

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IDENTIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS ATRAVÉS DO
PROCESSAMENTO MORFOLÓGICO DA ÍRIS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

JOAQUIM DE MIRA JÚNIOR

Florianópolis, abril de 2003.

IDENTIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO MORFOLÓGICO DA ÍRIS

Joaquim de Mira Júnior

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento Digital de Imagem, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



Joceli Mayer, Ph. D.
Orientador

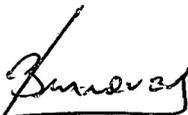


Edson Roberto De Pieri, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

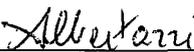
Banca Examinadora:



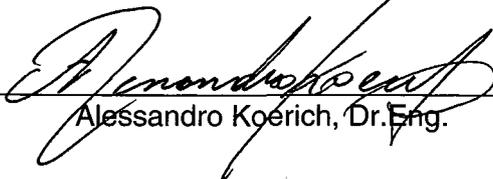
Joceli Mayer, Ph. D.
Presidente



Jefferson Luiz Brum Marques, Ph. D.



Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng.



Alessandro Koerich, Dr.Eng.

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

(Victor Hugo)

À minha esposa Tônia e meu filho
Lucas pelo incentivo, compreensão,
apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, meu fiel amigo e companheiro de todas as horas;
- Aos meus pais, Arady e Joaquim, pela educação e estudo que me proporcionaram, além do apoio e incentivo;
- A Lúcia, uma amiga como poucos, pela sua generosidade, apoio e incentivo;
- Ao meu orientador Prof. Joceli, pelo apoio, incentivo, contribuições dispensadas no decorrer da elaboração deste trabalho e pela confiança em mim depositada;
- Ao LPDS – Laboratório de Pesquisas em Processamento Digital de Sinais, pelo apoio e acolhida;
- Ao Labmetro, na pessoa do amigo Cesare, por disponibilizarem acesso ao banco de imagens de íris;
- À Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEEL, os quais oportunizaram o acesso ao qualificado programa de desenvolvimento acadêmico e profissional;
- Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR, Unidade de Ponta Grossa, pelo apoio e incentivo;
- A todos os amigos que ganhei ao longo desta jornada;
- A todos aqueles que lutam pela garantia do ensino público, gratuito e de qualidade.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

IDENTIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO MORFOLÓGICO DA ÍRIS

Joaquim de Mira Júnior

Abril/2003

Orientador: Joceli Mayer, Ph. D.

Área de Concentração: Processamento Digital de Imagem.

Palavras-chave: identificação de indivíduos, biométricos, reconhecimento de íris, operadores morfológicos.

Número de Páginas: 117.

Este trabalho apresenta uma nova abordagem, baseada em operadores morfológicos, para a identificação de indivíduos através da segmentação e análise da íris. Algoritmos baseados em operadores morfológicos foram desenvolvidos para segmentar a região da íris na imagem do olho e também para realçar determinados padrões da íris. As características extraídas foram usadas para representar e caracterizar singularmente a íris. A fim de extrair os padrões desejados corretamente, foi proposto um algoritmo que gera esqueletos com caminho único entre *end-points* e *nós* (que são a base da representação). Esta nova representação, obtida através dos operadores morfológicos propostos é armazenada para propósitos de identificação. Para avaliação da abordagem morfológica e dos algoritmos foram realizadas simulações computacionais com diversas imagens de íris diferentes. Resultados foram apresentados para ilustrar a eficiência do sistema de identificação. Os resultados obtidos mostraram a eficiência e adequação da abordagem morfológica e da representação adotada, apresentando baixa complexidade computacional (tempo de processamento) e baixas exigências de armazenamento para a representação dos dados dos padrões extraídos.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

IDENTIFICATION OF INDIVIDUALS BY MORPHOLOGICAL PROCESSING OF THE IRIS

Joaquim de Mira Júnior

April/2003

Advisor: Joceli Mayer, Ph. D.

Area of Concentration: Digital Image Processing.

Keywords: identification of individuals, biometrics, iris recognition, morphological operators.

Number of Pages: 117.

This work presents a new approach based on morphological operators for identification of individuals by segmentation and analysis of the iris. Algorithms, based on morphological operators, are developed to segment the iris region from the eye image and also to highlight chosen iris patterns. The extracted features are used to represent and uniquely characterize the iris. In order to properly extract the desired patterns, an algorithm is proposed to produce skeletons with unique paths among *end-points* and *nodes*. This new representation, obtained by the proposed morphological operators is stored for identification purposes. The morphological algorithms are evaluated by performing computational simulations with several different iris images. Results are presented to illustrate the efficiency of the identification system. The obtained results validate the morphological approach and the adopted representation. The proposed algorithms present low computational complexity (processing time) and low storage requirements for the data representation of the extracted patterns.

SUMÁRIO

Aprovação	i
Resumo	v
Abstract	vi
Sumário	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv

CAPÍTULO 1 – IDENTIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS: A CRESCENTE BUSCA POR MÉTODOS MAIS SEGUROS 1

1.1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA PESQUISADO	1
1.2 - OBJETIVOS	4
1.2.1 - Objetivo Geral	4
1.2.2 - Objetivos Específicos.....	4
1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO	4

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA..... 6

2.1 - VERIFICAÇÃO X IDENTIFICAÇÃO	6
2.2 - MERCADO DE BIOMÉTRICOS	7
2.3 - METODOLOGIAS	9
2.3.1 - Verificação de Impressão Digital.....	10
2.3.2 - Reconhecimento Facial.....	11
2.3.3 - Geometria da Mão	12
2.3.4 - Verificação da Retina.....	12
2.3.5 - Reconhecimento de Íris	13
2.3.5.1 - Tecnologia	14
2.3.5.2 - Aplicações.....	16
2.3.5.3 - Produtos e sistemas	19
2.4 - PANORAMA NACIONAL.....	19
2.5 - COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS BIOMÉTRICAS.....	20
2.6 - IDENTIFICANDO A JOVEM MISTERIOSA.....	22

CAPÍTULO 4 – PROCESSAMENTO DA ÍRIS	64
4.1 - RECONHECIMENTO AUTOMATIZADO DE ÍRIS.....	64
4.2 - DESCRIÇÃO DOS OPERADORES	68
4.2.1 - Threshold.....	69
4.2.2 - Opening	69
4.2.3 - Area Opening	69
4.2.4 - Closing.....	69
4.2.5 - Close-by-reconstruction Top-Hat.....	70
4.2.6 - Thinning.....	70
4.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO.....	70
4.4 - PROCESSAMENTO MORFOLÓGICO	73
4.5 - NORMALIZAÇÃO.....	78
4.5.1 - Reconstrução da Imagem.....	78
4.5.2 - Alinhamento.....	79
4.6 - DESENVOLVIMENTO DE OPERADORES.....	80
4.7 - REPRESENTAÇÃO	86
4.8 - CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO	89
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	91
5.1 - BANCO DE DADOS.....	91
5.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	92
5.2.1 - Fase Preliminar de Testes.....	94
5.2.2 - Primeira Fase de Testes.....	95
5.2.3 - Segunda Fase de Testes.....	98
5.2.4 - Fase Intermediária de Testes	100
5.2.5 - Terceira Fase de Testes.....	102
5.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	104
5.4 - CUSTO COMPUTACIONAL.....	106
5.5 - CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO	107
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6.1 - REFERENTES AOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	109

6.2 - REFERENTE AO OBJETIVO GERAL.....	110
6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
ANEXO	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Projeção de rendimentos	9
Figura 2.2 - Divisão do mercado (tecnologias de captura).....	9
Figura 2.3 - Reconhecimento de impressão digital	10
Figura 2.4 - Reconhecimento facial.....	12
Figura 2.5 - Sharbat Gula – a mulher misteriosa.....	22
Figura 3.1 - Anatomia do olho humano	24
Figura 3.2 - Anatomia da íris humana	26
Figura 3.3 - Histogramas correspondendo aos quatro tipos básicos de imagem.....	28
Figura 3.4 - Uma função de transformação de nível de cinza	29
Figura 3.5 - Exemplo: (a) imagem original, (b) imagem submetida à equalização de histograma e (c, d) seus respectivos histogramas	30
Figura 3.6 - Histograma em níveis de cinza de uma imagem composta de objeto claro com um fundo escuro, que pode ser separado por um limiar único	31
Figura 3.7 - Vizinhança de um pixel p	32
Figura 3.8 - (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	35
Figura 3.9 - Formato dos <i>elementos estruturantes</i> com raio igual a 2 pixels: (a) <i>SE cross</i> ; (b) <i>SE box</i> ; (c) <i>SE disk</i>	36
Figura 3.10 - <i>Dilatação</i> (imagem binária)	38
Figura 3.11 - <i>Dilatação</i> de F pelo deslizamento de K	38
Figura 3.12 - <i>Dilatação</i> (imagem em tons de cinza)	38
Figura 3.13 - <i>Erosão</i> (imagem binária).....	39
Figura 3.14 - <i>Erosão</i> de F pelo deslizamento de K	40
Figura 3.15 - <i>Erosão</i> (imagem em tons de cinza)	40
Figura 3.16 - <i>Abertura</i> (imagem binária)	41
Figura 3.17 - <i>Abertura</i> de F por K	42

Figura 3.18 - <i>Abertura</i> (imagem em tons de cinza)	43
Figura 3.19 - <i>Fechamento</i> (imagem binária)	43
Figura 3.20 - <i>Fechamento</i> de F por K	45
Figura 3.21 - <i>Fechamento</i> (imagem em tons de cinza)	45
Figura 3.22 - Exemplo de tipo estendido de <i>SE</i> usado na operação de <i>hit-or-miss</i>	46
Figura 3.23 - Os quatro <i>SEs</i> usados para encontrar cantos usando a operação <i>hit-or-miss</i>	47
Figura 3.24 - Localização dos cantos através da operação <i>hit-or-miss</i>	47
Figura 3.25 - <i>SEs</i> usados para localizar características binárias através da operação <i>hit-or-miss</i>	48
Figura 3.26 - <i>Equeletização</i> através do operador <i>afinamento</i>	49
Figura 3.27 - Exemplo de <i>gradientes</i> de uma imagem binária.....	51
Figura 3.28 - <i>Gradiente</i> (imagem em tons de cinza).....	51
Figura 3.29 - <i>Abertura top-hat</i> (imagem binária)	52
Figura 3.30 - Exemplo da <i>abertura top-hat</i> para uma imagem em tons de cinza	53
Figura 3.31 - <i>Reconstrução</i> (imagem binária)	55
Figura 3.32 - <i>Componente conectado</i> (abordagem convencional).....	56
Figura 3.33 - Trajetória de movimento $\mathbf{x}(t)$ e o vetor de deslocamento $\mathbf{d}_{t,\tau}(\mathbf{x})$ associado	60
Figura 3.34 - Regiões de movimento	61
Figura 3.35 - Exemplos de campos de vetores: (a) modelo <i>translacional</i> , (b) modelo <i>affine</i>	62
Figura 4.1 - Alinhamento das imagens da íris.....	66
Figura 4.2 - Diagrama do sistema de reconhecimento de íris.....	67
Figura 4.3 - Representação proposta.....	68
Figura 4.4 - Realçamento e melhoria de contraste da imagem.....	71
Figura 4.5 - Fronteiras da íris.....	73
Figura 4.6 - Imagem da <i>ROI</i> (íris) após segmentação	73
Figura 4.7 - <i>Close-by-reconstruction Top-hat</i>	74

Figura 4.8 - <i>Opening</i>	75
Figura 4.9 - <i>Area Opening</i>	76
Figura 4.10 - <i>Threshold</i>	76
Figura 4.11 - <i>Thinning</i>	77
Figura 4.12 - Imagem reconstruída contendo as pseudo-estruturas.....	79
Figura 4.13 - No detalhe: <i>pixels redundantes</i> (preto), <i>end-points</i> (■) e <i>nós</i> (□)	81
Figura 4.14 - Caminhos (<i>paths</i>).....	81
Figura 4.15 - Estrutura de um padrão	82
Figura 4.16 - (a) Vizinhos diagonais e (b) 8-vizinhos, do pixel <i>p</i>	82
Figura 4.17 - Os <i>SEs</i> utilizados para eliminação de <i>pixels</i> <i>redundantes</i>	83
Figura 4.18 - Seqüência de verificação, 1 ^o e 2 ^o passos	85
Figura 4.19 - Seqüência de verificação, 3 ^o e 4 ^o passos	85
Figura 4.20 - Seqüência de verificação, 5 ^o e 6 ^o passos	86
Figura 4.21 - Seqüência de verificação, 7 ^o e 8 ^o passos	86
Figura 4.22 - Estrutura após eliminação dos pixels redundantes, sem quebras de conexão.....	87
Figura 4.23 - Identificação dos <i>end-points</i> (■) e dos <i>nós</i> (□)	88
Figura 4.24 - Comparação entre duas íris distintas.....	90
Figura 5.1 - Algumas imagens de íris selecionadas.....	93
Figura 5.2 - Comparação da representação da íris (fase preliminar)	96
Figura 5.3 - Diagrama - metodologia.....	97
Figura 5.4 - Diagrama da primeira fase de testes	98
Figura 5.5 - Comparação da representação da íris (1 ^a fase)	99
Figura 5.6 - Diagrama da segunda fase de testes	100
Figura 5.7 - Comparação da representação da íris (2 ^a fase)	101
Figura 5.8 - Comparação da representação da íris (fase intermediária)	102
Figura 5.9 - Diagrama da terceira fase de testes	103
Figura 5.10 - Comparação da representação da íris (3 ^a fase)	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais tecnologias biométricas	7
Tabela 2.2 - Comparação de identificação biométrica	21
Tabela 2.3 - Comparação de identificação biométrica - Precisão	21
Tabela 3.1 - Modelos de movimento	62
Tabela 5.1 - Resultados dos experimentos (μ =média / σ =desvio padrão)	105

CAPÍTULO 1 – IDENTIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS: A CRESCENTE BUSCA POR MÉTODOS MAIS SEGUROS

1.1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA PESQUISADO

Na última década a busca incessante por segurança tem ocupado um lugar de destaque em nossa sociedade. Notícias sobre fraudes de cartões de crédito, carteiras de habilitação, cédulas de identidade, cadastro de pessoa física (CPF), passaportes, ou seja, documentos de identificação de uso pessoal em geral, são cada vez mais comuns. Um exemplo clássico é o da clonagem de cartões de crédito, que acontece em todo o mundo. O prejuízo das administradoras de cartões de crédito é tamanho, que muitas delas já estão buscando novas tecnologias para compor seus sistemas de segurança.

Muitas pessoas usam no seu dia a dia senhas ou números de identificação pessoal (PIN) para ter acesso a computadores pessoais, redes de computadores, Internet, contas bancárias, bancos 24 horas, locais de acesso restrito, etc. No entanto, as senhas e PINs podem ser perdidos ou roubados. Os PINs foram um dos primeiros identificadores a oferecer reconhecimento automático. Porém, deve se entender que isto significa o reconhecimento do PIN e não necessariamente o reconhecimento da pessoa que o forneceu. O mesmo se aplica aos cartões em geral. Usando os dois em conjunto se obtém um nível de segurança um pouco maior, mas isto ainda pode ser facilmente comprometido se alguém está determinado a fazê-lo.

Na tentativa de solucionar estes problemas, sistemas de identificação mais seguros e precisos estão sendo desenvolvidos. Estes sistemas são baseados em meios de identificação que não se pode roubar ou copiar: seu próprio corpo. 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 [1]. Neste contexto, *Biométricos* são mais bem definidos como características fisiológicas e/ou comportamentais mensuráveis que podem ser utilizadas para verificar a identidade de um indivíduo [1]. Dentre as técnicas de avaliação *biométrica*, as mais comuns

utilizam impressão digital, varredura (scanning) de retina e íris, geometria de mão, padrão de voz e reconhecimento facial. As impressões digitais dos indivíduos são únicas, assim como a voz, a face, e até mesmo a íris dos olhos [1]. Sendo assim, todas estas partes únicas do corpo humano podem funcionar como chaves para sistemas de segurança. A partir do momento que estas características únicas são capturadas e digitalizadas obtêm-se muitos códigos individuais de segurança pessoal. Tais características têm aplicabilidade em qualquer área onde há a necessidade de verificar a identidade de um indivíduo.

O método de identificação baseado em biométricos é preferido aos métodos tradicionais envolvendo senhas e PINs por várias razões, como por exemplo: o indivíduo a ser identificado é obrigado a estar presente fisicamente no local de identificação, e a identificação baseada em técnicas biométricas evita a necessidade de lembrar uma senha ou carregar um documento de identificação.

Com o aumento do uso de computadores como veículos da tecnologia de informação, é necessário restringir o acesso a dados sigilosos ou pessoais. Pela substituição de PINs, as técnicas biométricas podem potencialmente prevenir o acesso não autorizado ou fraudulento à caixas eletrônicas, bancos 24 horas, celulares, telefones, smart cards, computadores pessoais, estações de trabalho, redes de computadores, Internet, etc., sem mencionar as diversas aplicações que envolvem acesso físico. PINs e senhas podem ser esquecidos, e documentos baseados em métodos de identificação tradicionais como cédulas de identidade, passaportes e carteiras de habilitação (licenças de motorista) podem ser falsificados, roubados ou perdidos.

No entanto, isto não significa o desaparecimento dos PINs, das senhas e dos cartões. Os biométricos não vão substituí-los, mas deverão ser usados como complementos. Principalmente no que diz respeito aos cartões, que deverão integrar várias funções, como por exemplo, os smart cards que estão sendo mundialmente testados. Este tipo de cartão é dotado de um micro-chip capaz de processar e armazenar dados. Para evitar fraudes, o micro-chip conterá dados biométricos do seu proprietário, que deverão ser comparados ao do portador quando utilizado.

Em se tratando de biométricos, um dos mais promissores, e que vem ocupando um lugar de destaque, é a íris. Segundo estudos, a íris encontra-se

formada nos primeiros meses de idade, mantendo-se inalterada por toda vida, exceto por motivos de enfermidade ou acidente que causem algum tipo de dano a sua estrutura [2]. Por tratar-se de um organismo externamente visível, a íris permite que sua avaliação seja feita de forma não-intrusiva, característica que a torna ainda mais atraente, do ponto de vista biométrico.

Devido à diversidade de estruturas existentes na íris, a quantidade de padrões que podem ser obtidos para diferenciá-la de outra íris é consideravelmente grande. Em termos de precisão, o reconhecimento de íris é considerado o mais preciso entre as diversas tecnologias biométricas. O grau de precisão é tamanho, que permitiria comparar duas íris em um banco de dados contendo toda população mundial, com uma margem de erro desprezível.

Nos últimos anos, sistemas de reconhecimento baseados na íris, vem apresentando um crescimento considerável a nível de mercado mundial de biométricos, impulsionado, por um lado pelos avanços desta tecnologia, e por outro pela queda dos preços, motivada pela difusão da tecnologia e pela diversidade de aplicações que fazem uso da mesma. A gama de aplicações vai desde um simples sistema para autenticar usuários para acesso a computadores (ou estações de trabalho) pessoais (ou em rede), até sistemas usados para restringir o acesso físico a locais de alta segurança (cofres, laboratórios de pesquisas, instalações militares e nucleares, prisões, etc.), passando pelos sistemas de identificação de passageiros instalados em aeroportos.

Esta dissertação vem propor uma nova abordagem, no tocante ao processamento realizado nas diversas etapas do processo de reconhecimento automatizado de íris, como: localização da íris, extração de suas características e comparação de padrões, entre outras. A abordagem proposta baseia-se na *Morfologia Matemática*, que estuda a estrutura geométrica dos elementos que constituem uma imagem [3, 4]. Devido a este fato, a *Morfologia Matemática* e seus operadores apresentam um grande potencial de uso como ferramenta para o processamento e análise das imagens das íris, que possuem uma riqueza de estruturas dispostas ao longo de toda sua extensão.

Desta forma a presente dissertação tem como objetivos:

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo Geral

Estudo da viabilidade da abordagem proposta, fundamentada na *Morfologia Matemática*, para o reconhecimento de indivíduos através do processamento morfológico da íris. Para tanto, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

1.2.2 - Objetivos Específicos

- Desenvolver uma metodologia, baseada em operadores morfológicos, para:
 - localizar a íris na imagem adquirida, pois esta é composta pelo olho e região a sua volta;
 - evidenciar, identificar e extrair padrões existentes na íris;
- Estabelecer uma representação que caracterize os padrões da íris e seja compatível em termos de *distinguibilidade* e quantidade de informações a ser armazenada;
- Comparar padrões de íris de diversos indivíduos, provenientes de uma base de dados (composta por imagens adquiridas em diversas ocasiões), com base na representação adotada, para avaliar a eficiência da abordagem morfológica proposta.

1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta alguns conceitos básicos, definições e terminologia relacionadas à *Biometria*. Uma breve descrição das principais metodologias, baseadas em processamento de imagem, utilizadas para identificação de indivíduos é apresentada, bem como uma descrição um pouco mais detalhada do processo de reconhecimento de íris. Outros dados, de caráter informativo, sobre o mercado mundial de biométricos, o panorama nacional e um comparativo entre as tecnologias, também são mencionados.

O capítulo 3 traz os fundamentos da teoria utilizada nesta dissertação, 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 capítulo 4 trata do processamento da íris, descrevendo em detalhes todos os operadores utilizados nas etapas do processamento. Inicialmente é apresentada uma descrição do sistema de reconhecimento automatizado de íris. A seguir são descritos operadores e algoritmos desenvolvidos com finalidades diversas, tais como: localizar a íris, identificar e extrair padrões, compensar movimento e comparar padrões (com base na representação). Também são apresentados detalhes do algoritmo do operador desenvolvido para eliminar *pixels redundantes*, bem como, da representação proposta.

O capítulo 5 apresenta inicialmente algumas características do banco de dados utilizado para as simulações. Em seguida, uma descrição das etapas de testes realizadas e os resultados obtidos nas diversas séries de experimentos. A seguir é feita a análise dos resultados e apresentada uma série de comentários a respeito do desempenho dos algoritmos, das informações armazenadas no banco de dados e da representação.

Finalizando, o capítulo 6 traz as conclusões do presente trabalho, assim como, sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - VERIFICAÇÃO X IDENTIFICAÇÃO

Um sistema biométrico é essencialmente um sistema de reconhecimento de padrões, que faz uma identificação pessoal, determinando a autenticidade de uma característica fisiológica ou comportamental específica pertencente ao usuário. Dependendo do contexto, um sistema biométrico pode ser tanto um sistema de verificação (autenticação) como um sistema de identificação.

Em se tratando de 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 uma comparação de “um para um” (1:1) baseada na informação de entrada fornecida pelo usuário. Na *identificação*, uma amostra é tirada do usuário e o dispositivo realiza uma busca em seu banco de dados para encontrar uma compatível. A *verificação* (Eu sou quem eu declaro ser?) envolve confirmar ou negar a identidade declarada de um indivíduo, enquanto a *identificação* (Quem sou eu?) 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 são sinônimos.

Os precursores do uso de *biométricos* voltados para sistemas de segurança foram os militares, instituições penais, agências governamentais, tendo também sua participação em alguns filmes de Hollywood. Estes sistemas começaram a ser empregados em aplicações de alta segurança, onde o acesso era rigorosamente controlado, como por exemplo, em instalações militares e nucleares, em prisões de segurança máxima, etc. Devido à desinformação 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 representa 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 processos.

2.2 - MERCADO DE BIOMÉTRICOS

Em setembro de 2002, o IBG (International Biometric Group) divulgou o Relatório do Mercado de Biométricos 2003-2007 (298 páginas e 85 figuras e quadros), uma análise abrangente, extensa e autorizada da indústria de tecnologias biométricas, aplicações e mercados globais [4]. O Relatório fornece dados críticos do mercado pós-atentados de 11 de setembro de 2001, além de uma orientação do mundo-real para desenvolvedores de tecnologia biométrica, fomentadores, investidores e pesquisadores. Diferentemente do relatório de outras indústrias, o Relatório do Mercado de Biométricos 2003-2007 é pesquisado e assinado por peritos em tecnologia biométrica com anos de experiência desenvolvendo e testando os principais sistemas biométricos.

Destaques incluem projeções de renda anuais de 2002 a 2007 para as nove principais tecnologias biométricas, as sete principais aplicações biométricas e os cinco principais setores do mercado que adotam biométricos (Tabela 2.1). Cada segmento de mercado é caracterizado por uma análise detalhada dos condutores de crescimento e inibidores, os principais vendedores e tecnologias, e tendências até 2007.

Tabela 2.1 - Principais tecnologias biométricas.

Tecnologias	Aplicações	Setores do Mercado
Impressão Digital	Identificação Civil	Setor do governo
Reconhecimento Facial	Vigilância, Segurança e Proteção	Viagem e transporte
Reconhecimento de Íris	Acesso a computadores e redes	Setor financeiro
Middleware	Varejo / Caixa eletrônico / Ponto de venda	Saúde
AFIS	E-commerce / telefonia	Segurança Pública
Reconhecimento de Voz	Acesso físico / Frequência-tempo	
Geometria da Mão	Identidade criminal	
Verificação de Assinatura		
Dinâmica de Digitação		

Fonte: International Biometric Group, setembro de 2002.

O Relatório é leitura essencial para instituições que desenvolvem tecnologia biométrica, investidores em companhias de biométricos, ou desenvolvedores de soluções biométricas. Alguns dos principais destaques do Relatório são:

- O rendimento da indústria global em 2002 de US\$ 601 milhões deve alcançar US\$ 4,04 bilhões antes das 2007, conduzido por amplos desenvolvimentos de biométricos no setor público, o aparecimento de modelos de rendimento transacional e a adoção de infra-estruturas biométricas e formatos de dados padronizados – Figura 2.1;
- Tecnologias baseadas em impressão digital, incluindo ambos escaneamento-de-dedo e AFIS (Automated Fingerprint Identification System), tinham projeção para responder por US\$ 467 milhões dos rendimentos da indústria em 2002, de longe a maior tecnologia do segmento. Este crescimento é atribuído à extensa gama de aplicações na qual as soluções baseadas em impressão digital operam efetivamente;
- Entre as tecnologias biométricas emergentes, o reconhecimento facial e middleware deverão alcançar US\$ 200 milhões e US\$ 215 milhões, respectivamente, em rendimentos anuais em 2005. O reconhecimento de íris deverá alcançar US\$ 210 milhões em rendimento anual em 2007;
- Identificação civil e acesso a computadores/redes serão as principais aplicações biométricas durante os próximos cinco anos, respondendo juntas por quase US\$ 2 bilhões em rendimentos anuais em 2007. Acesso físico/frequência-tempo alcançarão US\$ 245 milhões em rendimentos anuais antes de 2004, com aplicações de vigilância, segurança e proteção devendo alcançar US\$ 49 milhões em rendimento anual em 2004;
- O principal setor do mercado de usuários de biométricos será o do governo, que deverá responder até 2007 com US\$ 1,2 bilhões em rendimentos anuais. O setor financeiro e de viagem/transporte seguem com US\$ 672 milhões e US\$ 556 milhões, respectivamente, em 2007. Os vários cenários nos quais agências do governo têm que identificar e autenticar ambos cidadãos e funcionários, particularmente depois de 11 de setembro, é um fator crítico de crescimento.

O IBG é o principal consultor da indústria de biométricos e das empresas de tecnologia e serviços. O IBG também fornece serviços e soluções biométricas para

instituições financeiras, agências do governo, integradores de sistemas, e empresas de alta tecnologia.

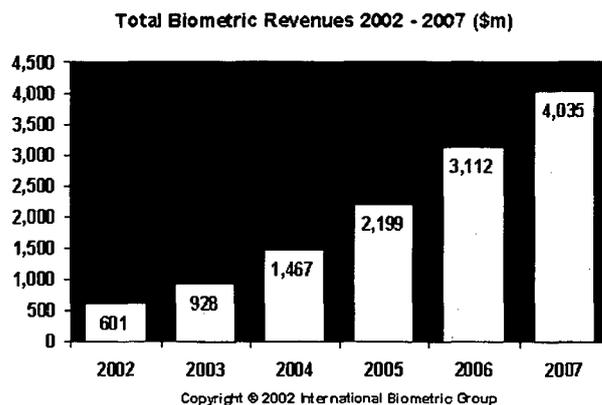


Figura 2.1 – Projeção de rendimentos.

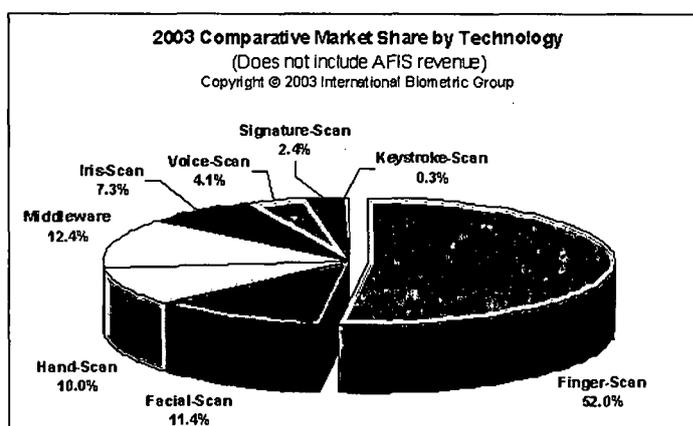


Figura 2.2 – Divisão do mercado (tecnologias de captura).

2.3 - METODOLOGIAS

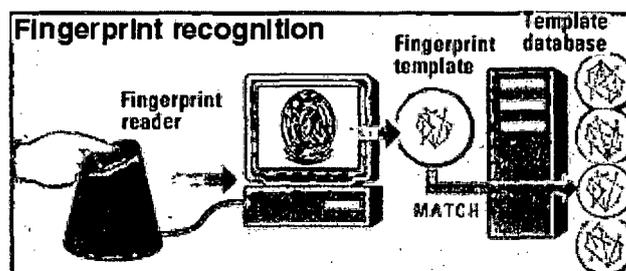
Entre as aplicações mais comuns hoje, a nível mundial, estão: sistemas de acesso a prisões, licenças de motoristas, sistemas de pagamento de benefícios, controles de fronteiras e aeroportos, sistemas de votação, sistemas de acesso a estações de trabalho e redes de computadores, além de numerosas aplicações em minas de ouro e diamante, depósitos de ouro em barra e cofres de bancos, como também as aplicações de controle de acesso físico mais comuns em empresas e indústrias.

As metodologias mais populares, atualmente usadas em sistemas biométricos, baseadas no processamento de imagens são:

2.3.1 - Verificação de Impressão Digital

Dentre as várias metodologias que usam biométricos, talvez a mais difundida seja a verificação da impressão digital. Para alguns, os sistemas baseados em impressões digitais são razoavelmente fáceis de usar e contam com anos de experiência dos sistemas de impressão digital já automatizados usados por órgãos e agências governamentais.

Atualmente, há disponível uma maior variedade de dispositivos que operam com impressões digitais que de qualquer outro biométrico. Tais dispositivos tem uma boa precisão (poucos casos de falsa aceitação), mas podem estar sujeitos a erros de uso devido à imperícia de alguns usuários (muitos casos de falsa rejeição), como no caso de grandes bases de usuários. Também deve ser considerada a interface transdutor/usuário e como esta seria afetada pelo uso em larga escala em uma variedade de ambientes. A Figura 2.3 ilustra um sistema de reconhecimento de impressão digital.



Fonte: PC Magazine, fevereiro de 1999.

Figura 2.3 - Reconhecimento de impressão digital.

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* [5]. 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 softwares conhecidos por *AFIS* (*Automated Fingerprint Identification Systems*) [5], 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.

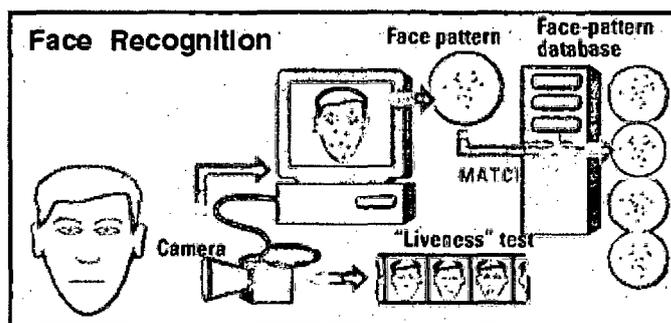
2.3.2 - Reconhecimento Facial

Uma técnica que atraiu considerável interesse e cujas capacidades tem sido freqüentemente mal entendidas. Alegações extravagantes foram feitas para dispositivos de reconhecimento faciais que foram difíceis se não impossíveis de concretizar na prática. Uma coisa é comparar duas imagens estáticas (o que alguns sistemas na verdade fazem - não de fato biométricos somente), outra é descobrir e verificar a identidade de um indivíduo dentro de um grupo (como alguns sistemas alegam fazer) [1].

Os dois maiores desafios do reconhecimento facial são: encontrar a região que corresponde a face na imagem e depois obter suas características, para gerar um modelo que possibilite seu armazenamento e comparação.

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 imagem da face é registrada, então digitalizada e 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 de: padronizar o brilho e o contraste da imagem, localizar a cabeça e olhos, girar e ajustar a imagem para uma distância fixa a "nível dos olhos" da perspectiva da câmera, e, finalmente, gerar uma representação vetorial da imagem, para ser usada no processo de comparação. Sistemas com duas câmeras, que levam uma visão "estéreo" da face, estão sendo usados para determinar que esta não é uma foto, mas uma face real. Até mesmo usando uma máscara perfeita, não se poderia mudar a distância entre os olhos. A Figura 2.4 ilustra um sistema de reconhecimento facial.

Sistemas que operam com o mapeamento térmico da face também estão sendo utilizados.



Fonte: PC Magazine, fevereiro de 1999.
 Figura 2.4 - Reconhecimento facial.

2.3.3 - Geometria da Mão

Como o próprio nome sugere, ela se baseia na medição de características físicas da mão e dedos do usuário, de uma perspectiva tridimensional no caso do principal produto. Oferece um bom equilíbrio das características de desempenho e é relativamente fácil de usar [1]. Nas Olimpíadas de Atlanta em 1996, os 40.000 portadores de crachás eletrônicos eram identificados pela geometria da mão. Sua utilização pode ser satisfatória onde há uma grande base de usuários ou onde os usuários acessam o sistema com menos frequência e podem estar então menos disciplinados na utilização do mesmo. Sua precisão pode ser muito alta se desejado, o desempenho é ajustável e a configuração é flexível, podendo acomodar uma extensa faixa de aplicações. Leitores de geometria da mão são de fácil integração a outros sistemas e processos.

2.3.4 - Verificação da Retina

Uma tecnologia onde padrões únicos da retina são "escaneados" por uma fonte de luz de baixa intensidade através de um acoplador óptico. O processo de identificação através do reconhecimento de retina se baseia nos padrões dos seus vasos sanguíneos. Este processo demonstrou ser bastante preciso em uso, mas exige que o usuário olhe em um receptáculo e foque em um determinado ponto. Isto não é particularmente conveniente se o usuário tem preocupações sobre contato íntimo com o dispositivo de leitura. Dispositivos atuais ficam a cerca de 1,5 centímetros da córnea, o que causa um certo desconforto e apreensão nos usuários,

que relutam em expor um órgão sensível como o olho humano. Por estas razões a varredura da retina tem alguns problemas de aceitação por parte do usuário embora a tecnologia em si trabalhe bem. Apesar de pouco utilizadas, as técnicas de identificação baseadas na retina podem ser empregadas em sistemas onde seja de grande relevância a precisão da identificação.

2.3.5 - Reconhecimento de Íris

Alguns sistemas usam a íris do olho para criar uma "impressão ocular". Duas íris não são as mesmas, nem mesmo as de gêmeos idênticos. Assim o olho, com sua impressão única, torna-se um tipo de código de segurança natural. Dentre as vantagens apontadas pelos fomentadores dessa tecnologia, destacam-se: o fato de não requerer nenhum contato efetivo entre o usuário e o dispositivo de leitura, o processo de identificação ser rápido e possibilitar uma alta precisão para identificar pessoas. A íris humana tem aproximadamente dez vezes mais características diferenciadoras, se comparadas a uma impressão digital [6].

A íris está externamente visível e completamente formada a partir dos seis meses 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 "escaneamento" estão bastante avançados para rejeitar uma fotografia ou até mesmo um olho de vidro. Os "scanners" de íris capturam uma foto de alta resolução da íris de uma pessoa, digitalizando a imagem, e armazenam as informações em um banco de dados de um servidor. 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 freqüentemente requer o uso de raios infravermelho ou luz de alta intensidade para conseguir uma leitura precisa. Estudos científicos mostram que a retina pode mudar com a idade, enquanto que uma íris permanece inalterada.

Segundo a IrisScan Inc. [7], uma das principais empresas que utiliza tecnologia baseada na íris, a probabilidade de duas íris produzir exatamente o

mesmo código é 1 em 10^{78} . O arquivo armazenado (código da íris - IrisCode) tem apenas 512 bytes com uma resolução de 640x480, permitindo o armazenamento de grande volume de informação em um disco rígido de um computador. O número de variáveis independentes (grau 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.

De acordo com pesquisadores britânicos, o reconhecimento de íris é a melhor das tecnologias biométricas de identificação. A tecnologia bateu seis outros sistemas biométricos, incluindo reconhecimento facial, impressão digital e reconhecimento de voz, em um estudo conduzido pelo Laboratório Nacional de Física (UK National Physical Laboratory - NPL) em nome do Grupo de Segurança em Comunicações Eletrônicas [8]. A pesquisa foi realizada entre maio e dezembro de 2000. Segundo a mesma, a tecnologia de reconhecimento de íris registrou uma taxa de falsa aceitação de zero em mais de 2.7 milhões de comparações. Também teve uma taxa de falsa rejeição de só 1,8 %, com nenhum usuário recebendo uma falsa rejeição depois de três tentativas. Esta foi a mais baixa taxa de falsa de rejeição dos sistemas testados, com quatro dos outros testados, incluindo reconhecimento facial, registrando de 10 a 25 % de taxa de falsa rejeição. O objetivo do estudo foi realizar uma avaliação independente e objetiva, comparando todas as tecnologias biométricas viáveis. O estudo revelou ainda que o reconhecimento de íris superou todos os outros biométricos nos aspectos que mais importam para negócios, isto é, precisão, velocidade e confiabilidade.

2.3.5.1 - Tecnologia

O reconhecimento de íris extrai as características da íris humana para fornecer uma tecnologia de identificação muito precisa. Esta precisão permite, em muitos sentidos, se destacar de outras tecnologias biométricas. Uma grande parte dos sistemas que operam com a tecnologia de reconhecimento de íris está baseada nas pesquisas e patentes detidas pelo Dr. John Daugman¹ [9].

¹ Professor e pesquisador do Laboratório de Computação da Universidade de Cambridge – Inglaterra. Também é fundador e membro do conselho da Iridian Technologies, uma companhia criada para explorar os algoritmos de reconhecimento de íris.

O reconhecimento de íris está baseado nas qualidades visíveis (via iluminação normal ou infravermelho) da íris. As primeiras características visíveis são as *trabéculas* (completamente formadas a partir do oitavo mês de gestação), um tecido que dá a aparência de dividir a íris em uma forma radial. Outras características visíveis incluem *collerette*, *sulcos*, *criptas*, e a *liséré*, para citar apenas as mais familiares [10]. A tecnologia de reconhecimento de íris proposta por . Daugman converte estas características visíveis em um código de 512 bytes (IrisCode) [9], que é um modelo armazenado para tentativas de verificação futuras. 512 bytes é um tamanho bastante compacto para um modelo biométrico, mas a quantidade de informação derivada da íris é volumosa. Da íris de 11mm de diâmetro, os algoritmos de Daugman fornecem 3,4 bits de dados por mm^2 . Esta densidade de informação é tal que pode ser dito que cada íris tem 266 "marcas" distintas, ao invés de 13-60 para tecnologias biométricas tradicionais. Esta medida 266 é citada em toda literatura de reconhecimento de íris. Depois de permitir funções correlativas nos algoritmos e considerar as características inerentes à maioria dos olhos humanos, conclui-se que podem ser extraídos mais de 240 graus-de-liberdade binária independentes com os algoritmos de Daugman - um número considerável para um biométrico.

A seguir, encontram-se descritas algumas abordagens propostas para sistemas de reconhecimento de íris. O sistema proposto por:

- Daugman [9, 11] 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 *wavelet bidimensional de Gabor*. Para medir a dissimilaridade entre as íris é computada a *distância de Hamming* entre o correspondente par de representações;
- Wildes [2] *et al.* utiliza 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 derivada do laplaciano do filtro Gaussiano, implementado na prática através da filtragem usando *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;

- Shinyoung [12] *et al.* utiliza *transformada wavelet de Haar* para obter o vetor de característica e dois mecanismos diretos para um método de aprendizagem competitivo como uma inicialização do vetor de peso e a seleção do vencedor;
- Li Ma [13] *et al.* utiliza um banco de *filtros de Gabor* para capturar características locais e globais da íris, para gerar um vetor de característica de comprimento fixo. A comparação das íris está baseada na *distância Euclidiana* entre os correspondentes vetores das duas íris;
- Tisse [14] *et al.* utiliza uma combinação de *decomposição pelo gradiente e transformada de Hough / operadores integro-diferenciais* para a localização da íris, e o conceito de *imagem analítica (transformada bidimensional de Hilbert)* para extrair informação de textura da íris;
- Boles [15] *et al.* utiliza o cruzamento-por-zero (*zero-crossing*) 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 [16] *et al.* utiliza uma abordagem semelhante a proposta por Boles.

2.3.5.2 - Aplicações

Sistemas de reconhecimento de íris vem sendo utilizados em diversos setores e em várias aplicações. A seguir estão relacionadas algumas:

- Controle de acesso a contas bancárias (caixas eletrônicos nas agências e banco 24 horas): o cliente precisa apenas aproximar-se do caixa eletrônico, seguir as instruções para olhar para a câmera e será reconhecido dentro de 2 a 4 segundos. Os benefícios de tal sistema são claros: os clientes que escolhem usar caixas equipados com sistemas de reconhecimento de íris terão uma transação mais rápida e segura;

- Rastreamento de prisioneiros (instalações de alta-segurança e alto-risco): qualquer transferência de prisão ou soltura é autorizada através da identificação biométrica (sistema em operação em penitenciárias – EUA). Os dispositivos também podem ser usados para registrar visitantes, diminuindo problemas de logística e pessoal. A precisão da tecnologia pode prevenir solturas ou transferências e identificar repetidas reentradas de criminosos na prisão sob uma identidade diferente.
- Autenticação de compras on-line: oferece um alto nível de segurança (íris) para um mecanismo de verificação bem aceito (assinatura digital). Qualquer documento ou transação on-line requer uma assinatura, tal como comércio eletrônico (e-commerce), requisições de compras, contratos, documentos legais, empréstimos e aplicações financeiras, etc., podem ser autenticados por meio de um biométrico extremamente preciso. A fácil aceitação a tais documentos ou comprovantes de transação, faria o comércio eletrônico, por exemplo, seguro para comprador e vendedor;
- Escritórios: controle de acesso a salas de armazenamento de documentos e dados, cofres, arquivos, salas de reuniões, etc;
- Laboratórios e fábricas: controle de acesso a salas de armazenamento de drogas e materiais perigosos, áreas restritas (projeto, desenvolvimento e pesquisa), etc;
- Instituições financeiras: controle de acesso a salas de caixas de depósito de valores, cofres, etc;
- Serviços essenciais: controle de acesso a salas de geradores de energia, escritórios de gerenciamento e controle de barragens, salas de controle de produção e distribuição de companhias petroquímicas (derivados de petróleo em geral), etc;
- Centros de controle de tráfego: controle de acesso a salas de controle de tráfego aéreo, centros administrativos e operacionais de auto-estradas, salas de despacho de ferrovias, etc;
- Aeroportos e portos: controle de pessoal autorizado, como por exemplo: funcionários, tripulações, agentes, policiais, militares, etc., em áreas restritas

(portões de embarque, imigração, aduana, centro administrativo, etc.), e no embarque/desembarque de passageiros, no controle de passaportes.

A seguir, estão relacionados algumas licenças, aplicações, usuários e marcas de produtos que utilizam os algoritmos de reconhecimento de íris desenvolvidos pelo Dr. Daugman [9]:

- Segurança de aeroportos / fronteiras
 - Aeroportos de Heathrow, Frankfurt, Charlotte (EyeTicket JetStream)
 - Aeroporto de Amsterdam (Schiphol Group, Joh. Enschede Privium)
 - Todos aeroportos internacionais canadenses (IBM Schiphol Group ABP)
 - Aeroportos JFK-New York e Dulles-Washington (EyeTicket JetStream)
- Controle de acesso físico / segurança de edifícios
 - Câmeras de reconhecimento de íris (Panasonic, Oki e LG)
 - Usinas nucleares (Union Electric / Calloway Nuclear)
 - Laboratório Nacional Brookhaven (EUA)
 - Gabinetes dos parlamentares do Congresso (EUA)
 - Gabinetes da vice-presidência e Departamento do Tesouro (EUA)
 - British Telecom.
 - 60.000 prisioneiros em penitenciárias nos estados da Flórida, Nova Iorque, Pensilvânia e New Hampshire (EUA)
 - Hospitais Bad Reichenhall (Alemanha) e Eagleville (EUA)
- Acesso a dados sigilosos / computadores e redes
 - Iridian (PrivateID, KnoWho)
 - Panasonic (Authenticam, Eye-Passport)
 - Siemens (Akita)
 - Computer Associates (e-Trust, e-True)
 - Netegrity (SiteMinder SSO)
 - Biometrix, Keyware, IO Software, SAFLink
- Bancos / caixas eletrônicos
 - NCR (Stella); Nationwide Building Society
 - Diebold (Bank United – Texas)

- Oki(IrisPass)
- Dresdner Bank, Brussels Bank e Takefuji Bank

2.3.5.3 - Produtos e sistemas

A seguir estão relacionados alguns dos produtos e sistemas encontrados no mercado e seus respectivos fabricantes. O custo depende do tipo da aplicação a que se destina, que vai desde um simples controle de acesso a redes de computadores a sistemas sofisticados que envolvem alta-segurança.

- IrisAccess 3000 (LG Electronics)
- BM-ET100 US (Panasonic)
- BM-ET500 Series (Panasonic)
- EyePass (Eye Ticket Corp.)
- PASS – Politec Authentication Security Suite (Polotec Inc.)
- IrisPass – WG (Oki Electric)

2.4 - PANORAMA NACIONAL

A procura por sistemas de segurança que usam o corpo como “chave de acesso” vem crescendo a nível mundial, seguindo uma tendência natural. Recentemente, os acontecimentos internacionais envolvendo ataques terroristas, como os ocorridos em 11 de setembro de 2001, nos EUA, fizeram com que este crescimento fosse ainda maior. Como não poderia ser diferente, o Brasil segue esta mesma tendência, e a biometria é uma realidade no contexto nacional.

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 fotos. São comparadas características faciais como: distância entre os ossos temporais e laterais, arco dos olhos, testa, nariz, boca e os ângulos do rosto. Caso a comparação resulte em semelhança com criminosos, o suspeito é interceptado e detido até a comprovação da sua identidade [17].

As perspectivas do mercado de identificação biométrica no país vêm aumentando, alavancadas também pela queda no custo dos sistemas. Um sensor de impressão digital custava em média US\$ 1.200, há cinco anos atrás. Atualmente, um equipamento que utiliza este tipo de biométrico, pode ser encontrado no mercado a partir de US\$ 50.

No Brasil, aproximadamente 90% 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. Há pouco mais de dois anos, a Universidade Estadual do Amazonas (UEA) utiliza o sistema de impressão digital associado a um smart card, que armazena informações de cada indivíduo [17]. Os cartões são usados por alunos, professores e demais funcionários da universidade, principalmente para controle de frequência, acesso a locais e redes de computadores.

Em termos de confiabilidade os sistemas de reconhecimento de íris só perdem para a identificação através do DNA. Os preços destes sistemas variam de acordo com o tipo de aplicação, custando aproximadamente US\$ 200 para uma aplicação de acesso a uma rede de computadores, podendo chegar a dezenas de milhares de dólares para aplicações mais sofisticadas, que envolvem alta-segurança. Em São Paulo, o sistema de identificação IrisAccess da LG Electronics, vem sendo usado por empresas, como a Telefônica (operadora de telefonia fixa e móvel), condomínios, como o Condomínio Múltiplo Tamboré, entre outros [17].

2.5 - COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS BIOMÉTRICAS

As tabelas a seguir mostram um comparativo entre os diversos biométricos. A Tabela 2.2 [18], de março de 1997, apresenta uma comparação em termos de custos, vantagens e desvantagens dos biométricos em questão, além de citar algumas aplicações possíveis. Na Tabela 2.3 [19], de setembro de 2001, a comparação está relacionada com a precisão, dada através da taxa de erro de identificação, e com o nível de segurança desejado.

Tabela 2.2 - Comparação de identificação biométrica.

Biométricos	Preço do nó-simples (hardware incluso)	Vantagens	Desvantagens	Exemplo de Indústrias Alvo
Reconhecimento Facial	US\$ 1.500	Fácil; rápido; um dos métodos mais baratos	Iluminação inadequada na imagem pode afetar autenticação	Geral
Impressão Digital	US\$ 1.200	Barato; muito seguro	Impressões ocultas, cortes e sujeira podem comprometer a imagem	Obrigação por lei, bancos de dados corporativos
Geometria da Mão	US\$ 2.150	Requisitos de armazenamento pequenos; operação intuitiva	Lento; menos preciso que a impressão digital	Fábricas / empresas
Íris / Retina	US\$ 5.000	Extremamente difícil de falhar	Intrusivo e inconveniente	Instalações nucleares, serviços médicos, instituições correccionais
Imagem Térmica da Face	US\$ 55.000*	Extremamente difícil de falhar	Necessita de câmeras infravermelho caras	Locais que requerem alta-segurança
Voz	US\$ 1.200	Barato; bom para acesso remoto	Lento; pode ser afetado pela condição física ou estado emocional	Acesso remoto a dados bancários e a banco de dados
Assinatura	US\$ 1.000	Barato	Pode ser afetado pela condição física ou estado emocional	Indústria
* Preço para instalação da tecnologia ao longo de um empreendimento; preço do nó-simples não disponível.				

Fonte: PC Week, março de 1997.

Tabela 2.3 - Comparação de identificação biométrica - Precisão.

Método	Padrão Codificado	Taxa de Erro de Identificação	Segurança
Reconhecimento de Íris	íris	1/1.200.000	Alta
Impressão Digital	impressão digital	1/1.000	Média
Geometria da Mão	tamanho, comprimento e espessura das mãos	1/700	Baixa
Reconhecimento Facial	contorno, formato e distribuição dos olhos e nariz	1/100	Baixa
Assinatura	formato das letras, ordem da escrita, pressão da caneta	1/100	Baixa
Voz	características de voz	1/30	Baixa

Fonte: AIM Japão, Seminário de Identificação Automática, setembro de 2001.

2.6 - IDENTIFICANDO A JOVEM MISTERIOSA

Sistemas de reconhecimento de íris são encontrados também em aplicações inesperadas. O melhor exemplo conhecido, envolveu o uso de reconhecimento de íris para confirmar a identidade de uma jovem afegã misteriosa. Seus olhos cativaram o mundo desde sua aparição na capa da revista National Geographic em 1985 [20]. A jovem afegã foi originalmente fotografada em 1984, por Steve McCurry, fotógrafo da revista. Por 17 anos não se sabia sequer o nome da garota da capa de junho de 1985. Até pouco tempo atrás, o nome e o paradeiro da menina afegã permaneciam o mais completo mistério.

A uns 18 anos atrás, McCurry fotografou a jovem em um campo de refugiados no Paquistão. O fotógrafo tentou encontrá-la novamente em diversas viagens subseqüentes que fez ao Paquistão e Afeganistão. Em janeiro de 2002, uma equipe da National Geographic retornou ao campo de refugiados para procurá-la. Ela foi localizada através de uma série de contatos que levaram ao seu irmão e seu marido. Depois de 18 anos, a jovem misteriosa, agora uma mulher feita e mãe de três meninas, foi encontrada. Seu nome é Sharbat Gula. Ela foi fotografada apenas em duas ocasiões: uma em 1984 e outra em 2002. A pedido da National Geographic, o Dr. John Daugman, comparou as íris das fotografias usando seus algoritmos de reconhecimento. A conclusão foi que as íris da jovem afegã e da mulher adulta, que apareciam nas fotos, pertencem a mesma pessoa, ou seja, Sharbat Gula – Figura 2.5 (versão colorida da figura encontra-se no apêndice).

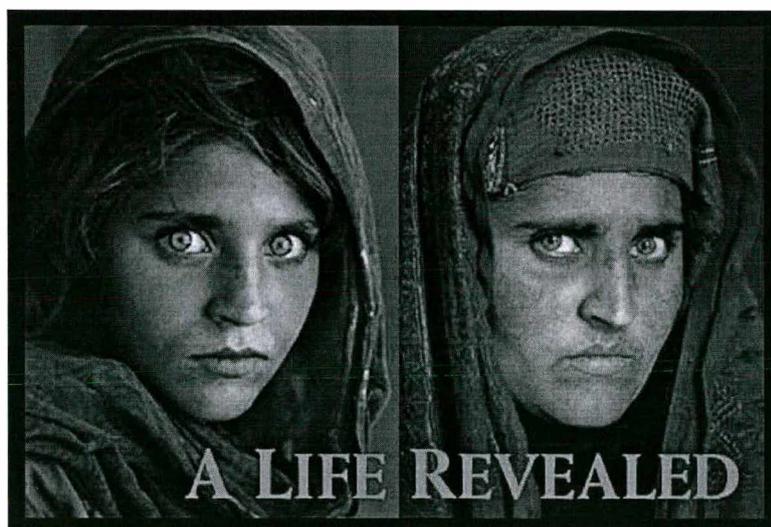


Figura 2.5 - Sharbat Gula – a mulher misteriosa.

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os fundamentos da teoria utilizada na presente dissertação. Inicialmente serão apresentadas as anatomias do olho e da íris, mostrando detalhes estruturais e funcionais de ambos. A seguir, serão apresentados alguns conceitos relacionados ao Processamento de Imagens, Morfologia Matemática e Transformação de Movimento, que são de fundamental importância para o desenvolvimento do trabalho, bem como para o entendimento da abordagem proposta.

3.1 - O OLHO HUMANO

3.1.1 - Anatomia do Olho

O olho (globo ocular) encontra-se alojado na órbita, que são cavidades ósseas 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 é formado por três camadas de tecidos: túnica externa (ou fibrosa), túnica média (ou vascular) e túnica interna (ou sensorial) [10, 21, 22].

A camada mais externa, túnica externa, é composta pela *córnea* (parte transparente na porção anterior do olho) e *esclera* (porção branca do olho). A camada do meio, túnica média, é composta pela *coróide*, *corpo ciliar* e *íris*, onde, destas estruturas, normalmente apenas a *íris* (parte colorida do olho) pode ser observada. A camada mais interna, túnica interna, é composta pela *retina*, que é um tecido do sistema nervoso (situado na porção posterior do olho) responsável por receber as imagens e transformá-las em impulsos elétricos, que são transmitidos através do *nervo óptico* até o cérebro. A Figura 3.1(a) mostra as estruturas aparentes do olho e da região a sua volta, enquanto a 3.1(b) mostra um corte transversal com detalhes das estruturas externas e internas.

A *córnea*, devido a seu formato e transparência, funciona como uma lente que, associada ao *crystalino*, constitui o sistema óptico responsável por focar as

imagens na *retina*. 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.

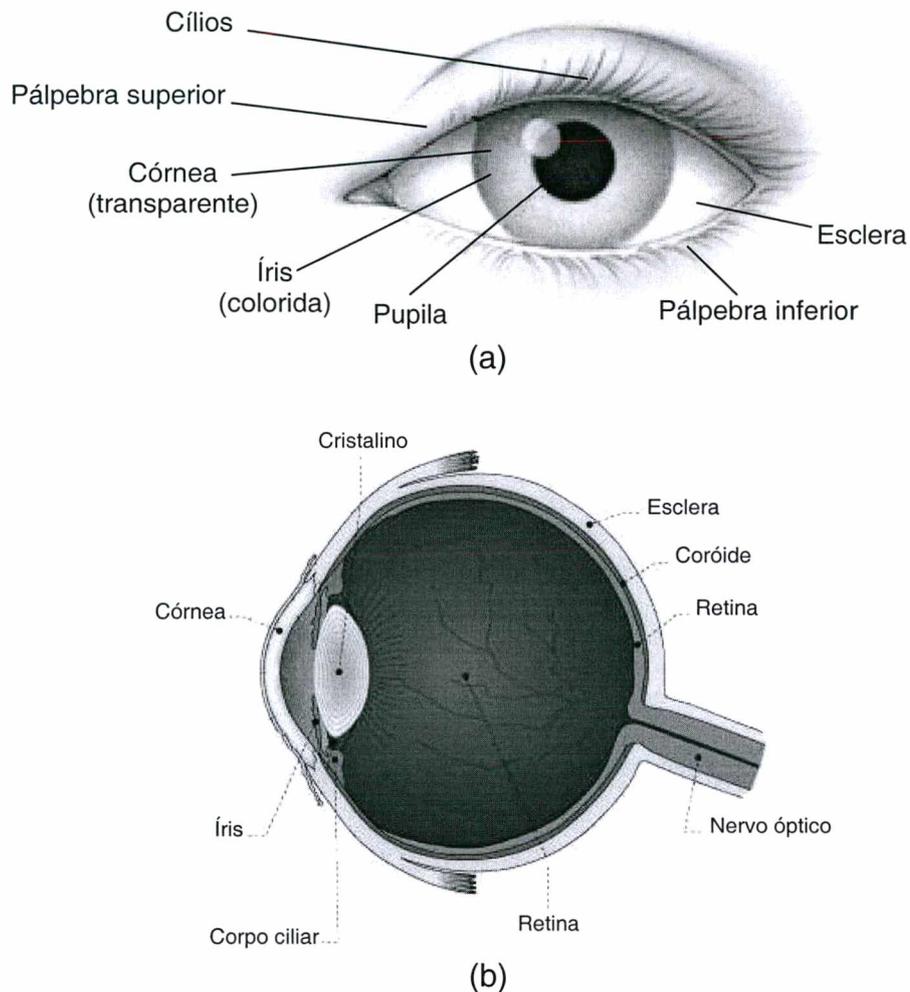


Figura 3.1 - Anatomia do olho humano.

A *íris*, além de dar a cor aos olhos, tem a função de controlar a intensidade de luz que chega dentro deles. Dotada de movimentos contráteis em reação ao estímulo luminoso, ela apresenta um orifício central denominado *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 a um diafragma. 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 *crystalino*, permitindo que as imagens sejam focalizadas no interior do olho, mais especificamente na *retina*.

3.1.2 - Anatomia da Íris

A íris [2, 10, 23] 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 esfíncter* e *dilatador*, responsáveis pelo movimento da pupila. A *camada anterior* atinge sua máxima espessura ao nível do *collerette*. Vista através de um corte radial, a *camada anterior* exhibe 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*. 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.

A Figura 3.2 apresenta em detalhes a estrutura anatômica da íris. Em 3.2(a) a estrutura é vista através de um corte transversal, e em 3.2(b) através de um setor frontal. Dentre os detalhes que podem ser observados na estrutura da íris, pode-se destacar:

- *Collerette*: situado concentricamente à pupila, lembra um degrau mais ou menos desenvolvido;
- *Lisére*: moldura pigmentada, cor de café, denteada, que contorna a pupila;
- *Pregas radiais*: mais freqüentes nas íris escuras, normalmente situam-se na porção plana;
- *Criptas*: atrofias irregulares vistas na superfície anterior da íris;

- *Nevos*: agrupamentos de células pigmentadas;
- *Sardas*: concentração de cromatóforos.

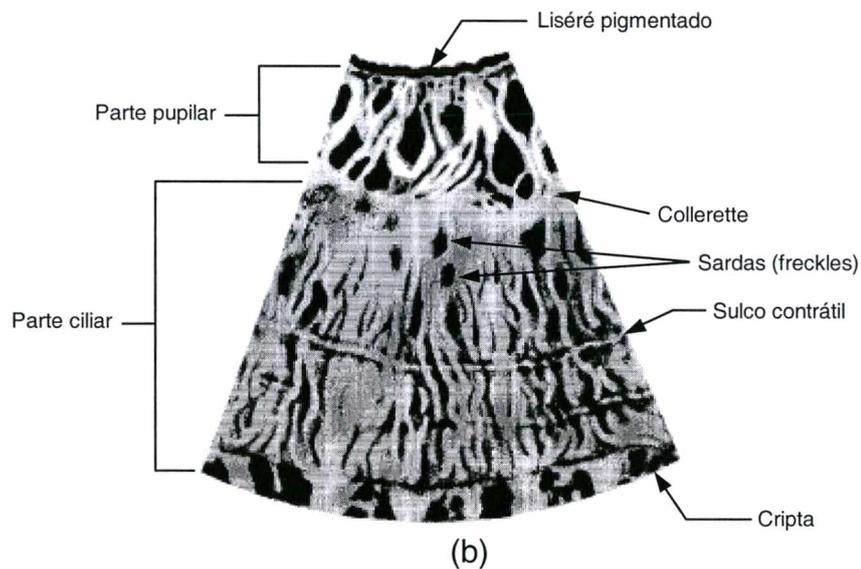
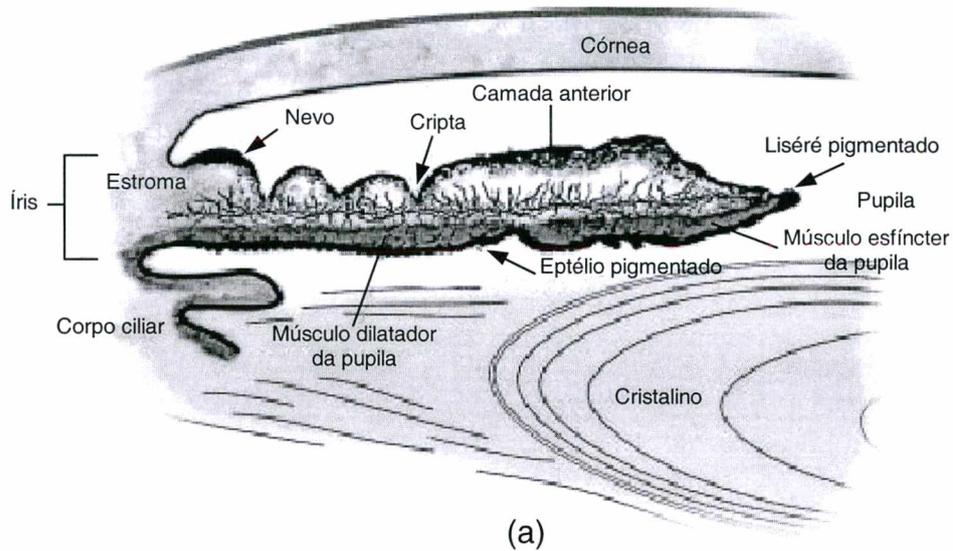


Figura 3.2 - Anatomia da íris humana.

3.2 - HISTOGRAMA

3.2.1 - Conceito

O histograma de uma imagem digital [3, 24], 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 pode-se obter informações do nível de contraste e do brilho médio (imagem predominantemente clara ou escura).

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

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (3.1)$$

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 plotagem desta função para todos os valores de k . Os quatro tipos básicos de histogramas são mostrados na Figura 3.3. Em 3.3(a) os níveis estão concentrados em torno do final escuro da faixa da escala de cinza, correspondendo a uma imagem com características escuras. O oposto ocorre em 3.3(b). Em 3.3(c) o formato estreito indica pequena faixa dinâmica, correspondendo a uma imagem com baixo contraste. Finalmente em 3.3(d), um histograma com espalhamento significativo, correspondendo a uma imagem com alto contraste. O formato do histograma de uma imagem fornece informações úteis sobre a possibilidade de realçamento do contraste.

3.2.2 - Equalização de Histograma

Em uma 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 [3] é

$$s = T(r) \quad (3.2)$$

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 $0 \leq r \leq 1$.

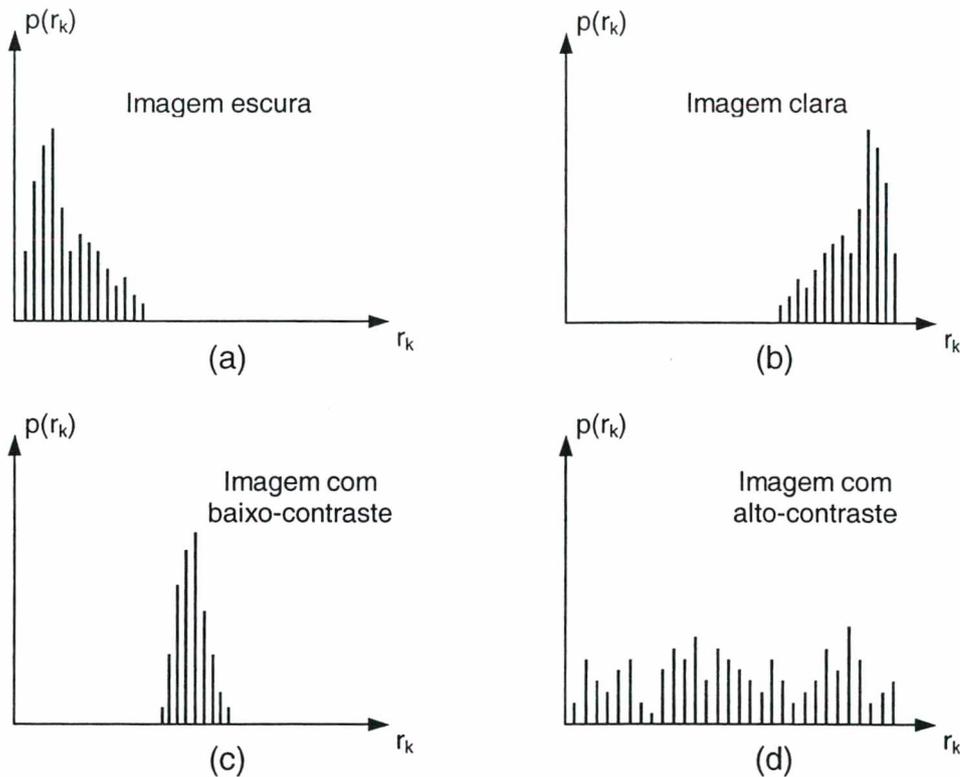


Figura 3.3 - Histogramas correspondendo aos quatro tipos básicos de imagem.

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. A Figura 3.4 mostra um exemplo de uma função que satisfaz estas condições.

A transformação inversa [3], que também satisfaz as duas condições em relação a variável s , é dada por:

$$r = T^{-1}(s) \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (3.3)$$

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:

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=T^{-1}(s)} \quad (3.4)$$

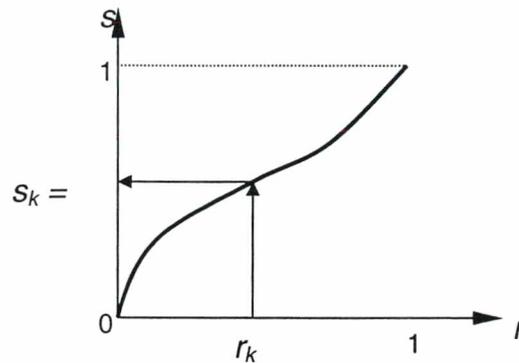


Figura 3.4 - Uma função de transformação de nível de cinza.

Técnicas para realçamento 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 [3].

Usando uma função de transformação igual a distribuição cumulativa de r , resulta em uma imagem cujos níveis de cinza tem uma densidade uniforme. Em termos de realçamento, este resultado implica em um aumento na faixa dinâmica dos pixels, que pode ter um efeito considerável 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:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad 0 \leq r_k \leq 1 \text{ e } k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (3.5)$$

A técnica usada para obter um histograma uniforme é conhecida como *equalização de histograma* [3, 25].

A função de transformação na forma discreta é dada pela relação

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad 0 \leq r_k \leq 1 \text{ e } k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (3.6)$$

e a inversa por

$$r_k = T^{-1}(s_k) \quad 0 \leq s_k \leq 1 \quad (3.7)$$

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

A Figura 3.5 mostra o resultado da equalização de histograma aplicada a imagem original.

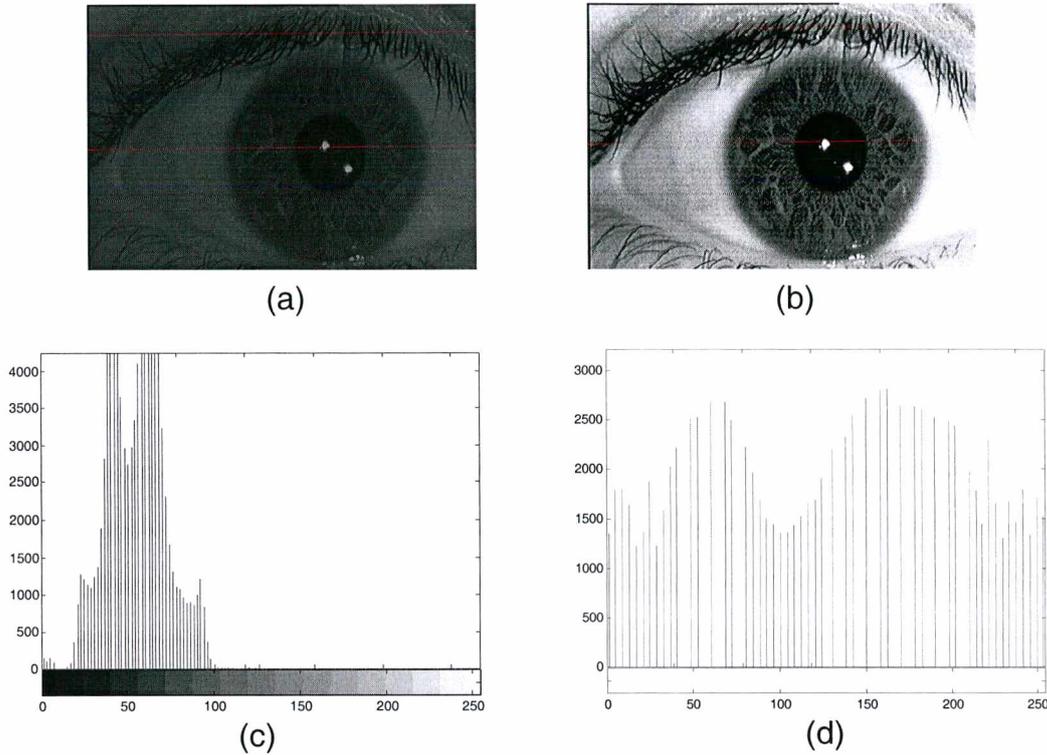


Figura 3.5 - Exemplo: (a) imagem original, (b) imagem submetida à equalização de histograma e (c, d) seus respectivos histogramas.

3.3 - LIMIAZIZAÇÃO (THRESHOLDING)

A *limiarização* [3, 24] 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*).

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 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. Um limiar tem que ser calculado para cada pixel na imagem. 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 óbvia; Figura 3.6.

Para encontrar o limiar, são duas as principais abordagens: *Chow e Kanenko* e *limiarização local* [3]. Ambos 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.

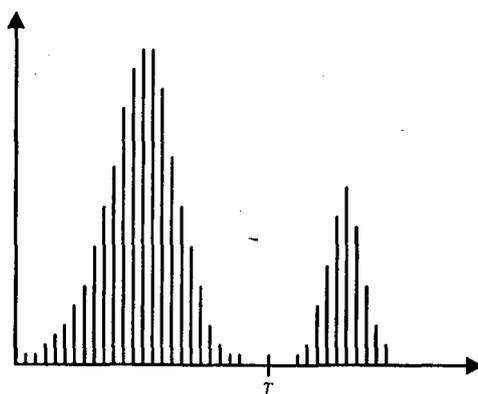


Figura 3.6 - Histograma em níveis de cinza de uma imagem composta de objeto claro com um fundo escuro, que pode ser separado por um limiar único.

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 pobre é 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 ela não pode trabalhar com imagens contendo uma forte variação na iluminação, por exemplo. Já a *limiarização adaptativa* seleciona um limiar individual para cada pixel, baseado na faixa de valores de intensidade na sua vizinhança local, isto considerando a *limiarização* de uma imagem cujo histograma não contém picos distintos.

3.4 - VIZINHOS DE UM PIXEL

Seja p um pixel com coordenadas (x,y) . O conjunto dos pixels mostrados na Figura 3.7(a) é chamado de 4-vizinhos (N_4), em 3.7(b) de vizinhos diagonais (N_D) e em 3.7(c) de 8-vizinhos(N_8) [3, 26].

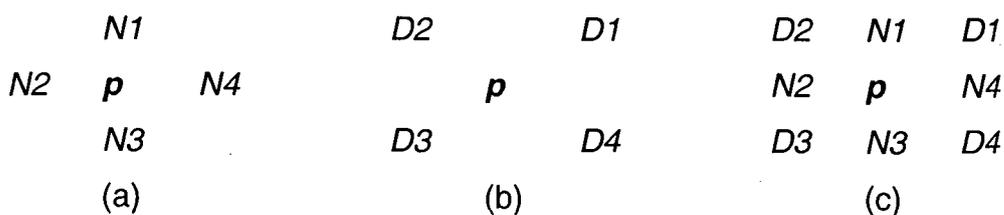


Figura 3.7 - Vizinhança de um pixel p .

3.5 - 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 [3, 26].

A conectividade entre pixels leva em conta não somente a posição, se eles são adjacentes, mas também um critério de similaridade, se seus níveis de cinza satisfazem tal 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.

No capítulo 4 (item 4.4), encontra-se a descrição de um algoritmo proposto para eliminar o problema de múltiplos *caminhos*¹ de conexão, preservando apenas os pixels indispensáveis para que não ocorra quebra de conexão nas estruturas.

3.6 - 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 [3, 4, 26]. Sua aplicação abrange diversas áreas de análise e processamento de imagens, cujos objetivos podem ser os mais variados como, por exemplo: filtragem, segmentação, realçamento, afinamento, detecção de bordas, entre outros.

Na morfologia matemática, informações relativas à topologia e à geometria de um conjunto desconhecido (uma imagem), são extraídas usando um outro conjunto completamente definido (chamado *elemento estruturante* – *structuring element, SE*) 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.

Algumas definições básicas da teoria de conjuntos, ilustradas na Figura 3.8, serão úteis para melhor compreensão dos operadores morfológicos. Sejam Y e K dois conjuntos 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:

$$(Y)_x = \{u \mid u = y + x, \text{ para } y \in Y\} \quad (3.8)$$

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

¹ *caminho* de um pixel p com coordenadas (x,y) a um pixel q com coordenadas (s,t) é a seqüência de pixels distintos com coordenadas $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, onde $(x_0, y_0) = (x, y)$ e $(x_n, y_n) = (s, t)$, e os pixels intermediários são adjacentes entre si, ou seja, (x_i, y_i) é adjacente a (x_{i-1}, y_{i-1}) para $1 \leq i \leq n$ e n é o comprimento do caminho.

$$Y^c = \{x \mid x \notin Y\} \quad (3.9)$$

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

$$\hat{Y} = \{x \mid x = -y, \text{ para } y \in Y\} \quad (3.10)$$

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

$$Y - K = \{x \mid x \in Y, x \notin K\} = Y \cap K^c \quad (3.11)$$

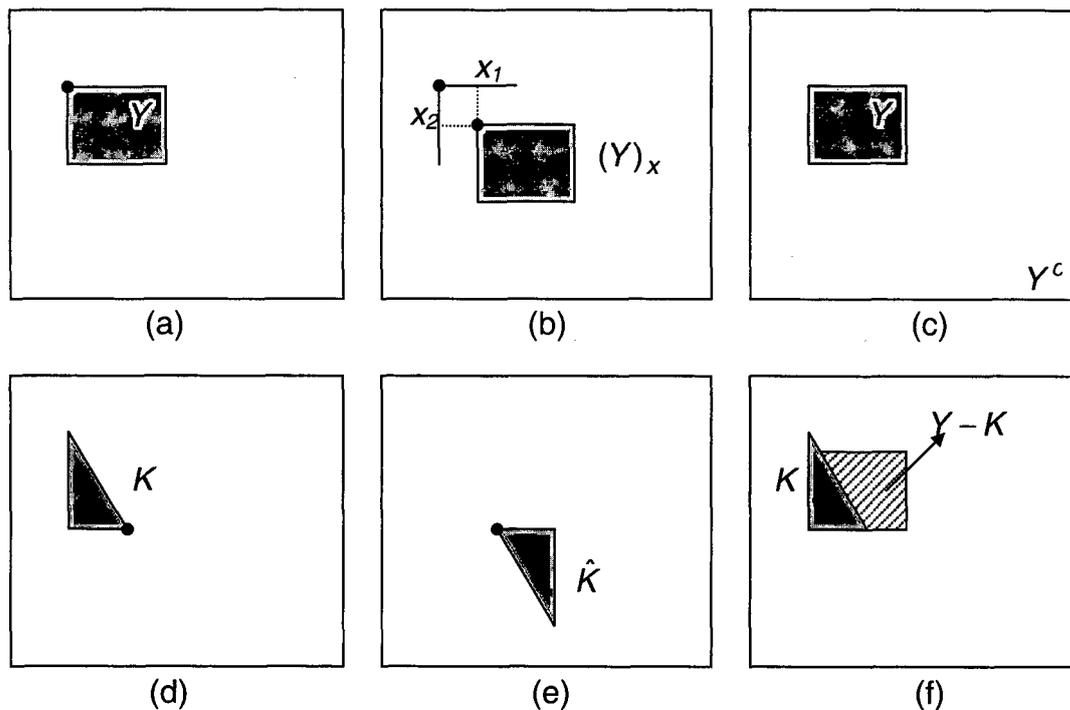


Figura 3.8 - (a) Conjunto Y ; (b) translação de Y por x ; (c) Y e seu complemento; (d) conjunto K ; (e) reflexão de K em relação a sua origem; (f) diferença entre os conjuntos Y e K .

3.6.1 - Elemento Estruturante (SE)

Um *elemento estruturante* [3, 4, 26, 27] plano é um conjunto de coordenadas determinadas. Os formatos elementares mais comuns são: cruz (*cross*), caixa (*box*) e disco (*disk*). O tamanho do SE varia em função do raio. A Figura 3.9 mostra os SE s, nos diversos formatos, para um raio igual a 2 pixels. O formato e o tamanho do SE podem variar, de acordo com a aplicação, contanto que o SE seja simétrico e contenha a origem, a reconstrução produzirá resultados úteis.

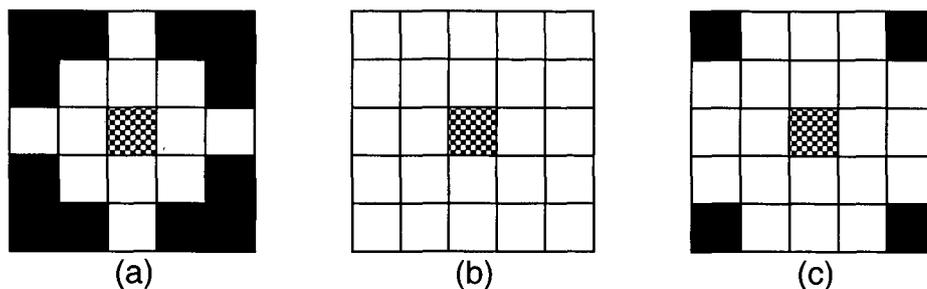


Figura 3.9 - Formato dos *elementos estruturantes* com raio igual a 2 pixels: (a) *SE cross*; (b) *SE box*; (c) *SE disk*.

3.6.2 - Dilatação (dilation) - δ

A *dilatação* [3, 4, 26, 27] 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 3.10. Então a área do objeto cresce em tamanho enquanto que os buracos dentro do objeto tornam-se menores.

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



Figura 3.10 - *Dilatação* (imagem binária).

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

- Seja X um conjunto que corresponde à imagem de entrada, e K é o *SE*;
- $(K)_x$ 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:

$$X \oplus K = \delta_K(X) = \{x \mid (\hat{K})_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (3.12)$$

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 $K(x, y)$ é o SE, 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:

$$(F \oplus K)(s, t) = \max\{F(s-x, t-y) + K(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_F; (x, y) \in D_K\} \quad (3.13)$$

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 3.13, que fica reduzida a expressão:

$$(F \oplus K)(s) = \max\{F(s-x) + K(x) \mid (s-x) \in D_F \text{ e } x \in D_K\} \quad (3.14)$$

A Figura 3.11 ilustra a *dilatação* de F pelo deslizamento de K . Em 3.11(a) e (b) são apresentadas a função F e o SE K , respectivamente. Em 3.11(c) está ilustrado o deslizamento de K sobre F , e em 3.11(d) o resultado da *dilatação*.

A *dilatação* em tons de cinza geralmente clareia a imagem – Figura 3.12. 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.

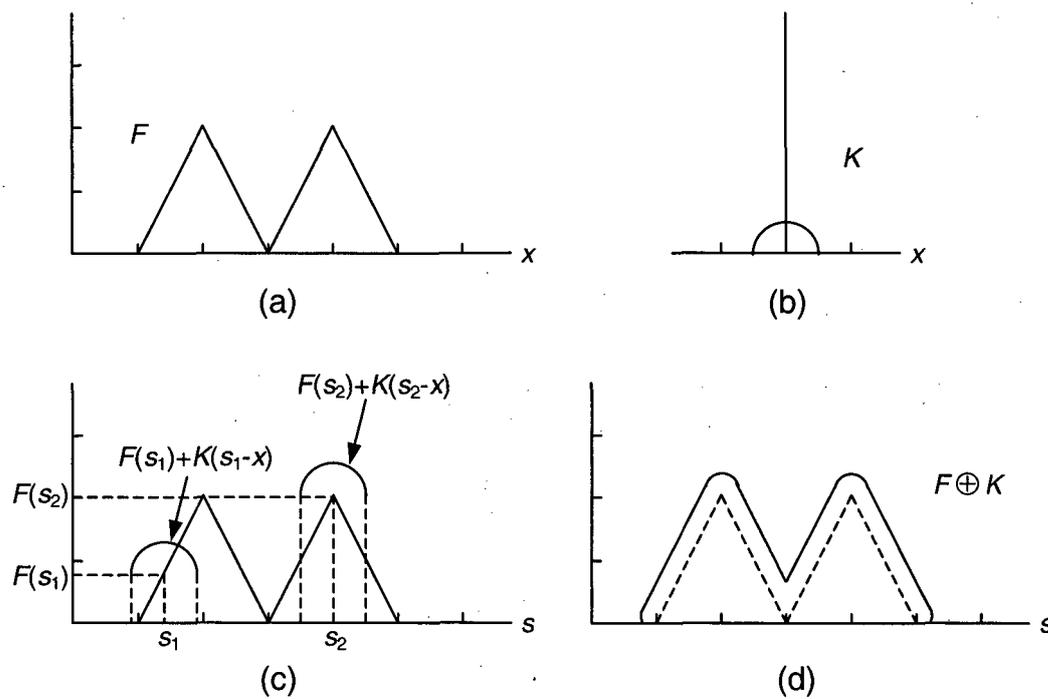


Figura 3.11 - Dilatação de F pelo deslizamento de K .

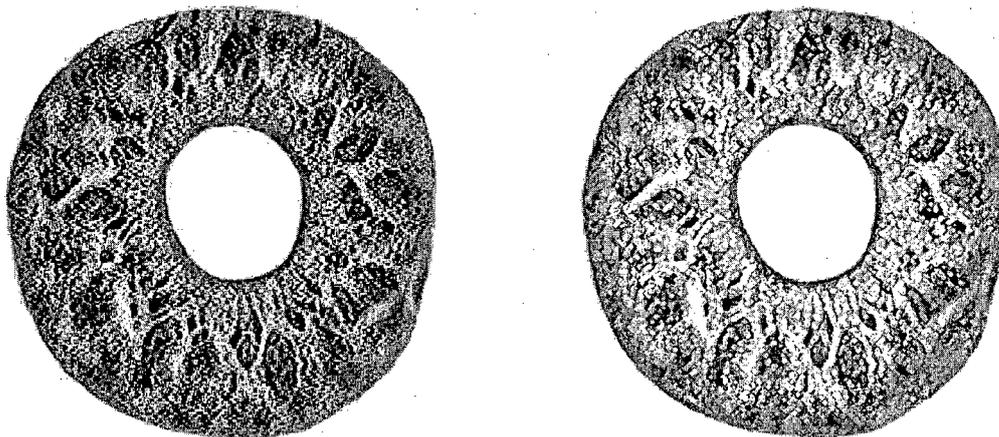


Figura 3.12 - Dilatação (imagem em tons de cinza).

3.6.3 - Erosão (erosion) - ε

Assim como a *dilatação*, a *erosão* [3, 4, 26, 27] 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 – Figura 3.13. Então a área do objeto contrai em tamanho e os buracos dentro do objeto tornam-se maiores.

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

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

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

$(K)_x$ 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:

$$X \ominus K = \varepsilon_K(X) = \{x \mid (K)_x \subseteq X\} \quad (3.15)$$



Figura 3.13 - *Erosão* (imagem binária).

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

$$(F \ominus K)(s, t) = \min\{F(s+x, t+y) - K(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_F; (x, y) \in D_K\} \quad (3.16)$$

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 *SE* ter que estar completamente contido pelo conjunto que está sendo erodido, no caso da *erosão* binária.

Para descrever o mecanismo dado pela equação 3.16, uma função 1D pode ser utilizada, reduzindo a expressão para:

$$(F \ominus K)(s) = \min\{F(s+x) - K(x) \mid (s+x) \in D_F \text{ e } x \in D_K\} \quad (3.17)$$

A Figura 3.14 ilustra o resultado da *erosão* da função F , apresentada na Figura 3.11(a), pelo $SE K$, apresentado em 3.11(b).

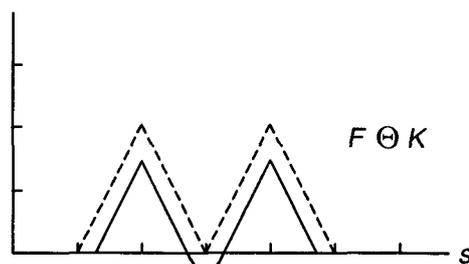


Figura 3.14 - *Erosão* de F pelo deslizamento de K .

A *erosão* geralmente escurece imagens em tons de cinza – Figura 3.15. 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.

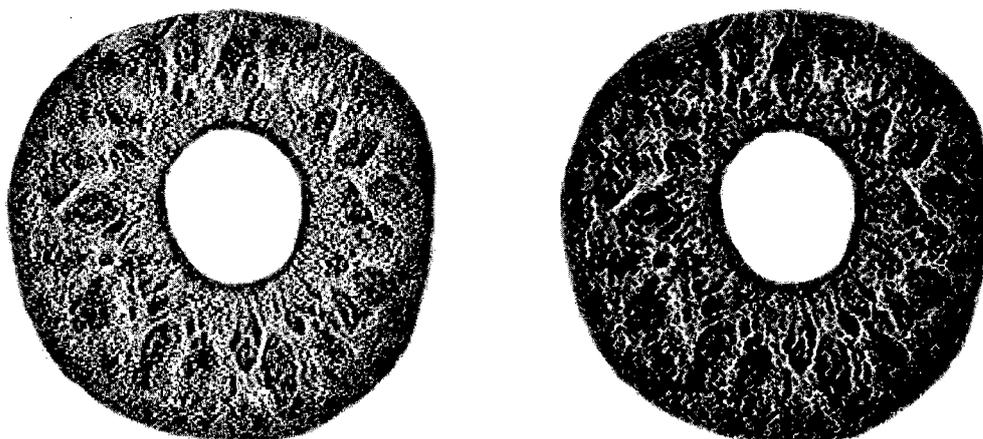


Figura 3.15 - *Erosão* (imagem em tons de cinza).

A *dilatação* é a dual da *erosão*, isto é, aplicar *dilatação* aos pixels do objeto é equivalente a aplicar *erosão* aos pixels do fundo.

$$X^c \oplus \hat{K} = (X \ominus K)^c \quad (3.18)$$

3.6.4 - 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* [3, 4, 26, 27] suaviza contornos, quebra istmos estreitos e elimina proeminências delgadas. O efeito do operador é preservar regiões do objeto que tem forma similar ao *SE*, ou que contém completamente o *SE*, enquanto eliminam outras regiões do objeto – Figura 3.16.



Figura 3.16 - *Abertura* (imagem binária).

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

$$X \circ K = (X \ominus K) \oplus K \quad \text{ou} \quad \gamma_K(X) = \delta_K(\varepsilon_K(X)) \quad (3.19)$$

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 *SE* K é dada por:

$$F \circ K = (F \ominus K) \oplus K \quad \text{ou} \quad \gamma_K(F) = \delta_K(\varepsilon_K(F)) \quad (3.20)$$

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 *SE* 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 3.17, onde 3.17(a) mostra uma linha de uma imagem em tons de cinza como uma função contínua para simplificar a ilustração. 3.17(b) mostra a bola rolando em diversas posições, e em 3.17(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.

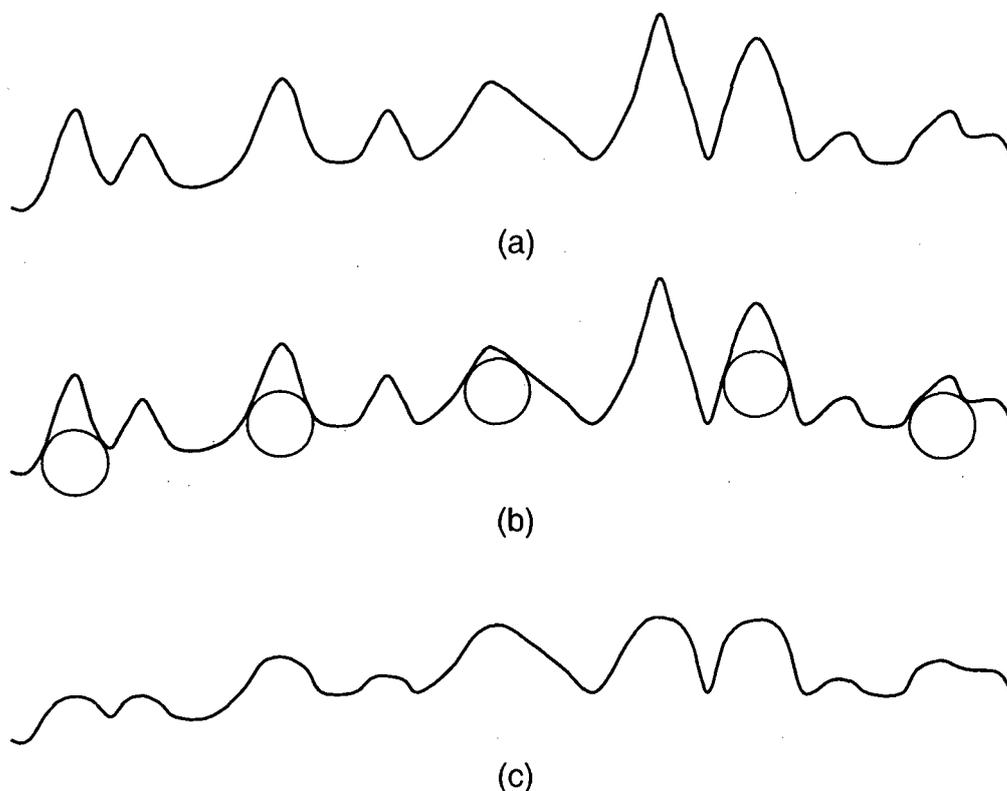


Figura 3.17 - *Abertura* de F por K .

A *abertura* geralmente é aplicada para remover pequenos detalhes claros, quando comparados ao tamanho do *SE*, enquanto deixa os níveis de cinza e características maiores relativamente estáveis – Figura 3.18. 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*.

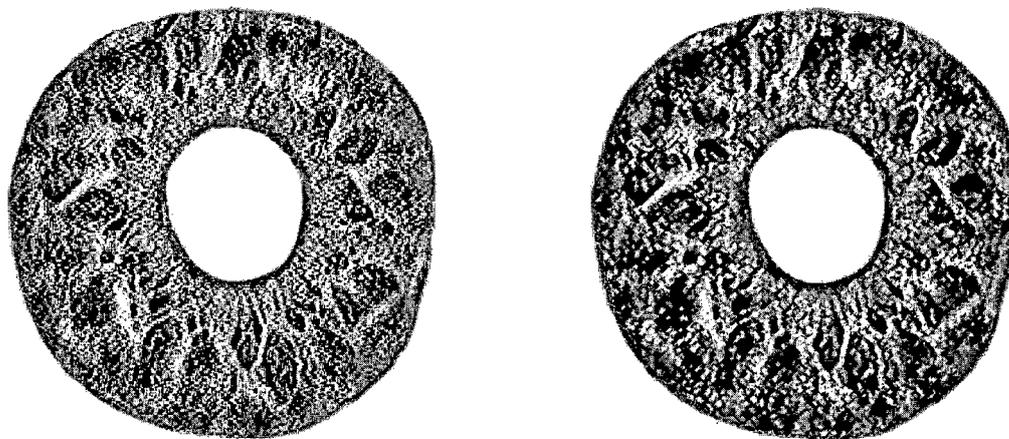


Figura 3.18 - *Abertura* (imagem em tons de cinza).

3.6.5 - 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* [3, 4, 26, 27] 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 *SE*, ou que podem conter completamente o *SE*, enquanto eliminam outras regiões do fundo – Figura 3.19.



Figura 3.19 - *Fechamento* (imagem binária).

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

$$X \bullet K = (X \oplus K) \ominus K \quad \text{ou} \quad \varphi_K(X) = \varepsilon_K(\delta_K(X)) \quad (3.21)$$

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

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 *SE* *K* é dada por:

$$F \bullet K = (F \oplus K) \ominus K \quad \text{ou} \quad \varphi_K(F) = \varepsilon_K(\delta_K(F)) \quad (3.22)$$

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 3.20, onde 3.20(a) mostra uma linha de uma imagem em tons de cinza, 3.20(b) a bola rolando em diversas posições, e 3.20(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 3.21. A *dilatação* inicial remove detalhes escuros e clareia a imagem, em seguida a *erosão* escurece a imagem sem reintroduzir os detalhes removidos pela *dilatação*.

3.6.6 - Transformação Hit-or-Miss - *hom*

A transformação *hit-or-miss* [3, 4, 26, 27] 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

SEs, e então fazendo um *OR* 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 *SE*, e produz outra imagem binária como saída.

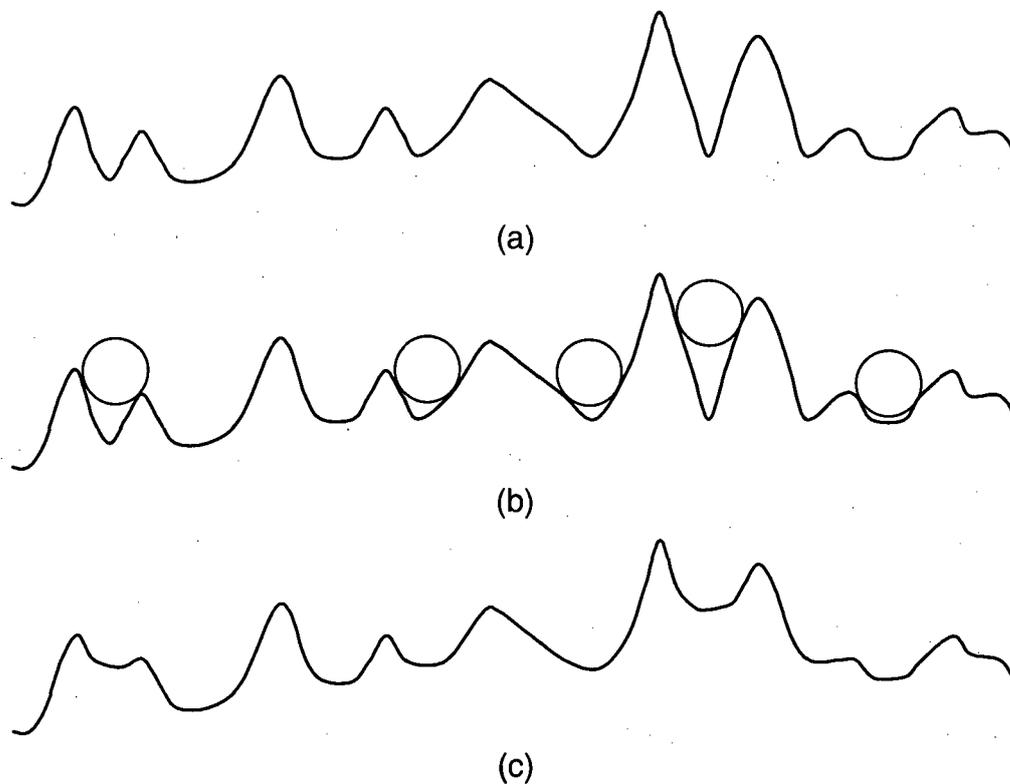


Figura 3.20 - *Fechamento* de *F* por *K*.

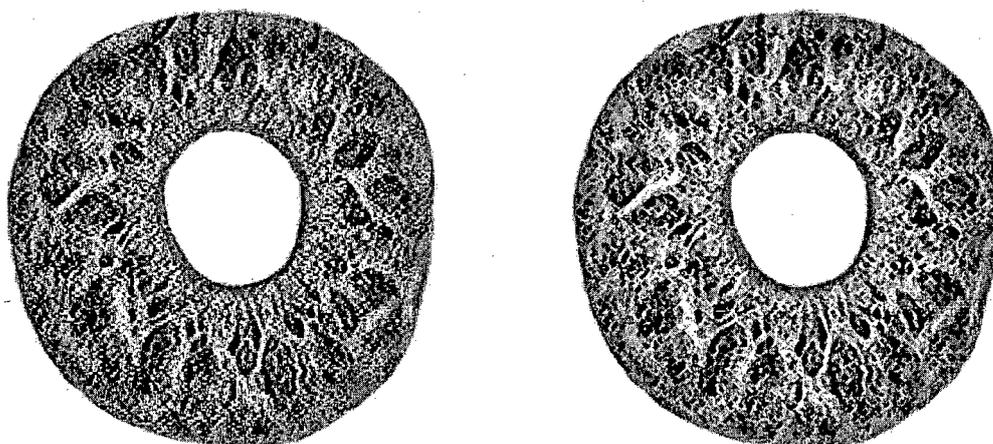


Figura 3.21 - *Fechamento* (imagem em tons de cinza).

O *SE* usado no *hit-or-miss* é uma ligeira extensão do tipo 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 *SE* usado com a erosão e a dilatação é freqüentemente 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 *SE* para um formato de núcleo conveniente. Na Figura 3.22 é mostrado um tipo estendido de *SE*, 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 3.22 - Exemplo de tipo estendido de *SE* 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 *SE* por todos os pontos da imagem, e então comparando o *SE* com os pixels da imagem que estão por baixo dele. Se os pixels do objeto e do fundo no *SE* coincidem exatamente com os pixels do objeto e do fundo na imagem, então o pixel abaixo da origem do *SE* 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:

$$X \otimes K = (X \ominus K_1) \cap (X^c \ominus K_2) \quad (3.23)$$

onde K_1 é o conjunto formado por elementos de K associados com um objeto, e K_2 é o conjunto formado por elementos de K associados com o fundo correspondente. A operação $X \otimes K$ resulta num conjunto de pontos (coordenadas) nos quais, simultaneamente, K_1 encontra uma correspondência (*hit*) em X e K_2 encontra uma correspondência em X^c .

O *SE* mostrado na Figura 3.22, 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 necessários quatro passagens, cada uma com um elemento

diferente, representando um dos quatro tipos de cantos com ângulo reto. A Figura 3.23 mostra os quatro elementos usados nesta operação, que na realidade são o mesmo elemento apenas com três rotações consecutivas de 90°.

Depois de obter a localização dos cantos em todas as orientações, pode ser feito um *OR* entre todas estas imagens para conseguir o resultado final, mostrando a localização dos cantos em ângulo reto convexo em qualquer orientação – Figura 3.24, à esquerda a estrutura original e a direita o resultado obtido após a aplicação do operador.

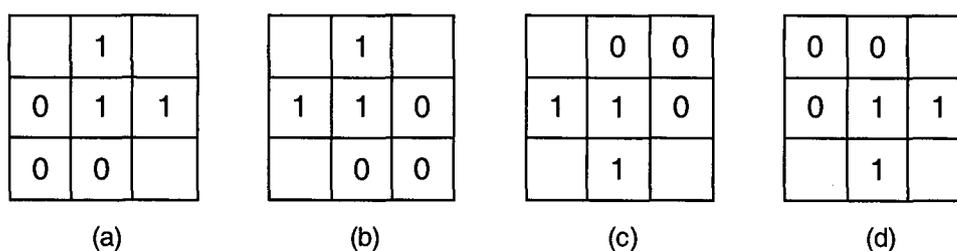


Figura 3.23 - Os quatro *SEs* usados para encontrar cantos usando a operação *hit-or-miss*.

A transformação *hit-or-miss* tem muitas aplicações em operações morfológicas mais complexas. Ela pode ser usada para construir os operadores *afinamento* (*thinning*) e *espassamento* (*thickening*), e conseqüentemente para os demais operadores morfológicos. As operações de *erosão*, *dilatação*, *abertura*, *fechamento*, *afinamento* e *espassamento* podem ser todas derivadas de uma transformação *hit-or-miss* junto com um conjunto de operações simples.

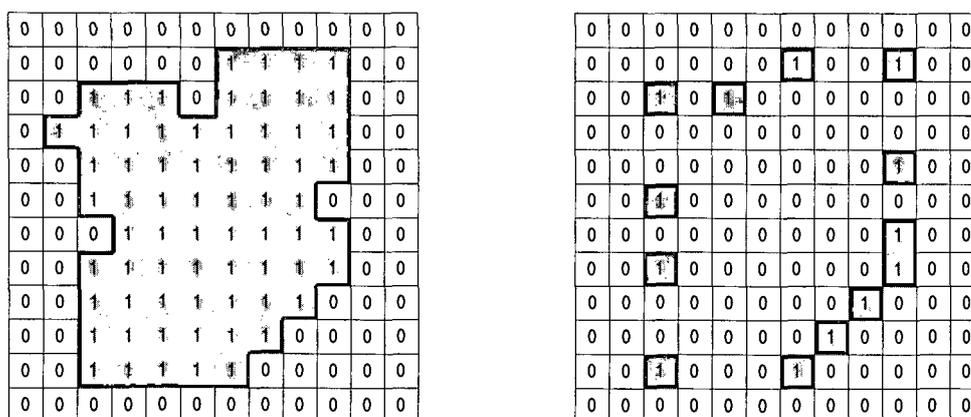


Figura 3.24 - Localização dos cantos através da operação *hit-or-miss*.

A Figura 3.25 ilustra alguns elementos que podem ser usados para localizar várias características binárias. Na Figura 3.25(a) o elemento é usado para localizar um ponto isolado em uma imagem binária, o da 3.25(b) para localizar *end-points* em um *esqueleto* (*skeleton*) binário, onde o *SE* deve ser usado em todas as suas orientações (então quatro passagens *hit-or-miss* são necessárias). Os elementos da Figura 3.25(c) e 3.25(d) são usados para localizar pontos triplos (*nós* ou *junções*) em um *esqueleto*, sendo que ambos *SEs* devem usados em todas orientações (então oito passagens *hit-or-miss* são necessárias).

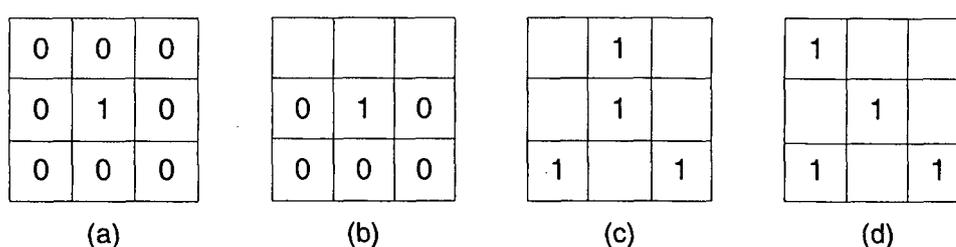


Figura 3.25 - *SEs* usados para localizar características binárias através da operação *hit-or-miss*.

3.6.7 - Afinamento (thinning) - *thin*

O *afinamento* [3, 4, 26, 28] é um operador morfológico usado para remover pixels selecionados de imagens binárias. Ele pode ser usado para várias aplicações, mas é particularmente útil para a *esqueletização* [3, 4, 28]. A *esqueletização* é um processo para reduzir regiões do objeto, em uma imagem binária, a um esqueleto que em grande parte preserva a extensão e a conectividade da região original, enquanto descarta a maioria dos pixels do objeto original. Neste modo de operação, pode ser usado para organizar a saída de *detectores de bordas* (*edge detectors*) reduzindo todas as linhas para um único pixel de espessura. O *afinamento* é aplicado normalmente apenas para imagens binárias, produzindo outra imagem binária como saída.

Como em outros operadores morfológicos, o comportamento da operação de *afinamento* é determinado por um *SE*. O *SEs* usados para o *afinamento* são do tipo estendido, descritos na transformação *hit-or-miss* (isto é, eles podem conter ambos

uns ou zeros). A operação de *afinamento* pode ser expressa em função da transformação *hit-or-miss* como a seguir:

$$X \text{ thin } K = X - X \text{ hom } K \quad (3.24)$$

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

$$X \text{ thin } K = X \cap (X \text{ hom } K)^c \quad (3.25)$$

Em condições usuais, o *afinamento* é calculado pela translação da origem do *SE* para cada posição de pixel possível na imagem. Para cada posição é feita uma comparação pixel a pixel, entre o *SE* e os pixels da imagem que estão abaixo dele. Se os pixels do objeto e do fundo no *SE* coincidem exatamente com os pixels do objeto e do fundo na imagem, então o pixel abaixo da origem do *SE* recebe o valor do pixel do fundo. Caso contrário é deixado inalterado. Para que a operação surta efeito a origem do *SE* deve ter sempre um 1 ou um *espaço em branco* ('*não interessa*'). A escolha do *SE* 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 3.26 mostra um exemplo da aplicação do operador *afinamento* para obter a *esqueletização*. À esquerda a estrutura original e a direita o resultado obtido após a aplicação do operador.

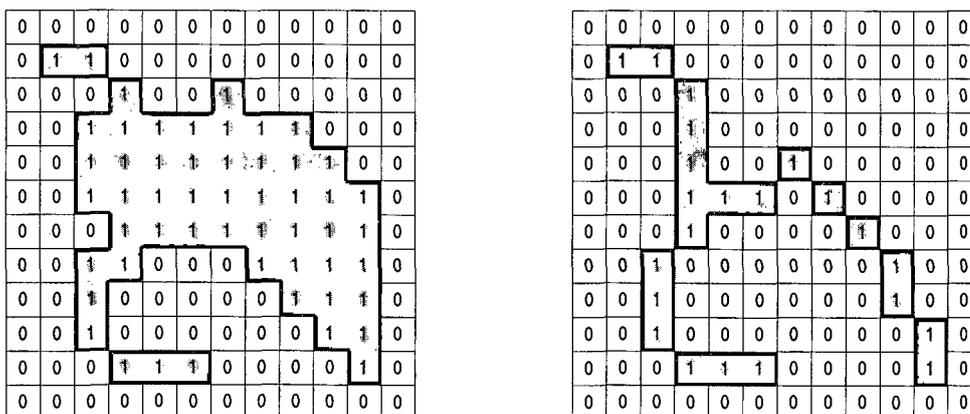


Figura 3.26 - *Esqueletização* através do operador *afinamento*.

3.6.8 - Resíduos

Resíduo é um nome genérico dado ao que é deixado de algo que é removido. Por exemplo, quando algo é filtrado, aquilo que não passa no filtro é o resíduo. Com o uso de dois operadores, um maior que o outro, o resíduo pode ser computado pela diferença entre eles.

$$R = \Psi_1 - \Psi_2 \quad \text{se } \Psi_1 \geq \Psi_2 \quad (3.26)$$

3.6.8.1 - Gradiente morfológico

Um primeiro grupo de resíduos são chamados *gradiente* [3, 4, 27] e são obtidos através de *dilatações* e *erosões*. Eles geram contornos (binários ou em tons de cinza), que podem ser interno (imagem original “ ι ” menos a *erosão*), externo (*dilatação* menos a imagem original “ ι ”) ou ambos (*dilatação* menos *erosão*), ou seja:

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

Um exemplo dos *gradientes* de uma imagem binária, utilizando um *SE cruz* (3x3), é apresentado na Figura 3.27, onde a imagem original contendo algumas bolhas é mostrada em 3.27(a) e em 3.27(b) o resultado da aplicação do *gradiente*. A Figura 3.27(c) mostra o resultado do *gradiente interno* que corresponde ao contorno interno das bolhas, e em 3.27(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 3.28. Em 3.28(a) a imagem original e em 3.28(b) o resultado do *gradiente*. Como pode ser observado, o *gradiente morfológico* realça transições nítidas (em nível de cinza) na imagem original.

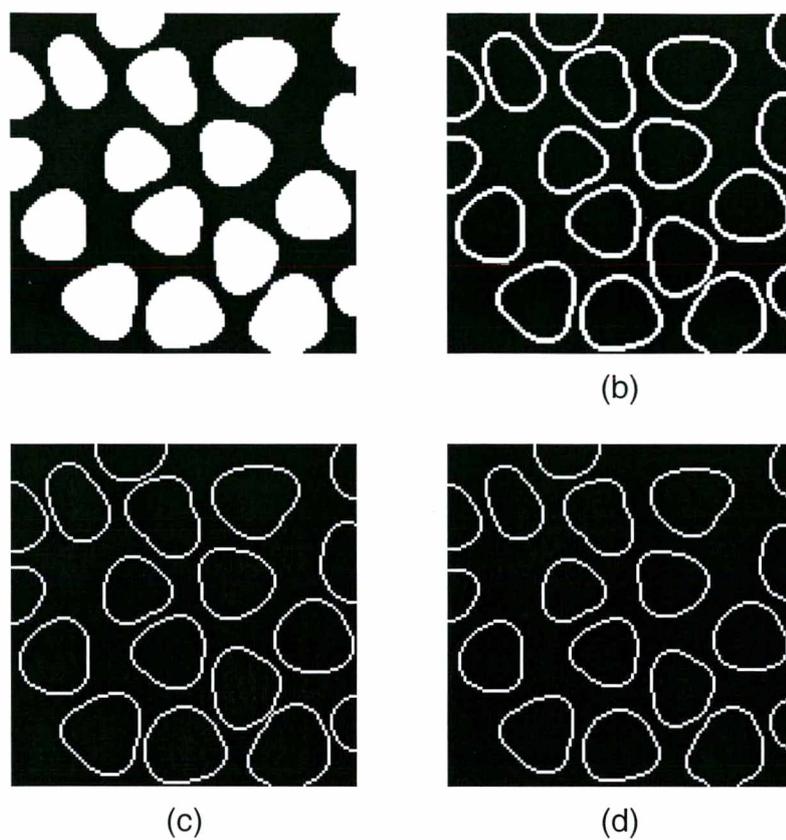


Figura 3.27 - Exemplo de *gradientes* de uma imagem binária.

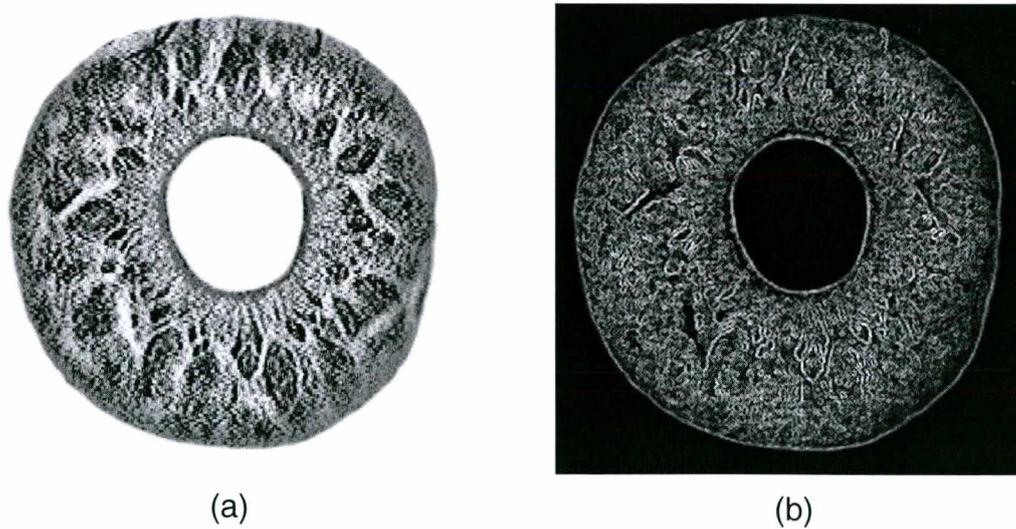


Figura 3.28 - *Gradiente* (imagem em tons de cinza).

3.6.8.2 - Top-hat

Um segundo grupo de resíduos são a *abertura* e o *fechamento top-hat* (*open/close top-hat*) [3, 4, 27]. Neste caso, a *abertura* e o *fechamento* são filtros morfológicos gerados pelo formato do *SE*. Os resíduos são tudo que o *SE* 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:

$$\text{Open top-hat:} \quad X - (X \circ K) \text{ ou } \iota - \gamma \quad (3.27)$$

$$\text{Close top-hat:} \quad (X \bullet K) - X \text{ ou } \varphi - \iota \quad (3.28)$$

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 *SE* não se encaixa. No exemplo ilustrado pela Figura 3.29, a *abertura top-hat* é usada para detectar os dentes de uma engrenagem, que pode ser observada em 3.29(a). Em 3.29(b) a imagem original é submetida a uma *abertura* por um *SE* esférico (*disk*) com raio igual a 20. A seguir a imagem resultante da *abertura* é subtraída da imagem original – Figura 3.29(c). Esta seqüência abertura-subtração é conhecida como *abertura top-hat*.

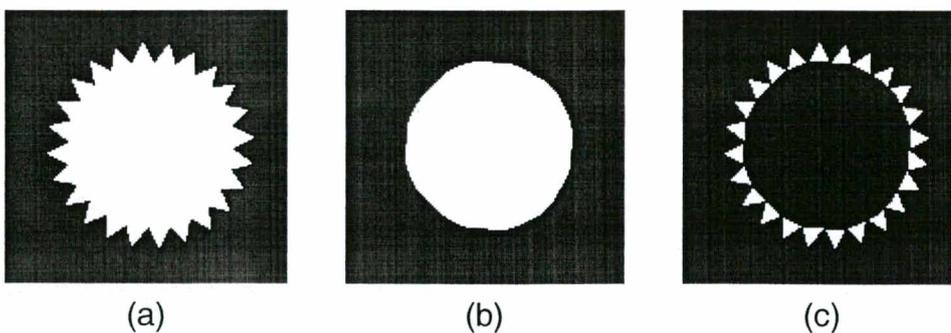


Figura 3.29 - *Abertura top-hat* (imagem binária).

Para imagens em tons de cinza, a *abertura top-hat* detecta os picos que são mais estreitos que a largura do *SE*, 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 3.30. Uma imagem bidimensional contendo três picos (com formato gaussiano) é apresentada na Figura 3.30(a), e em 3.30(c) esta imagem é vista em perspectiva, como uma superfície topográfica. A *abertura* utiliza um *SE caixa (box)* com raio igual a 3 (7x7), e todos os picos na imagem onde o *SE* não se encaixa são detectados pelo *top-hat* – Figura 3.30(b) e 3.30(d).

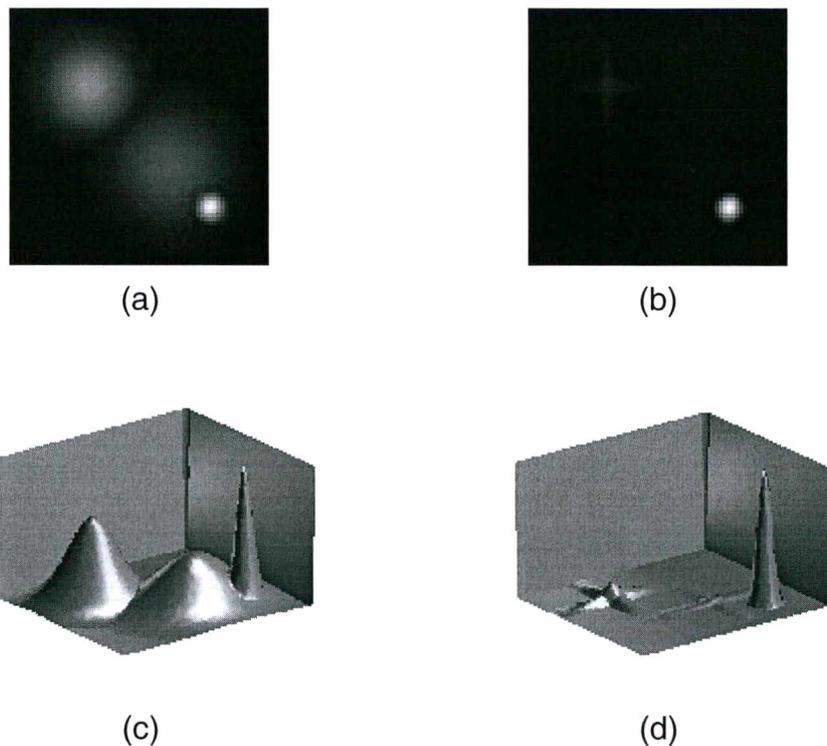


Figura 3.30 - Exemplo da *abertura top-hat* para uma imagem em tons de cinza.

3.6.9 - Reconstrução

É uma operação que está associada ao conceito de conectividade em imagens binárias ou em tons de cinza [3, 27, 28]. Em uma imagem binária a *reconstrução* é equivalente ao processo de pintura usando a ferramenta ***flood fill color***. O usuário pega uma determinada cor e toca uma região branca na imagem. Tudo que está conectado aquele ponto será colorido. 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 seqüência infinita de *dilatação* e *interseção* (chamada *dilatação condicional*). A *reconstrução em tons de cinza* $\rho_Y(X)$ de Y por X é obtida pelas iterações das *dilatações geodésicas* (*geodesic dilations*) [36] de X sob Y até que o resultado atinja uma estabilidade.

$$\delta_{K,Y}(X) = \delta_K(X) \wedge Y \quad (3.29)$$

$$\delta_{K,Y}^n(X) = \underbrace{\delta_{K,Y}(\delta_{K,Y}(\dots\delta_{K,Y}(X)))}_n \quad (3.30)$$

$$\rho_{K,Y}(X) = \bigvee_{n \geq 1} \delta_{K,Y}^n(X) \quad (3.31)$$

A *reconstrução* detecta todos os pixels que estão conectados ao *marcador*, sendo o *SE* o responsável pelo critério de conectividade, isto é, para trabalhar com o critério 4-conectados deve-se usar o formato elementar *cruz* (*elementary cross*) e para o critério 8-conectados o formato elementar *caixa* (*elementary box*). 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 3.31, o *marcador* é uma linha vertical no meio da imagem, Figura 3.31(b), e a imagem condicionante é a imagem binária das bolhas, Figura 3.31(a). Após aplicar oito *dilatações condicionais* sucessivas, o marcador torna-se mais largo, Figura 3.31(c), invadindo a imagem condicional, imitando o mesmo comportamento do efeito de preenchimento de algumas ferramentas disponíveis nos pacotes de pintura. O resultado da *reconstrução*, mostrado na Figura 3.31(d), é um resultado estável, ou seja, se outra *dilatação condicional* for aplicada, o resultado não se altera. As bolhas marcadas na Figura 3.31(d) são aquelas que estão conectadas à linha central (*marcador*). Assim, a *reconstrução* detecta todos os pixels que estão conectados aos *marcadores*.

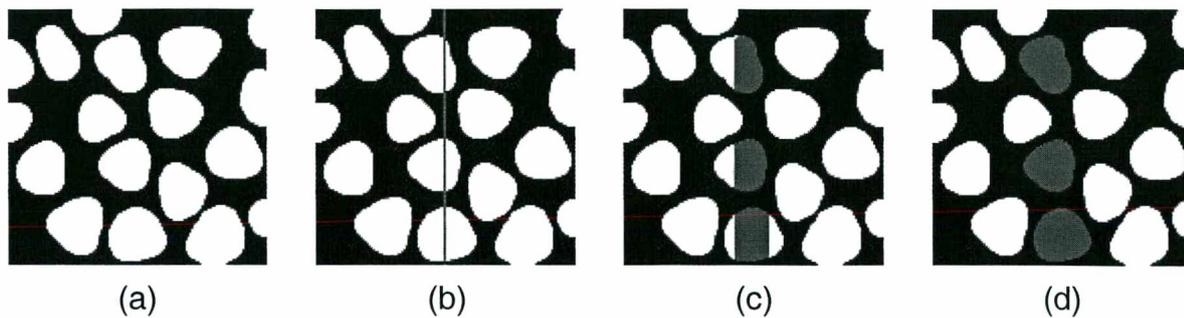


Figura 3.31 - *Reconstrução* (imagem binária).

3.7 - 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* [3,4, 26] 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*.

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 [3, 4].

3.7.1 - Abordagem Convencional

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 3.32(a) para conectividade-4,

examinam-se os pixels r e t , e em 3.32(b) para conectividade-8, examinam-se q , r , s e t .



Figura 3.32 - *Componente conectado* (abordagem convencional).

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

3.7.1.1 - 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.

3.7.1.2 - 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.

3.7.2 - Abordagem Baseada em Morfologia

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 (SE)* 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:

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.32)$$

onde $X_0 = p$ e B é o *SE*.

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 [3, 26, 27].

3.8 - 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 freqüentemente referenciadas como *detecção de movimento* e *estimação de movimento*, respectivamente [27, 29].

O movimento em uma seqüência 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 3.33). Este movimento 2D é conhecido como *movimento aparente* [27, 29]. 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.

3.8.1 - 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:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(t) = (X(t), T(t), Z(t))^T \in R^3 \quad (3.33)$$

expressa em coordenadas da câmera. $(\mathbf{X}(t), t)$ define uma curva no espaço 3D sobre o tempo, conhecida como *trajetória de movimento global* [29]. Tomando-se dois instantes de tempo quaisquer t e τ , a *trajetória de movimento global* apresenta um deslocamento 3D na posição, dado por:

$$D_{t,\tau}(\mathbf{X}) = \mathbf{X}(\tau) - \mathbf{X}(t) \quad (3.34)$$

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:

$$\mathbf{d}_{t,\tau}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}(\tau) - \mathbf{x}(t) \quad (3.35)$$

A Figura 3.33 mostra a projeção da trajetória do movimento.

3.8.2 - Modelos de Movimento

A escolha de um modelo [27, 29] 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.

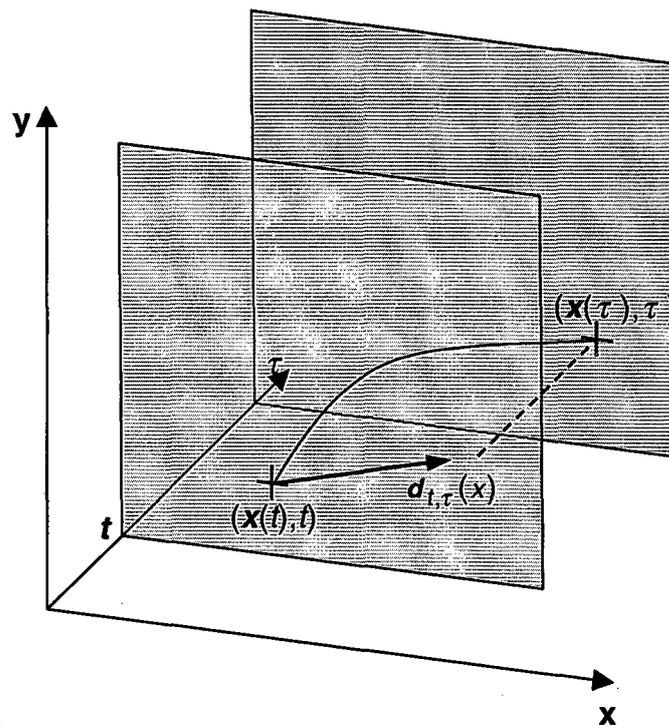


Figura 3.33 - Trajetória de movimento $x(t)$ e o vetor de deslocamento $d_{t,\tau}(x)$ associado.

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 3.34 ilustra as regiões de movimento [27, 29] descritas acima; em 3.34(a) o movimento global, 3.34(b) o movimento local ou regional e 3.34(c) o movimento de ponto individual.

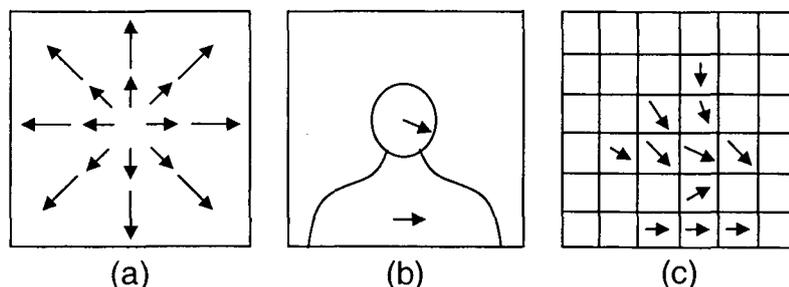


Figura 3.34 - Regiões de movimento: (a) global, (b) local e (c) ponto individual.

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* [29] 2D pode ser derivado de modelos descrevendo movimento 3D, função de superfície 3D e projeção geométrica da câmera. Como o *campo de movimento* é freqüentemente 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 3.1 [29] apresenta alguns dos modelos para movimento 2D, com seus respectivos modelos 3D e os parâmetros usados para gerar o campo de vetores de movimento. Na Figura 3.35, são apresentados exemplos dos campos de vetores de movimento, correspondentes a predição de movimento-compensado de um quadrado centralizado, para os modelos *translacional* e *affine* (descritos na Tabela 3.1).

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.

Tabela 3.1 - Modelos de movimento.

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
Affine	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	3D Affine	Ortográfico
Projetivo linear	8	$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 + a_2x + a_3y \\ 1 + a_4x + b_4y \\ b_1 + b_2x + b_3y \\ 1 + a_4x + b_4y \end{pmatrix} - x$	Planar	3D Affine	Perspectiva
Quadrático	12	$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 + a_2x + a_3y + a_6x^2 + a_5xy + a_4y^2 \\ b_1 + b_2x + b_3y + b_6x^2 + b_5xy + b_4y^2 \end{pmatrix}$	Parabólica	3D Affine	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

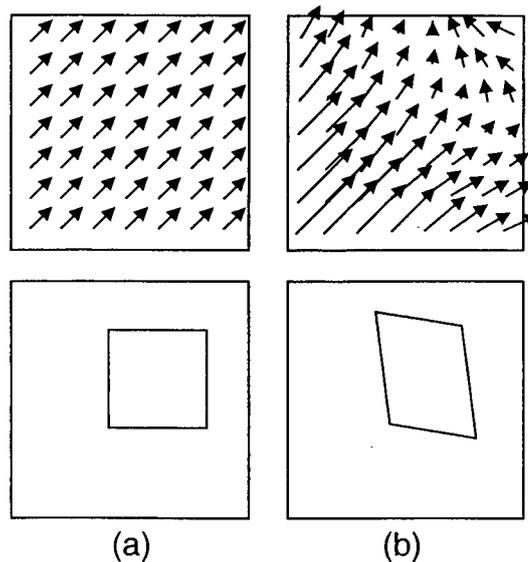


Figura 3.35 - Exemplos de campos de vetores; (a) modelo *translacional*, (b) modelo *affine*.

A equação paramétrica do modelo *affine* 2D, apresentada na Tabela 3.1 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).

$$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

3.9 - CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO

Os fundamentos e conceitos apresentados neste capítulo servirão 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. O conhecimento sobre operadores morfológicos permitirá determinar a seqüência do processamento morfológico, utilizada no capítulo seguinte para extrair os padrões da íris.

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 *affine* 2D será utilizado no próximo capítulo para estimação do movimento, permitindo compensar os efeitos por ele causados, possibilitando assim, um alinhamento das imagens das íris a serem comparadas.

CAPÍTULO 4 – PROCESSAMENTO DA ÍRIS

O presente capítulo trata do processamento da íris. Nele serão abordado as diversas etapas do processamento, bem como os operadores e algoritmos utilizados. Inicialmente é apresentada uma descrição do sistema de reconhecimento automatizado de íris, passando a seguir pela descrição dos operadores. Na seqüência é abordada a etapa de pré-processamento, onde se encontra a descrição do algoritmo desenvolvido para segmentação da imagem do olho. A próxima etapa é a do processamento morfológico, onde são evidenciados os padrões da íris para extrair suas características, cujo algoritmo também é apresentado. A seguir, é abordada a normalização, que engloba os processos de reconstrução da imagem e o alinhamento, executados na etapa de processamento morfológico. A finalidade desta etapa é fazer a compensação de movimento da imagem submetida ao sistema, possibilitando a comparação de padrões com base na representação proposta, apresentada posteriormente no final do capítulo. Na etapa seguinte é apresentado o algoritmo desenvolvido para eliminar os *pixels redundantes* das estruturas, cuja presença dificulta a obtenção da representação. Uma vez eliminados, resultam nos esqueletos das estruturas, para deles extrair a representação proposta.

4.1 - RECONHECIMENTO AUTOMATIZADO DE ÍRIS

O processo de reconhecimento automatizado de íris engloba basicamente a aquisição da imagem, a localização da *região de interesse (ROI – Region Of Interest)*, a extração e a comparação de padrões [2, 27, 30]. Sistemas de reconhecimento tem sido propostos, abordando de várias maneiras os diversos passos do processo.

Na etapa de aquisição da imagem, está um dos maiores desafios para os sistemas de reconhecimento automatizado de íris: capturar uma imagem de alta qualidade por meios não-invasivos ao usuário. Em outras palavras, obter uma

imagem com resolução e nitidez suficientes para suportar o reconhecimento, com um bom contraste no interior da íris (sem recorrer a uma iluminação que cause incomodo ao usuário) e ainda bem enquadrada (sem coagir excessivamente o usuário). Os primeiros sistemas de reconhecimento automatizados propostos [2], dispunham de todo um aparato para posicionamento do indivíduo/olho, iluminação (fonte de luz, polarizadores, difusores, etc.) e captura da imagem (câmeras, lentes e dispositivo de armazenamento). Estes sistemas impunham certas restrições aos usuários, pois necessitavam de uma iteração para o correto posicionamento do olho e para uma iluminação adequada. Portanto necessitavam de ambientes controlados para a aquisição da imagem. Atualmente os sistemas de reconhecimento automatizados possibilitam um maior grau de liberdade ao usuário, com produtos comerciais sendo empregados em diversas aplicações.

Localizar a região que corresponde a íris na imagem adquirida é o próximo passo no processo de reconhecimento. Devido ao fato que a imagem adquirida não contempla apenas a íris, mas também contém informações da região ao redor do olho, faz-se necessário determinar a localização da *ROI*. A *ROI* geralmente está localizada na porção dentro do *limbus* (fronteira entre a *esclera* e a íris) e fora da pupila. A íris pode sofrer uma oclusão parcial das pálpebras, causando uma alteração nos limites da *ROI*, que deve incluir então a região abaixo da pálpebra superior e acima da pálpebra inferior. Outros fatores podem influenciar na localização da íris, como o baixo contraste entre uma íris densamente pigmentada e sua pupila, a variação de contraste da pálpebra (que depende da pigmentação relativa entre a pele e a íris), fronteira irregular da pálpebra e a presença de cílios. Portanto, estes fatores sugerem que a localização da *ROI* deve ser sensível a uma larga faixa de contraste de bordas, robusta à fronteiras irregulares, e capaz de operar com oclusão variável.

Depois de localizada a *ROI* na imagem adquirida, é necessário identificar e extrair os padrões existentes na íris. Para que a comparação de padrões possa ser realizada com sucesso, a imagem contendo a íris submetida ao sistema – Figura 4.1(b), deve estar alinhada com a “imagem” armazenada no banco de dados – Figura 4.1(a), com a qual será comparada. O alinhamento possibilita uma comparação mais detalhada, pois permite estabelecer uma correspondência mais precisa entre as estruturas dispostas ao longo das imagens. A Figura 4.1(c) ilustra o

efeito causado pela sobreposição das imagens, sem a devida compensação de movimento. As setas indicam as regiões onde não haveria sobreposição, o que acarretaria em perda de informação das estruturas nelas localizadas. Em 4.1(d) a imagem submetida ao sistema foi compensada, com base na "imagem" armazenada no banco de dados. Este alinhamento deve compensar os efeitos da translação (deslocamento lateral em qualquer direção num plano paralelo à lente da câmera), escalamento (variação da distância entre a câmera e o olho) e rotação (mudança na posição angular com relação ao eixo óptico da câmera).

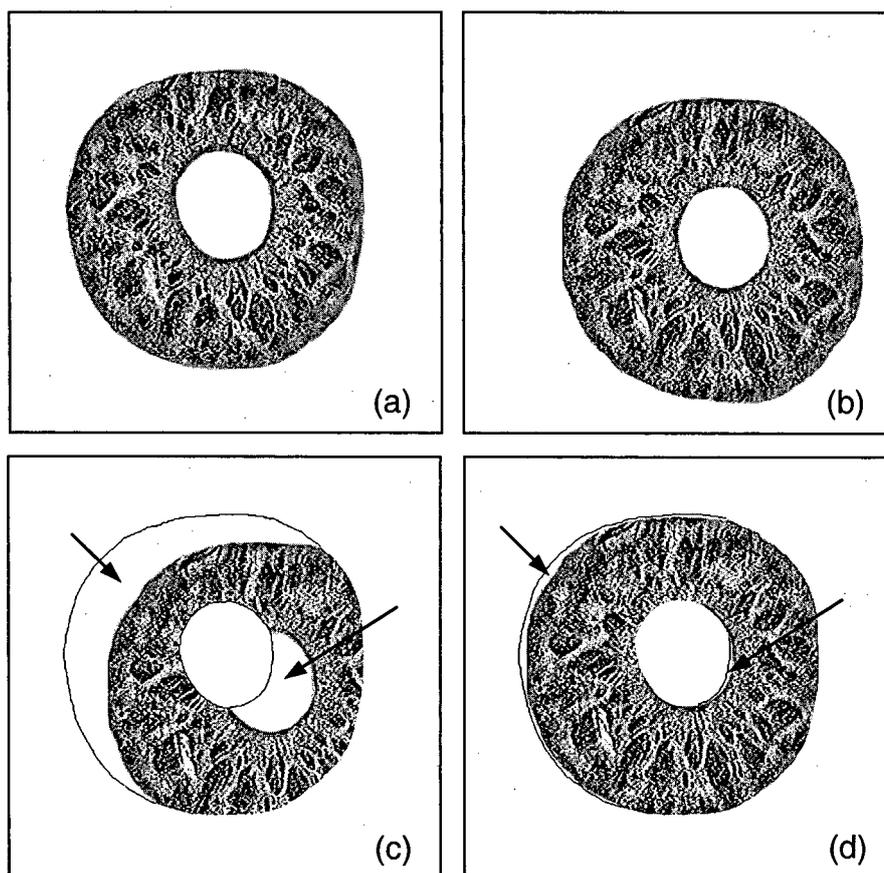


Figura 4.1 - Alinhamento das imagens da íris: (a) íris banco de dados, (b) íris submetida ao sistema, (c) sobreposição sem compensação e (d) íris compensada.

Uma representação deve ser adotada para caracterizar os padrões da íris. Esta representação deve evidenciar as diferenças existentes entre padrões distintos, possibilitando sua comparação para tomada de decisão, ou seja, determinar se um padrão de íris submetido ao sistema coincide ou não com um padrão armazenado no banco de dados. A Figura 4.2 apresenta um diagrama do sistema de reconhecimento de íris.

A extração de características pode ser implementada através de diversas técnicas diferentes [2, 3, 15, 16, 31, 32]. No entanto, a escolha da característica, bem como da técnica a ser utilizada, deve levar em conta a contribuição em termos de informação que pode ser obtida da mesma, ou seja, o quão boa é uma determinada característica para *distinguilidade* de padrões. Com este objetivo, a abordagem baseada em *operadores morfológicos* [3, 26, 27, 33] é utilizada para identificar padrões existentes na íris. A idéia básica consiste em evidenciar estes padrões, aplicando uma determinada seqüência destes operadores para obter as estruturas e chegar a uma representação, de onde serão retiradas informações para caracterizá-los.

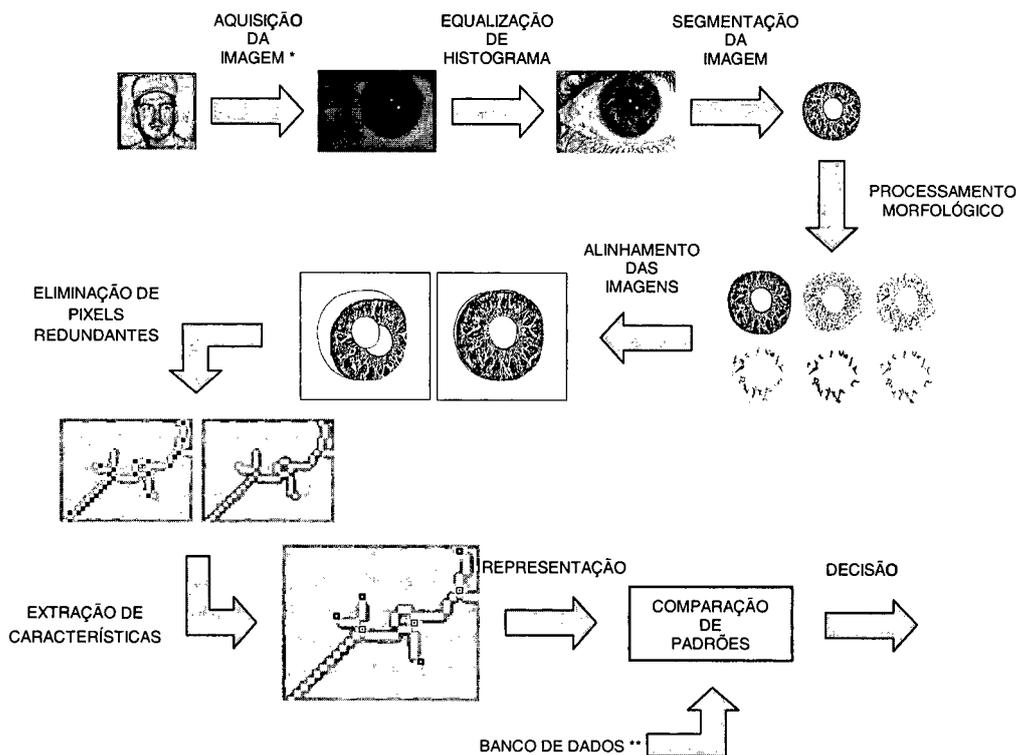


Figura 4.2 - Diagrama do sistema de reconhecimento de íris.

A utilização de algoritmos baseados em operadores morfológicos apresenta vantagens relacionadas à baixa complexidade computacional (tempo de processamento) e fácil integração em hardware. A representação extraída das estruturas através do processamento morfológico está fundamentada em *componentes conectados*. Na análise automatizada de imagens, a capacidade de atribuir rótulos (*labels*) diferentes para diversos *componentes conectados* é uma

característica muito importante. Operadores morfológicos podem ser utilizados para extrair *componentes conectados* e rotulá-los, podendo ser implementados de diversas maneiras.

Devido a grande quantidade de características espaciais da íris humana, que se manifestam em uma variedade de escalas, a escolha da representação afeta diretamente a quantidade de informação a ser armazenada. Na abordagem proposta, a representação está baseada nas informações dos *end-points* (pontos extremos), dos *nós* (pontos de onde partem as ramificações) e dos *ramos* – Figura 4.3. Na Figura 4.3, os pixels marcados com o símbolo □ correspondem aos *end-points*, e os marcados com ■ aos *nós*. Os *ramos* correspondem aos conjuntos de pixels da estrutura (em branco) que partem dos *nós*, até atingir um *end-point* ou outro *nó*. Com a representação proposta, procura-se reduzir a quantidade de informação necessária para caracterizar a íris, quando comparada a outros tipos de representação [2, 15, 16, 31, 32], gerando uma representação compacta (da ordem de centenas de bytes) de fácil armazenamento. A imagem da íris não é armazenada, mas apenas sua representação.

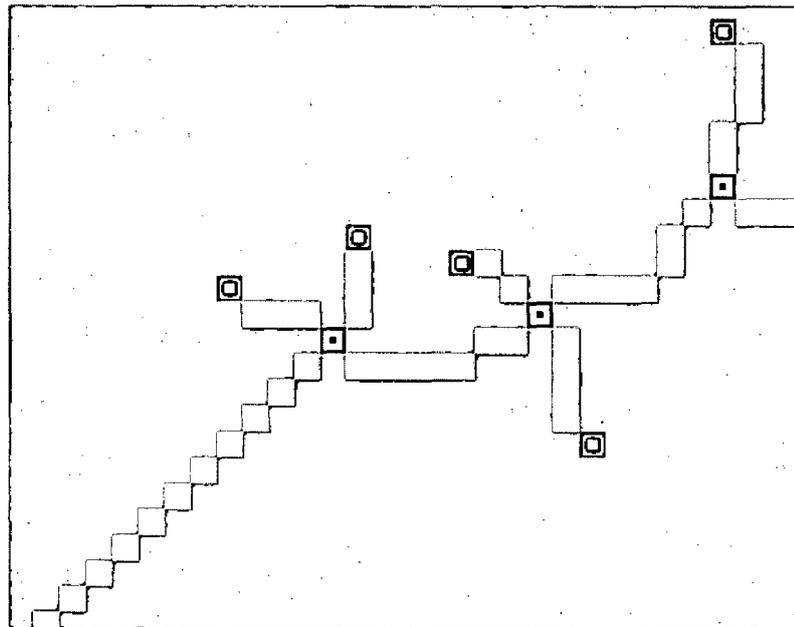


Figura 4.3 - Representação proposta.

4.2 - DESCRIÇÃO DOS OPERADORES

4.2.1 - Threshold

O operador *threshold* [3, 25, 26, 27] gera uma imagem binária através da *limiarização* da imagem F pelos valores $t1$ e $t2$. Um pixel tem valor **1** quando o valor do pixel correspondente em F está entre os valores dos limiares $t1$ e $t2$.

$$(t1 \leq F \leq t2)(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } t1 \leq F(x) \leq t2, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Este operador também pode utilizar um limiar simples (t), onde os pixels na imagem F cujos valores estão acima de t recebem o valor **1**, caso contrário recebem **0**.

4.2.2 - Opening

O operador *abertura* (*opening*) [3, 25, 26, 27, 28] é o resultado de uma *erosão* (*erosion*) seguida por uma *dilatação* (*dilation*).

$$\gamma_b(F) = \delta_b(\varepsilon_b(F)) \quad (4.2)$$

4.2.3 - Area Opening

O operador *area opening* [3, 26, 27, 35] remove qualquer *componente conectado* com área menor que λ de uma imagem binária F . A conectividade é dada pelo *SE* \mathbf{b} . Para imagens em tons de cinza ($f: F \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$) o operador pode ser generalizado aplicando sucessivamente o operador binário nas camadas da imagem F , tomando-se dos níveis de limiar mais altos para os mais baixos.

$$\gamma_\lambda^a(f) = \bigvee_{S \in \mathcal{A}_{b,\lambda}} \gamma_S(f) \quad (4.3)$$

$$\mathcal{A}_{b,\lambda} = \{X \subset F : X \text{ é } \mathbf{b} \text{ conectado, } \text{Área}(X) \geq \lambda\}$$

4.2.4 - Closing

O operador *fechamento* (*closing*) [3, 25, 26, 27, 28] é o resultado de uma *dilatação* (*dilation*) seguida por uma *erosão* (*erosion*).

$$\varphi_b(F) = \varepsilon_b(\delta_b(F)) \quad (4.4)$$

4.2.5 - Close-by-reconstruction Top-Hat

O operador *close-by-reconstruction top-hat* cria uma imagem subtraindo a imagem original F de sua versão *fechada por reconstrução* (*closing by reconstruction*) [3, 26, 28, 36], definida por dois SE : um para a dilatação (b_{dil}) e outro para conectividade (b_c).

$$\varphi^{rec\ th}(F) = \varphi_{b_{dil}, b_c}^{rec}(F) - F \quad (4.5)$$

Para obter a imagem reconstruída aplica-se uma seqüência “infinita” de *dilatação e interseção* (chamada de *dilatação condicional*), até que o resultado atinja uma estabilidade. Na prática, a *dilatação condicional* converge rapidamente para alcançar a estabilidade.

$$\rho_{b_c, G}(F) = \bigvee_{n \geq 1} \delta_{b_c, G}^n(F) \quad (4.6)$$

Já o *fechamento top-hat* (*close top-hat*) [3, 26, 27, 35, 36] é a diferença entre a imagem *fechada* (*close*) e a original.

$$\varphi^{th}(F) = \varphi_b(F) - F \quad (4.7)$$

4.2.6 - Thinning

O operador *thinning* [3, 26, 28] gera uma imagem binária realizando o *afinamento* da imagem F , também binária. Cada iteração é realizada pela subtração dos pontos que são detectados em F pelos operadores *hit-or-miss* [3, 26, 28], caracterizados por rotações de θ . Aplicando o operador com sucessivas iterações até atingir a estabilidade, resulta numa imagem contendo os *esqueletos* (*skeletons*) [3, 26, 27] de cada estrutura.

4.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO

Durante todo o processo, vários fatores podem influenciar na qualidade da imagem, e por sua vez, na tomada de decisão. Mesmo que a aquisição tenha sido

realizada em condições controladas (iluminação, distância, enquadramento, etc.), para se obter imagens com a melhor qualidade possível (resolução, nitidez e contraste), ainda assim pode ser preciso uma etapa de pré-processamento. Esta etapa é necessária para evidenciar determinadas estruturas da íris, eliminar efeitos indesejáveis (por exemplo, reflexões), e ainda determinar a região de interesse (*ROI*) na imagem adquirida do olho – Figura 4.4(a).

Inicialmente a imagem do olho adquirida (colorida) é convertida para tons de cinza (*gray-scale*). A seguir a imagem é submetida a um pré-processamento para realçamento e melhoria do contraste, utilizando *equalização de histograma* [3, 26] – Figura 4.4.

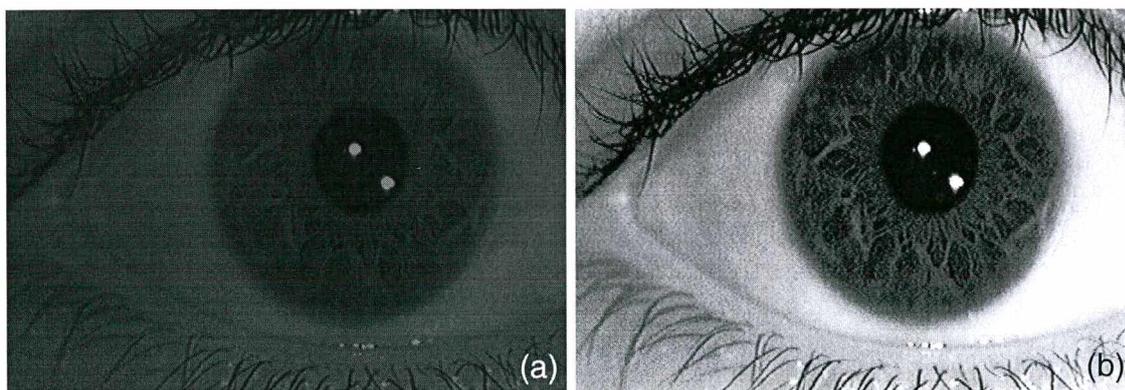


Figura 4.4 - Realçamento e melhoria de contraste da imagem.

Na seqüência, um algoritmo baseado em operadores morfológicos e *limiarização* (*threshold*) é usado para segmentar a imagem do olho e obter a *ROI*, ou seja, a região da íris. O algoritmo de segmentação está dividido em duas etapas. A primeira executa a detecção da fronteira interna (*íris / pupila*) – Figura 4.5 (círculo pontilhado), e a segunda executa a detecção da fronteira externa (*íris / esclera*) – Figura 4.5 (círculo contínuo). A seqüência de passos do algoritmo de segmentação é mostrada a seguir:

- 1º passo a imagem equalizada (em tons de cinza) é submetida a uma operação de *complementação*, ou seja, para cada pixel da imagem é calculado seu complemento de 255 (complemento = $255 - \text{valor do nível de cinza do pixel}$);

- 2º passo a imagem resultante é submetida a uma operação de *limiarização* com nível de limiar $t = 245$, que dá início a etapa de detecção da fronteira interna. O resultado é uma imagem binária que contém a região da pupila (com alguns buracos) e algumas pequenas estruturas;
- 3º passo a imagem binária é submetida ao operador *area opening* para remover qualquer estrutura com área menor que 500 pixels, usando um *SE cruz* de raio 1;
- 4º passo a imagem binária é submetida ao operador *closing*, usando um *SE caixa* de raio 11, para fechar os buracos encontrados na região correspondente a pupila. Desta forma a região da pupila foi delimitada, sendo que sua fronteira corresponde à fronteira interna da íris. Assim, a primeira etapa está concluída;
- 5º passo novamente a imagem complementada, obtida no 1º passo, é submetida a uma operação de *limiarização* com nível de limiar $t = 80$, para dar início a etapa de detecção da fronteira externa. O resultado é uma imagem binária que contém uma região praticamente definida (que corresponde a íris + pupila), com algumas falhas e buracos, além de algumas estruturas;
- 6º passo a imagem binária é submetida ao operador *closing*, usando um *SE caixa* de raio 5, para fechar os buracos encontrados na região correspondente a íris + pupila;
- 7º passo a imagem resultante é submetida ao operador *area opening* para remover qualquer estrutura com área menor que 5000 pixels, usando um *SE cruz* de raio 1. Assim, foi delimitada a região que corresponde a íris + pupila, sendo que a fronteira desta região corresponde à fronteira externa da íris, concluindo assim, a segunda etapa;
- 8º passo as imagens resultantes das duas etapas (4º passo e 7º passo) são combinadas para gerar uma máscara binária, que corresponde a região da íris. Em seguida esta máscara é

sobreposta a imagem equalizada. Os pixels que estão situados na região da íris são mantidos, enquanto que os demais recebem o valor **0**. O resultado é uma imagem (em tons de cinza) que contém apenas a *ROI* (íris), concluindo, assim, a segmentação do olho – Figura 4.6.

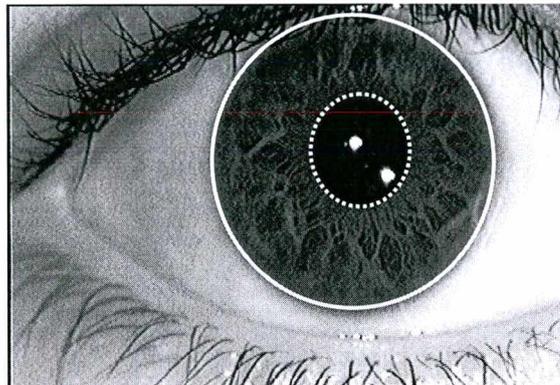


Figura 4.5 - Fronteiras da íris.



Figura 4.6 - Imagem da *ROI* (íris) após segmentação.

4.4 - PROCESSAMENTO MORFOLÓGICO

Depois do pré-processamento a imagem da íris é submetida a uma seqüência de operadores morfológicos com o objetivo de identificar padrões nela existentes. Diversos operadores são associados para gerar novos operadores, com o objetivo de evidenciar estes padrões [3, 26, 27]. A escolha dos operadores, bem como da

seqüência com que eles foram aplicados, foi determinada através de um estudo do comportamento dos padrões existentes na íris e como estes se apresentavam em termos de estruturas, aliado ao estudo das características dos diversos operadores disponíveis. A seguir, é apresentada a seqüência de passos do algoritmo que faz o processamento morfológico da imagem da íris:

- 1º passo a imagem da íris (Figura 4.7(a)) é submetida ao operador *close-by-reconstruction top-hat* com o objetivo de evidenciar as estruturas existentes como um todo. O operador é aplicado utilizando dois *SEs*, sendo um *SE caixa* de raio igual a 5 para a dilatação (b_{dil}) e um *SE cruz* de raio igual a 1 para a conectividade (b_c). A Figura 4.7(b) apresenta o resultado da aplicação do operador, onde se pode observar que alguns padrões começam a se destacar dos demais. A imagem resultante ainda é em tons de cinza;

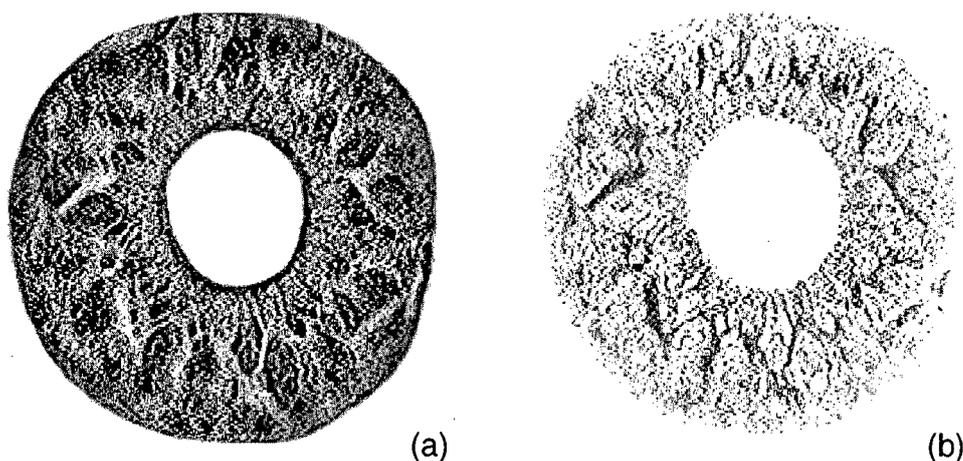


Figura 4.7 - *Close-by-reconstruction Top-Hat*.

- 2º passo com o intuito de enfatizar apenas os padrões que estão se destacando, a imagem resultante da aplicação do operador *close-by-reconstruction top-hat* (Figura 4.8(a)) é submetida ao operador *opening*, utilizando um *SE cruz* de raio igual a 1. Na Figura 4.8(b) é apresentada a imagem (em tons de cinza) do

resultado da aplicação do operador *opening*, onde os padrões que estavam se destacando encontram-se ainda mais evidentes que os demais;

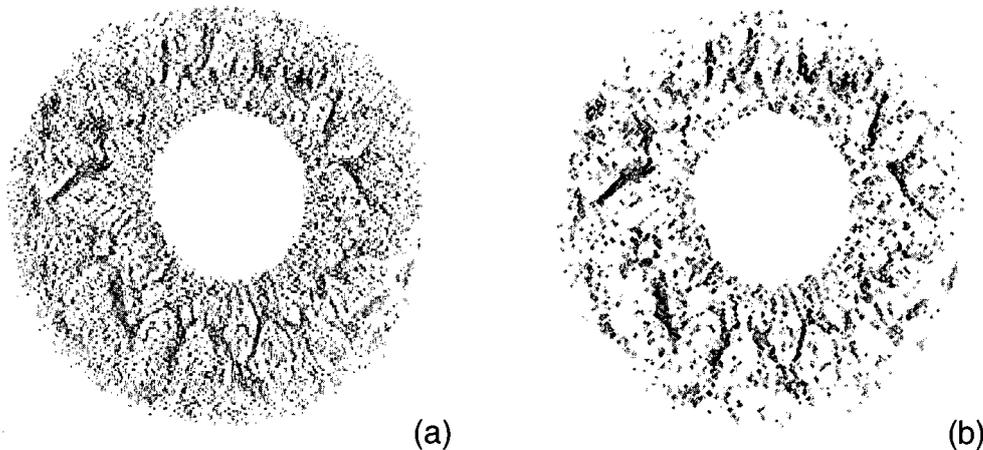


Figura 4.8 - *Opening*.

- 3º passo para eliminar pequenas estruturas que ainda ficaram após a aplicação do operador *opening*, a imagem é submetida ao operador *area opening*. Como a imagem está em tons de cinza (Figura 4.9(a)), o operador em sua versão binária é aplicado sucessivamente nas camadas da imagem, ajustado para remover quaisquer estruturas (*componentes conectados*) com área menor que 200 pixels, usando um *SE cruz* de raio 1. O resultado pode ser visto na Figura 4.9(b), onde os padrões aparecem em diferentes tons de cinza, representando as diferentes camadas onde eles se encontram;
- 4º passo devido à disposição dos padrões em camadas, a imagem em tons de cinza (Figura 4.10(a)) é submetida ao operador *threshold*, para obter uma imagem binária, onde aparecem

apenas as estruturas (padrões) mais relevantes – Figura 4.10(b). A imagem binária gerada pelo operador é obtida através da limiarização da imagem em tons de cinza, utilizando um nível de limiar $t = 15$;

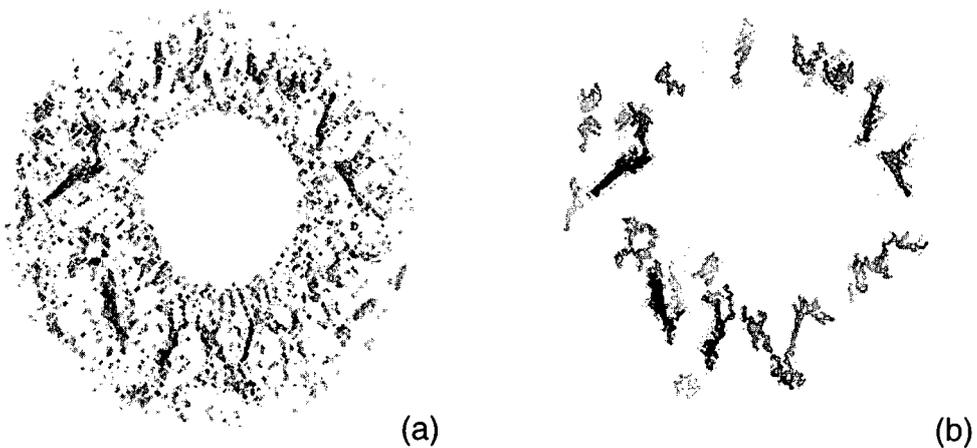


Figura 4.9 - *Area opening*.

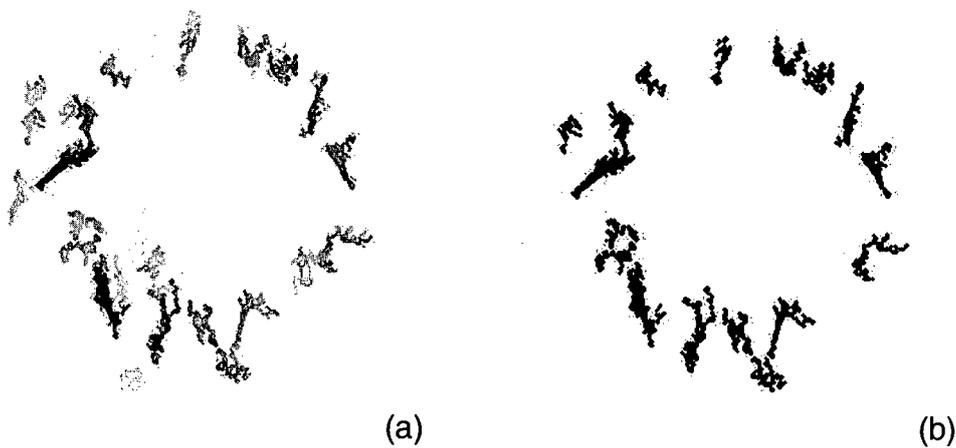


Figura 4.10 - *Threshold*.

- 5º passo a imagem binária gerada após a limiarização é então submetida a uma normalização¹, que toma como referência uma imagem contendo pseudo-estruturas, que são reconstruídas a partir da representação (coordenadas dos *end-points* e dos *nós*) da íris de referência, previamente armazenada no banco de dados;
- 6º passo para chegar a uma representação adequada, a imagem binária contendo as estruturas (Figura 4.11(a)) deve passar por um processo de *afinamento*, pois as estruturas se apresentam como um aglomerado de pixels. A imagem é submetida ao operador *thinning*, que gera uma outra imagem também binária, através da eliminação de pixels detectados pelos operadores *hit-or-miss* (com rotações de $\theta=45^\circ$) a cada iteração. Para obter uma imagem contendo os *esqueletos* de cada estrutura (Figura 4.11(b)), o operador *thinning* é aplicado com sucessivas iterações até atingir a estabilidade. Na prática, isto acontece com poucas iterações, fazendo com que o resultado convirja rapidamente para a estabilidade.

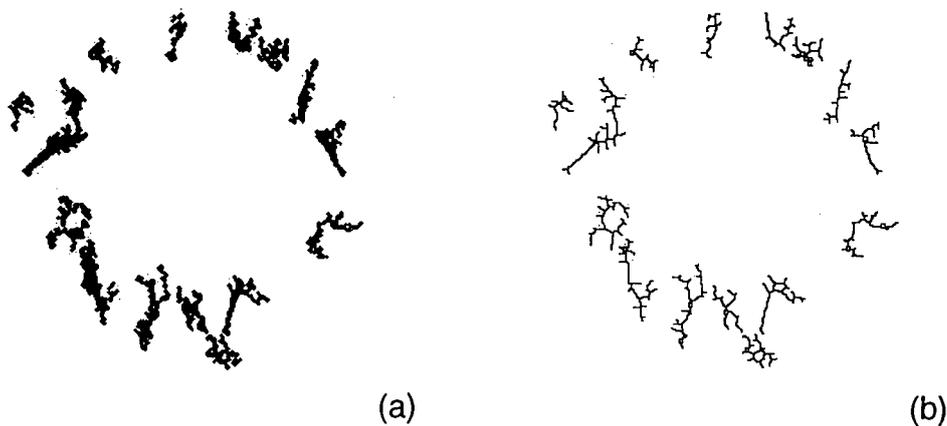


Figura 4.11 - *Thinning*.

No entanto, após o *afinamento* as estruturas ainda apresentam uma quantidade considerável de *pixels redundantes*, dificultando, assim, a tarefa de

¹ O processo de normalização será abordado na seção 4.5, por tratar-se de um outro algoritmo.

identificação dos *end-points* (pontos extremos nos esqueletos das estruturas) e dos *nós* (pontos de onde partem as ramificações nos esqueletos das estruturas), que são a base da representação adotada. Um algoritmo foi desenvolvido com a finalidade de eliminar os *pixels redundantes*².

4.5 - NORMALIZAÇÃO

Na imagem adquirida, que foi submetida ao sistema, a íris em geral apresenta-se deslocada, se comparada a posição da íris em outra imagem. Isto se dá devido a diferenças no posicionamento do olho na etapa de aquisição da imagem. Para compensar estas diferenças, a imagem binária gerada após a aplicação do operador *threshold* é submetida a uma normalização, que toma como referência uma imagem contendo pseudo-estruturas.

4.5.1 - Reconstrução da Imagem

As pseudo-estruturas são reconstruídas a partir da representação (coordenadas dos *end-points* e dos *nós*) da íris de referência, que se encontra armazenada no banco de dados. A seqüência de passos utilizada no processo de reconstrução é apresentada a seguir:

- 1º passo gerar uma imagem binária, a partir das informações da representação, ou seja, uma imagem contendo as coordenadas dos *end-points* e dos *nós* – Figura 4.12(a), recuperadas do banco de dados;
- 2º passo a imagem gerada é submetida ao operador *dilatação (dilation)*, que é aplicado duas vezes consecutivas, utilizando um *SE caixa* de raio igual a 1 (3x3), para garantir a conectividade de cada estrutura. O resultado é uma imagem binária contendo pseudo-estruturas – Figura 4.12(b), que servirá de base para o alinhamento da imagem gerada após a *limiarização*.

² O algoritmo desenvolvido para eliminação de *pixels redundantes* será apresentado na seção 4.6.

Em outras palavras, a partir da representação armazenada no banco de dados, são geradas imagens que serão tomadas como referência para o alinhamento das correspondentes imagens submetidas ao sistema.

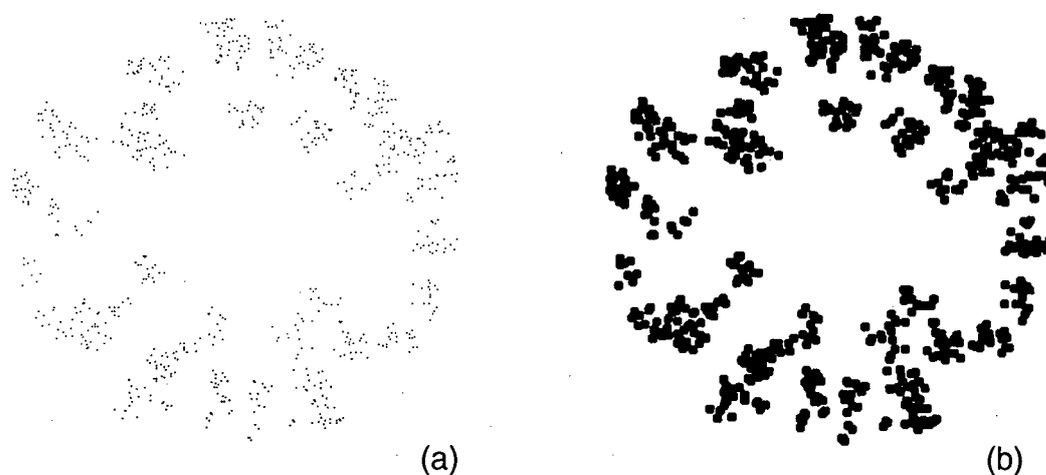


Figura 4.12 - Imagem reconstruída contendo as pseudo-estruturas.

4.5.2 - Alinhamento

No processo de alinhamento são feitas as devidas compensações dos efeitos causados pela translação, rotação e escalamento, através de um algoritmo baseado no *modelo de movimento Affine (affine motion model)*³ [27, 29]. A escolha deste modelo bidimensional (2D) para representar o movimento aparente está baseada nas características de movimento que as imagens adquiridas estão sujeitas e também por tratar-se de um modelo simples de fácil implementação, que atende os requisitos necessários para descrever o movimento real das imagens.

Em geral, as imagens apresentam um movimento global, no que diz respeito à região de movimento. No entanto, com relação ao tipo de movimento, o que se apresenta com maior frequência é o de translação (deslocamento lateral em qualquer direção no plano da imagem), podendo ainda apresentar pequenas

³ A descrição do *modelo de movimento Affine* encontra-se na seção 3.8 do capítulo 3.

rotações (com relação ao eixo ótico da câmera) e algum escalamento (variação da distância entre o olho e a câmera). A equação paramétrica que descreve o movimento (4.8), 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).

$$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

O algoritmo que faz a compensação dos efeitos causados pelos movimentos toma como referência a imagem que contém as pseudo-estruturas, e a compara com a imagem obtida após a *limiarização*. 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. A idéia básica do algoritmo é estimar os parâmetros que melhor representam os efeitos causados pelos referidos movimentos.

A estimação de movimento está baseada no critério do mínimo erro absoluto (MAD – Minimum Absolute Difference) [27], onde os parâmetros estimados fornecem o movimento que a imagem está sujeita. Através dos parâmetros estimados é possível fazer a compensação de movimento da imagem obtida após a *limiarização*. Desta forma, as imagens podem ser alinhadas, ficando com as estruturas sobrepostas para posteriormente serem comparadas (*matching*).

4.6 - DESENVOLVIMENTO DE OPERADORES

Para possibilitar a identificação dos pixels correspondentes aos *end-points* e *nós*, é necessário eliminar os *pixels redundantes* existentes nas estruturas, pois estas ainda apresentam uma quantidade considerável deles após o *afinamento*. A Figura 4.13 mostra parte do esqueleto de uma estrutura, onde os *pixels redundantes*, os *end-points* e os *nós* podem ser observados.

A idéia básica do algoritmo desenvolvida para eliminar pixels redundantes consiste em determinar *caminhos* (*paths*), tal que, para dois pixels adjacentes só exista um *caminho* que os conecta. No exemplo mostrado na Figura 4.14, *p* e *q* são pixels adjacentes, mas existem dois *caminhos* possíveis entre eles: um direto (diagonal) e outro que passa por *r*. O mesmo acontece com *p* e *s*, que possuem um *caminho* direto e outro passando por *t*. Então os pixels *r* e *t* são redundantes, pois mesmo sendo eliminados, *p* continua conectado a *q* e *s* por meio de um *caminho* único.

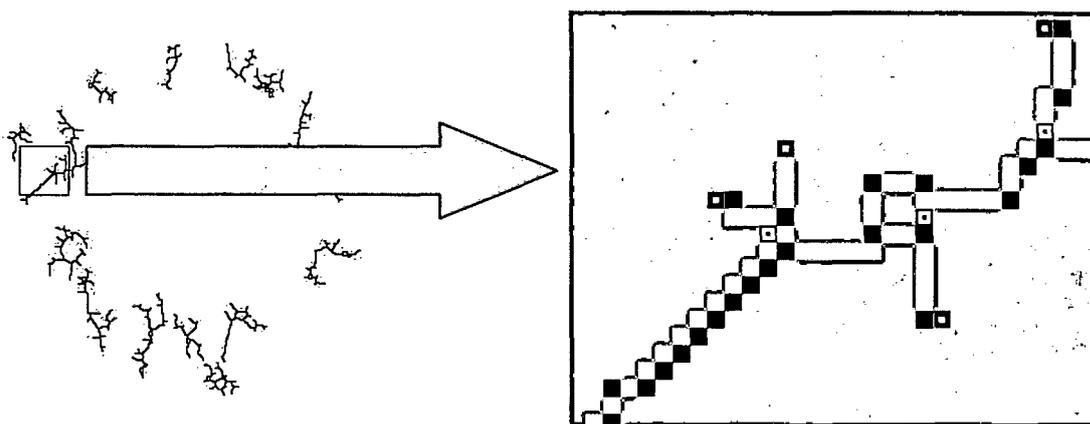


Figura 4.13 - No detalhe: *pixels redundantes* (preto), *end-points* (◻) e *nós* (◻).

Para casos simples, como o deste exemplo, o raciocínio funciona bem. No entanto os padrões encontrados normalmente são mais complexos, necessitando de regras adicionais para evitar a eliminação de pixels que causem uma quebra de conexão (*gap*) na estrutura do padrão.

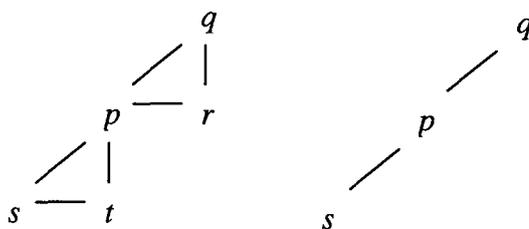


Figura 4.14 - Caminhos (*paths*).

A Figura 4.15 mostra a estrutura de um padrão, que apresenta diversos *pixels redundantes*. Na Figura 4.15(a) a estrutura original e em 4.15(b) o problema da

quebra de conexão, que surge após a eliminação dos *pixels redundantes* levando em consideração apenas os pixels diagonalmente conectados.

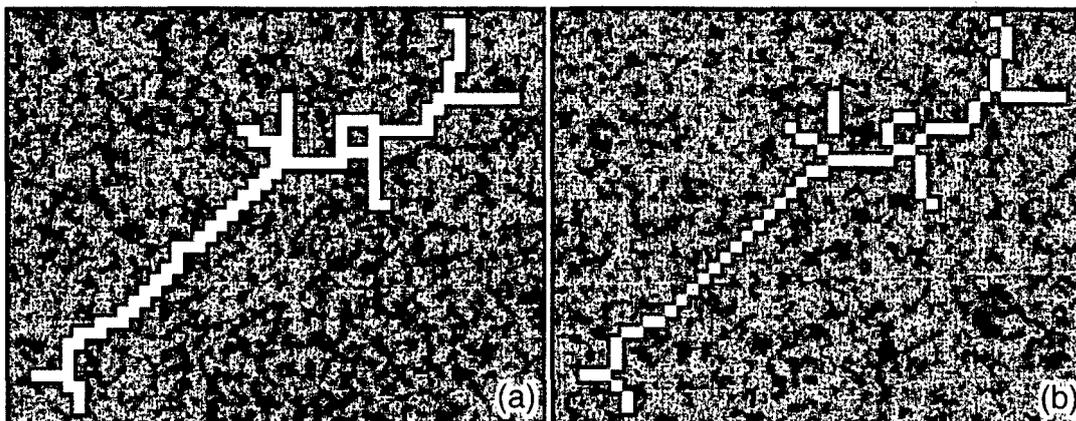


Figura 4.15 - Estrutura de um padrão.

A quebra de conexão pode ser causada se a regra utilizada para eliminação dos *pixels redundantes* está baseada apenas em caminhos diagonais, ou seja, para cada pixel p são verificados os pixels pertencentes ao conjunto dos seus vizinhos diagonais (N_D), ou seja, $N_D(p)$ – Figura 4.16(a). O problema pode ser resolvido através da extensão da verificação dos pixels da vizinhança, não apenas para os $N_D(p)$, mas também para seus 4-vizinhos, $N_4(p)$, que em conjunto correspondem aos 8-vizinhos do pixel p , $N_8(p)$ (Figura 4.16(b)), garantindo assim que as conexões existentes serão preservadas.

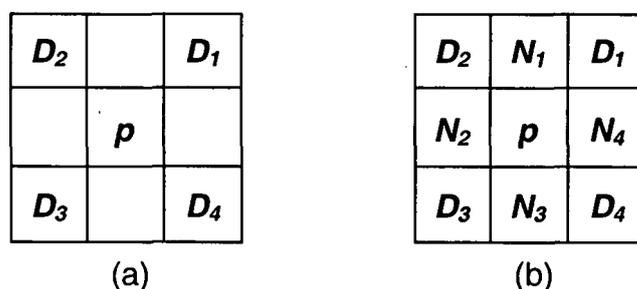


Figura 4.16 - (a) Vizinhos diagonais e (b) 8-vizinhos, do pixel p .

Com relação à disposição dos pixels na vizinhança de p , a notação adotada 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 .

Para eliminação dos *pixels redundantes*, são utilizados dois tipos de *SEs* – Figura 4.17. A Figura 4.17(a) exhibe o primeiro *SE*, que será chamado de **SE-1**, e em 4.17(b) sua versão rotacionada de 90° (sentido horário), que será chamado de **SE-1r**. O outro *SE*, que será chamado de **SE-2**, é apresentado em 4.17(c) e sua versão rotacionada de 90° (sentido horário) em 4.17(d), que será chamado de **SE-2r**.

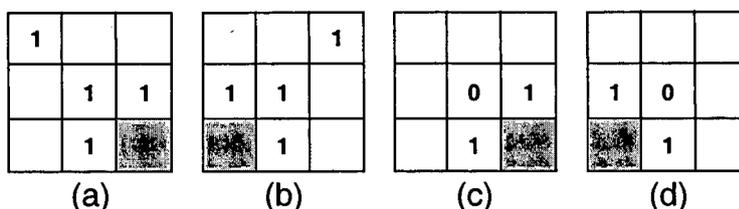


Figura 4.17 - Os *SEs* utilizados para eliminação dos *pixels redundantes*.

O princípio básico do algoritmo é semelhante ao da operação *hit-or-miss*, onde é feita a translação do *SE* (origem) por todos os pixels da imagem, comparando os pixels do *SE* com os que estão abaixo dele na imagem. A diferença é que no algoritmo, quando os pixels do *SE* coincidem exatamente com os pixels da imagem, o pixel a ser modificado não é mais o que está abaixo da origem do *SE*. O pixel a ser modificado depende do *SE* que está sendo utilizado, onde na Figura 4.17, para cada *SE*, estes pixels estão representados em destaque (fundo cinza). Então, quando houver a coincidência dos pixels, o referido pixel (fundo cinza) receberá o valor 0.

A seguir é apresentada uma descrição do algoritmo para eliminação de *pixels redundantes*. O algoritmo inicia uma varredura na imagem em busca de pixels com valor igual a 1. Quando um pixel (p) nesta condição é encontrado, inicia-se a verificação dos pixels localizados na sua vizinhança. A posição do pixel na vizinhança é que determina qual *SE* será utilizado. A seqüência de verificação segue a seguinte ordem, com relação aos *SEs*:

- 1º passo a origem do **SE-1** é posicionada sobre o pixel N_1 . Se houver a coincidência dos pixels do **SE-1** com os correspondentes pixels na imagem, o pixel N_4 recebe o valor 0 ao final desta etapa de verificação – Figura 4.18(a) e 4.18(b);

- 2º passo a origem do **SE-2** é posicionada sobre o pixel **N_1** . O procedimento de verificação é o mesmo descrito no 1º passo e em caso de coincidência dos pixels, novamente o pixel **N_4** recebe o valor **0** – Figura 4.18(c) e 4.18(d);
- 3º passo a origem do **SE-1r** é posicionada sobre o pixel **N_1** e repetindo o procedimento, se houver coincidência dos pixels, o pixel **N_2** é que recebe o valor **0** – Figura 4.19(a) e 4.19(b);
- 4º passo a origem do **SE-2r** é posicionada sobre o pixel **N_1** e se houver coincidência dos pixels, o pixel **N_2** recebe o valor **0** – Figura 4.19(c) e 4.19(d);
- 5º passo a origem do **SE-1** é posicionada sobre o pixel **N_2** . No entanto, em caso de coincidência dos pixels, o pixel **N_3** é que recebe o valor **0** – Figura 4.20(a) e 4.20(b);
- 6º passo a origem do **SE-2** é posicionada sobre o pixel **N_2** . Novamente, se houver a coincidência dos pixels, o pixel **N_3** recebe o valor **0** – Figura 4.20(c) e 4.20(d);
- 7º passo a origem do **SE-1r** é posicionada sobre o pixel **N_4** . Em caso de coincidência dos pixels, o pixel **N_3** recebe o valor **0** – Figura 4.21(a) e 4.21(b);
- 8º passo a origem do **SE-2r** é posicionada sobre o pixel **N_4** . Se houver a coincidência dos pixels, o pixel **N_3** recebe o valor **0** – Figura 4.21(c) e 4.21(d);
- 9º passo depois de terminada a verificação, são alterados na imagem os pixels que tiveram seu valor substituído por **0** nos passos anteriores – Figuras 4.18(b) e (d), 4.19(b) e (d), 4.20(b) e (d) e 4.21(b) e (d), finalizando assim esta etapa de verificação para dar continuidade à varredura da imagem.

Nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21, o posicionamento do **SE** aparece em destaque (bordas em negrito), onde os pixels cuja notação aparece em negrito, correspondem às posições onde os pixels do **SE** devem coincidir com os da

imagem. As posições que apresentam o fundo cinza correspondem aquelas que podem ter seu valor modificado, de acordo com as coincidências entre os pixels do SE e da imagem.

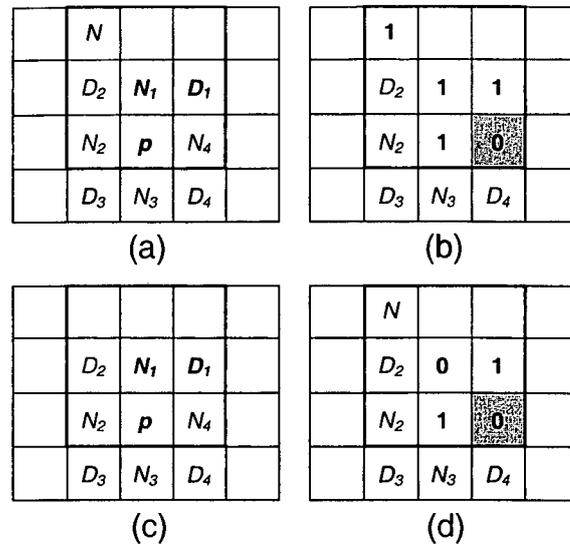


Figura 4.18 - Sequência de verificação, 1º e 2º passos.

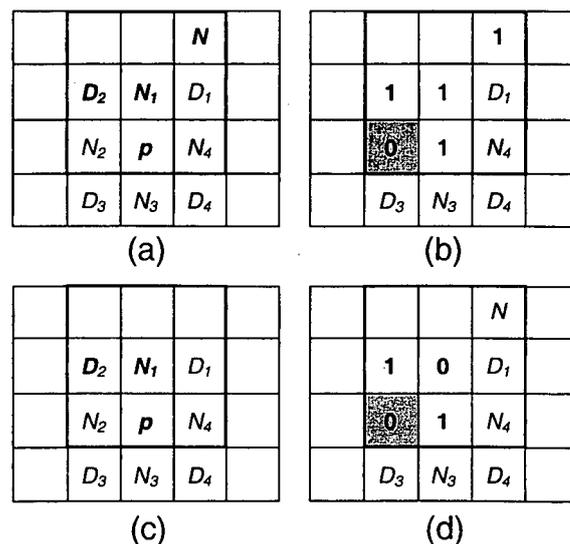


Figura 4.19 - Sequência de verificação, 3º e 4º passos.

O resultado da aplicação do algoritmo pode ser visto na Figura 4.22, onde os *pixels redundantes* foram eliminados e as quebras de conexão observadas na Figura 4.15(b) não estão mais presentes.

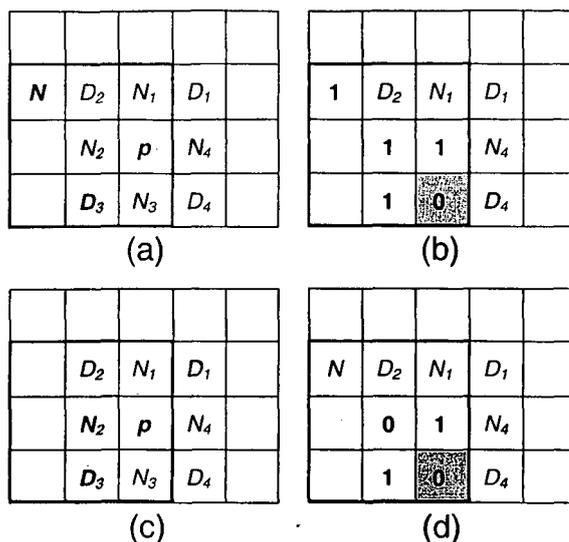


Figura 4.20 - Seqüência de verificação, 5º e 6º passos.

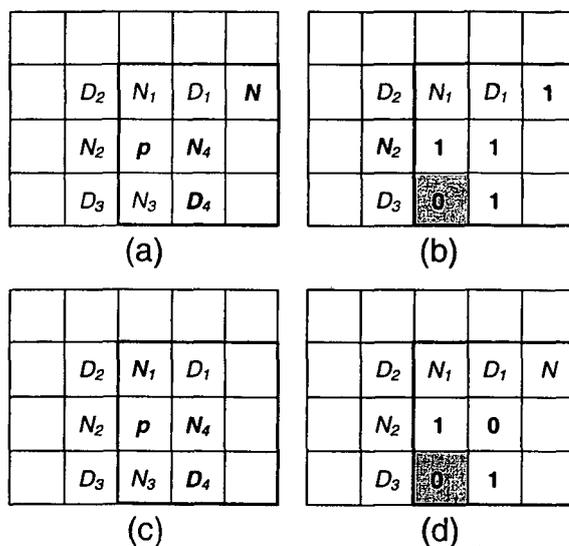


Figura 4.21 - Seqüência de verificação, 7º e 8º passos.

4.7 - REPRESENTAÇÃO

Depois de eliminar os *pixels redundantes* da imagem contendo os *esqueletos* das estruturas, o próximo passo é a identificação dos *end-points* e dos *nós*. O processo de identificação começa com a verificação dos pixels da vizinhança $N_8(p)$. Como um *end-point* é um pixel localizado em uma das extremidades de um ramo, se apenas um dos $N_8(p)$ for igual a 1, o pixel em questão é um *end-point* – Figura

4.23(a). Entretanto, para identificar um *nó* é necessário que três ou mais pixels de $N_8(p)$ sejam iguais a 1 – Figura 4.23(b).

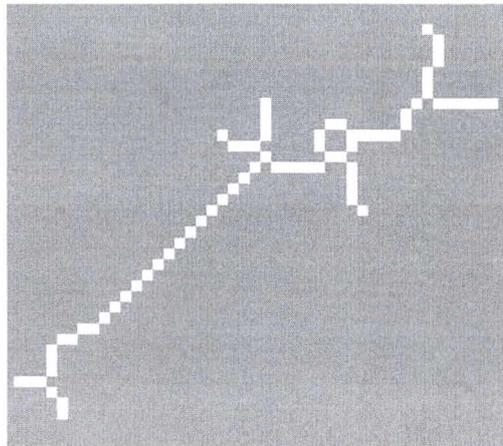


Figura 4.22 - Estrutura após eliminação dos pixels redundantes, sem quebras de conexão.

A princípio o processo de identificação estaria concluído se não houvesse a necessidade de eliminar *nós redundantes*. Tais *nós* são decorrentes da proximidade entre os *nós*. A métrica utilizada para eliminar os *nós redundantes* é a seguinte: se nas proximidades de um determinado *nó* existem outros *nós*, e estes se encontram dentro de uma região com um raio de 3 pixels – Figura 4.23(b), calcula-se o ponto médio entre os *nós*, e estas coordenadas corresponderão ao *nó médio*, que substituirá os demais – Figura 4.23(c).

Uma vez identificados os *end-points* e os *nós*, é feito um mapeamento de suas coordenadas, para em seguida dar início à etapa de comparação (*matching*), com base na representação proposta. As coordenadas dos *nós* são comparadas às dos *nós* da íris de referência (armazenada no banco de dados), para identificar os *nós coincidentes*. A partir das coordenadas dos *nós coincidentes*, são verificadas suas ramificações para se obter o *número de ramos por nó coincidente*. Em seguida as informações referentes às coordenadas dos *nós coincidentes* e ao *número de ramos por nó coincidente* são analisadas, para constatar se a íris processada é a mesma da que foi tomada como referência, ou não.

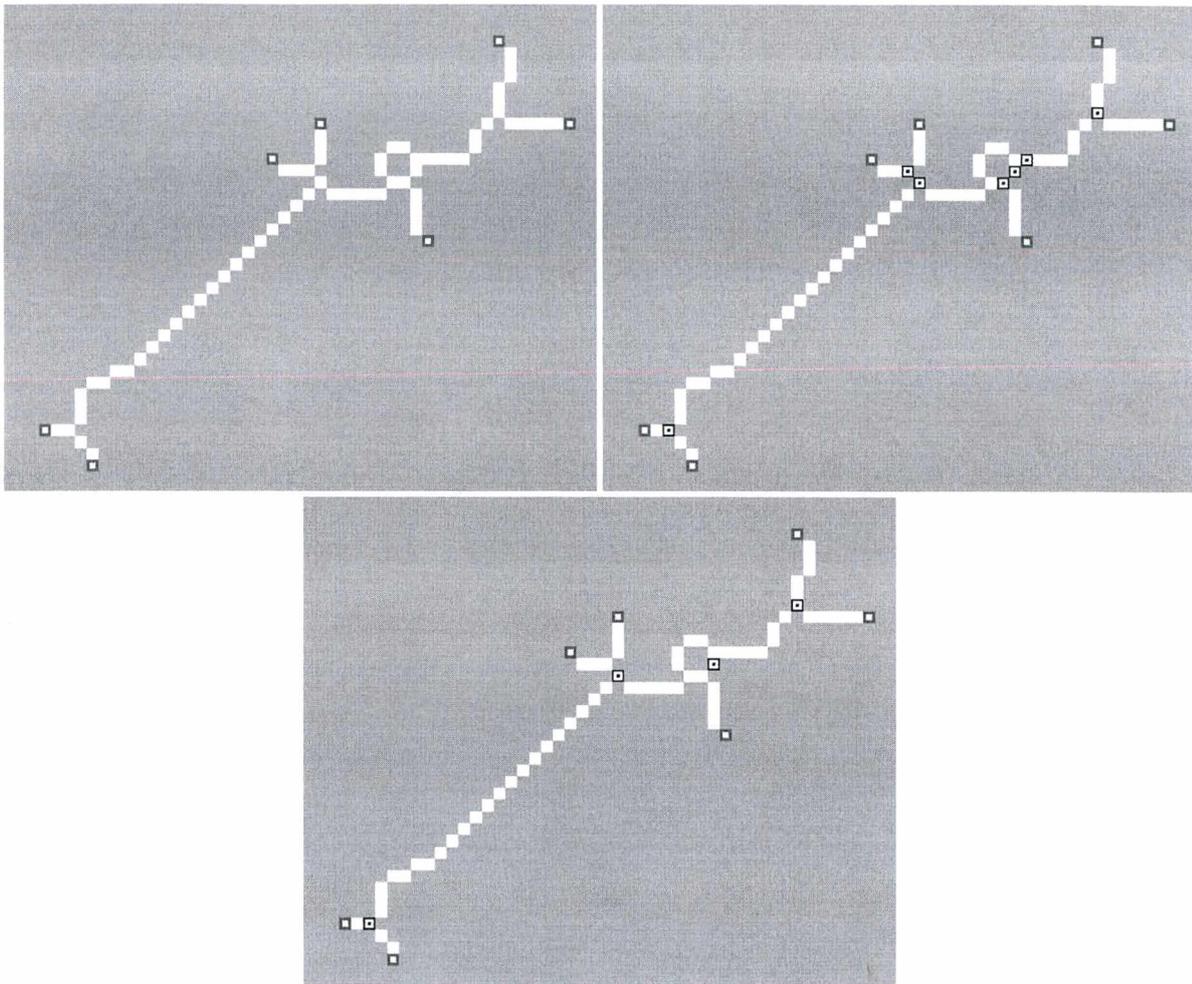


Figura 4.23 - Identificação dos *end-points* (■) e dos nós (□).

A Figura 4.24 apresenta o resultado após a comparação entre as representações de duas íris. Para efeito ilustrativo, sobre as imagens das duas íris foram sobrepostas as estruturas correspondentes a cada uma delas, bem como as respectivas coordenadas dos *nós*, *nós coincidentes* e *end-points*. Desta maneira, foram geradas as imagens da Figura 4.24. Em 4.24(a) e 4.24(b), as estruturas em vermelho correspondem as que apresentam *nós coincidentes*, enquanto que nas em azul eles estão ausentes, ou seja, correspondem as estruturas que estão presentes em apenas uma das duas íris. Em 4.24(c) foi ampliada a região demarcada (pelo moldura em branco) em 4.24(a), para mostrar em detalhes os pixels correspondentes aos *nós* (em azul claro), aos *nós coincidentes* (em laranja) e aos *end-points* (em verde).

Informações como a localização dos *end-points* e dos *nós*, são fundamentais para a extração de características, pois possibilitam a obtenção de novas informações, tais como: distância entre *nós*, tamanho dos *ramos*, orientação dos *ramos*, entre outras, que poderiam tornar a representação ainda mais robusta.

Convém destacar que todos os algoritmos utilizados no decorrer do desenvolvimento desta dissertação, foram implementados no software *Matlab* da *MathWorks Inc.*

4.8 - CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO

A descrição do sistema de reconhecimento automatizado de íris dá uma visão geral das diversas etapas envolvidas no processo. Com base nestas informações foram desenvolvidos os algoritmos apresentados neste capítulo, com a finalidade de executar as diversas operações requeridas nas diferentes etapas do processamento. Foram apresentados algoritmos para:

- segmentação do olho, cujo objetivo é localizar a *região de interesse (ROI)*, ou seja, a íris na imagem adquirida;
- processamento morfológico, cujo objetivo é evidenciar e extrair padrões existentes na íris;
- normalização, cujo objetivo é a compensação de movimento das imagens, que permite alinhar as estruturas para uma posterior comparação;
- eliminação de *pixels redundantes*, cujo objetivo é retirar das estruturas os pixels que dificultam a identificação dos pontos (*end-points* e *nós*) que são a base da representação adotada, sem causar quebras de conexões nas estruturas;
- identificação de *end-points* e *nós*, cujo objetivo é possibilitar uma comparação baseada na representação proposta, para verificar se a íris submetida ao sistema é a mesma da que foi tomada como referência.

Através das simulações dos algoritmos apresentados neste capítulo, será possível no próximo capítulo chegar aos resultados que permitirão uma análise, para verificar a eficiência da abordagem proposta para o reconhecimento de íris.

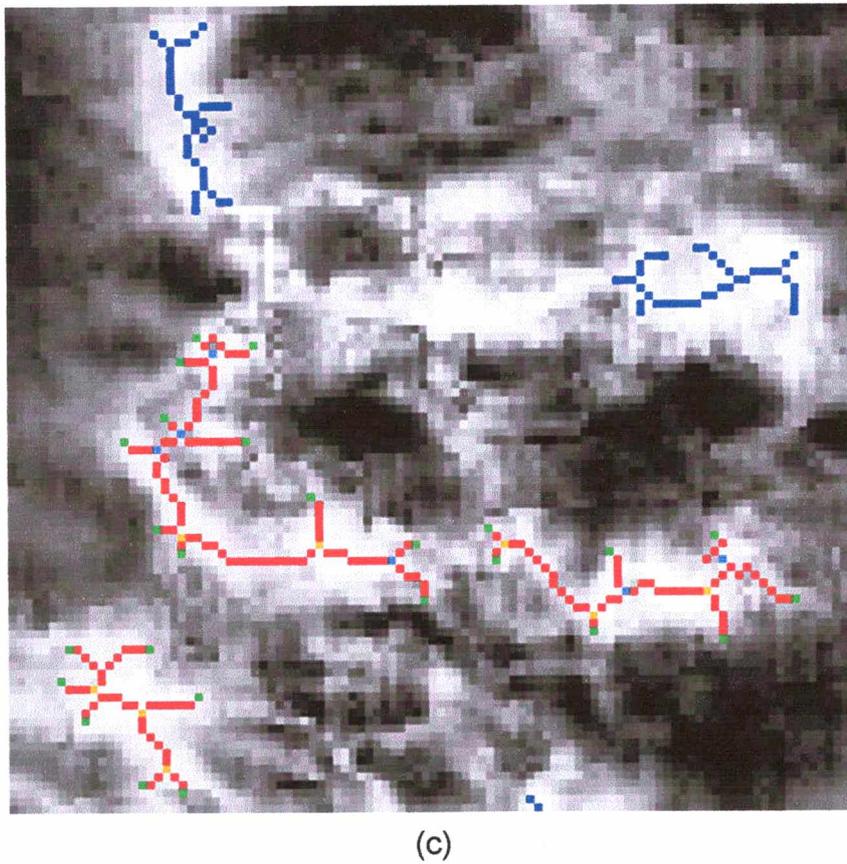
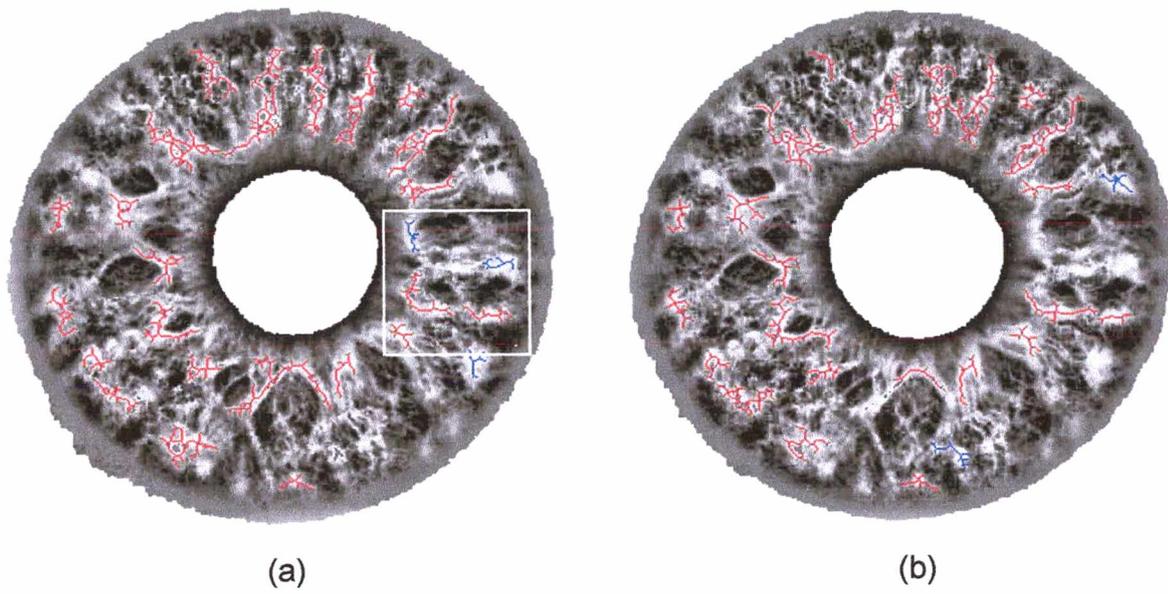


Figura 4.24 - Comparação entre duas íris distintas.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentadas algumas características das imagens que compõem o banco de imagens utilizado nas simulações. A seguir, serão apresentadas as diversas fases de testes, com uma descrição dos experimentos realizados, além de seus objetivos, metodologia e resultados. Com base nos resultados obtidos será feita a análise, que permitirá concluir a respeito do desempenho dos algoritmos, das informações armazenadas no banco de dados (tipo e tamanho) e da representação adotada.

5.1 - BANCO DE DADOS

O método proposto foi testado com imagens reais, adquiridas em cores e de ambos os olhos, cujas principais características são:

- Resolução da imagem 1280x960 pixels;
- Tamanho do arquivo 3,6 Mbytes;
- Extensão do arquivo BMP (Bitmap);
- Compactação do arquivo não compactado.

Posteriormente estas imagens foram convertidas para tons de cinza, pois a abordagem proposta está fundamentada na extração de características dos padrões encontrados na íris e não na sua cor (pigmentação). A seguir estão algumas das características destas imagens, tais como:

- Resolução da imagem 640x480 pixels;
- Tamanho do arquivo 308 kbytes;
- Extensão do arquivo TIFF (Tagged Information File Format);
- Compactação do arquivo não compactado.

Para criar o banco de dados experimental usado para as simulações, foram selecionadas várias imagens (170) aleatoriamente de um banco de imagens de íris¹.

¹ Imagens disponibilizadas pelo LABMETRO - UFSC.

As imagens deste banco foram adquiridas em várias ocasiões, por uma câmera digital Kodak DC120 [37], cujas especificações estão listadas abaixo:

- Fabricante Kodak;
- Resolução 1,2 Mpixels;
- CCD 836.400 pixels;
- Cores 16,8 milhões de cores (24 bits);
- Abertura f/2,5 a f/16;
- Tempo de abertura 1/500 a 16 segundos.

O uso de um conjunto de lentes para close-up (ganho aproximado de 17 vezes) permitiu uma redução na distância focal da câmera para cerca de 5 cm [37]. Durante a aquisição das imagens, procurou-se minimizar as restrições ao usuário com relação ao posicionamento (distância da câmera, rotação da cabeça e posição do olho).

A Figura 5.1 mostra um conjunto de algumas das imagens de íris selecionadas para as simulações². Estas imagens podem ser divididas em quatro subconjuntos com três imagens cada, sendo que cada subconjunto corresponde às íris de um indivíduo. Em algumas imagens pode ser observada a existência de íris com oclusão das pálpebras (Figura 5.1.1(b), 1(c), 2(c), 3(c), 4(b) e 4(c)), variação no diâmetro da pupila nas íris de um mesmo subconjunto, além de deslocamentos relacionados com o posicionamento dos indivíduos.

A representação usada para construir o banco de dados leva em conta apenas os padrões da íris de um único olho (direito ou esquerdo). Sendo assim, o banco de dados está dividido em *ID* (íris do olho direito) e *IE* (íris do olho esquerdo). Portanto, as imagens submetidas ao processamento devem pertencer ao mesmo olho da correspondente íris do banco de dados.

5.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As séries de experimentos foram realizadas em duas etapas. Na primeira etapa as íris de um mesmo indivíduo foram comparadas entre si, e o procedimento

² Uma versão colorida da Figura 5.1 encontra-se em anexo.

foi repetido para as íris dos demais indivíduos. Na segunda etapa as comparações foram feitas entre as diversas íris dos diversos indivíduos, tomando sempre uma íris de um indivíduo como referência e comparando com as diversas íris dos demais. Para cada série de experimentos foram utilizadas em média sete íris diferentes de quatro indivíduos, representados pelos números 1, 2, 3 e 4, nas duas etapas de comparações, apresentadas no decorrer deste capítulo nas figuras com os gráficos de comparação da representação da íris, nas diversas fases de testes.

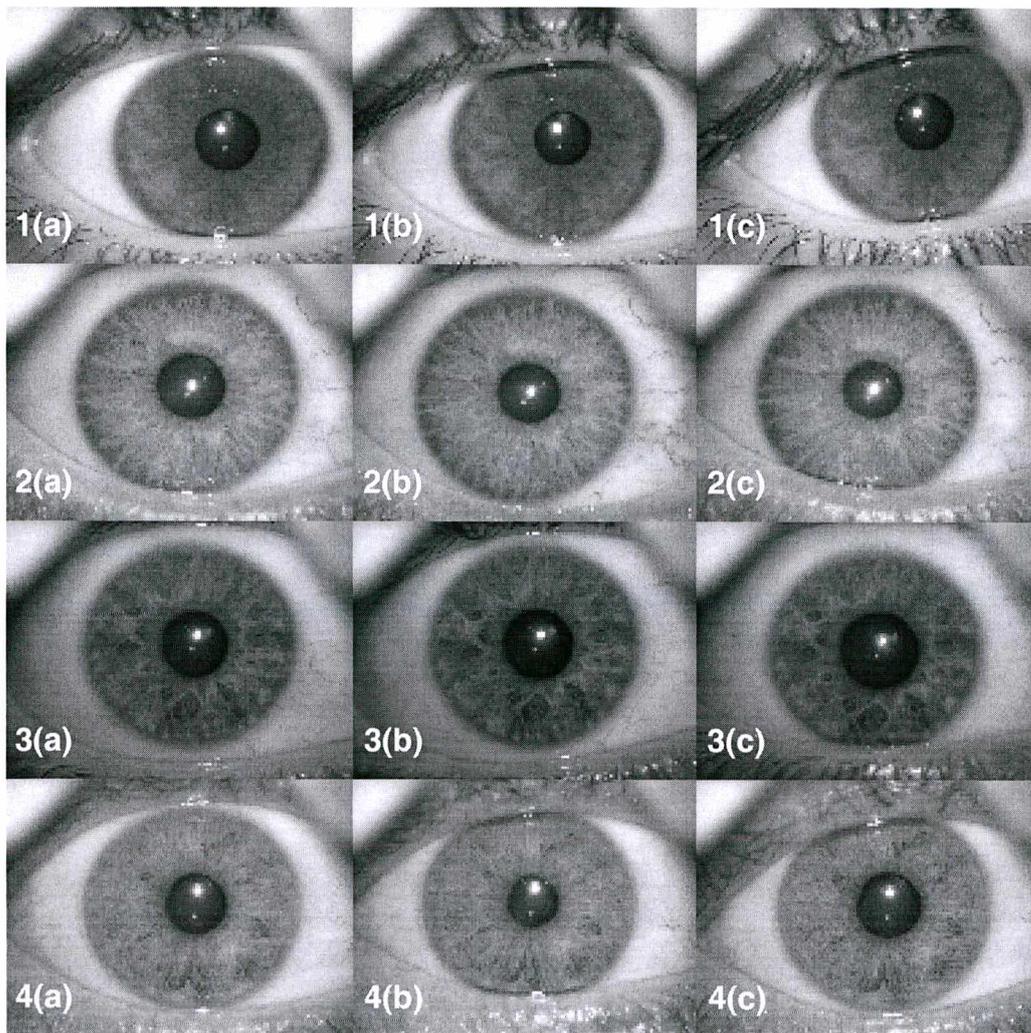


Figura 5.1 - Algumas imagens de íris selecionadas.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações, utilizando três tipos de algoritmos diferentes, aplicados a um determinado conjunto de imagens de íris. Além destes, serão apresentados alguns resultados obtidos em outras duas fases de testes: uma preliminar e outra intermediária. Convém ressaltar, que os

resultados se mantiveram nas simulações realizadas com os demais conjuntos de imagens de íris.

5.2.1 - Fase Preliminar de Testes

O objetivo desta fase preliminar de testes é verificar a real necessidade de submeter as imagens da íris a todo o processamento, e a influência do alinhamento das imagens no processo de comparação.

Esta fase de testes pode ser subdividida em três:

- a primeira, onde o coeficiente de correlação entre as imagens das íris foi computado;
- a segunda, onde o erro médio quadrático (*MSE – Mean Square Error*) foi computado;
- a terceira, onde as imagens foram submetidas ao processamento, suprimindo-se a etapa de alinhamento.

Na primeira, os testes foram realizados com diversas imagens (F), sendo uma tomada como referência (G) para se computar o coeficiente de correlação (r), de acordo com a expressão:

$$r = \frac{\sum_x \sum_y (F_{xy} - \bar{F})(G_{xy} - \bar{G})}{\sqrt{\left(\sum_x \sum_y (F_{xy} - \bar{F})\right)^2 \left(\sum_x \sum_y (G_{xy} - \bar{G})\right)^2}} \quad (5.1)$$

onde $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$, \bar{F} e \bar{G} correspondem as *médias* das imagens F e G , respectivamente, cujas dimensões são $M \times N$. Os resultados mostraram que os valores dos coeficientes de correlação obtidos para imagens da íris de um mesmo indivíduo e de indivíduos diferentes, podem ser muito próximos, dificultando assim a sua identificação.

O mesmo acontece, quando o *MSE* é computado. O procedimento adotado foi o mesmo descrito acima, sendo a expressão do erro dada por:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y (F_{xy} - G_{xy})^2 \quad (5.2)$$

Da mesma forma, os resultados obtidos não permitem afirmar com precisão se as imagens das íris comparadas pertencem ou não a um mesmo indivíduo, baseando-se apenas nos valores do *MSE*.

Pode-se concluir então, que os resultados obtidos justificam a necessidade de submeter as imagens da íris a um processamento mais elaborado, para que se possa chegar a um sistema de identificação confiável. No entanto, tanto o coeficiente de correlação como o *MSE*, poderiam ser utilizados numa etapa de pré-classificação, para descartar imagens que apresentassem grandes diferenças entre si, ou seja, um baixo valor para o coeficiente de correlação e um alto valor para o *MSE*.

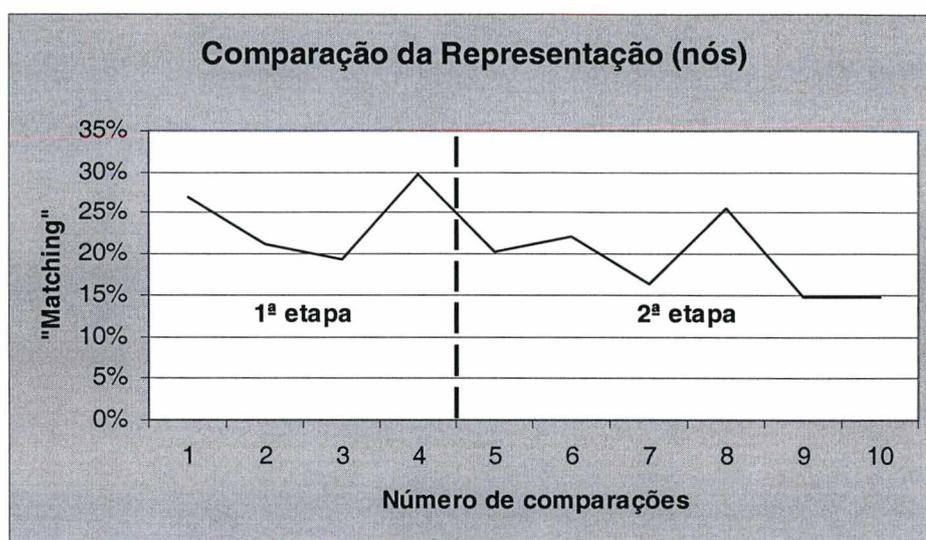
A seguir, foram testados algoritmos onde a etapa de alinhamento das imagens foi suprimida, sendo as imagens submetidas diretamente ao processamento e posteriormente a comparação das representações. Os resultados mostraram que submeter as imagens ao processamento sem a devida compensação de movimento causa uma perda de informações. Esta perda faz com que os valores percentuais caiam para cerca de 50% dos valores obtidos com o alinhamento das imagens (no caso de informações provenientes dos *nós*), isto considerando apenas comparações entre íris de um mesmo indivíduo (primeira etapa). A Figura 5.2 exhibe alguns destes resultados, onde foi obtida uma média de 0,2538 (relativa aos *nós*) contra 0,4597, de um algoritmo que faz a compensação de movimento.

5.2.2 - Primeira Fase de Testes

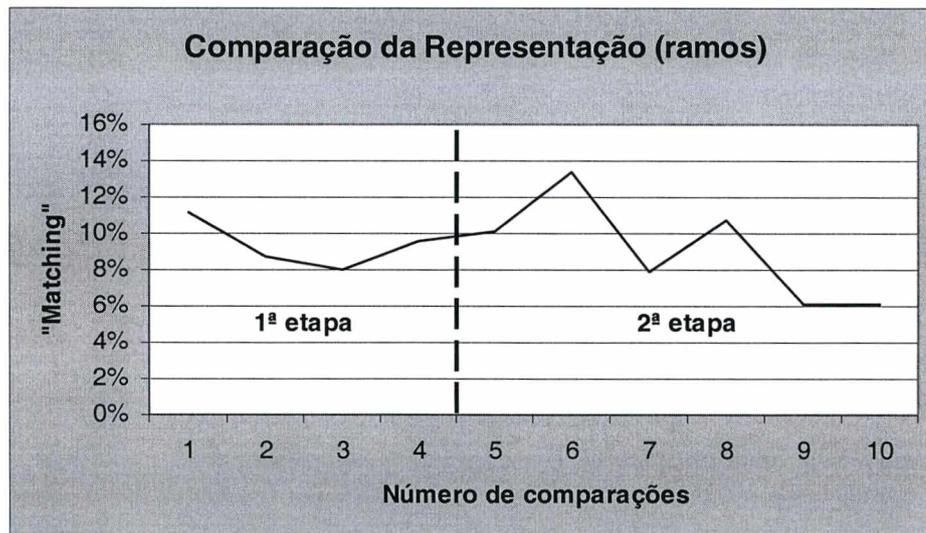
A primeira, segunda e terceira fases de testes, apresentam a evolução do algoritmo utilizado para fazer o processamento geral da imagem adquirida, contemplando todas as etapas do processo. O objetivo destas etapas é otimizar as informações armazenadas no banco de dados, no sentido de armazenar a menor quantidade de dados possível, suficiente para permitir o alinhamento das íris, bem como sua comparação baseada na representação.

A metodologia utilizada nestas três etapas de testes, para realização dos experimentos, é apresentada no diagrama da Figura 5.3. Nele pode-se observar

duas etapas distintas, uma que realiza comparações entre íris de um mesmo indivíduo e outra de indivíduos diferentes. A cada experimento realizado a comparação é feita com base nas informações provenientes da representação, ou seja, *nós* e *ramos*.



(a)



(b)

Figura 5.2 - Comparação da representação da íris (fase preliminar).

Inicialmente foram testados algoritmos que executavam o alinhamento (compensação de movimento) utilizando a imagem da íris submetida ao sistema e

da íris de referência previamente armazenada no banco de dados, como por exemplo, a da Figura 4.6 do capítulo anterior.

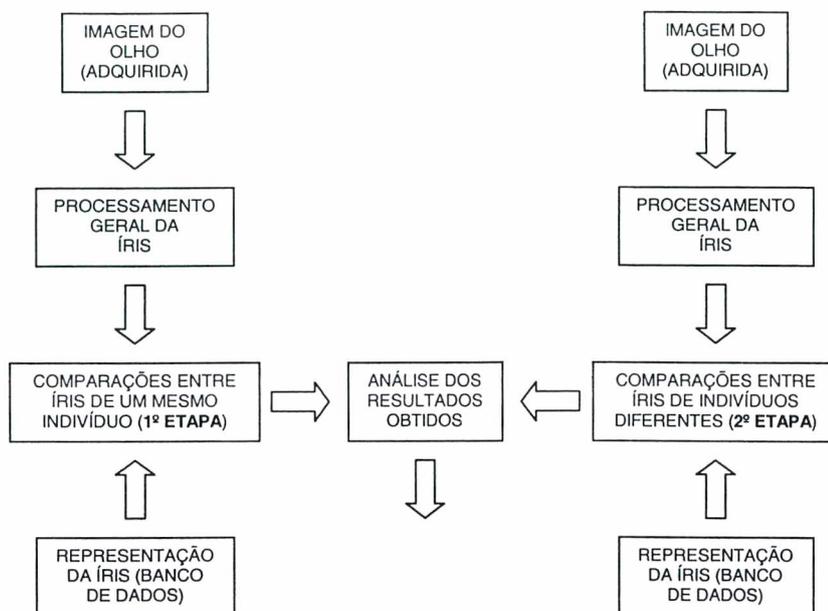


Figura 5.3 - Diagrama – metodologia.

A Figura 5.4 traz um diagrama que descreve o procedimento adotado nesta fase, e em destaque (linha pontilhada) está o conteúdo armazenado no banco de dados. Desta forma, haveria a necessidade de armazenar as imagens das íris (em tons de cinza) para compor o banco de dados, o que acarretaria em uma elevada quantidade de dados a ser armazenada (da ordem de 120 Kbytes por íris).

A Figura 5.5 retrata uma das séries de experimentos, onde foram feitas 23 comparações com íris de um mesmo indivíduo e 76 comparações com íris de indivíduos diferentes. Na Figura 5.5(a) e 5.5(b), fica evidente a distinção que existe ao se comparar a representação de uma mesma íris (1ª etapa) à de íris diferentes (2ª etapa), onde a transição delimita as duas etapas do experimento. Em 5.5(a) a comparação é realizada com base nas informações dos *nós*, enquanto que em 5.5(b) as informações são provenientes dos *ramos*. Com base na análise destas informações pode-se inferir se a imagem da íris processada pertence ou não ao mesmo indivíduo cuja íris foi tomada como referência.

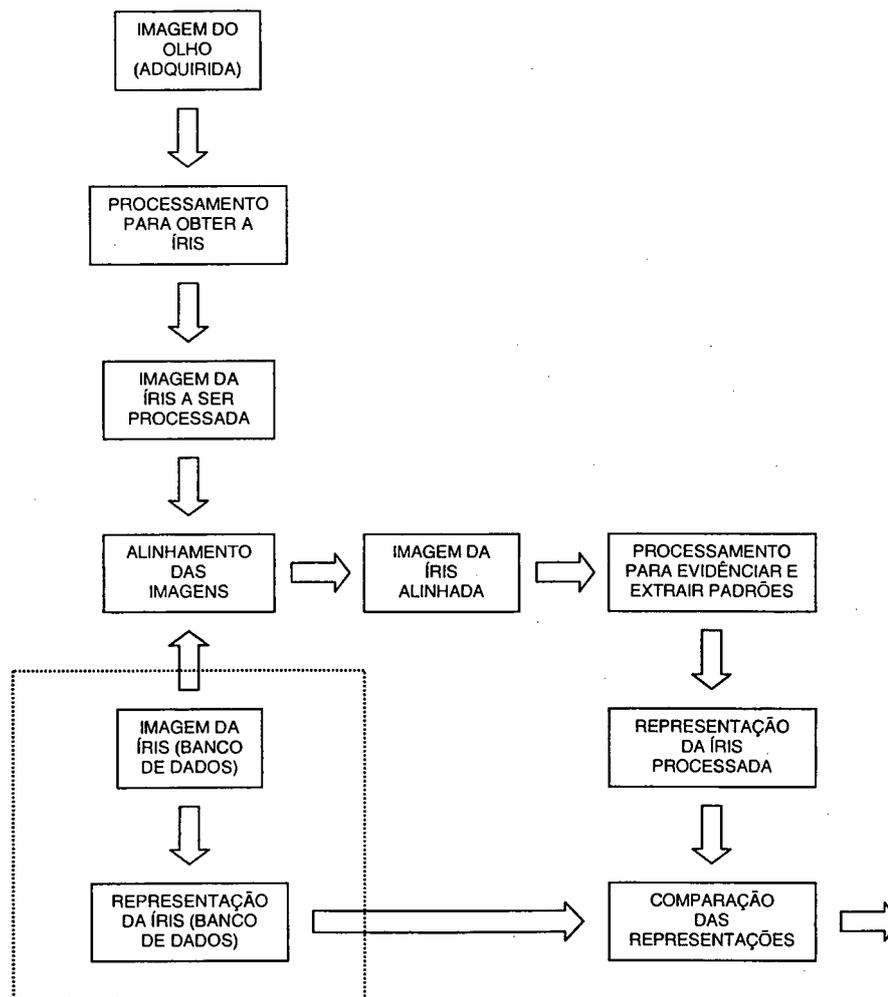


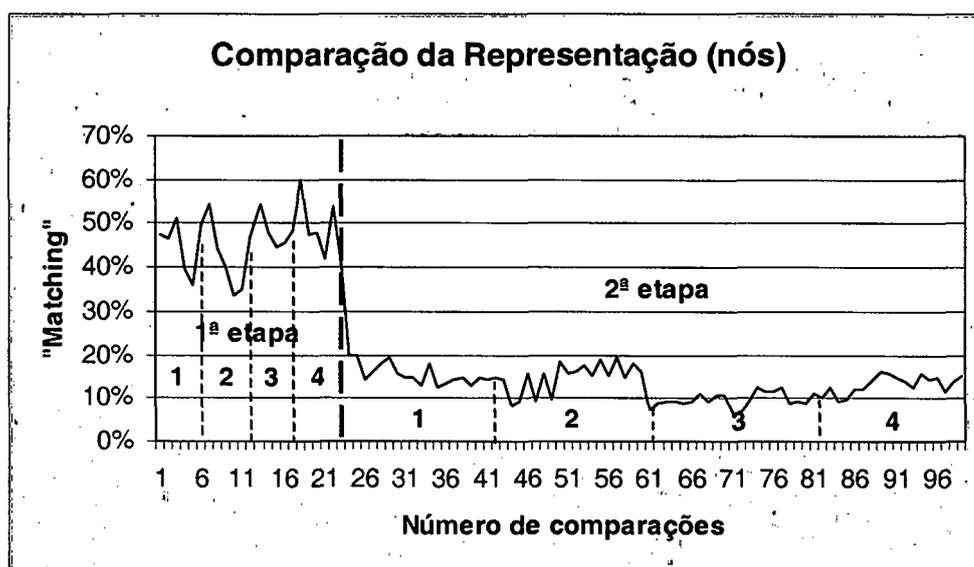
Figura 5.4 - Diagrama da primeira fase de testes.

5.2.3 - Segunda Fase de Testes

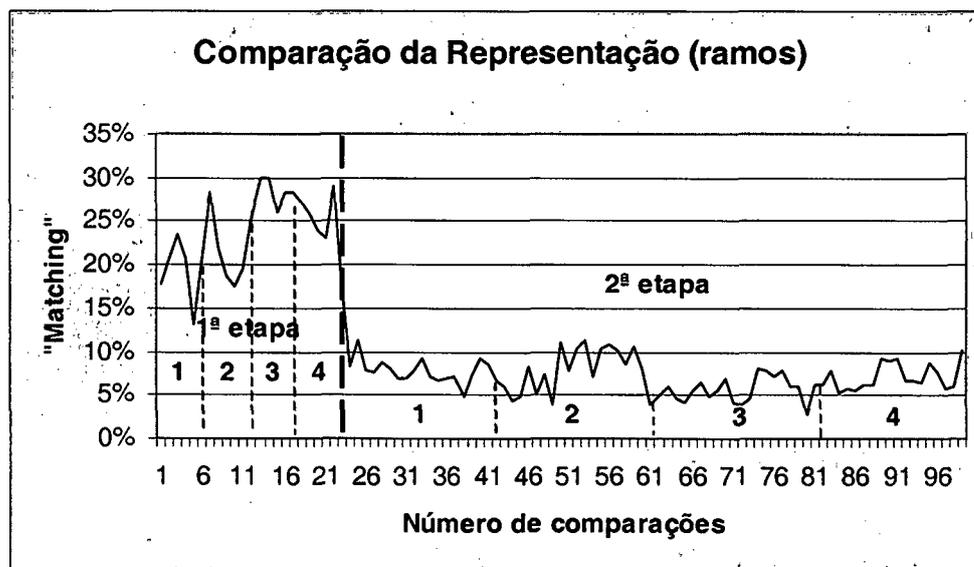
Na segunda fase de testes, os algoritmos utilizavam imagens das estruturas obtidas após a aplicação do operador *threshold* para o alinhamento. Então, a imagem obtida, da íris submetida ao sistema, após a aplicação do referido operador, seria utilizada para o alinhamento tomando como referência uma imagem do mesmo tipo (binária contendo as estruturas) previamente armazenada no banco de dados. A Figura 5.6 mostra o diagrama do procedimento adotado nesta fase, e em destaque (linha pontilhada) o conteúdo armazenado no banco de dados.

Neste caso o banco de dados deveria armazenar imagens binárias contendo as estruturas, como por exemplo, a imagem da Figura 4.10(b) do capítulo anterior.

Sendo assim, haveria uma redução da ordem de 10 vezes na quantidade de dados a ser armazenada (cerca de 12 Kbytes por íris), se comparada ao armazenamento das imagens das íris (tons de cinza). Na Figura 5.7 são mostrados os resultados obtidos em uma das séries de experimentos, onde foram feitas 23 comparações com íris de um mesmo indivíduo e 76 comparações com íris de indivíduos diferentes. O mesmo raciocínio feito para análise na primeira fase de testes pode ser empregado.



(a)



(b)

Figura 5.5 - Comparação da representação da íris (1ª fase).

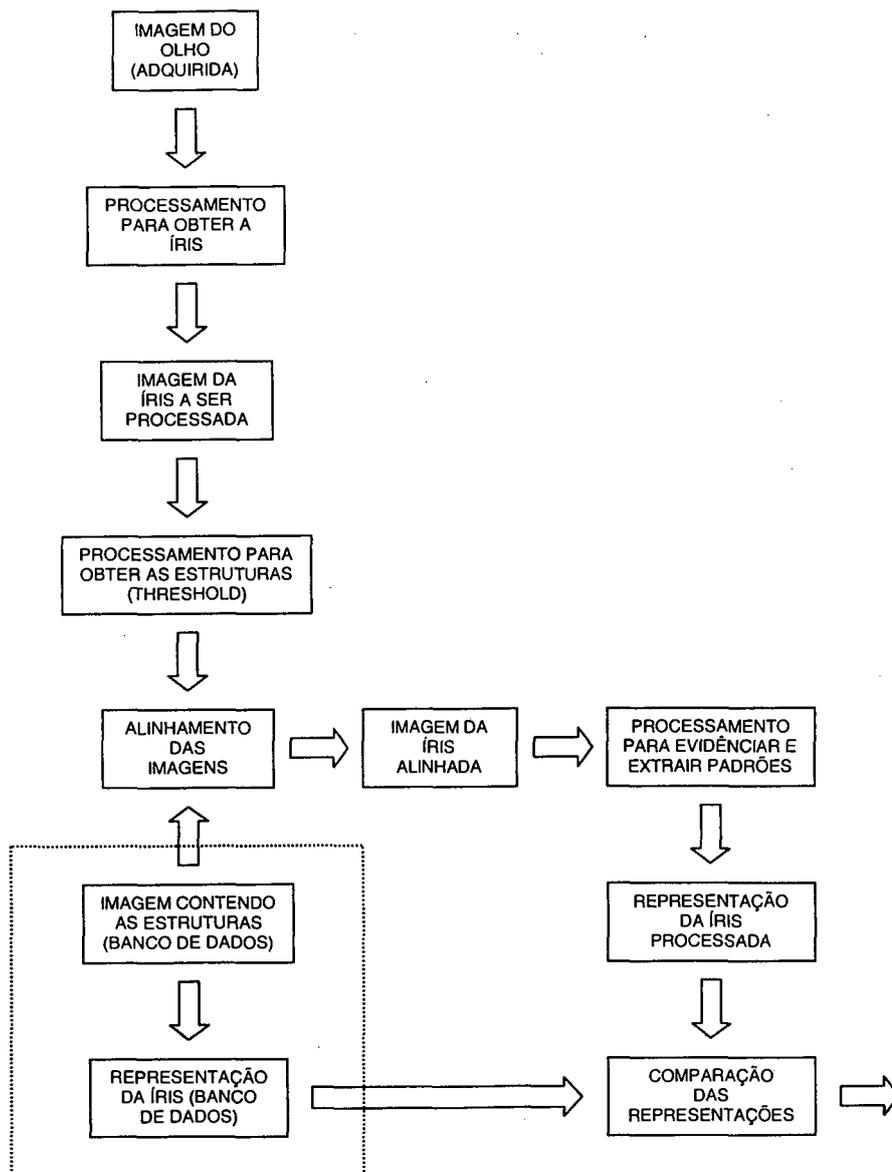


Figura 5.6 - Diagrama da segunda fase de testes.

5.2.4 - Fase Intermediária de Testes

Nesta fase intermediária, foram testados também alguns algoritmos que não faziam a compensação de movimento para alinhar a imagem que estava sendo processada. Estes algoritmos utilizavam um operador morfológico que fazia a *dilatação* da imagem contendo as coordenadas dos *end-points* e dos *nós* (representação), condicionada a uma imagem contendo as estruturas, que era

tomada como referência. Os resultados mostraram que a diferença percentual relativa entre a primeira e a segunda etapa é muito pequena, com as respectivas médias de 0,2431 e 0,1894 (relativas aos *nós*), e 0,0938 e 0,0905 (relativas aos *ramos*). A proximidade entre estes valores impossibilita distinguir entre a comparação de íris de um mesmo indivíduo e indivíduos diferentes, pois não existe mais uma transição nítida entre as duas etapas dos experimentos. A Figura 5.8 apresenta alguns resultados parciais.

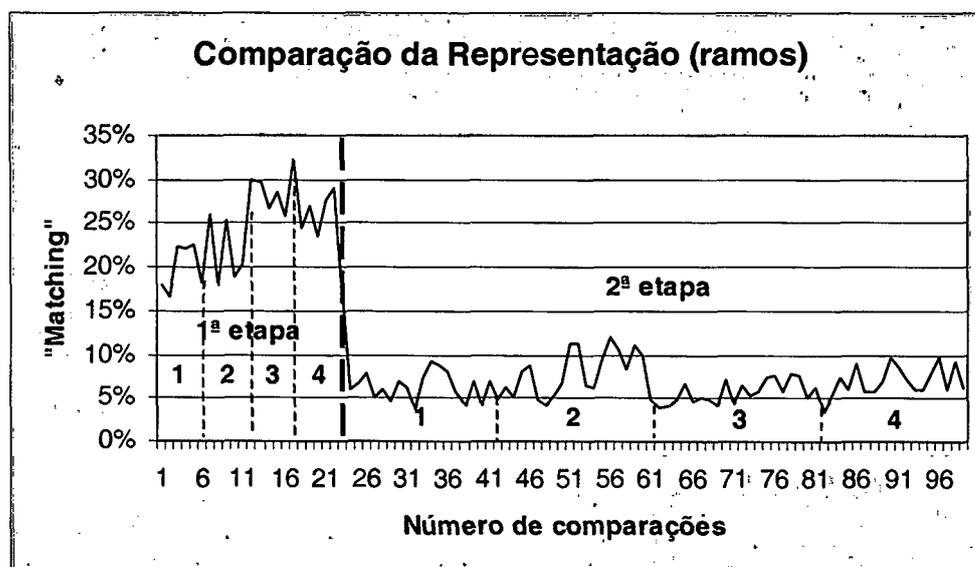
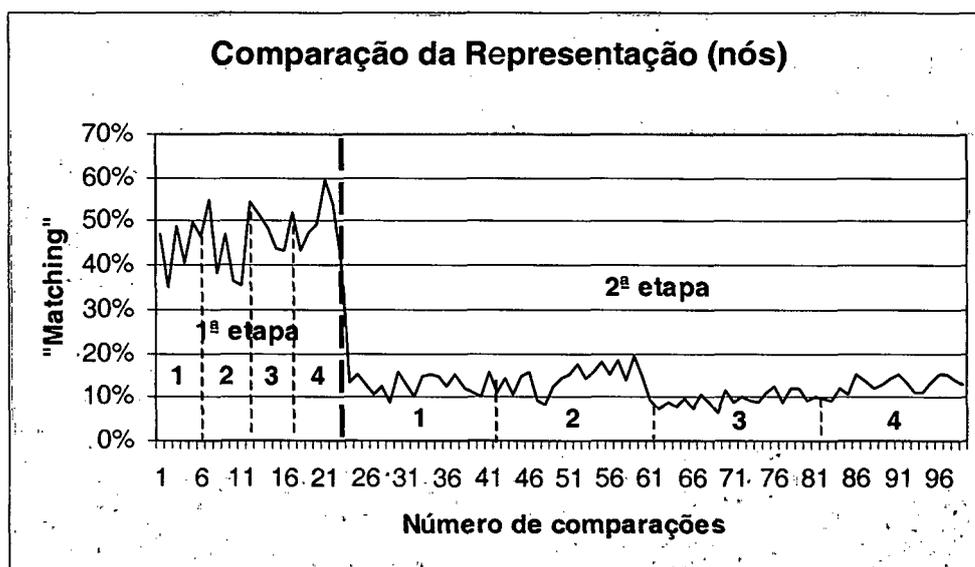
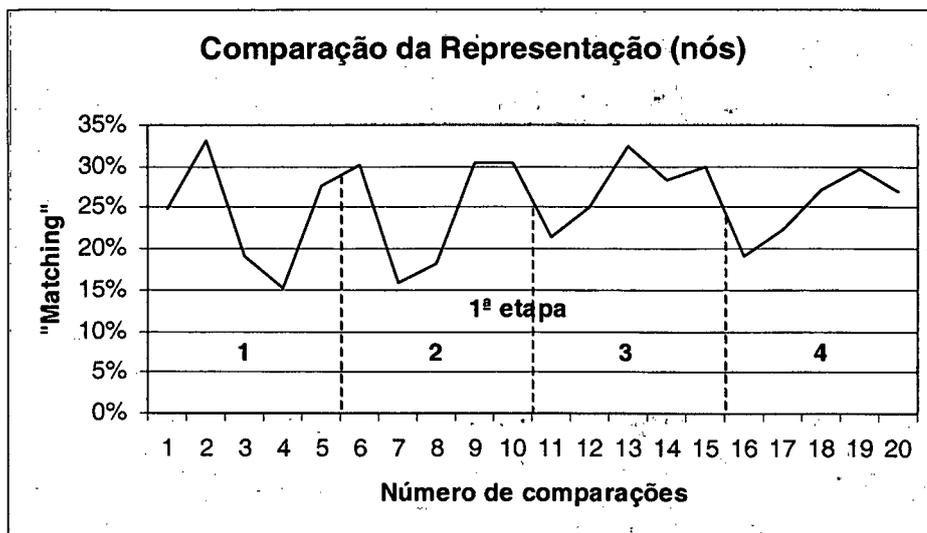
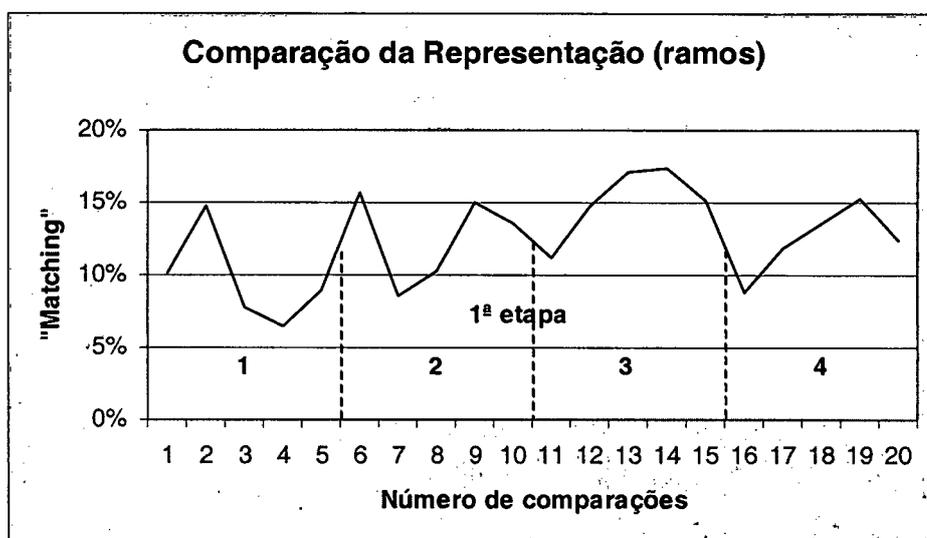


Figura 5.7 - Comparação da representação da íris (2ª fase).



(a)



(b)

Figura 5.8 - Comparação da representação da íris (fase intermediária).

5.2.5 - Terceira Fase de Testes

Na fase final dos testes, as séries de experimentos foram realizadas utilizando para o alinhamento algoritmos que também operavam com imagens binárias. A imagem submetida ao sistema utilizada para o alinhamento era a mesma da segunda fase, ou seja, a imagem binária contendo as estruturas, obtida após a aplicação do operador *threshold*. No entanto, a imagem tomada como referência (banco de dados), era composta de pseudo-estruturas reconstruídas a partir da

representação da íris. A Figura 5.9 apresenta o diagrama do procedimento adotado e em destaque (linha pontilhada) o conteúdo armazenado no banco de dados.

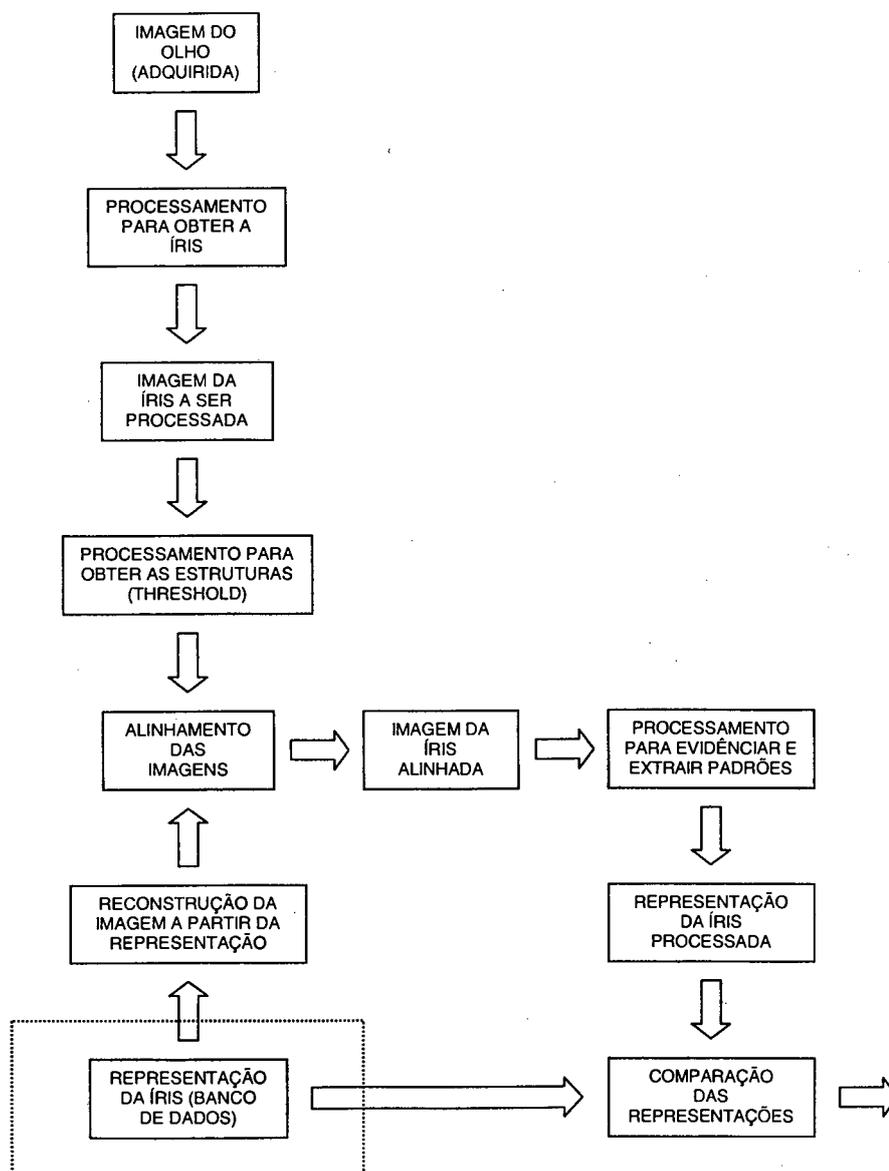
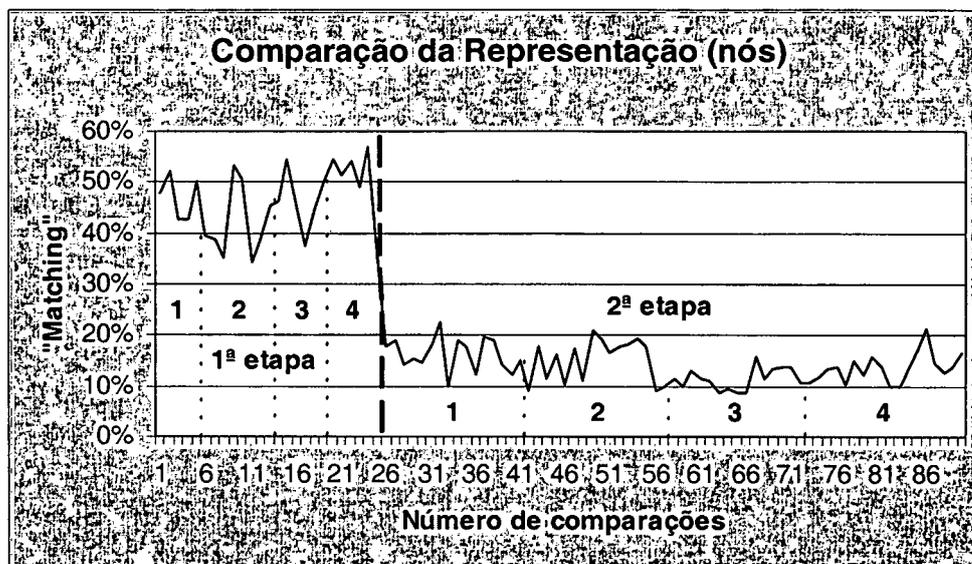


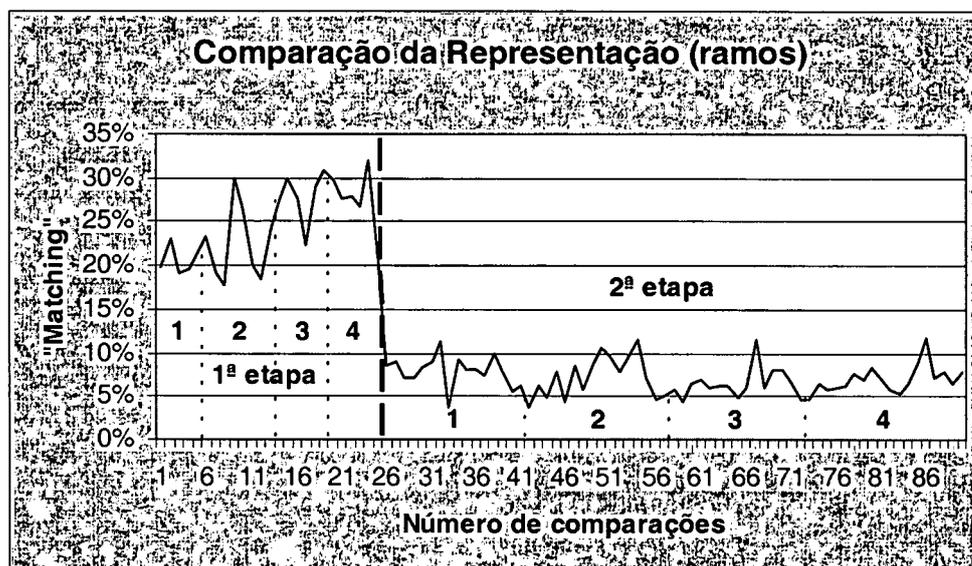
Figura 5.9 - Diagrama da terceira fase de testes.

Então, seriam armazenadas apenas as representações das íris para compor o banco de dados. O ganho em termos da quantidade de dados a ser armazenada é substancial (da ordem de centenas de bytes por íris), com relação aos dados armazenados nas outras duas fases dos testes. Os resultados mostrados na Figura 5.10 foram obtidos de uma série de experimentos, onde foram realizadas 26 comparações com íris de um mesmo indivíduo e 64 comparações com íris de

indivíduos diferentes. Assim como na primeira e segunda fases de testes, as duas etapas do experimento continuam sendo distintas e o procedimento para análise é o mesmo.



(a)



(b)

Figura 5.10 - Comparação da representação da íris (3ª fase).

5.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comparando os resultados das séries de experimentos, das três fases de testes, observam-se que os percentuais mantêm uma proporção relativa entre as

duas etapas do processo de comparação, independentemente do tipo de dados utilizados para compor o banco de dados, ou seja, imagens da própria íris, imagens contendo as estruturas ou as representações da íris. Na primeira etapa (mesmo indivíduo), considerando as informações provenientes dos *nós*, as médias foram: 0,4597 na primeira fase (alinhamento baseado nas imagens das íris), 0,4639 na segunda fase (alinhamento baseado nas imagens contendo estruturas), e 0,4599 na última fase (alinhamento baseado nas imagens contendo pseudo-estruturas). Na segunda etapa (indivíduos diferentes), as médias ficaram em: 0,1315 na primeira fase, 0,1232 na segunda e 0,1417 na última – Tabela 5.1. Considerando agora as informações provenientes dos *ramos*, na primeira etapa dos experimentos as médias foram: 0,2332 na primeira fase, 0,2390 na segunda e 0,2433 na última. Na segunda etapa as médias ficaram em: 0,0709 na primeira fase, 0,0671 na segunda e 0,0716 na última – Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados dos experimentos (μ = média / σ = desvio padrão).

Representação		nós		ramos	
Gráfico (Figura)		1ª etapa	2ª etapa	1ª etapa	2ª etapa
5.2	μ	0,4597	0,1315	0,2332	0,0709
	σ	0,0660	0,0336	0,0474	0,0197
5.3	μ	0,4639	0,1232	0,2390	0,0671
	σ	0,0659	0,0291	0,0465	0,0199
5.4	μ	0,4599	0,1417	0,2433	0,0716
	σ	0,0674	0,0363	0,0461	0,0192

Através da análise dos dados da Tabela 5.1, é possível verificar que os valores das médias da segunda etapa dos experimentos, onde são comparadas íris de indivíduos diferentes, correspondem a 30% dos valores das respectivas médias da primeira etapa, onde as comparações são realizadas entre íris de um mesmo indivíduo. Portanto, a diferença relativa existente entre os percentuais das duas etapas, permite distinguir se a comparação está sendo feita entre íris de um mesmo indivíduo ou de indivíduos diferentes.

Contudo, embora os resultados das três fases de testes sejam muito próximos, em termos de quantidade de dados a ser armazenada no banco de dados, o armazenamento da representação (terceira fase de testes) é a melhor opção. Então, como no banco de dados não estão armazenadas as imagens das íris, mas as informações provenientes da sua representação, todas as imagens cujas representações farão parte do banco de dados são previamente processadas.

A representação das estruturas baseada nos *end-points* e *nós* mostrou ser adequada para caracterizar os padrões existentes na íris, permitindo sua *distingibilidade* através da comparação das informações deles obtidas, confirmada através das simulações realizadas com várias imagens de íris. Com relação ao tamanho, a representação adotada é compacta, em média 750 bytes por vetor de informações (*nós coincidentes* e *ramos por nó coincidente*). O tamanho da representação poderia ser reduzido ainda mais, caso fosse utilizado algum tipo de algoritmo de compactação de dados. Alguns testes realizados mostraram que o tamanho da representação pode facilmente ser reduzido a 1/3 do tamanho original.

Dois tipos de informações, *nós coincidentes* e *ramos por nó coincidente*, foram usados nas séries de experimentos, no entanto outras poderiam ter sido usadas, aumentando assim a confiabilidade do sistema, bem como a robustez da representação.

Com relação ao problema de oclusão da íris, geralmente provocada pelas pálpebras e cílios, seus efeitos são minimizados devido à disposição das estruturas na íris e a forma com que os algoritmos processam estas informações. Geralmente a perda de informações causada pela oclusão não é o bastante para comprometer o desempenho dos algoritmos, pois as demais regiões da íris que estão livres contêm informações suficientes para permitir comparações com precisão considerável.

5.4 - CUSTO COMPUTACIONAL

Devido ao tipo de representação adotado, o tempo de processamento da etapa de comparação é reduzido, bastando apenas uma operação que faz o "matching" entre os vetores que contêm as coordenadas dos *nós* e *ramos coincidentes*. O mesmo acontece com o uso de algoritmos baseados em operadores

morfológicos, que utilizam basicamente seis operadores, nas diversas etapas do processo, o que também contribui para uma redução do tempo total de processamento. Em média, o tempo total de processamento gira em torno de 75 segundos³.

O algoritmo que faz a compensação de movimento é responsável por cerca de 80% do tempo gasto para o processamento completo, em média 60 segundos. Os demais algoritmos, responsáveis pelas outras etapas do processo, em conjunto correspondem aos outros 20% do tempo de processamento (10 a 15 segundos).

O tempo de processamento envolvido na etapa de compensação de movimento (de 30 a 90 segundos) varia de acordo com as imagens e com o movimento que elas estão sujeitas. Isto significa que o tempo gasto nesta etapa, quando o alinhamento é feito para íris de um mesmo indivíduo, deve ser menor do que o gasto para íris de indivíduos diferentes. Da mesma forma, quanto mais próxima está uma íris do alinhamento, ou seja, necessita de menos processamento para compensar os efeitos causados pelo movimento, menor será o tempo gasto nesta etapa.

Levando-se em consideração o fato que os algoritmos foram implementados no software *Matlab*, o tempo de processamento correspondeu às expectativas. Uma redução substancial no tempo de processamento pode ser obtida se os algoritmos forem implementados em outras linguagens de programação, como por exemplo, C ou C++, melhorando assim o desempenho dos mesmos.

5.5 - CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO

Através dos resultados obtidos, na fase preliminar de testes, podê-se verificar a necessidade de submeter as imagens da íris ao processamento completo, incluindo o alinhamento das mesmas.

Nas demais fases de testes, alguns algoritmos foram avaliados. Em termos de desempenho, todos apresentaram bons resultados, mostrando-se eficientes no que diz respeito à capacidade de discriminação, ou seja, a eficiência da abordagem

³ Processador AMD Athlon - K7 1.0 GHz Thunderbird e memória de 128 Mbytes (SDRAM).

proposta para o reconhecimento de íris. O diferencial entre eles está relacionado ao tipo de informação armazenada no banco de dados. O armazenamento da representação mostrou ser o mais adequado em termos de tamanho, sendo possível a partir da representação realizar tanto o alinhamento quanto a comparação das íris. Através da análise dos resultados obtidos foi possível verificar que o compromisso *tamanho x distinguibilidade* foi respeitado. Com relação ao tamanho da representação, se comparada com a proposta por Daugman (código de 512 bytes) [9, 11], poderia-se chegar a mesma ordem de grandeza ou menor, desde que submetida a um algoritmo de compactação de dados. No entanto, deve-se considerar que um código (representação) da ordem de 512 bytes possui um tamanho bastante compacto para um modelo biométrico.

Como mencionado anteriormente no capítulo 2 (seção 2.3.5.1) existem diversas abordagens propostas para os sistemas de reconhecimento de íris. No entanto, a abordagem morfológica para este tipo de aplicação, substituindo outras técnicas mais usuais nas diversas etapas do processamento (localização da íris, segmentação, extração de características, etc.), é uma inovação.

Com relação ao custo computacional envolvido no processamento, o algoritmo responsável pela compensação de movimento é o que mais onera, em todo o processo. No entanto, o tempo total de processamento ficou dentro do esperado, considerando-se o software (*Matlab*) em que os algoritmos foram implementados. Se comparado ao de outros tipos de abordagens (capítulo 2, seção 2.3.5.1), pode-se concluir, com as devidas proporções, que os tempos de processamento são compatíveis.

Para proceder à validação estatística da abordagem proposta, o banco de dados utilizado deveria ser composto por um número maior de imagens de íris, de diferentes indivíduos. Para tal, seria necessário dispor de um equipamento para fazer a aquisição das imagens, bem como do aparato associado. No entanto, devido a falta de tais recursos, a validação da abordagem ficou restrita ao banco de dados disponível.

No próximo capítulo serão feitas algumas considerações a cerca dos objetivos propostos, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos estudos realizados e da análise dos resultados obtidos nas séries de experimentos realizadas, foi possível chegar a algumas conclusões a cerca dos objetivos a serem alcançados para validar o presente trabalho.

6.1 - REFERENTES AOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma metodologia, baseada em operadores morfológicos, para:
 - localizar a íris na imagem adquirida;

Para o cumprimento deste objetivo, no capítulo 4 (seção 4.3), foi desenvolvido um algoritmo, cuja base são operadores morfológicos, para segmentar a imagem do olho e obter somente a região da íris.

- evidenciar, identificar e extrair padrões existentes na íris;

Também no capítulo 4 (seção 4.4), é apresentada a seqüência de passos do algoritmo aplicado à imagem da íris para evidenciar as estruturas existentes, identificar as mais relevantes e, então, adequá-las para obter a representação. Sendo assim, o referido objetivo foi alcançado.

- Estabelecer uma representação que caracterize os padrões da íris e seja compatível em termos de *distingibilidade* e quantidade de informações a ser armazenada;

Este objetivo foi cumprido através da representação proposta no capítulo 4 (seção 4.7), e constatado ao término do processamento, onde se conseguiu uma representação compacta (da ordem de centenas de bytes por íris) e adequada para evidenciar as diferenças existentes entre padrões distintos. A representação, extraída das estruturas através do algoritmo desenvolvido, baseada nos *end-points* e *nós*, mostrou-se adequada para caracterizar os padrões existentes na íris. Sua eficiência, em termos de *distingibilidade*, pôde ser constatada através da comparação das informações delas obtidas, expressa pelos resultados apresentados

nas diversas simulações realizadas com várias imagens de íris – capítulo 5 (seção 5.2).

- Comparar padrões de íris de diversos indivíduos;

Tal objetivo foi alcançado através das séries de experimentos realizados, cujos procedimentos, resultados obtidos e a análise dos resultados encontram-se descritos no capítulo 5 (seções 5.2 e 5.3, respectivamente). Da análise dos resultados obtidos, pôde-se constatar a viabilidade da abordagem morfológica para a comparação de padrões da íris.

6.2 - REFERENTE AO OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, conforme mencionado no capítulo 1 (seção 1.2), objetivou-se de forma geral ao estudo da viabilidade da abordagem proposta, fundamentada na *Morfologia Matemática*, para o reconhecimento de indivíduos através do processamento morfológico da íris.

Como os objetivos específicos foram alcançados, e estes condicionavam o objetivo geral, pode-se concluir então, que foi constatada a viabilidade da abordagem utilizada para a aplicação proposta. A abordagem morfológica e a representação adotada mostraram-se eficientes e adequadas aos propósitos que se destinam.

A utilização de algoritmos baseados em operadores morfológicos apresenta vantagens relacionadas à baixa complexidade computacional (tempo de processamento) e fácil integração em hardware. Estes algoritmos utilizaram basicamente seis operadores para implementar as várias operações necessárias, nas diversas etapas do processo, contribuindo para uma redução do tempo total de processamento – capítulo 5 (seção 5.4). A representação adotada também tem sua parcela de contribuição na redução do tempo de processamento, mais especificamente na etapa de comparação, necessitando apenas de uma operação para fazer a comparação.

Dentre as contribuições dadas neste trabalho, destacam-se:

- Os algoritmos desenvolvidos para:
 - segmentação da imagem do olho – capítulo 4 (seção 4.3);
 - processamento morfológico da íris – capítulo 4 (seção 4.4);
 - eliminação de pixels redundantes – capítulo 4 (seção 4.6)
 - identificação dos *end-points*, *nós* e *ramos* – capítulo 4 (seção 4.7);
- A determinação da seqüência de aplicação dos operadores morfológicos no algoritmo que faz o processamento morfológico da íris;
- A representação proposta.

6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Face ao desempenho do método proposto e aos resultados obtidos, são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros, que poderão complementar as pesquisas realizadas na presente dissertação. São elas:

- Como mencionado anteriormente, no capítulo 5 (seção 5.4), os algoritmos utilizados neste trabalho foram implementados no software *Matlab*. Visando melhorar o desempenho, poder-se-ia utilizar outras linguagens de programação (por exemplo: *C*, *C++*) para implementar os algoritmos. Isto traria um reflexo direto no tempo de processamento, que apresentaria uma redução substancial;
- Na representação adotada, dois tipos de informações (*nós coincidentes* e *ramos por nó coincidente*) foram utilizados. No entanto, outras informações como: distância entre *nós*, tamanho dos *ramos*, orientação dos *ramos*, entre outras, poderiam ser utilizadas para tornar a representação ainda mais robusta, proporcionando também um aumento na confiabilidade do método;

- Ainda com relação à representação, conforme mencionado no capítulo 5 (seção 5.3), os dados foram armazenados sem nenhuma compactação. Portanto, para reduzir o tamanho da representação poder-se-ia utilizar algum tipo de algoritmo de compactação de dados.
- Durante o desenvolvimento do presente trabalho, com base nos estudos realizados e nos resultados obtidos, pôde-se verificar a potencialidade de uso da abordagem morfológica para outras aplicações, além da proposta. Assim sendo, poderiam ser identificadas outras aplicações onde a abordagem morfológica seria adequada para o processamento;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

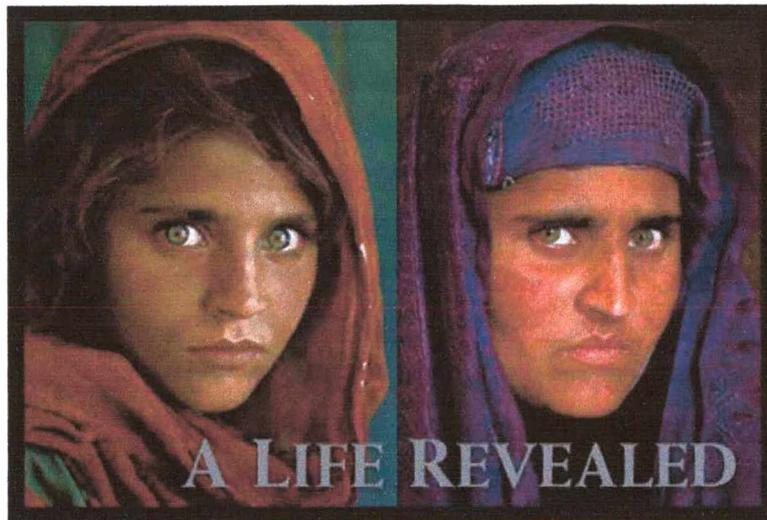
- [1] ASHBOUM, Julian. Management Summary – The Busy Persons Guide to Biometrics. Disponível em: <<http://www.biometrics.org>>. Acesso em: 20 março 2001.
- [2] WILDES, R.P. Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology. *Proceedings of IEEE*, Vol.85, No. 9, pp. 1347-1363, Sept. 1997.
- [3] GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, 3 ed., 1992.
- [4] SERRA, J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, 1988.
- [5] INTERNACIONAL BIOMETRICS GROUP. Biometrics Market Report 2003-2007. Disponível em: <<http://www.ibgweb.com>>. Acesso em: 10 fevereiro 2003.
- [6] INTERNACIONAL BIOMETRICS GROUP. Technology – Fingerprint and AFIS. Disponível em: <<http://www.ibgweb.com>>. Acesso em: 03 agosto 2002.
- [7] SCHREINER, K. Biometrics: Prospects for going the distance. *IEEE Intelligent Systems*, Nov./Dec. 1999.
- [8] IRIS-SCAN. Iris Recognition: The Technology. Disponível em: <<http://www.iris-scan.com>>. Acesso em: 07 dezembro 2001.
- [9] HARRISON, Linda. Iris Recognition is the best Biometric System. Iris Recognition is the top Biometrics ID technology, British researchers claim. Disponível em: <<http://www.theregister.co.uk>>. Acesso em: 12 outubro 2002.
- [10] DAUGMAN, John. Iris Recognition. Links on this page relate to iris recognition. Disponível em: <<http://www.cl.cam.ac.uk/users/jgd1000>>. Acesso em: 10 outubro 2002.
- [11] DUANE'S OPHTHALMOLOGY. Base de dados em Oftalmologia. Lippincott Williams & Wilkins Publishers, 2000. CD-ROM.
- [12] DAUGMAN, John. How Iris Recognition Works. This paper explains the iris recognition algorithms, and presents results of comparisons. Disponível em: <<http://www.cl.cam.ac.uk/users/jgd1000>>. Acesso em: 19 maio 2002.
- [13] SHINYOUNG, L.; LEE, K.; BYEON, O. et al. Efficient Iris Recognition through Improvement of Feature Vector and Classifier. *ETRI Journal*. Vol. 23, No. 2, pp. 61-70, June 2001.
- [14] 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.
- [15] TISSE, C.; MARTIN, L.; TORRES, L. et al. Person Identification Technique using Human Iris Recognition. In: International Conference on Vision Interface (15th.: May 2002 : Calgary, Canada). *Proceedings*. Calgary, 2002.

- [16] BOLES, W. e 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.
- [17] ROCHE, D. M.; AVILA, C. S.; REILLO, R. S. Iris Recognition for Biometric Identification using Dyadic Wavelet Transform Zero-Crossing. *Proceedings IEEE*, 2001.
- [18] FONTOURA, Alexandre. Atentado de 11 de setembro dobrou a procura por sistema de identificação digital em empresas. Reportagem do Jornal Gazeta Mercantil. Disponível em: <<http://www.compuetra.com.br/noticias>>. Acesso em: 15 outubro 2002.
- [19] PHILLIPS, Ken. Unforgettable Biometrics. PC Week Online, March 1997. Disponível em: <<http://www.zdnet.com>>. Acesso em: 02 novembro 1999.
- [20] PANASONIC. Iris Recognition Technology. Technology comparison. Disponível em: <<http://www.mci.panasonic.co.jp/english/prdct/iris/tech.html>>. Acessado em: 27 setembro 2002.
- [21] NEWMAN, Cathy. A Life Revealed. Afghan girl's story. Disponível em: <<http://www.nationalgeographic.com>>. Acesso em: 05 janeiro 2003.
- [22] WEBMED. Oftalmologia – Anatomia do Olho. Disponível em: <<http://www.ofthalmologia.cjb.net>>. Acesso em: 23 abril 2002.
- [23] ATLAS DE OFTALMOLOGIA. Base de dados em Oftalmologia. Unimagem Produções LTDA, 1999. CD-ROM.
- [24] MEDEIROS, A. et al. *A Moderna Biomicroscopia*. Projeto Alcon Line, 1998.
- [25] CASTLEMAN, Kenneth R. *Digital Image Processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.
- [26] MATHWORKS. Image Processing Toolbox for Matlab. The MathWorks Inc., version 2.2, 1999. CD-ROM.
- [27] SOILLE, Pierre. *Handbook of Computer Vision and Applications*. Volume 2. Academic Press, 1999.
- [28] BOVIK, Al. *Handbook of Image and Video Processing*. Academic Press, 2000.
- [29] KHORAL. Mathematical Morphology Toolbox for Khoros System. Version 1.4, 1994. CD-ROM.
- [30] STILLER, C.; KONRAD, J. Estimating Motion in Image Sequences. *IEEE Signal Processing Magazine*, July 1999.
- [31] EGGLESTON, P. Region-based Segmentation, *Vision Systems Design*, pp 21-23, Nov. 1998.
- [32] DAUGMAN, J. High Confidence Recognition of Persons by Video Analysis of Iris Texture. *Proc. European Convention on Security and Detection*, pp 244-251, 1995.
- [33] DAUGMAN, J. Neural Image Processing Strategies Applied in Real-Time Pattern Recognition. *Real Time Imaging*. Academic Press, vol. 3, pp 157-171, 1997.

- [34] PHILLIPS, B. Image Segmentation – Morphology Attacks, *Vision Systems Design*, pp 30-35, May 1997.
- [35] VINCENT L. Morphological Area Opening and Closing for Grayscale Images. *Proc. NATO Shape in Picture Workshop*, Driebergen, The Netherlands, Springer-Verlag, pp. 197-208, September 1992.
- [36] VINCENT L. Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 2, No. 2, pp. 176-201, April 1993.
- [37] MENEZES, J. R. Desenvolvimento e Avaliação Preliminar de um Sistema para Quantificação da Glicose no Sangue por Meio de Imagens da Íris Humana. Florianópolis, 2000. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

ANEXO – FIGURAS COLORIDAS

Versão colorida: - Figura 2.5 (Sharbat Gula – a mulher misteriosa), que se encontra na seção 2.6 do capítulo 2;



- Figura 5.1 (Algumas imagens de íris selecionadas), seção 5.1 do capítulo 5.

