



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Presidente Prudente

Jorge Marques Prates

Algoritmos de Thinning e Suas Aplicações

Presidente Prudente

2011

JORGE MARQUES PRATES

ALGORITMOS DE THINNING E SUAS APLICAÇÕES

Monografia apresentada ao curso de Bacharelado em
Ciência da Computação da Faculdade de Ciências e
Tecnologia/UNESP - Câmpus de Presidente Prudente,
como requisito para a conclusão do curso.

PRESIDENTE PRUDENTE

2011

Termo de Aprovação

Jorge Marques Prates

Algoritmos de Thinning e Suas Aplicações

Monografia sob o título “**Algoritmos de Thinning e Suas Aplicações**”, defendida por Jorge Marques Prates e aprovada em 20 de dezembro de 2011, em Presidente Prudente, Estado de São Paulo, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Marco Antônio Piteri
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Aylton Pagamisse
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Maurício Araújo Dias
Universidade Estadual Paulista

Presidente Prudente, 20 de dezembro de 2011

Agradecimentos

A realização do presente curso foi possível devido à colaboração de muitas pessoas que me auxiliaram durante os 5 anos de curso. Manifesto assim minha gratidão:

A Deus por tem me dado forças para superar as inúmeras dificuldades.

À minha mãe e toda minha família por estar sempre ao meu lado.

Ao professor e orientador Piteri por todo suporte, paciência e incentivo que tornaram possíveis a conclusão dessa monografia.

A todos os professores da FCT de Presidente Prudente em especial, Rogério, Ronaldo, Erwin, Milton, Silvely, Aylton e Raphael que colaboraram na minha aprendizagem, assim como no amadurecimento dos meus conhecimentos ao longo do curso.

Aos amigos e colegas de curso, em especial ao amigo Helder pelo auxílio no TCC, aos amigos Aline, Guilherme e Fernanda pela ajuda nos trabalhos e ao amigo Alex pela amizade e auxílio constante.

Aos colegas de trabalho Suzy, Moacir e Tânia pela ajuda nos momentos de necessidade.

Resumo

A presente monografia tem como propósito estudar o problema de *thinning*, conhecido também por Afinamento ou Esqueletonização de Imagens, explorar suas aplicações em áreas, como, por exemplo, Biometria, Medicina, Engenharia e Cartografia. Os algoritmos de *thinning* podem ser classificados em dois grandes grupos: algoritmos iterativos e algoritmos não-iterativos. Os iterativos são sub-divididos em algoritmos sequenciais e algoritmos paralelos. Visando o desenvolvimento de um sistema capaz de extrair o esqueleto de uma imagem foram pesquisados, analisados e implementados diferentes tipos de algoritmos para esse problema, mais precisamente os de Stentiford, Zhang-Suen e Holt.

palavras-chave: Afinamento, esqueletonização, algoritmos de Stentiford, Zhang-Suen e Holt.

Abstract

This monograph aims to study the problem of *thinning*, also known by Image Skeletonization, to explore their applications in areas such as, Biometrics, Medicine, Engineering and Cartography. The algorithms of *thinning* can be classified into two major groups: iterative algorithms and non-iterative algorithms. Iterative are sub-divided into sequential algorithms and parallel algorithms. In order to develop a computer system able to extract the skeleton of an image, were studied, analyzed and implemented different algorithms for this problem, precisely those of Stentiford, Zhang Suen, and Holt.

keywords: thinning, applications, Stentiford, Zhang-Suen e Holt.

Sumário

1	Introdução	p. 12
1.1	Objetivos Gerais	p. 14
1.2	Organização do Trabalho	p. 15
2	Fundamentos Teóricos	p. 16
2.1	Pixel	p. 16
2.2	Imagem Digital	p. 18
2.3	Vizinhança de <i>Pixels</i>	p. 19
2.4	Ponto Extremo	p. 20
2.5	Conectividade	p. 21
2.6	Thinning	p. 21
3	Algoritmos	p. 24
3.0.1	Algoritmos Sequenciais	p. 25
3.0.2	Algoritmos Paralelos	p. 25
3.0.3	Algoritmos Não-Iterativos	p. 26
3.1	Algoritmo de Stentiford	p. 26
3.2	Algoritmo de Zhang-Suen	p. 31
3.3	Algoritmo de Holt	p. 34

4	Aplicações	p. 37
4.1	Reconhecimento Óptico de Caracteres	p. 37
4.2	Verificação de Assinaturas	p. 38
4.3	Biometria Envolvendo Impressões Digitais	p. 39
4.4	Aplicações em Geografia e Cartografia	p. 42
4.5	Aplicações em Sistemas de Segurança	p. 42
4.6	Aplicações em Medicina	p. 43
5	Desenvolvimento e Testes	p. 44
5.1	Ferramenta de Desenvolvimento	p. 44
5.2	Sistema	p. 45
5.3	Testes e Resultados	p. 46
6	Conclusões	p. 56
6.1	Trabalhos Futuros	p. 57
	Referências	p. 58

Lista de Figuras

1	lena: imagem clássica do processamento de imagens.	p. 17
2	Operação em escala na lena.	p. 17
3	Representação matemática de uma imagem digital.	p. 18
4	Representação de uma imagem monocromática digital: (a) região ampliada (b) composição dos <i>pixels</i>	p. 19
5	Imagens vetorial e bitmap.	p. 20
6	(a) vizinhança 8 (b) vizinhança 4.	p. 20
7	Caracterização do ponto extremo.	p. 20
8	Ordem em que os pixels são percorridos.	p. 21
9	Caracterização de conectividade: (a) igual a 1; (b) igual a 2.	p. 21
10	Esqueleto de uma imagem.	p. 22
11	Transformação do eixo medial: (a) forma original, (b) respectiva MAT.	p. 22
12	Exemplo de um algarismo antes (a) e depois (b) do afinamento.	p. 23
13	Tipos de algoritmo de <i>thinning</i>	p. 25
14	Máscaras do algoritmo de Stentiford.	p. 27
15	Imagens originais: (a), (c), (e); respectivas falhas: (b) <i>necking</i> , (d) <i>spurious projection</i> , (f) <i>tailing</i>	p. 28
16	Máscaras utilizadas na procura por buracos em uma imagem.	p. 29
17	Máscaras utilizadas na procura por buracos isolados.	p. 29

18	Máscaras utilizadas na procura ângulos agudos.	p. 30
19	Aplicação do algoritmo de Stentiford.	p. 30
20	Condição 1.2 - quantidade de vizinhos pretos.	p. 32
21	Condição 1.3 - vizinhos brancos.	p. 32
22	Condição 1.4 - vizinhos brancos.	p. 32
23	Condição 2.2 - quantidade de vizinhos pretos.	p. 33
24	Condição 2.3 - vizinhos brancos.	p. 33
25	Condição 2.4 - vizinhos brancos.	p. 33
26	Remoção iteração 1.	p. 34
27	Remoção iteração 2.	p. 34
28	Aplicação do algoritmo de Zhang-Suen.	p. 34
29	Coordenadas cardinais.	p. 35
30	Máscaras do <i>starcase removal</i>	p. 36
31	Classificação proposta por Henry.	p. 40
32	Exemplo de minúcias.	p. 40
33	<i>thinning</i> de uma impressão digital.	p. 41
34	Interface gráfica do <i>framework</i> QT.	p. 44
35	Interface do sistema hIP.	p. 45
36	Funções adicionadas ao sistema.	p. 46
37	Imagem da lena binarizada.	p. 47
38	Imagem caracter 'X'.	p. 47
39	Imagem caracter 'X' após afinamento.	p. 48
40	Imagem caracter 'T'.	p. 48
41	Imagem caracter 'T' após afinamento.	p. 48
42	Imagem caracter 'T' após afinamento.	p. 49
43	Modelo de assinatura.	p. 49

44	Assinatura afinada: (a) Zhang-Suen,(b) Stentiford, (c) Holt.	p. 49
45	Conjunto de assinaturas.	p. 50
46	Afinamento por Stentiford.	p. 50
47	Afinamento por Zhang-Suen.	p. 51
48	Afinamento por Holt.	p. 51
49	Impressões digitais: (a) excelente qualidade, (b) média qualidade. . . .	p. 52
50	Impressões digitais: (a) afinamento por Zhang-Suen, (b) afinamento por Stentiford, (c) afinamento por Holt.	p. 52
51	Binarização de uma impressão digital pelo sistema.	p. 52
52	Impressões digitais: (a) afinamento por Zhang-Suen, (b) afinamento por Stentiford, (c) afinamento por Holt	p. 53
53	Mediana cerebral obtida por uma tomografia	p. 53
54	Mediana cerebral negativada	p. 54
55	Mediana cerebral binarizada	p. 54
56	Mediana Cerebral: (a) afinamento por Zhang-Suen, (b) afinamento por Stentiford, (c) afinamento por Holt	p. 55
57	Tomografia: (a) (b) afinamento por Zhang-Suen, (c) afinamento por Stentiford, (d) afinamento por Holt	p. 55

Introdução

O problema de *Thinning*, conhecido também por Afinamento ou Esqueletonização de imagens, consiste em encontrar uma representação mais compacta do objeto que consiga preservar sua forma geral e manter sua estrutura topológica. Algumas das propriedades interessantes associadas ao *thinning* é que o seu processo se mantém invariante às transformações geométricas de rotação, translação e escala (uniforme em ambas as direções), além de preservar as simetrias locais.

Tradicionalmente, essa é uma operação de pré-processamento sobre a imagem com o propósito de processamentos futuros, assim como outras igualmente importantes, tais como, binarização, segmentação e detecção de arestas.

A história do problema começa nos anos 50, onde foi constatada a necessidade de se reduzir a informação a ser processada e os primeiros experimentos foram desenvolvidos para o reconhecimento de padrões de caracteres. Em 1955, pesquisas realizadas no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) constataram que uma operação de média sobre uma janela quadrada com um limiar (*threshold*) resulta no afinamento da imagem de entrada, preservando características importantes da imagem como sua forma (DINNEN, 1955).

As primeiras aplicações surgiram no âmbito da Medicina, onde eram realizadas atividades como o reconhecimento de células sanguíneas anormais através da análise de cromossomos e glóbulos brancos, assim como a análise de imagens de raios-X e artérias coronárias (LAM; LEE; SUEN, 1992). Desde então as aplicações do problema de *thinning* se expandiram enormemente e o interesse teórico pelo problema aumentou.

Diante de um levantamento inicial, pode-se observar que o número de aplicações que

utilizam essa técnica é grande, afinal desde os anos 50 técnicas de *thinning* são empregadas em diferentes áreas. Inicialmente temos o fato de que a redução da representação da imagem tem seus benefícios, pois uma imagem reduzida pode ser processada de uma forma menos custosa e mais rápida, pois nos dias de hoje a quantidade de informação armazenada é cada vez maior, assim como a necessidade de otimização na sua transmissão e processamento.

Os algoritmos de *thinning* devem determinar quais pixels são redundantes em uma imagem. A exclusão de um ponto p dependerá dos pixels na vizinhança deste ponto. A classificação destes algoritmos depende do modo de como se examinam os pixels.

Após estudos (PLOTZE; BRUNO, 2004) a classificação foi feita em dois grandes grupos: iterativos e os não-iterativos. Os iterativos são sub-divididos em algoritmos sequenciais e algoritmos paralelos. Nos sequenciais a exclusão de um pixel depende de todas as operações anteriores, ou seja, todas as operações que tenham sido realizadas até o momento.

Por outro lado, quando se utiliza o paradigma paralelo, a exclusão do pixel depende apenas da operação anterior, possibilitando a análise paralela e independente dos pixels em diferentes regiões da imagem. A análise independente dos pixels ainda permite que os mesmos sejam removidos de uma forma simultânea.

A categoria dos algoritmos não-iterativos extrai o esqueleto depois de uma única varredura na imagem, sem examinar individualmente os pixels.

Nos últimos anos, o problema de *thinning* tem sido aplicado cada vez mais. Para exemplificar, as áreas de Visão Computacional, Biometria, Medicina, Engenharia e Cartografia utilizam de modo intensivo em suas aplicações conceitos de afinamento de imagens. Dentre essas aplicações podemos destacar o reconhecimento ótico de caracteres (OCR) e um de seus casos práticos, que é o reconhecimento automático de placas de veículos, sistemas biométricos baseados em impressões digitais e a verificação de assinaturas.

Dentre os algoritmos existentes destacam-se:

- Stentiford;
- Zhang-Suen;
- Holt.

Porém, não há um algoritmo que seja bem mais eficiente que os demais, pois deter-

minados algoritmos funcionam melhor para certos tipos de imagens (PLOTZE; BRUNO, 2004), por isso é impossível apontar o melhor. Também não há uma definição exata de esqueleto ideal, pois de acordo com Zhang e Suen (1984, p.236) pontuam que *“There is no general agreement in the literature on an exact definition of thinness”*.

Uma importante aplicação é na área de Biometria, presente em atividades como emissão de passaportes, autenticação em sistemas, criminalística e futuramente as urnas eletrônicas também adotarão o sistema biométrico.

A utilização de impressões digitais para assinatura de documentos é utilizada desde os antigos chineses, egípcios e assírios, que inclusive as utilizavam em transações comerciais. Já no final do século 20, foram utilizadas pelo FBI na área de criminalística. Devido às características como universalidade, individualidade e facilidade na coleta, as impressões digitais são utilizadas para identificação e verificação de um indivíduo através do reconhecimento de padrões (MALTONI; JAIN; PRABHAKAR, 2003).

Uma das fases no processo de reconhecimento de indivíduos baseado em impressões digitais, utiliza-se dos seus pontos singulares (delta, núcleo, minúcias), que após um pré-processamento e afinamento se tornam mais evidentes, facilitando o reconhecimento do indivíduo. As aplicações típicas são: investigação criminal, emissão de documentos e validação de acesso a um sistema (PINHEIRO, 2008).

Técnicas de reconhecimento ótico de caracteres (do inglês OCR) tem tido uma grande importância na área de Visão Computacional (MARANA; PAPA; CHIACHIA, 2009). Para exemplificar alguns poucos exemplos, podemos citar: a identificação e a separação automática de correspondências nas empresas de correios por meio dos códigos postais, leitura de cheques em sistemas bancários, identificação e leitura formulários diversos. Por outro lado, textos escritos à mão exigem um esforço maior, pois a variação de caligrafia entre as pessoas é grande e esse problema não está completamente resolvido, como Benne; Dhandra e Hangargem (2009, p. 47) descrevem *“The problem of the handwritten numeral recognition is a complex task due to the variations among the writers like style of writing, shape, stroke etc”*.

Ainda área da Medicina, esqueletos de imagens (que podem ser tomografias, endoscópicas, ressonâncias) podem ser usados para auxiliar na navegação virtual dentro de órgãos humanos, auxiliando em cirurgias delicadas.

1.1 Objetivos Gerais

Embora o problema de *thinning* possa ser caracterizado em espaços de dimensão mais alta, esse trabalho tem como propósito estudar todas as questões de natureza teórica do problema de afinamento de uma imagem digital, para na seqüência implementar diferentes abordagens algorítmicas (sequenciais e paralelas) para encontrar o esqueleto de objetos bidimensionais, além da diversidade de aplicações existentes.

Nesse sentido, será desenvolvido um protótipo que tenha entre suas funcionalidades, capacidades de manipular imagens digitais, particularmente, operações de *thinning* a partir das várias técnicas existentes, o que permitirá inclusive realizar comparações entre os resultados obtidos e de performance.

1.2 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 contém a Fundamentação Teórica necessária para uma melhor compreensão do trabalho apresentado.

O Capítulo 3 destina-se a apresentação dos algoritmos de *thinning*, explicitando seus tipos e seus conceitos, destacando os algoritmos de Stentiford, Zhang-Suen e Holt.

O Capítulo 4 apresenta algumas das aplicações existentes do problema de *thinning* em áreas como Visão Computacional, Biometria e Medicina.

Por fim, no Capítulo 5 será feita uma conclusão sobre o trabalho proposto.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Para proporcionar um suporte teórico para o estudo, compreensão e análise desse trabalho, faz-se necessário apresentar alguns conceitos básicos da área de processamento de imagens, como as definições de *pixel*, imagem, vizinhança e conectividade. Essa fundamentação é essencial para uma boa compreensão dos princípios dos algoritmos de *thinning* que serão descritos posteriormente.

2.1 Pixel

Um *pixel* (abreviatura para *picture element*), ou traduzindo, elemento de uma imagem) representa a menor parte de uma imagem digital, sendo que o conjunto de milhares de *pixels* formam a imagem inteira. É um ponto da imagem que possui informações que determinam as suas características, também é possível atribuir a esse ponto uma intensidade.

Em imagens coloridas, a cor de cada *pixel* é fruto da combinação de três cores básicas: vermelha, verde e azul (sistema de cores RGB). Cada uma dessas três cores possui 256 tonalidades, da mais clara à mais escura, que, combinadas, geram mais de 16 milhões de possibilidades de cores. Por outro lado, em imagens monocromáticas a cor do *pixel* é composta por tons de cinza, variando entre o preto como a menor intensidade e o branco como maior intensidade.

Na Figura (1) temos um exemplo clássico de uma imagem digital, a imagem da lena, provavelmente a imagem de teste mais utilizada para processamento de imagens.

Ao efetuar uma operação em escala na imagem, pode-se notar a composição de seus



Figura 1: lena: imagem clássica do processamento de imagens.

pixels, sendo possível diferenciar cada um dos *pixels*, pois ao visualizar uma imagem com alto índice de aproximação, é possível identificar pequenos quadrados nela, que, somados, formam o desenho completo.

A Figura (2) mostra a parte de uma imagem da lena após sofrer a operação em escala, sendo possível visualizar os *pixels* individualmente.

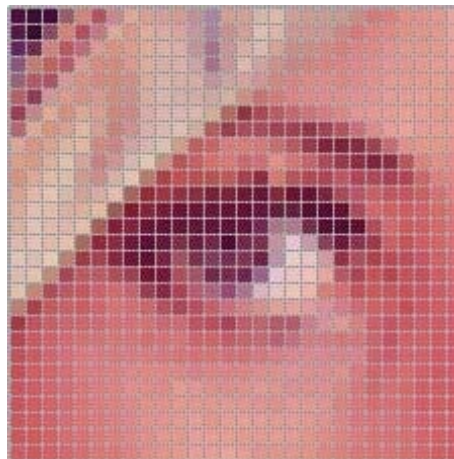


Figura 2: Operação em escala na lena.

O *pixel* também é usado para descrever a dimensão geométrica da imagem, por isso dizemos que quanto maior o número de *pixels*, maior a qualidade da imagem, pois essa apresentará uma maior quantidade de pontos por polegada, (em inglês *dots per inch* ou dpi). Dpi é uma medida de densidade relacionada à composição de imagens, que expressa o número de pontos individuais que existem em uma polegada linear na superfície onde a imagem é apresentada, também conhecida como *resolução* da imagem.

Para esse estudo adotaremos valores para o *pixel*: poderá ser branco (*pixel* apagado), com valor igual a 0 ou preto (*pixel* não-apagado) com valor igual a 1.

2.2 Imagem Digital

Uma *imagem digital* pode ser descrita como uma matriz bidimensional finita ($m \times n$) de números inteiros (MASCARENHAS; VELASCO, 1984), cujas células (no caso os *pixels*) recebem valores correspondentes à intensidade luminosa naquela região, como mostra a Figura 3

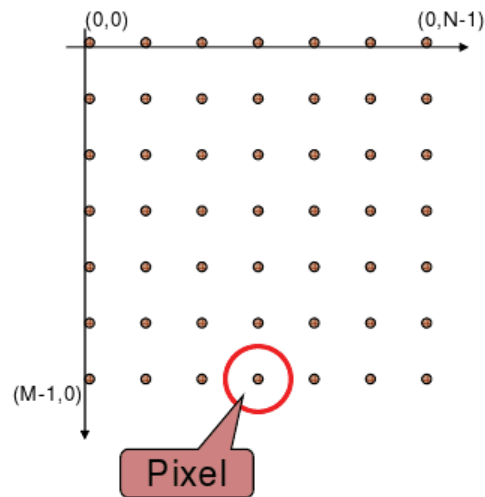


Figura 3: Representação matemática de uma imagem digital.

As imagens digitais são constituídas em centenas de linhas de *pixels* e como o olho humano não é capaz de distinguir esses *pixels* individualmente, temos a percepção da imagem como um todo. Quanto à coloração as imagens podem ser:

- Binárias: utiliza 1 bit, com cores preto e branco;
- Monocromáticas: utiliza 8 bits, com apenas tons de cinza;
- Coloridas: no sistema RGB utiliza 3 bytes para representar a cor;

A Figura (4) ilustra a representação matricial de uma imagem monocromática da lena. A parte (b) representa os valores inteiros associados à região em torno de um ponto representada em (a). Nota-se que a região em questão é composta por tons de cinza representados por uma matriz de números inteiros, com os valores variando de 0 a 255.

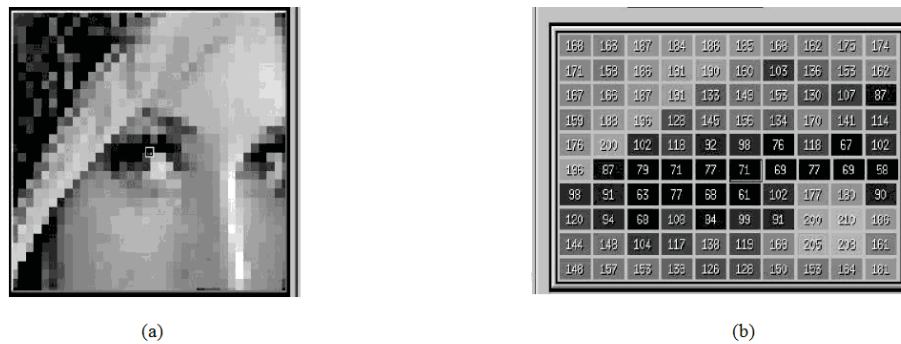


Figura 4: Representação de uma imagem monocromática digital: (a) região ampliada (b) composição dos *pixels*.

Por outro lado, a classificação em relação à origem é dividida em dois tipos:

- Bitmap;
- Vetorial;

A imagem *bitmap* utiliza uma grade de *pixels* para representar uma imagem - como se fosse uma matriz de *pixels*. Para cada um deles é atribuído um valor de cor e uma posição. São dependentes da resolução, isso acarreta em perda de qualidade ao efetuar uma operação de ampliação em uma imagem, pois possui um número fixo de *pixels*. Quando alargamos uma imagem somente aumentamos o tamanho do *pixel*, provocando sua distorção (imagem "pixelizada").

As imagens vetoriais utilizam linhas e curvas definidas por vetores que descrevem a imagem de acordo com suas características geométricas. Geralmente é um tipo de imagem gerada a partir das descrições geométricas de formas como elipses, curvas e polígonos. São independentes da resolução, podem ser redimensionados em qualquer tamanho sem que haja perda de qualidade e detalhamento.

Na Figura 5 temos os exemplos dos dois tipos de imagem. Nota-se que em (a) o tipo vetorial, composto por curvas e em (b) o tipo *bitmap*, que é composto por *pixels*.

2.3 Vizinhança de *Pixels*

O conceito de *vizinhança* será importante nos algoritmos de *thinning*, pois não será apenas necessário analisar o *pixel* em questão, mas também os seus pontos vizinhos.

Nos casos mais comuns de amostragem retangular as vizinhanças mais usadas são as

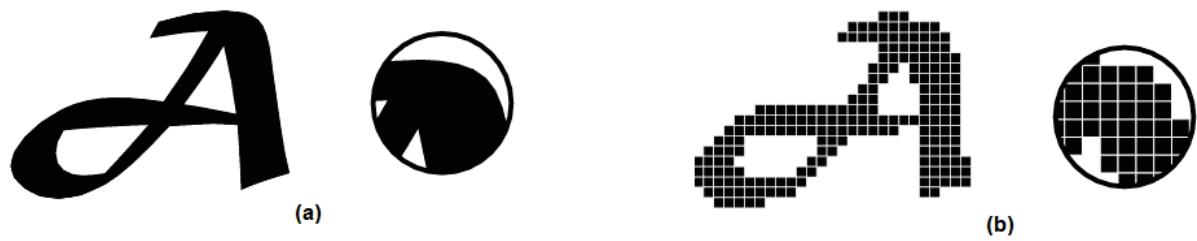


Figura 5: Imagens vetorial e bitmap.

de 4 e 8 vizinhos, conhecidas como viz4, ilustrado na Figura 6(a), e viz8, ilustrado na Figura 6(b).

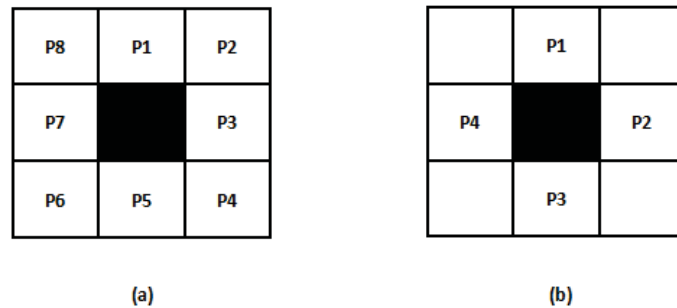


Figura 6: (a) vizinhança 8 (b) vizinhança 4.

2.4 Ponto Extremo

Um *ponto extremo* é um ponto que possui apenas um *pixel* preto como vizinho. Esse ponto não pode ser apagado pois geralmente fazem ligação entre duas partes de uma Figura. A deleção pode causar problemas como descontinuidade ou erupções na imagem.

A Figura 7 ilustra um exemplo de um *pixel* que é um ponto extremo.

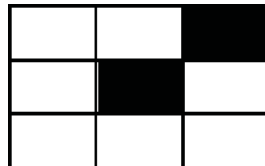


Figura 7: Caracterização do ponto extremo.

2.5 Conectividade

Conectividade é um dos conceitos mais importantes no processo de afinamento de uma imagem. Ao deletar os *pixels*, a conectividade da imagem deve sempre ser preservada, ou seja, deve haver ao menos um *pixel* que ligue duas regiões distintas quaisquer.

O *número de conectividade* de um *pixel* é definido como sendo o número de transições de branco para preto, percorrendo os *pixels* vizinhos no sentido de P1 à P8 ao *pixel* em questão (ZHANG; SUEN, 1984), como ilustra a Figura 8.

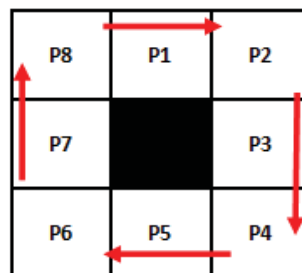


Figura 8: Ordem em que os **pixels** são percorridos.

Dizer que um *pixel* possui conectividade igual a 1 significa dizer que o número de transições de branco para preto é 1, ou seja, o *pixel* é conectado somente a uma única região. A Figura 9 ilustra o número de conectividade, na Figura 9 (a) o número de transições é igual a 1, enquanto que na Figura 9 (b) é igual 2, portanto possuem conectividades iguais a 1 e 2 respectivamente.

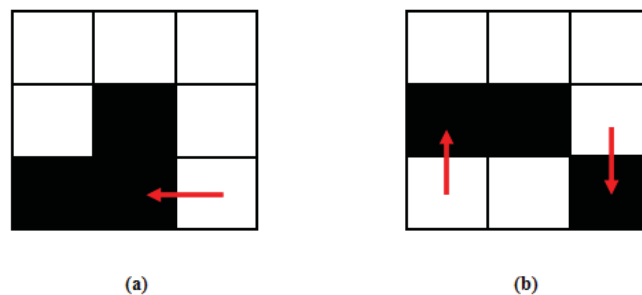


Figura 9: Caracterização de conectividade: (a) igual a 1; (b) igual a 2.

2.6 Thinning

O processo de afinamento consiste em minimizar a quantidade de pontos da imagem sem afetar a forma original da imagem. Contudo, os termos "*thinning*" e "*esqueleto-*

nização” tornaram-se os mais conhecidos na literatura.

A operação de *thinning*, remove todos os *pixels* redundantes em uma imagem produzindo uma outra, porém simplificada e com largura de um único *pixel*. Preserva sua forma original, de onde é possível extrair muitas de suas propriedades.

O ponto chave relativo aos algoritmos de afinamento é determinar quais *pixels* são redundantes em uma imagem. No processo de afinamento os *pixels* que devem ser apagados são primeiramente marcados e posteriormente removidos.

A versão afinada da forma é chamada de *esqueleto*. Outros termos diferentes como, *eixo médio* (*medial axis*) e *thinned image* também são encontrados na literatura. A Figura 10 ilustra o esqueleto de uma imagem.

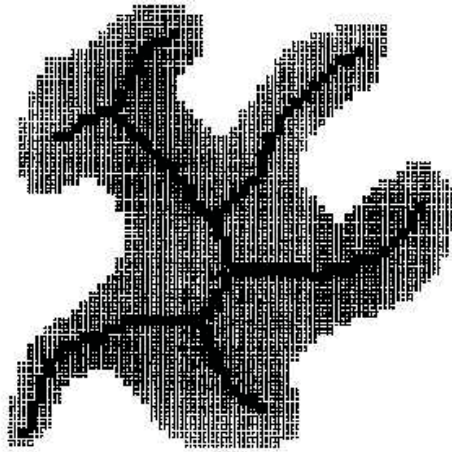


Figura 10: Esqueleto de uma imagem.

O esqueleto de uma região também pode ser definido em termos da Transformação do Eixo Medial (*Medial Axis Transformation*) - MAT (DHARMARAJ, 2005). O MAT de uma região é obtido da seguinte maneira: para cada ponto p pertencente a uma região R , encontra-se o seu vizinho mais próximo na borda B . Se p tem mais que um vizinho ele é dito pertencer ao eixo médio (esqueleto) de R . A Figura 11 apresenta uma forma simples e sua respectiva MAT.



Figura 11: Transformação do eixo medial: (a) forma original, (b) respectiva MAT.

As etapas do *thinning* são repetidas até que não existam mais *pixels* redundantes, ou

seja, até o ponto em que os *pixels* remanescentes são aqueles que pertencem ao esqueleto do objeto.

O esqueleto do objeto precisa permanecer intacto e deve respeitar as seguintes propriedades:

- As regiões afinadas precisam ter um *pixel* de largura;
- Os *pixels* que formam o esqueleto precisam permanecer próximos do centro da região de cruzamento de regiões;
- É necessário que os *pixels* do esqueleto formem o mesmo número de regiões que a imagem original apresentava.

A Figura 12 mostra uma imagem do algarismo 1 antes e após o afinamento. A imagem resultante possui largura de 1 *pixel*, porém preserva o formato e as características essenciais da imagem original.



Figura 12: Exemplo de um algarismo antes (a) e depois (b) do afinamento.

Capítulo 3

Algoritmos

Alguns tipos de algoritmos de thinning são capazes de gerar esqueletos melhores (do ponto de vista da conectividade e da conservação da topologia), porém exigindo maior tempo de processamento.

Também existem algoritmos mais velozes, mas não tão eficientes, muitas vezes podendo gerar esqueletos com falhas.

Na literatura encontramos algoritmos como:

- Stentiford;
- Zhang-Suen;
- Holt;
- Petrosino e Salvi;
- Susan.

Algoritmos sequenciais geram esqueletos melhores (do ponto de vista da conectividade e da conservação da topologia), porém exigem maior tempo de processamento. Já os algoritmos paralelos são mais velozes, mas muitas vezes podem gerar esqueletos com falhas. Nos algoritmos sequenciais a exclusão de um *pixel* depende de todas as operações anteriores, ou seja, todas as operações que tenham sido realizadas até o momento. Geram esqueletos melhores, porém exigem um gasto computacional maior que os paralelos (LAM; LEE; SUEN, 1992).

Por outro lado nos paralelos, a exclusão do *pixel* depende apenas da operação anterior, possibilitando a análise paralela e independente dos *pixels*. São mais velozes, mas podem gerar esqueletos com falhas.

Algoritmos Não-Iterativos extraem o esqueleto depois de uma única varredura na imagem sem examinar individualmente os *pixels*. A Figura 13 ilustra a divisão dos algoritmos de *thinning*.

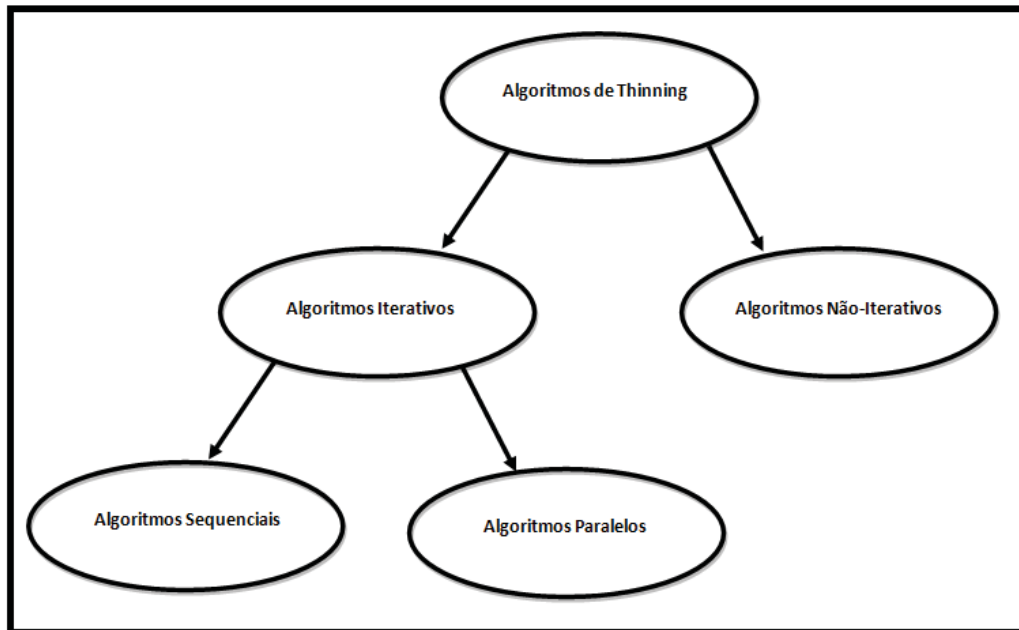


Figura 13: Tipos de algoritmo de *thinning*.

Dentre os algoritmos propostos, todos possuem em comum o fato de excluir pontos de uma dada região, desde que a extração desses pontos:

1. Não remova pontos terminais;
2. Não interrompa conexões;
3. Não cause erosão excessiva na região.

3.0.1 Algoritmos Sequenciais

Algoritmos sequenciais geram esqueletos melhores, contudo, exigem maior gasto na execução. Nele os *pixels* são examinados e a exclusão de um ponto p na n -ésima iteração depende de todas as operações que tenham sido realizadas até aquele momento.

3.0.2 Algoritmos Paralelos

Nos algoritmos paralelos, os *pixels* examinados para exclusão são baseados apenas na iteração anterior, isto é, a exclusão na *n-ésima* iteração depende apenas dos *pixels* da iteração anterior. Por isso, todos os *pixels* podem ser analisados independentemente e paralelamente a cada iteração (PETROSINO; SALVI, 2000).

Nesses algoritmos, os *pixels* que satisfazem às determinadas condições previamente estabelecidas podem ser excluídos ao mesmo tempo. Infelizmente, apesar de mais rápidos, algoritmos completamente paralelos podem ter dificuldades em conservar a conectividade das imagens (PLOTZE; BRUNO, 2004).

3.0.3 Algoritmos Não-Iterativos

Nesses algoritmos o esqueleto de um objeto é obtido a partir de uma única varredura na imagem, sem examinar individualmente todos os *pixels* (PLOTZE; BRUNO, 2004).

Eles são considerados "não baseados em *pixels*". Eles produzem uma linha central no padrão diretamente em um único passo sem examinar todos os outros *pixels*. A categoria mais simples destes algoritmos determina os pontos médios, ao longo de uma linha de varredura, de pequenas regiões que fazem parte do padrão contido em uma imagem.

São algoritmos mais velozes em tempo de execução e geram esqueletos que conservam propriedades globais e mantém a conectividade durante o processo.

3.1 Algoritmo de Stentiford

O algoritmo de Stentiford se baseia na remoção de *pixels* por camadas (STENTIFORD; MORTIMER, 1983). Várias iterações são feitas para remoção de cada camada. Estas iterações ocorrem até não existirem mais camadas a serem retiradas. O processo de remoção de *pixels* é definido através de algumas regras e máscaras.

Para executar a eskeletonização de uma imagem binária o algoritmo utiliza quatro máscaras que devem ser aplicadas sucessivamente e de forma ordenada na imagem.

As máscaras obedecem a seguinte representação:

- Os *pixels* marcados com um círculo branco representam um *pixel* com valor igual a

0;

- Os *pixels* marcados com um círculo preto representam um *pixel* com valor igual a 1;
- Quando um *pixel* é marcado com um "X" representa que não importa se o *pixel* é preto ou branco.

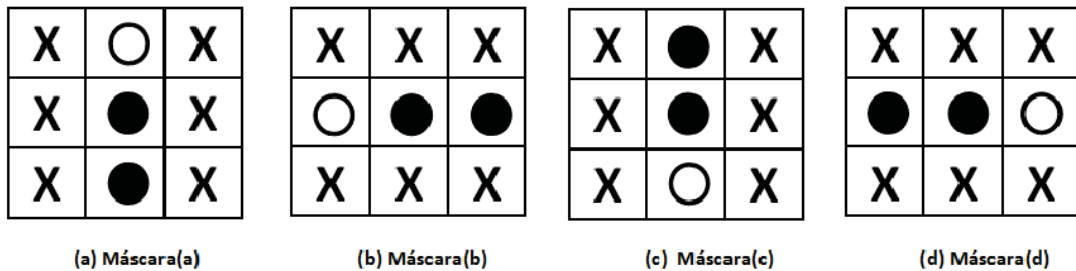


Figura 14: Máscaras do algoritmo de Stentiford.

Estas máscaras percorrem a imagem na seguinte ordem:

Máscara(a) : da esquerda para a direita e de cima para baixo;

Máscara(b) : de baixo para cima e da esquerda para a direita;

Máscara(c) : da direita para a esquerda e de baixo para cima;

Máscara(d) : de cima para baixo e da direita para a esquerda.

Em linhas gerais algoritmo é composto por 6 passos:

Passo 1 : Percorrer a imagem até encontrar um *pixel* que se encaixe na máscara(a);

Passo 2 : Se este *pixel* não for um ponto extremo e se o seu número de conectividade for igual a 1, marcar este ponto para que seja apagado mais tarde;

Passo 3 : Repetir os passos 1 e 2 para todos os *pixels* que se encaixem na máscara(a);

Passo 4 : Repetir os passo 1, 2 e 3 para cada uma das máscaras (b), (c) e (d), exatamente nessa ordem;

Passo 5 : Se algum ponto estiver marcado para ser apagado, ele deve ser apagado mudando-o para a cor branca;

Passo 6 : Se algum ponto foi apagado no passo 5, repetir todos os passos a partir do passo 1. Senão, o processo termina;

O algoritmo de Stentiford funciona somente para alguns tipos de imagens (como veremos a seguir). Dependendo da imagem o objeto resultante pode apresentar descontinuidade. A causa provável desta descontinuidade é alguma falha no processo que verifica o número de conectividade de um *pixel* ou na forma com que as máscaras são aplicadas na imagem. Alguns dos defeitos apresentados por imagens afinadas (STENTIFORD; MORTIMER, 1983) são:

- *necking*: geração de uma falha semelhante a um pescoço;
- *tailing*: geração de uma falha semelhante a uma cauda;
- *spurious projection*: geração de uma falsa projeção.

Esses problemas são gerados devido à defeitos na imagem a ser pré-processada.

Quando a imagem possui cruzamentos (duas regiões se encontram em um ângulo agudo) gera o problema de ”‘necking’”. A existência de um elemento irregular na borda gera uma falsa projeção. E quando duas linhas se encontram em um ângulo agudo geram uma projeção na imagem parecida como uma ”‘cauda’”.

Esses problemas são visualizados respectivamente na Figura 15:

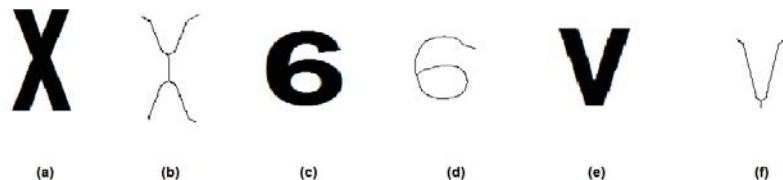


Figura 15: Imagens originais: (a), (c), (e); respectivas falhas: (b) *necking*, (d) *spurious projection*, (f) *tailing*.

Após a publicação do artigo original, Stentiford propôs novas heurísticas de pré-processamento para resolver esses possíveis problemas na imagem resultante.

O algoritmo de pré-processamento consiste nos seguintes passos:

Passo 1 : Identificar pontos que se encaixe em uma das máscaras da Figura 16;

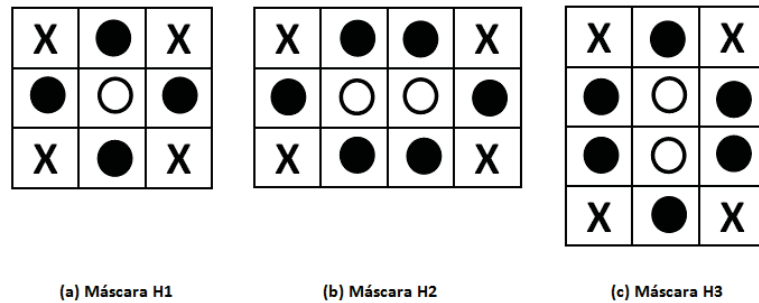


Figura 16: Máscaras utilizadas na procura por buracos em uma imagem.

Passo 2 : Se algum ponto for encontrado no Passo 1 e um dos seus dos cantos for branco, então marque seus dois vizinhos pretos pra serem apagados. Caso contrário, se os pontos encontrados não se encaixarem nas máscaras I1, I2 ou I3 (mostradas na Figura 17), marque esses pontos para preenchimento;

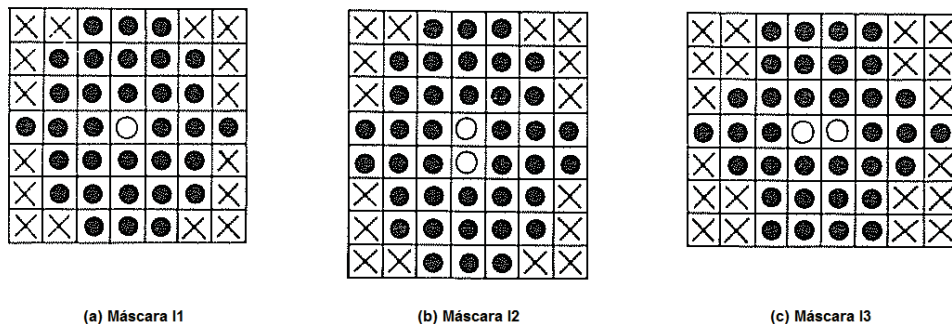


Figura 17: Máscaras utilizadas na procura por buracos isolados.

Passo 3 : Retorne ao Passo 1 até que todos os buracos forem encontrados;

Passo 4 : Apague todos os pontos marcados para serem apagados;

Passo 5 : Preencha todos os buracos encontrados (pontos marcados para preenchimentos);

Passo 6 : Remova pontos que tenham um, dois ou nenhum vizinho preto e que tenha conectividade igual a um ou a zero;

Passo 7 : Identifique ângulos que se encaixem nas máscaras da Figura 18;

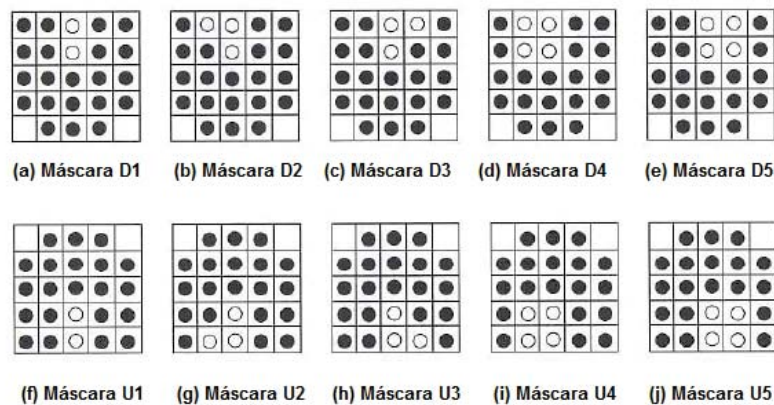


Figura 18: Máscaras utilizadas na procura ângulos agudos.

Passo 8 : Para cada ângulo encontrado no Passo 7, o elemento central é marcado para ser apagado;

Passo 9 : Repita os Passos 7 e 8 até que todos os ângulos sejam encontrados;

Passo 10 : Apague todos os elementos encontrados;

Passo 11 : Se algum elemento for apagado no Passo 10, repita os Passos de 7-10, porém usando apenas as máscaras U1, U2, U3, D1, D2 e D3. Caso contrário finalize;

Passo 12 : Se algum elemento for apagado no Passo 11, repita os passos 7-10, porém usando apenas as máscaras U1 e D1;

A Figura 28 exemplifica a aplicação do algoritmo de Stentiford.

3.2 Algoritmo de Zhang-Suen

Em 1984 Zhang e Suen publicaram um artigo chamado "A fast parallel Algorithm for thinning digital patterns" (ZHANG; SUEN, 1984). Nesse artigo propuseram um algoritmo para afinamento de imagens binárias, em que pontos da imagem tem valor 1 e pontos de fundo tem valor 0.

Mais tarde, outros pesquisadores, dentre eles o próprio Zhang, propuseram novos testes e metodologias que melhoraram ainda mais o algoritmo de Zhang e Suen em relação à qualidade da imagem resultante.

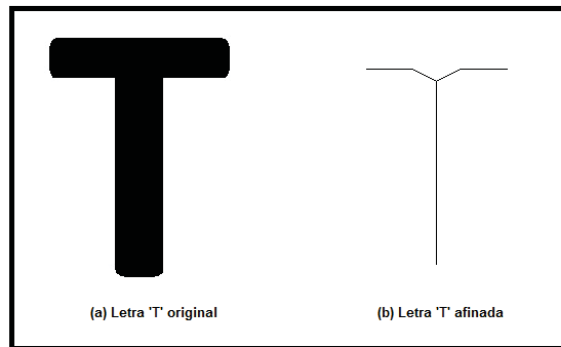


Figura 19: Aplicação do algoritmo de Stentiford.

A idéia básica do método Zhang-Suen é decidir se um determinado *pixel* será eliminado olhando somente seus oito vizinhos. Consiste em sucessivas aplicações de duas regras para decidir se o *pixel* deve ou não ser removido. Com isso os *pixels* do contorno da imagem são extraídos, exceto aqueles que pertencem ao esqueleto do objeto.

A primeira regra diz que o *pixel* somente pode ser apagado se o número de conectividade do mesmo for igual a um. Isto significa que o *pixel* é conectado somente a uma única região. Se um *pixel* possuir o número de conectividade igual a dois então, duas regiões conectadas poderão se separar, provocando descontinuidade na imagem.

Já a segunda regra diz que o *pixel* somente pode ser apagado se este possuir mais de um e menos de sete vizinhos - assegurando assim que apenas sejam retirados *pixels* das bordas da região da imagem, e não de suas partes internas.

A aplicação do algoritmo de Zhang-Suen consiste em comparar sempre o *pixel* que se está tentando eliminar com seus oito vizinhos. Existem quatro regras que devem ser aplicadas na verificação da exclusão do *pixel* e caso essas quatro forem satisfeitas, o *pixel* poderá ser eliminado.

Tais regras asseguram que se o *pixel* em questão for eliminado não fará com que diferentes regiões ligadas por ele passem a ficar separadas - causando erosão e descontinuidade. Também assegura que a eliminação de *pixels* sempre ocorrerá nas bordas da imagem.

O algoritmo proposto por Zhang e Suen é paralelo e composto por duas iterações.

Na primeira todas as seguintes condições de um *pixel* devem ser satisfeitas:

Condição 1.1 : O número de conectividade é 1;

Condição 1.2 : Existem ao menos dois *pixels* vizinhos pretos, e menos do que sete, sendo que, vizinhos pretos de um ponto são todos os pontos pretos presentes nas 8 direções possíveis a partir do ponto corrente (*pixels* de P2 à P9), vide Figura 20;

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

Figura 20: Condição 1.2 - quantidade de vizinhos pretos.

Condição 1.3 : Ao menos um dos *pixels* P2, P4 ou P6 são brancos, Figura 21;

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

Figura 21: Condição 1.3 - vizinhos brancos.

Condição 1.4 : Ao menos um dos *pixels* P4, P6 ou P8 são brancos, como mostra a Figura 22;

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

Figura 22: Condição 1.4 - vizinhos brancos.

Após essa iteração os *pixels* marcados são eliminados.

Na segunda iteração, os passos 3 e 4 são substituídos por suas rotações de 180°, sendo assim, o *pixel* P1 será excluído se as condições forem satisfeitas:

Condição 2.1 : O número de conectividade é 1;

Condição 2.2 : Existem ao menos dois *pixels* vizinhos pretos, e menos do que sete, Figura 23;

<i>P9</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>
<i>P8</i>	<i>P1</i>	<i>P4</i>
<i>P7</i>	<i>P6</i>	<i>P5</i>

Figura 23: Condição 2.2 - quantidade de vizinhos pretos.

Condição 2.3 : Ao menos um dos *pixels* P2, P4 ou P8 são brancos, como ilustra a Figura 24;

<i>P9</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>
<i>P8</i>	<i>P1</i>	<i>P4</i>
<i>P7</i>	<i>P6</i>	<i>P5</i>

Figura 24: Condição 2.3 - vizinhos brancos.

Condição 2.4 : Ao menos um dos *pixels* P2, P6 ou P8 são brancos, ilustrado pela Figura 25;

<i>P9</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>
<i>P8</i>	<i>P1</i>	<i>P4</i>
<i>P7</i>	<i>P6</i>	<i>P5</i>

Figura 25: Condição 2.4 - vizinhos brancos.

A primeira iteração é aplicada a todo ponto da borda da região considerada. Se uma ou mais condições são violadas, o valor do ponto em questão não é mudado. Se todas as condições são satisfeitas o ponto é marcado para exclusão. Após essa iteração ter sido aplicada em todos os pontos, aqueles que foram marcados são excluídos. Então a segunda iteração é aplicada à imagem da mesma forma que primeira. A primeira iteração remove o *pixel* sul, ou o leste ou o noroeste (*pixels* P6, P4 e P9, respectivamente), Figura 26.

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	X	P5

P9	P2	P3
P8	P1	X
P7	P6	P5

X	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

Figura 26: Remoção iteração 1.

A segunda iteração remove o *pixel* norte, ou o oeste ou o sudeste (*pixels* P2, P8 e P5, respectivamente), Figura 27.

P9	X	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

P9	P2	P3
X	P1	P4
P7	P6	P5

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	X

Figura 27: Remoção iteração 2.

Os *pixels* só devem ser eliminados no final de cada uma das iterações. Se no final da segunda iteração não existem *pixels* para serem eliminados, então a esqueletização está completa e o programa para.

A Figura 28 exemplifica a aplicação do algoritmo de Zhang-Suen.

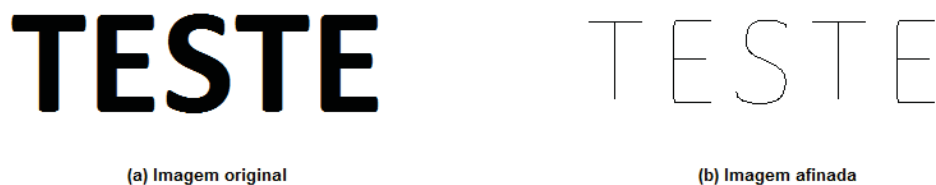


Figura 28: Aplicação do algoritmo de Zhang-Suen.

3.3 Algoritmo de Holt

O Algoritmo de Holt (HOLT et al., 1997) transforma o conjunto de regras propostas por Zhang Suen em expressões lógicas, sendo assim, é mais rápido e com a vantagem de

não envolver iterações.

Essas expressões são aplicadas em um ponto p qualquer e em seus vizinhos para ver se ele pode ser removido ou não.

A primeira iteração do algoritmo de Zhang Suen é descrita pela seguinte expressão lógica:

- $v(C) \wedge (\neg edge(C) \vee (v(L) \wedge v(S) \wedge (v(N) \vee v(O))))$

Já a segunda iteração é descrita pela seguinte expressão:

- $v(C) \wedge (\neg edge(C) \vee (v(O) \wedge v(N) \wedge (v(S) \vee v(L))))$

Onde:

- Função $v()$: Representa o valor do *pixel*, retorna o valor verdadeiro se o *pixel* for preto ou retorna falso se o *pixel* for branco.
- Função $edge()$: Retorna verdadeiro se o *pixel* estiver na borda do objeto, ou seja, se o número de conectividade for igual a 1 e possuir de dois a seis vizinhos pretos. Caso contrário retorna falso.
- Parâmetros N, S, L, O, C : Representam respectivamente os vizinhos (dados em coordenadas cardinais) Norte, Sul, Leste e Oeste do *pixel* Central, como mostra a Figura 29.

NO	N	NE
O	C	L
SO	S	SE

Figura 29: Coordenadas cardinais.

Se o resultado de ambas as expressões for falso, o *pixel* pode ser removido.

Holt também combinou as duas expressões acima gerando a seguinte expressão:

- $v(C) \wedge (\neg edge(C) \vee (edge(L) \wedge v(N) \wedge v(S)) \vee (edge(S) \wedge v(O) \wedge v(L)) \vee (edge(L) \wedge edge(SE) \wedge edge(S)))$

Após o afinamento Holt constatou nas imagens formas semelhantes a uma escada e que metade dos *pixels* que formam essas imagens poderiam ser removidos sem afetar o formato ou a conectividade do objeto.

A remoção desses pontos é chamada de *staircase removal* (ou remoção em escada). No processo de *staircase removal* o ponto central das seguintes máscaras pode ser apagado, sem que um buraco seja criado na imagem, se um dos valores X for 0 (branco).

A Figura 30 ilustra as máscaras utilizadas no proceso de *staircase removal*.

0	1	X
1	1	X
X	X	0

Máscara 1

X	1	0
X	1	1
0	X	X

Máscara 2

0	X	X
X	1	1
X	1	0

Máscara 3

X	X	0
1	1	X
0	1	X

Máscara 4

Figura 30: Máscaras do *staircase removal*

Foram descritas expressões lógicas que representam as máscaras da Figura 30.

A expressão lógica que representa as máscaras 1 e 2 é a seguinte:

- $v(C) \wedge \neg(v(N) \wedge ((v(L) \wedge \neg v(NE) \wedge \neg v(SO) \wedge (\neg v(O) \vee \neg v(S)) \vee (v(O) \wedge \neg v(NO) \wedge \neg v(SE) \wedge (\neg v(L) \wedge \neg v(S))))))$

Já a expressão lógica que representa as máscaras 3 e 4 é a seguinte:

- $v(C) \wedge \neg(v(S) \wedge ((v(L) \wedge \neg v(NE) \wedge \neg v(SO) \wedge (\neg v(O) \vee \neg v(N)) \vee (v(O) \wedge \neg v(NO) \wedge \neg v(SE) \wedge (\neg v(L) \wedge \neg v(N))))))$

Aplicações

Dentre as aplicações existentes do problema de *thinning*, podemos destacar: reconhecimento de caracteres, verificação de assinaturas, aplicações médicas e em Biometria, como descrevem (ALI; JUMARI, 2002) ”‘Skeletonization has been effectively proven in wide range of image processing usages, for instance character recognition, fingerprint recognition, inspection of printed circuit boards, chromosome shape analysis’”.

Um esqueleto de uma imagem afinada possui uma vasta aplicação, como descrevem (SOUZA; BANON, 2003) :”’Os esqueletos possuem várias aplicações em processamento de imagens, tais como: agrupamento, segmentação, vetorização, descrição de formas, reconhecimento de caracteres, inspeção e outras’”.

Nos anos 50 foram registradas as primeiras aplicações, desde então o número de aplicações cresceu e se tornou mais diversificada.

4.1 Reconhecimento Óptico de Caracteres

A importância de se reconhecer óticamente um caractere é devido à necessidade de sistemas que sejam capazes de interpretar dados obtidos através de caracteres escritos manualmente ou por máquinas.

Basicamente o computador recebe uma imagem e a processa de uma forma de que possa ”entendê-la”, faz a comparação à uma base e aplicar um processo de reconhecimento do caractere.

Uma aplicação importante é a separação automática de correspondências nas empresas de correios por meio dos códigos de endereçamento postal. Esta aplicação requer o

reconhecimento tanto de caracteres escritos manualmente quanto impressos por máquinas (pois grande parte das correspondências ainda são escritas manualmente). Outra aplicação é na área bancária como o processamento automático de cheques bancários no sistema de compensação e no processamento de formulários.

Resumidamente o processo de reconhecimento consiste nas seguintes etapas:

1. A imagem do caractere ou dígito é digitalizada;
2. As bordas do caractere ou dígito são detectadas;
3. O processo de *thinning* é aplicado;
4. É extraído o vetor característico do caractere ou dígito;
5. A partir da representação vetorial do passo 4, o caractere ou dígito é classificado.

4.2 Verificação de Assinaturas

A assinatura manuscrita é o meio mais utilizado para a validação da autenticidade de documentos. Esses documentos podem ser contratos, cheques, recibos, declarações, etc. A verificação destas assinaturas é efetuada através de extração e comparação de características da escrita.

A Grafoscopia é a Ciência que tem como objetivo apurar determinadas características gráficas na elaboração de uma escrita ou assinatura. Sua credibilidade baseia-se na característica individualista do ser humano e serve de base para perícias na verificação de autenticidade de assinaturas.

No ato de escrever, nossos gestos são tão automatizados que nossa mão se move cerca de duas vezes mais rápido do que podemos controlar conscientemente. Por isso, introduzimos certas características muito sutis em nossa assinatura, mesmo que inconscientemente, quando feitas por uma outra pessoa com intenção de falsificação, por exemplo, perdem certos elementos de dinamismo que permitem identificar a assinatura como falsa.

Se nos caracteres impressos a dificuldade encontrada são as diferentes fontes na qual os caracteres são impressos (TSAI et al., 2001), o grande problema encontrado no reconhecimento de assinaturas e caracteres manuscritos em geral, deve-se ao fato da grande variedade de estilos de escrita por pessoas diferentes (BENNE.; DHANDRA; HANGARGEM, 2009), ou seja, cada indivíduo escreve de uma forma diferente que o outro.

O processo de reconhecimento de assinaturas é similar ao de reconhecimento de caracteres, aplica-se o processo de *thinning* na imagem da assinatura depois de digitalizada e pré-processada, extraindo características e fazendo comparação.

4.3 Biometria Envolvendo Impressões Digitais

Como o próprio nome diz Biometria ("Bios" = Vida e "Metron" = Medida) é o estudo de características dos seres vivos. Essas características podem ser físicas (como digitais dos dedos, geometria das palmas das mãos, íris dos olhos), como comportamentais (a maneira com a qual o indivíduo escreve ou anda, voz).

Os Sistemas Biométricos são capazes de realizar as atividades de Verificação e Identificação:

- Verificação: O sistema deve responder a pergunta "Eu sou quem digo ser?", ou seja, faz a autenticação/validação de um usuário;
- Identificação: O sistema deve responder a pergunta "Quem sou eu?", ou seja, identifica um indivíduo.

Existem vários tipos de padrões biométricos, tais como:

- Sistema Venoso: analisa a estrutura venosa;
- Geometria da Mão: analisa o formato da mão;
- Íris: analisa os anéis coloridos em torno da pupila;
- Impressão Digital: forma mais comum, analisa a impressão digital do indivíduo.

A impressão digital vem sendo utilizados desde o tempo dos antigos assírios, babilônios, japoneses e chineses para a assinatura de documentos. Os chineses também utilizavam a impressão da palma da mão de crianças para diferenciá-las.

O primeiro a desenvolver técnicas forenses de utilização de impressões digitais foi Henry Faulds, por volta de 1880.

No final do século 19, Francis Galton apresentou uma nova classificação para as impressões digitais usando os 10 dedos. Através de seu estudo, Galton constatou que a chance de dois indivíduos possuírem a mesma impressão digital era de 1 em 64 bilhões.

No começo do século 20, Edward Richard Henry, um comissário assistente da polícia metropolitana, estabeleceu a primeira base de dados de impressões digitais da Inglaterra. O sistema de classificação Henry é usado hoje para classificar uma impressão digital, Figura 31.



Figura 31: Classificação proposta por Henry.

O NIST (National Institute of Standards and Technology) constatou que 6,2 % dos padrões são do tipo Arco plano, 7,8 % do tipo Arco Angular, 17 % do tipo Presilha Interna, 36,5 % do tipo Presilha Externa e 32,5 % do tipo Verticilo.

Isso é bem útil ao se fazer uma busca num banco de dados. Por exemplo ao se procurar uma digital que é classificada como arco, descartamos mais de 94 % do banco de dados, facilitando a busca.

O primeiro a adotar oficialmente o sistema de impressões digitais para resolução de crimes foi o FBI, estima-se que em 1946 o seu arquivo de impressões digitais já ultrapassava 100 milhões de fichas.

As impressões digitais apresentam características propícias para identificação e verificação de um indivíduo, pois são únicas (não há dois indivíduos com a mesma digital - nem mesmo irmãos gêmeos e imutáveis (não se alteram ao longo do tempo).

Foi Galton quem determinou por quais características as impressões digitais poderiam ser reconhecidas (minúcias), que é basicamente o método em uso hoje, Figura 32.

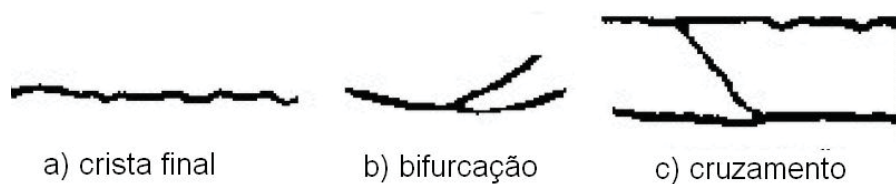


Figura 32: Exemplo de minúcias.

O processo de extração de minúcias é constituído das seguintes etapas:

1 - Aquisição da Digital: A impressão digital é extraída através de um aparelho como um sensor óptico, por exemplo.

2 - Aplicação do Filtros: Etapa de pré-processamento que auxilia na remoção de ruídos da imagem, melhorando sua qualidade.

3 - Binarização: Binarizar uma imagem significa transformar uma imagem em tons de cinza em uma imagem binária. Verifica-se a intensidade dos pixels da imagem para saber se ele receberá o valor de branco ou preto (0 ou 1), essa decisão é baseada num valor pré-definido chamado de *threshold* ou limiar. Então o valor do *pixel* é comparado ao valor do *threshold*, se for menor, recebe o valor branco e se for maior o valor preto.

4 - *thinning*: Remoção dos pixels redundantes. Quando o *pixel* é apagado seu valor muda de 1 para 0.

5 - Extração de Minúcias: Minúcias são extraídas e é realizada a comparação, Figura 33.



Figura 33: *thinning* de uma impressão digital.

Na imagem acima, à esquerda temos um exemplo de uma imagem que sofreu o processo

de binarização, já a da direita passou pelo processo de *thinning*.

As aplicações típicas de impressões digitais podem ser divididas em três grupos:

- Forense: Identificação de corpos; investigação criminal; identificação de terroristas.
- Governamental: Emissão de carteira de identidade; controle de fronteiras; seguridade social; controle de passaporte e acesso a serviços públicos
- Comercial: Validação de usuários em rede; comércio eletrônico; cartão de crédito; controle de acesso; gerência de registro médico e ensino à distância.

4.4 Aplicações em Geografia e Cartografia

Um Sistema de Informação Geográfica (Geographic Information System), também conhecido por Sistema de Informação Geo-Espacial é qualquer sistema que capture, armazene, analise, gere e apresente dados que estão ligados à localização. Pode ser considerado a fusão da cartografia, análise estatística e de tecnologia de banco de dados. Pode ser utilizado em arqueologia , geografia , cartografia, dentre outras áreas.

Porém os dados para serem utilizados num Sistema de Informação Geográfica devem ser digitalizados e processados (DHARMARAJ, 2005), esses dados podem ser mapas escaneados ou imagens de satélites.

Outra aplicação é a detecção e suavização de bordas provenientes de imagens de satélite, como descrevem (GALVANIN et al., 2005) ”‘A detecção e extração de bordas de objetos presentes na imagem têm como função auxiliar nas etapas de pré-processamento para a realização propriamente dita da extração automática e semiautomática de feições em Fotogrametria Digital.”’.

4.5 Aplicações em Sistemas de Segurança

Atualmente todas as grandes empresas utilizam-se de sistemas de vigilância e isso vêm sendo uma tendência adotada também por pequenas e médias empresas.

Um sistema de vigilância detecta objetos em movimento e é de extrema importância diferenciar quais os tipos de objetos estão em movimento, diferenciar um simples gato de um ser humano por exemplo. Segundo (XIE et al., 2009) As pernas humanas são o ponto chave para essa identificação, ao caminhar as pernas se dividem formando um tipo de ”‘V

invertido”’. Essa imagens são capturadas, sofrem o processo de afinamento e é feita a procura por um padrão - no caso o ”‘V invertido”’.

4.6 Aplicações em Medicina

Atualmente o número de acidentes vem crescendo assustoradamente e uma das consequências são vítimas que sofrem traumatismo craniano (tipo de contusão ou ainda lesão na cabeça) - podendo causar danos leves ou até mesmo irreversíveis em alguma função neurológica.

Por isso a tempestividade no atendimento ao paciente é necessária. A análise nas imagens geradas por tomografia e/ou ressonância permite ao médico avaliar a gravidade da lesão do paciente. Essas imagens sofrem o processo de afinamento para proporcionar uma visualização limpa e sem perda de informações significativas (CASANOVA; COMUNELLO, 2005).

Além da compactação de imagens volumétricas obtidas através de exames o processo de afinamento é usado para auxiliar na navegação virtual dentro de órgãos humanos em cirurgias delicadas.

Capítulo 5

Desenvolvimento e Testes

Neste Capítulo é discutido como foi realizado o desenvolvimento dos algoritmos propostos por esse trabalho. São explicitados os passos, desde a implementação e a ferramenta escolhida, até os testes e seus resultados.

5.1 Ferramenta de Desenvolvimento

O sistema em questão foi desenvolvido em C++ com o uso de um *framework* para desenvolvimento de aplicações com interfaces gráficas de usuário denominado QT. A Figura 34 apresenta a sua interface de desenvolvimento.



Figura 34: Interface gráfica do *framework* QT.

As aplicações escritas utilizando o Qt podem ser compiladas em diferentes plataformas.

Para realizar o afinamento, o usuário escolhe e abre a imagem. Depois da imagem ser carregada, é possível escolher dentre os 3 algoritmos para realizar o afinamento, como exemplifica a Figura 36

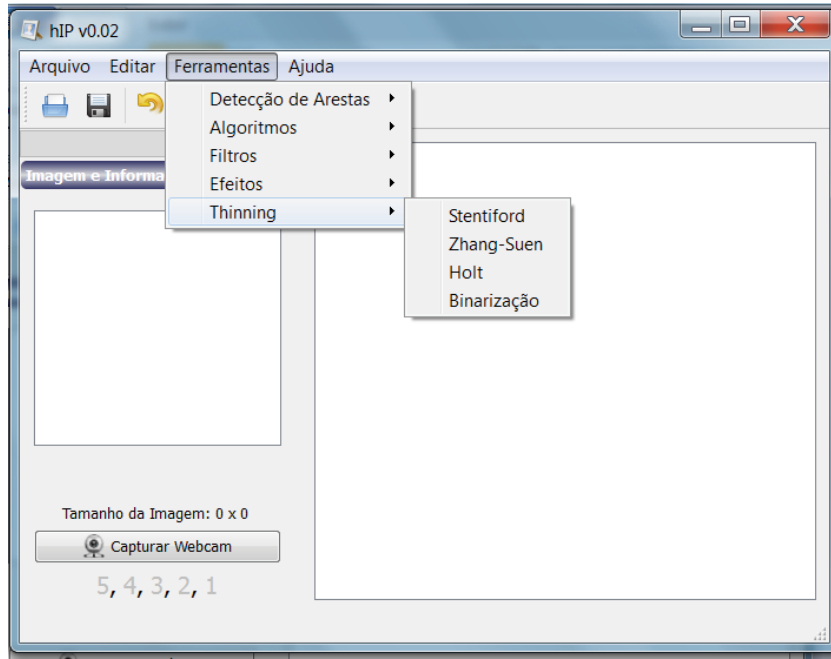


Figura 36: Funções adicionadas ao sistema.

5.3 Testes e Resultados

Após a implementação e incorporação dos algoritmos de *thinning*, foi iniciada a fase de testes. Foram utilizadas imagens de tipos variados, como caracteres alfa-numéricos, impressões digitais, ressonâncias magnéticas e tomografias.

Como os algoritmos de *thinning* são apenas aplicados em imagens binárias, foi necessária a criação e inclusão de uma função para binarização da imagem. Dessa maneira, se necessário, após a binarização a imagem resultante possuirá apenas *pixels* brancos e pretos.

O processo de binarização consiste em percorrer a imagem, comparando cada *pixel* com um *threshold* previamente definido; *pixels* com valores menores são apagados, enquanto que os *pixels* com valores maiores são trocados por *pixels* pretos.

Na Figura 37, temos o exemplo de uma imagem da lena em vários tons de cinza e a imagem resultante após o processo de binarização.

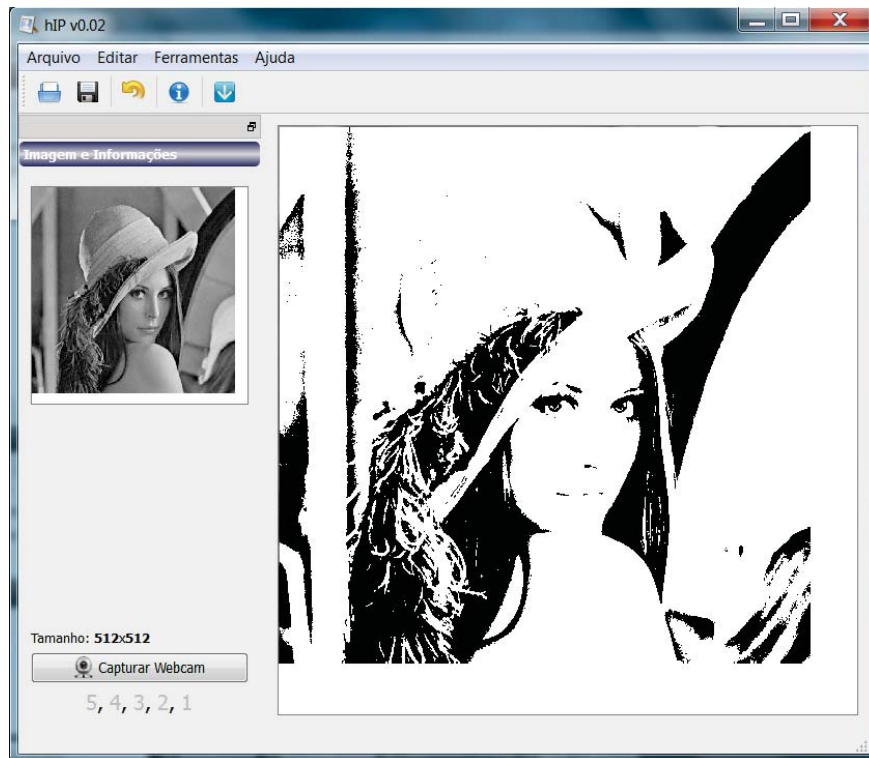


Figura 37: Imagem da lena binarizada.

A fase de testes deu-se início com imagens clássicas da literatura de *thinning*. Foram afinados exemplos simples de caracteres do alfabeto e seus resultados analisados.

A Figura 38 apresenta a primeira imagem testada, o caracter 'X'.

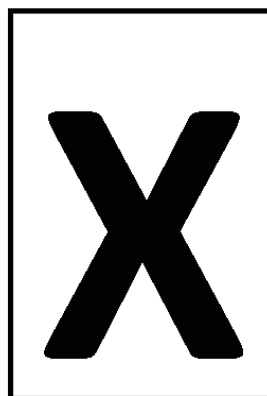


Figura 38: Imagem caracter 'X'.

Após o afinamento foi constatado que o algoritmo de Stentiford foi o mais eficaz, pois ao contrário dos outros, não eliminou pontos nas extremidades da imagem. Porém a diferença entre os resultados não foi significativa, todos algoritmos apresentaram desempenhos satisfatórios - imagens afinadas conservaram as características da imagem original,

vide Figura 39.

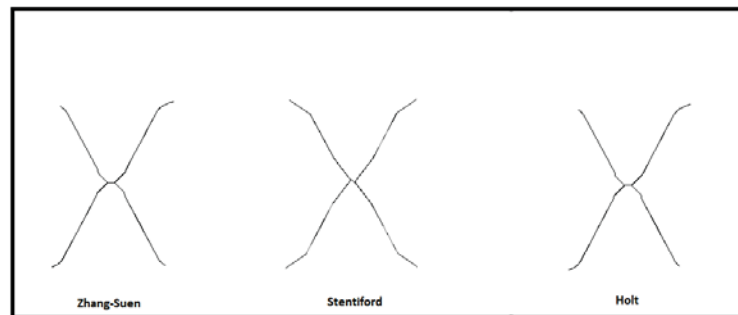


Figura 39: Imagem caracter 'X' após afinamento.

O segundo teste foi realizado com o caracter 'T', ilustrado na Figura 40.

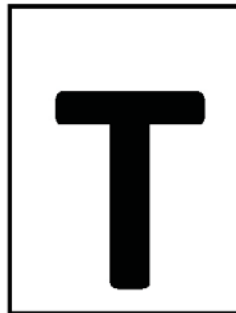


Figura 40: Imagem caracter 'T'.

Os esqueletos originados pelo afinamento do caracter 'T' apresentaram pouca variação uns dos outros, sendo que a mais visível é a existente no ponto de conexão da imagem, os resultados são apresentados na Figura 41.

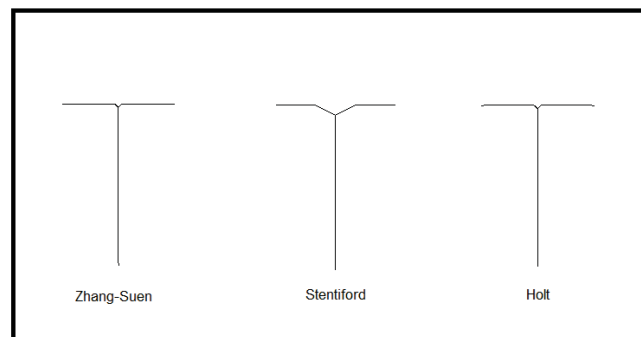


Figura 41: Imagem caracter 'T' após afinamento.

No caso de Stentiford, o esqueleto apresentou uma leve curvatura na região da conexão, conforme ilustra a Figura 42.

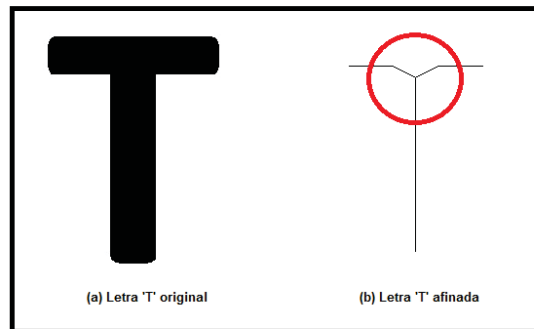


Figura 42: Imagem caracter 'T' após afinamento.

Na segunda bateria de testes foram utilizadas imagens de assinaturas. Foram afinadas variados tipos e o primeiro teste é mostrado na Figura 43.

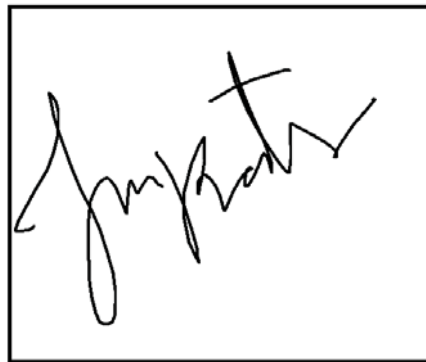


Figura 43: Modelo de assinatura.

Os esqueletos gerados pelos algoritmos de Holt e Zhang-Suen foram muito semelhantes. Ambos apresentaram pequenas falhas como o *tail*, mas produziram esqueletos contínuos. Por outro lado a aplicação do algoritmo de Stentiford gerou um esqueleto com falhas de continuidade em alguns pontos, como ilustra a Figura 44

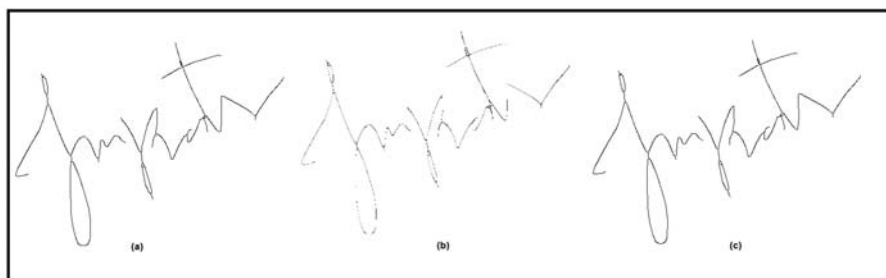


Figura 44: Assinatura afinada: (a) Zhang-Suen, (b) Stentiford, (c) Holt.

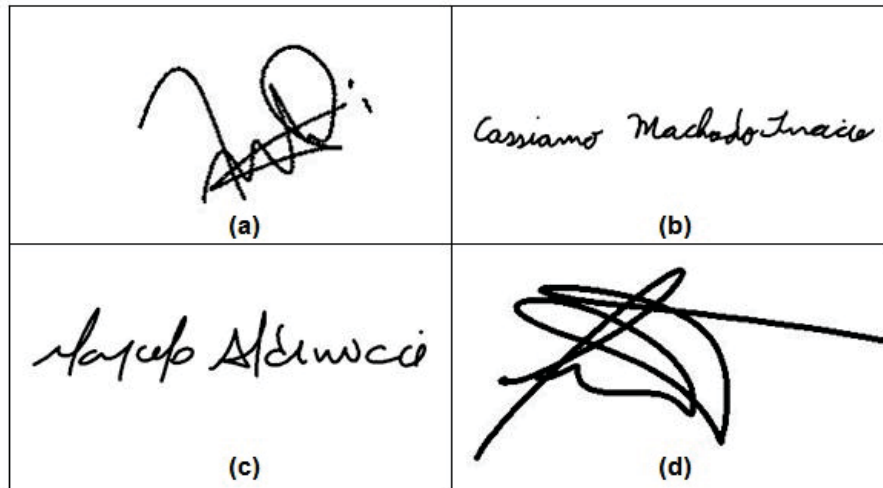


Figura 45: Conjunto de assinaturas.

O segundo teste dessa bateria afinou as assinaturas contidas na Figura 45.

O algoritmo de Stentiford novamente apresentou falhas de continuidade, na maioria das vezes em projeções em linha reta.

A falha mais nítida está ilustrada na Figura 46(d).

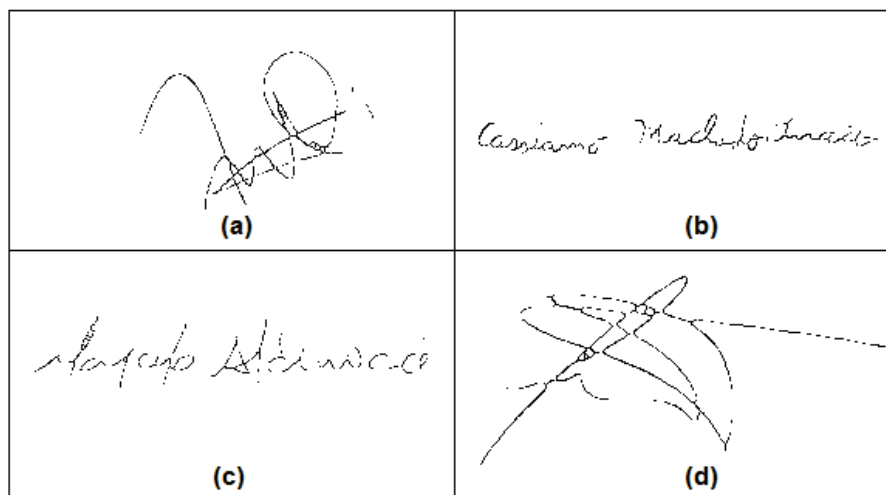


Figura 46: Afinamento por Stentiford.

O algoritmo de Zhang-Suen apresentou esqueletos excelentes que conservaram a estrutura da imagem sem falhas, como mostra a Figura 47.

Uma pequena falha, uma *tail* na parte inferior da imagem, pode ser notada na Figura 47(d).

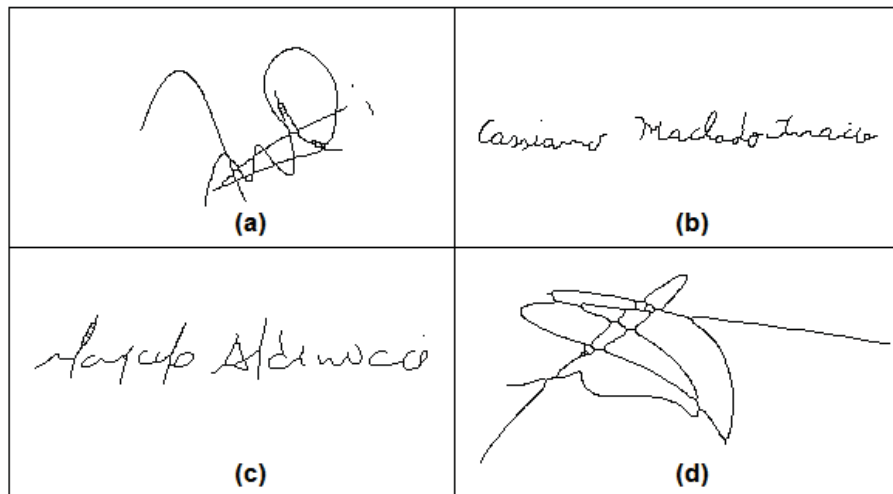


Figura 47: Afinamento por Zhang-Suen.

Para finalizar o teste de assinaturas, o algoritmo de Holt também apresentou esqueletos excelentes que conservaram a estrutura da imagem, como mostra a Figura 48. Assim como o algoritmo de Zhang-Suen, apresentou uma pequena falha na mesma parte da imagem e que pode ser notada na Figura 48(d).

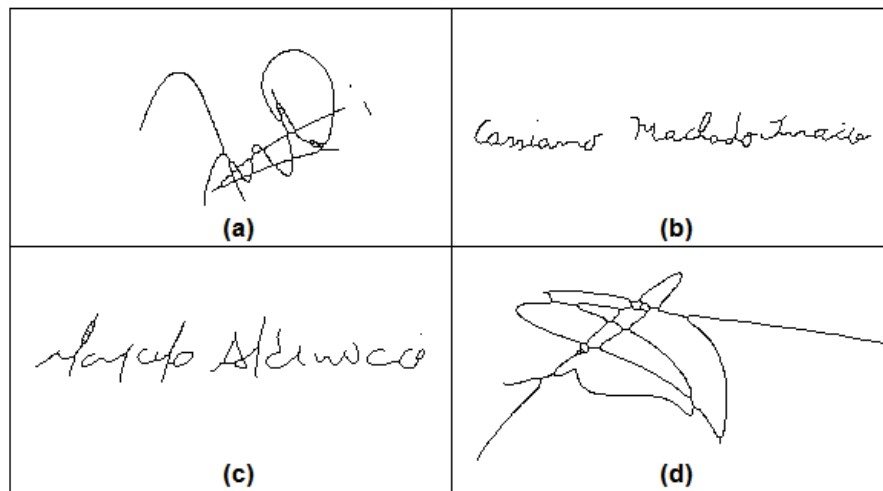


Figura 48: Afinamento por Holt.

Nos próximos testes foram utilizadas impressões digitais, que possuem grande importância na área de Biometria e estão presente cada vez mais no cotidiano.

Para testar os algoritmos de afinamento nesse tipo de imagem foram escolhidas imagens com qualidade variada com o propósito de verificar o quão eficiente são os algoritmos.

A Figura 49 ilustra esse dois tipos de imagens.

Para a imagem de teste da Figura 49(a), todos os algoritmos geraram esqueletos



Figura 49: Impressões digitais: (a) excelente qualidade, (b) média qualidade.

ótimos, sendo possível identificar com facilidade todas as minúcias da digital. As diferenças dentre os algoritmos foram mínimas e o resultado foi satisfatório.

A Figura 50 apresenta os esqueletos obtidos pelo afinamento.



Figura 50: Impressões digitais: (a) afinamento por Zhang-Suen, (b) afinamento por Stentiford, (c) afinamento por Holt.

Antes de realizar o afinamento da imagem da Figura 50(b) foi necessário que a imagem passasse pelo processo de binarização, pois há tons de cinza na mesma. A Figura 51 mostra a imagem antes e depois da binarização.

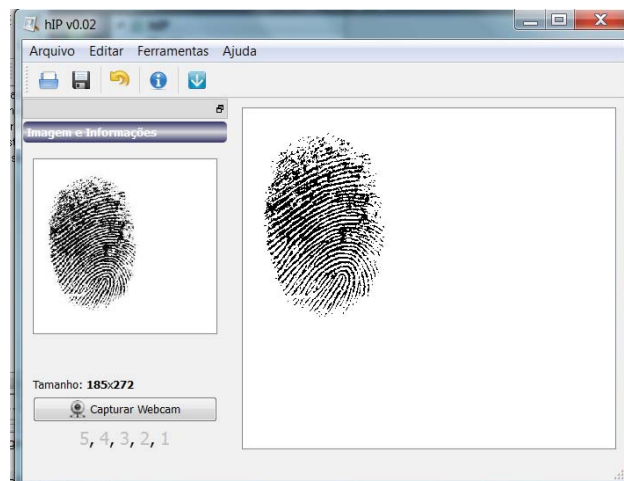


Figura 51: Binarização de uma impressão digital pelo sistema.

Após a binarização a imagem teste da Figura 56(b) foi afinada. Todos os algoritmos geraram bons esqueletos, porém não ótimos. Entretanto ainda foi possível identificar as minúcias da digital. As diferenças dentre os algoritmos foram poucas e as falhas da imagem resultante são em regiões em que a original apresentava pequenos borrões.

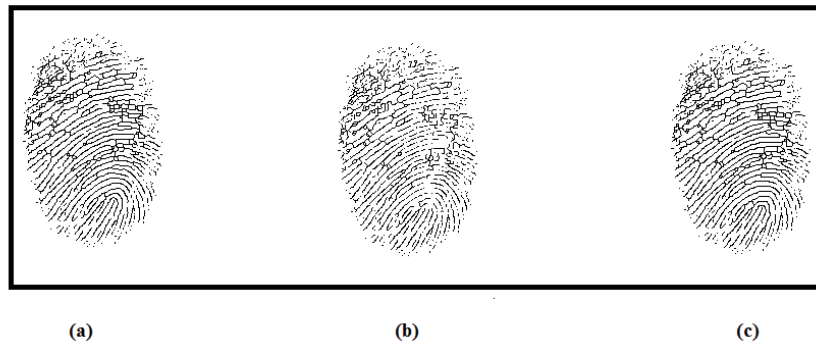


Figura 52: Impressões digitais: (a) afinamento por Zhang-Suen, (b) afinamento por Stentiford, (c) afinamento por Holt

Após finalizar os testes com impressões digitais, iniciaram-se testes em imagens na área da Medicina, e como vimos anteriormente possui uma vasta aplicação. Os primeiros teste foram iniciados em imagens de tomografias que representam a linha mediana cerebral (Figura 53).



Figura 53: Mediana cerebral obtida por uma tomografia

Porém antes de afinar a imagem, a mesma passou pelos processos de:

- Negativação: ilustrado na Figura 54;

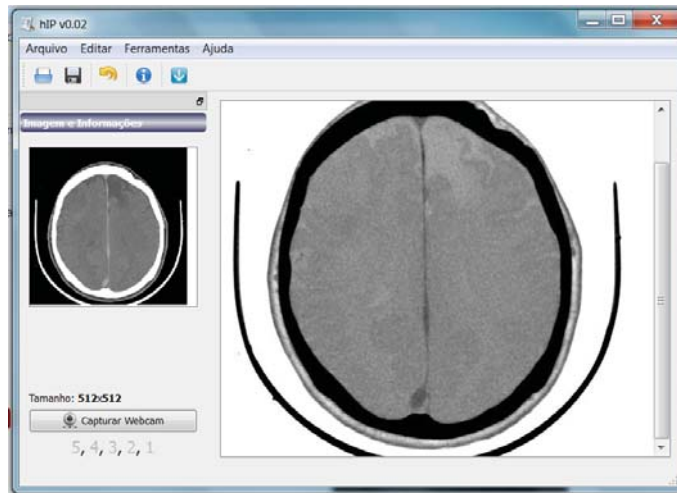


Figura 54: Mediana cerebral negativada

- Binarização: ilustrado na Figura 55.

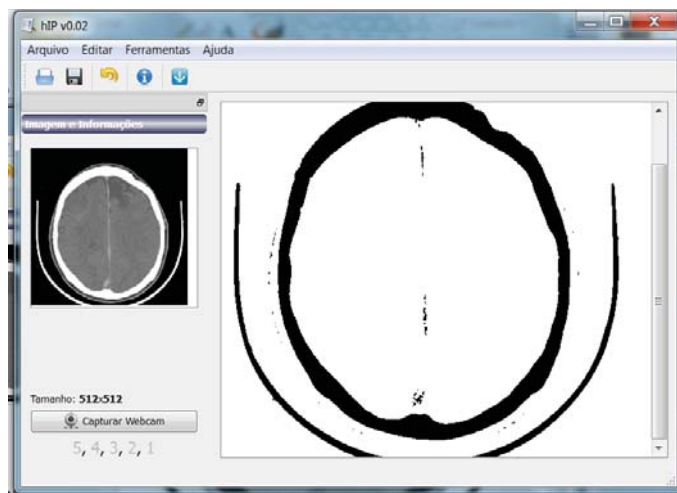


Figura 55: Mediana cerebral binarizada

Os resultados foram satisfatórios para todos os algoritmos, sendo que o de Zhang-Suen apresentou um desempenho um pouco melhor, porém não houve diferenças significativas entre os algoritmos, conforme mostra a Figura 56 .

A Figura 57 exemplifica o afinamento em uma imagem de tomografia, a Figura 57 (a) mostra a imagem original e as demais os esqueletos obtidos pela aplicação dos algoritmos. Nota-se que o resultado foi satisfatório, assim como no exemploda mediana cerebral.

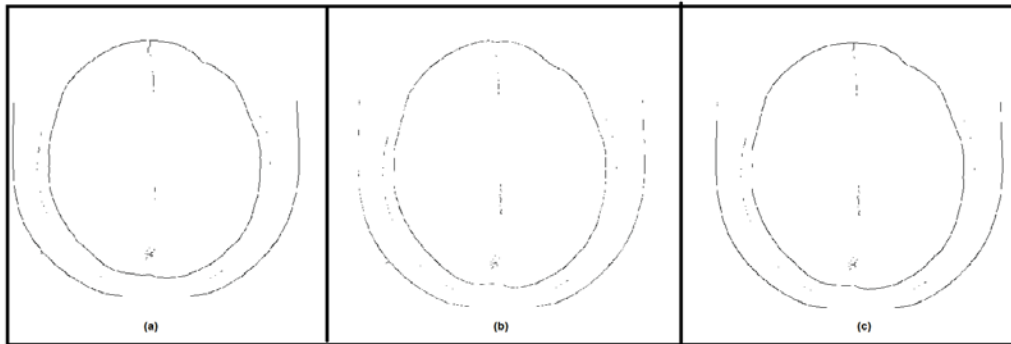


Figura 56: Mediana Cerebral: (a) afinamento por Zhang-Suen, (b) afinamento por Stentiford, (c) afinamento por Holt

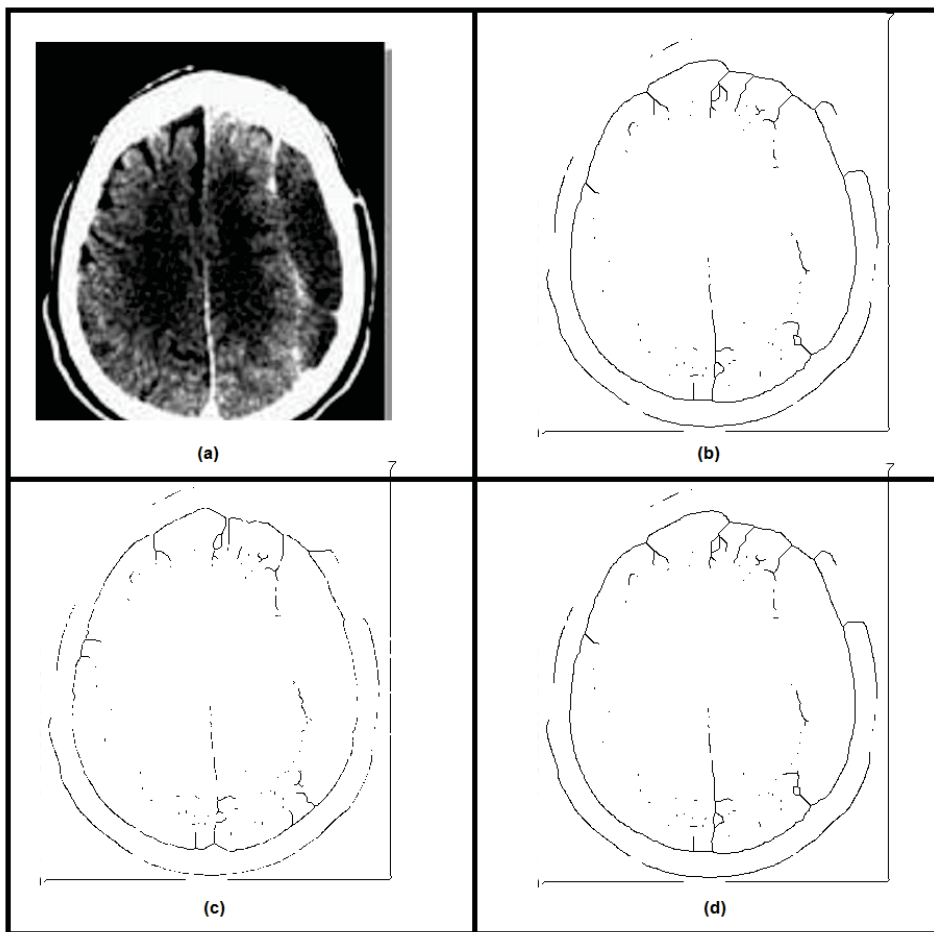


Figura 57: Tomografia: (a) (b) afinamento por Zhang-Suen, (c) afinamento por Stentiford, (d) afinamento por Holt

Capítulo 6

Conclusões

No presente trabalho, foram estudados, implementados e incorporados a um sistema desenvolvido no *framework* QT, algoritmos de *thinning* capazes de extrair o esqueleto de uma imagem.

Considerando a amplitude dos algoritmos existentes, optamos por aqueles pertencentes ao paradigma paralelo, em que os *pixels* podem ser analisados de forma paralela e independente a cada iteração (PETROSINO; SALVI, 2000).

Foram implementados três algoritmos. O primeiro teve como base o trabalho de Stentiford (STENTIFORD; MORTIMER, 1983), que se utiliza do conceito de *máscaras* que percorre a imagem. O segundo foi baseado no trabalho de Zhang-Suen (ZHANG; SUEN, 1984) que exclui *pixels* da borda/contorno da imagem. Por último foi implementado o algoritmo de Holt (HOLT et al., 1997) que transformou o conjunto de regras proposto por Zhang-Suen em expressões lógicas.

A partir do resultado obtido nesse projeto nota-se que não há um algoritmo ideal, que seja mais eficiente que os demais. O fator crucial é a imagem a ser afinada, ou seja, o bom desempenho do afinamento depende diretamente da qualidade da imagem. Imagens com boa qualidade, sem borrões ou falhas produzem bons esqueletos, enquanto que outras podem apresentar defeitos, como descontinuidade, no esqueleto resultante.

Em geral, os resultados obtidos pelo sistema foram satisfatórios, sendo possível extrair esqueletos que conservam características da forma original, em grande parte devido à robustez e consistência dos algoritmos.

6.1 Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento desse projeto, surgiram alguns aspectos importantes que podem ser tratados no futuro:

1. Implementação e incorporação de novos algoritmos ao sistema (como o de SUSAN);
2. Realização de um maior número de testes comparativos com ferramentas disponíveis no mercado;
3. Criação de novas funções de pré-processamento na imagem original, capazes de corrigir possíveis falhas.

Referências

- ALI, M. A.; JUMARI, K. B. Skeletonization algorithm for an arabic handwriting. *.Journal Teknologi, Malaysian University of Technology, (E)*, p. 1–18, 2002.
- BENNE., R. G.; DHANDRA, B.; HANGARGEM, M. Tri-scripts handwritten numeral recognition: a novel approach. *Advances in Computational Research, India*, v. 1, p. 47–51, 2009.
- CASANOVA, D.; COMUNELLO, E. Reconhecimento e representação gráfica da linha mediana cerebral. *Evidência (Videira)*, v. 1, p. 42–50, 2005.
- DHARMARAJ, G. *Algorithms for Automatic Vectorization of Scanned Maps*. Dissertação (Mestrado) — Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta., 2005.
- DINNEN, G. P. Programming pattern recognition. *Proc. Wets. Joint Comput. Conf.*, v. 1, p. 94–100, 1955.
- GALVANIN, E. A. S. et al. Detecção e afinamento de bordas utilizando suavização anisotrópica e esqueletização. in: Anais... curitiba, 2005. *Anais do 4º COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, Curitiba*, v. 1, p. 1, 2005.
- HOLT, C. M. et al. A improved parallel thinning algorithm. *Communications of the ACM.*, v. 30, p. 156–160, 1997.
- LAM, L.; LEE, S.-W.; SUEN, C. Y. Thinning methodologies - a comprehensive survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 14, p. 896–885, 1992.
- MALTONI, M. D.; JAIN, A. K.; PRABHAKAR, S. *Handbook of fingerprint Recognition*. [S.l.]: Springer-Verlag, 2003.
- MARANA, A. N.; PAPA, J. P.; CHIACHIA, G. Análise de desempenho de classificadores baseados em redes neurais, máquinas de vetores de suporte e florestas de caminhos Ótimos para o reconhecimento de dígitos manuscritos. *Anais do 5º Workshop de Visão Computacional, São Paulo.*, 2009.
- MASCARENHAS, N. D. A.; VELASCO, F. R. D. *Processamento digital de imagens*. [S.l.]: INPE, 1984.

- PETROSINO, A.; SALVI, G. A two-subcycle thinning algorithm and its parallel implementation on simd machines. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 9, p. 277–283, 2000.
- PINHEIRO, J. M. S. *Biometria nos sistemas computacionais: você é a senha*. [S.l.]: Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.
- PLOTZE, R. O.; BRUNO, O. M. Estudo e comparação de algoritmos de esqueletização para imagens binárias. *Anais do 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO*, p. 59–64, 2004.
- SOUZA, A. F.; BANON, G. J. F. Um algoritmo simples de esqueletização. ... são José dos campos 2003. *Anais do WORKSHOP DOS CURSOS DE COMPUTAÇÃO APLICADA DO INPE, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS*, 2003.
- STENTIFORD, F. W. M.; MORTIMER, R. G. Some new heuristics for thinning binary handprinted characters for ocr. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 13, p. 81–84, 1983.
- TSAI, M.-Y. et al. Toward font identification for printed chinese characters. *Proceedings of the National Computer Symposium 2001, Taiwan*, B, p. 170–177, 2001.
- XIE, F. et al. An improved thinning algorithm for human body recognition. *IST 2009 - International Workshop on Imaging Systems and Techniques*, v. 1, p. 416–420, 2009.
- ZHANG, T. Y.; SUEN, C. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. *Communications of the ACM*, v. 27, p. 236–239, 1984.