



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JADIEL CAPARRÓS DA SILVA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS PARA
BIOMETRIA FACIAL: RECONHECIMENTO DE IDENTIDADE
BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS DE PADRÕES BINÁRIOS**

Ilha solteira
2015



UNIVERSIDADE ESTADUALPAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JADIEL CAPARRÓS DA SILVA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS PARA
BIOMETRIA FACIAL: RECONHECIMENTO DE IDENTIDADE
BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS DE PADRÕES BINÁRIOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação.

Profa. Dra. Anna Diva Plasencia Lotufo
Orientadora

Prof. Dr. Jorge Manuel M. C. Pereira Batista
Coorientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Silva, Jádriel Caparrós da.
S586a Aplicação de sistemas imunológicos artificiais para biometria facial:
reconhecimento de identidade baseado nas características de padrões binários
/ Jádriel Caparrós da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
204 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Anna Diva Plasencia Lotufo
Inclui bibliografia

1. Padrão binário. 2. Geometria facial. 3. Sistemas Imunológicos artificiais. 4.
Algoritmo de seleção negativa. 5. Sistemas inteligentes. 6. Reconhecimento de
identidade.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Aplicação de Sistemas Imunológicos Artificiais Para Biometria Facial: Reconhecimento de Identidade Baseado nas Características de Padrões Binários

AUTOR: JADIEL CAPARRÓS DA SILVA

ORIENTADORA: Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RICARDO LUIZ BARROS DE FREITAS
Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia / Unidade de Rosana


Prof. Dr. DÍBIO LEANDRO BORGES
Departamento de Ciência Da Computação / Universidade de Brasília


Prof. Dr. GELSON DA CRUZ JUNIOR
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação / Universidade Federal de Goiás

Data da realização: 15 de maio de 2015.

DEDICATÓRIA

*DEDICO ESTE TRABALHO A TODO O AMOR E INCENTIVO DOS MEUS
PAIS, BENEDITO NEVES DA SILVA E CLEONICE CAPARRÓS DA SILVA,
PELO EXEMPLO DE VIDA, AMOR, TRABALHO E APOIO EM TODOS OS
MOMENTOS.*

AGRADECIMENTO

Quero primeiramente agradecer a Deus, que nos incontáveis momentos difíceis da caminhada para a conclusão deste trabalho, Ele, com a Sua presença, Sua fidelidade e o Seu amor me levantaram e me deram forças para superar os obstáculos e continuar a caminhar. “Abre, Senhor, os meus lábios, e a minha boca manifestará os teus louvores.” –Salmos 51:15.

Aos meus pais que nunca mediram esforços e trabalho dispensados a mim durante toda a minha vida. Hoje consigo conquistar mais uma vitória profissional por causa desse imenso apoio, amor e palavras sábias de instrução, esperança e incentivo.

Em muitíssimo especial, quero agradecer a minha orientadora Professora Dra. Anna Diva Plasencia Lotufo. Não consigo encontrar palavras para expressar a minha imensa gratidão pela vida da minha orientadora que esteve presente no momento mais difícil deste período de doutoramento e prontamente me estendeu a mão, me orientou com paciência e sabedoria, acreditando em mim e em meu esforço. Este trabalho concluiu-se por causa desta grande mulher que é sem dúvida um exemplo de ser humano a ser seguido por todos nós.

Ao Prof. Dr. Jorge Manuel Moreira de Campos Pereira Batista expresso a minha mais profunda gratidão, primeiramente pela oportunidade que me deu ao me receber na Universidade de Coimbra, Portugal, no período sanduíche do meu doutorado. Todos meus agradecimentos aqui seriam pouco diante de tamanha paciência, sabedoria e dedicação dispensada por ele de forma a me orientar e conduzir-me até a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Dr. Nilton Vieira Junior, Dr. Ruben Romero, Dr. Carlos Minussi, Dra. Mara Lopes e Dr. Júlio Borges, quero agradecer de uma forma especial e expressar a minha imensa gratidão pela amizade, companheirismo, incentivo em inúmeras vezes e por terem acreditado em mim.

Quero agradecer de maneira especial a dois grandes colegas que foram essenciais na realização deste trabalho e que sempre me orientaram em toda a parte de simulações e testes experimentais, ao Pedro Martins e Fernando Parra, meu muito obrigado. Vocês são indispensáveis!

Ao meu grande amigo Rodrigo de Mello que desde a minha primeira semana em Portugal sempre esteve ao meu lado me incentivando, participando de forma direta desta trajetória, me motivando e encorajando em todos os aspectos de minha vida e ainda pelos vários momentos de lazer.

A minha grande amiga Stefani Freitas, “mas há um amigo mais chegado que um irmão – Provérbios 18:24b”, a esta amiga/irmã quero agradecer por tudo.

Agradeço aos amigos Thays Abreu, Cibele Trinca, Rodrigo Souza, Agnes Aguiar e Caroline Bonifácio, pelo companheirismo.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e da seção de pós-graduação da FEIS/UNESP que direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro prestado ao desenvolvimento deste projeto tanto no Brasil como também no Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior, processo BEX 18730-12-4.

Muito obrigado a todos.

***SIGO FIRMADO NA ROCHA QUE É CRISTO, EM
QUEM ESTÃO ESCONDIDOS TODOS OS
TESOUROS DA SABEDORIA E DA CIÊNCIA.***

COLOSSENSES 2:2 E 3

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar o reconhecimento de identidade por meio de um método baseado nos Sistemas Imunológicos Artificiais de Seleção Negativa. Para isso, foram explorados os tipos de recursos e alternativas adequadas para a análise de expressões faciais 3D, abordando a técnica de Padrão Binário que tem sido aplicada com sucesso para o problema 2D. Inicialmente, a geometria facial 3D foi convertida em duas representações em 2D, a Depth Map e a APDI, que foram implementadas com uma variedade de tipos de recursos, tais como o Local Phase Quantisers, Gabor Filters e Monogenic Filters, a fim de produzir alguns descritores para então fazer-se a análise de expressões faciais. Posteriormente, aplica-se o Algoritmo de Seleção Negativa onde são realizadas comparações e análises entre as imagens e os detectores previamente criados. Havendo afinidade entre as imagens previamente estabelecidas pelo operador, a imagem é classificada. Esta classificação é chamada de casamento. Por fim, para validar e avaliar o desempenho do método foram realizados testes com imagens diretamente da base de dados e posteriormente com dez descritores desenvolvidos a partir dos padrões binários. Esses tipos de testes foram realizados tendo em vista três objetivos: avaliar quais os melhores descritores e as melhores expressões para se realizar o reconhecimento de identidade e, por fim, validar o desempenho da nova solução de reconhecimento de identidades baseado nos Sistemas Imunológicos Artificiais. Os resultados obtidos pelo método apresentaram eficiência, robustez e precisão no reconhecimento de identidade facial.

Palavras-Chave: Padrão binário. Geometria facial. Reconhecimento de identidade. Sistemas imunológicos artificiais. Algoritmo de seleção negativa. Sistemas inteligentes.

ABSTRACT

This work aims to perform the identity recognition by a method based on Artificial Immune Systems, the Negative Selection Algorithm. Thus, the resources and adequate alternatives for analyzing 3D facial expressions were explored, exploring the Binary Pattern technique that is successfully applied for the 2D problem. Firstly, the 3D facial geometry was converted in two 2D representations. The Depth Map and the Azimuthal Projection Distance Image were implemented with other resources such as the Local Phase Quantisers, Gabor Filters and Monogenic Filters to produce descriptors to perform the facial expression analysis. Afterwards, the Negative Selection Algorithm is applied, and comparisons and analysis with the images and the detectors previously created are done. If there is affinity with the images, than the image is classified. This classification is called matching. Finally, to validate and evaluate the performance of the method, tests were realized with images from the database and after with ten descriptors developed from the binary patterns. These tests aim to: evaluate which are the best descriptors and the best expressions to recognize the identities, and to validate the performance of the new solution of identity recognition based on Artificial Immune Systems. The results show efficiency, robustness and precision in recognizing facial identity.

Keywords: Binary pattern. Facial geometry. Identity recognition. Artificial immune systems. Negative selection algorithm. Intelligent systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema proposto	30
Figura 2: Arquitetura de múltiplas camadas do SIB.....	59
Figura 3: Fluxograma da fase de sensoriamento do ASN.....	68
Figura 4: Fluxograma da fase de monitoramento do ASN.....	69
Figura 5: Configuração do sistema.....	75
Figura 6: Imagens da câmera superior (em cores) e da câmera inferior (monocromático)....	75
Figura 7: Amostras de rastreamento temporais	76
Figura 8: Imagens retificadas à esquerda, o modelo 3D no centro e a projeção correspondente cilíndrica à direita.....	77
Figura 9: Organização dos dados.....	78
Figura 10: Foto de um dos pares de câmeras	79
Figura 11: As disparidades à esquerda e o estéreo à direita	80
Figura 12: A fusão de duas nuvens de pontos	81
Figura 13: Amostra da Reconstrução de Superfície Poisson.....	82
Figura 14: Pré-máscara gerada	82
Figura 15: À esquerda e ao centro as distorções causadas pelas múltiplas fontes de textura são quase imperceptíveis. À direita pode se ver que a área sob o queixo contém algumas distorções não visíveis para qualquer uma das câmeras.....	84
Figura 16: Rastreamento das Características Faciais	85
Figura 17: Representações em 2D da malha facial a) A malha facial inicial, b) O DM interpolados, c) APDI.....	91
Figura 18: Amostras temporais de DM calculados para amostras de quadros (frames) da base de dados (4D Facial Database, 2012), para cada uma das expressões faciais.....	92
Figura 19: Amostras temporais de APDIs, calculados para amostras de quadros (frames) da base de dados (4D Facial Database, 2012), para cada uma das expressões faciais.....	94
Figura 20: Obtenção de informações para vizinhança de 8 pixels	96
Figura 21: Vizinhança quadrada (8,1), circular (8,1), quadrada (8,2) e circular (16,2)	97
Figura 22: Processo realizado pelo operador LBP	97
Figura 23: Processo básico realizado pelo operador LBP	98
Figura 24: a) 3DLBP e b) LABP para uma pessoa da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).	99
Figura 25: a) Imagem de entrada de pixels vizinhos N_x e b) módulo da transformada de Fourier $ F_w(u) $ da imagem de entrada.....	103
Figura 26: a) LDPQ e b) LAPQ para uma pessoa da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).	104
Figura 27: Imagens de magnitude dos coeficientes de Gabor de um DM obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)	106
Figura 28: Imagens de fase dos coeficientes de Gabor de um DM obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas).....	107
Figura 29: Imagens de magnitude dos coeficientes de Gabor de uma APDI obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)	107

Figura 30: Imagens de fase dos coeficientes de Gabor de uma APDI obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas).....	108
Figura 31: LDGBPs obtidos a partir das imagens de magnitude utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas).....	109
Figura 32: LDGBPs obtidos a partir das imagens de fase, usando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (em linhas)	110
Figura 33: LAGBPs obtidos a partir das imagens de magnitude utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (em linhas).....	111
Figura 34: LAGBPs obtidos a partir das imagens de fase, usando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (em linhas)	111
Figura 35: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens monogênicas obtidas a partir de um DM, utilizando diferentes escalas (variando em linhas)	114
Figura 36: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens monogênicas obtidas a partir de um APDI utilizando diferentes escalas (variando em linhas).....	114
Figura 37: Codificação do quadrante do componente monogênico de orientação	115
Figura 38: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens LDMBP obtido usando as imagens da Figura 35.....	116
Figura 39: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens LAMBp obtido usando as imagens da Figura 36.....	116
Figura 40: Construção do vetor característico pela concatenação de histogramas de cada bloco na imagem, e em seguida, a concatenação de modelos de histogramas de imagem.....	119
Figura 41: a-LDGBPm, b- LDGBPp, c- LAGBPm, d- LAGBPp, e- LDMBPm, f- LDMBPp, g- LDMBPo, h- LAMBp, i- LAMBp, j- LAMBPo para uma pessoa da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).....	120
Figura 42: Espelho do diretório do Banco de Dados 4D (4D FACIAL DATABASE, 2012)	121
Figura 43: Oito expressões do banco de dado 4D (4D FACIAL DATABASE, 2012)	121
Figura 44: Arquivos para cada uma das expressões (4D FACIAL DATABASE, 2012)	122
Figura 45: Diagrama de módulos da fase de sensoriamento	125
Figura 46: Diagrama de módulos da fase de Monitoramento	126
Figura 47: Amostra de imagens não detectadas corretamente para a expressão Neutral	133
Figura 48: Amostra de imagens não detectadas corretamente para expressões Angry e Contempt.....	134
Figura 49: Amostra de imagens não detectadas corretamente para as expressões Disgust e Fear.....	135
Figura 50: Amostra de imagens não detectadas corretamente para as expressões Happy e Phrase	135
Figura 51: Amostra de imagens não detectadas corretamente para as expressões Sad e Surprise	136
Figura 52: Gráfico da média de classificações correta	157
Figura A1: Fluxograma dos mecanismos de defesa do SIB	181
Figura A2: Anatomia do sistema imunológico biológico	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens retiradas da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).....	132
Tabela 2: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens DM calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)	137
Tabela 3: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens APDI calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)	138
Tabela 4: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor 3DLBP calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	140
Tabela 5: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LABP calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	141
Tabela 6: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDPQ calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	142
Tabela 7: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAPQ calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	143
Tabela 8: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDGBPm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	145
Tabela 9: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDGBPp calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	146
Tabela 10: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAGBPm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	147
Tabela 11: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAGBPp calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	148
Tabela 12: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDMBPm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	150
Tabela 13: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDMBPp calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	151
Tabela 14: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDMBPo calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	152
Tabela 15: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAMBPM calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	153
Tabela 16: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAMBPP calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	154
Tabela 17: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAMBPO calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) .	155
Tabela D1: Resultados da referência cruzada usando a expressão Angry para gerar os detectores	200
Tabela D2: Resultados da referência cruzada usando a expressão Contempt para gerar os detectores	201
Tabela D3: Resultados da referência cruzada usando a expressão Disgust para gerar os detectores	201

Tabela D4: Resultados da referência cruzada usando a expressão Fear para gerar os detectores	202
Tabela D5: Resultados da referência cruzada usando a expressão Happy para gerar os detectores	202
Tabela D6: Resultados da referência cruzada usando a expressão Phrase para gerar os detectores	203
Tabela D7: Resultados da referência cruzada usando a expressão Sad para gerar os detectores	203
Tabela D8: Resultados da referência cruzada usando a expressão Surprise para gerar os detectores	204

LISTA DE ABREVIATURAS

AAM – Active Appearance Model.

AEP – Azimuthal Equidistant Projection.

APDI – Azimuthal Projection Distance Image.

ASN – Algoritmo de Seleção Negativa.

AU – Action Unit.

DM – Depth Map.

EI – Engenharia Imunológica.

ELBP - Multi-Scale Extended Local Binary Patterns.

FACS - Sistema de Codificação de Ação Facial

HMBPs – Histogram of Monogenic Binary Patterns.

IA – Inteligência Artificial

ICP – Interactive Closest Point.

ISR – Institute of Systems and Robotic.

LABPs – Local Azimuthal Binary Patterns.

LAGBPs – Local Azimuthal Gabor Binary Patterns.

LAMBPs – Local Azimuthal Monogenic Binary Patterns.

LAPQs – Local Azimuthal Phase Patterns.

LBPs – Local Binary Patterns.

LDGBPs – Local Depth Gabor Binary Patterns.

LDMBPs – Local Depth Monogenic Binary Patterns.

LDPQs – Local Depth Phase Quantisers.

LGBPs – Local Gabor Binary Patterns.

LGOBP – Local Gradient Orientation Binary Patterns.

LNBPs – Local Normal Binary Patterns.

LPQ – Local Phase Quantisers.

MBP – Local Binary Monogenic.

MELBPs – Multi-resolution Extended Local Binary Patterns.

MHC – Major Histocompatibility Complex.

PSF – Propagação do ponto de desfoque.

RBF – Radial Basis Function.

RNA – Redes Neurais Artificiais.

SIA – Sistema Imunológico Artificial

SIB – Sistema Imunológico Biológico.

STFT – Short-Term Fourier Transform.

SVM – Support Vector Machines.

TPS – Thin Plate Splines.

UC – Universidade de Coimbra.

VLBP – Volume Local Binary Patterns.

V-LGBP – Volume based Local Gabor Binary Patterns.

VRML – Virtual Reality Modeling Language.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	29
1.2	PROPOSTA.....	29
1.3	JUSTIFICATIVA	30
1.4	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	31
1.5	COMENTÁRIOS	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	ESTADO DA ARTE EM SIA (SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS)	35
2.1.1	Diversidade de Aplicações.....	39
2.2	ESTADO DA ARTE DE RECONHECIMENTO DE EXPRESSÕES FACIAIS	44
2.2.1	Principais Trabalhos	44
2.2.2	Outros Trabalhos.....	46
2.2.3	Comentários	54
3	SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS	55
3.1	INTRODUÇÃO.....	55
3.2	SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO (SIB)	57
3.3	SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS (SIA) E A ENGENHARIA IMUNOLÓGICA (EI)	60
3.3.1	O Conceito de Computação Natural.....	61
3.3.2	As Representações Celulares, Moleculares e afinidade	63
3.3.3	Processo de Maturação e afinidade.....	65
3.3.4	Funcionamento da Memória em um Sistema Imunológico	66
3.3.5	Propriedades dos SIBs	66
3.4	ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA (ASN)	67
3.5	CRITÉRIO DE CASAMENTO (COMBINAÇÃO) E AFINIDADE	70
3.6	COMENTÁRIOS	72
4	BASE DE DADOS	73
4.1	INTRODUÇÃO.....	73
4.2	ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA.....	74
4.3	MODO DE CAPTURA DAS IMAGENS.....	76
4.4	ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	77
4.5	ALTA RESOLUÇÃO DE RECONSTRUÇÃO 3D	78

4.5.1	Linha de base estreita	78
4.5.2	Construção da linha de base estéreo passiva	79
4.5.3	Alinhamento e fusão das nuvens de pontos	80
4.5.4	Reconstrução da Superfície de Poisson	81
4.5.5	Alinhamento de face	82
4.5.6	Texturização	83
4.5.6.1	<i>Geração das coordenadas de textura</i>	83
4.5.6.2	<i>Seleção da fonte de textura ótima</i>	83
4.6	REGISTRO DAS CARACTERÍSTICAS FACIAIS	84
4.7	COMENTÁRIOS	88
5	RECONHECIMENTO DE IDENTIDADE USANDO DINÂMICAS FACIAIS 4D	89
5.1	INTRODUÇÃO	89
5.2	REPRESENTAÇÕES DA GEOMETRIA FACIAL	91
5.3	CARACTERÍSTICAS DE PADRÕES BINÁRIOS	94
5.3.1	Local Binary Patterns (LBP)	95
5.3.2	Local Phase Quantisers	99
5.3.3	Gabor Binary Patterns (GBP)	104
5.3.4	Monogenic Binary Patterns (MBP)	112
5.4	COMENTÁRIOS	117
6	METODOLOGIA	119
6.1	MANIPULAÇÃO DAS IMAGENS	119
6.1.1	Cálculo da taxa de afinidade	123
6.1.2	Fase de sensoriamento	124
6.1.3	Fase de monitoramento	125
6.2	COMENTÁRIOS	127
7	TESTES E RESULTADOS	129
7.1	ELABORAÇÃO DOS TESTES	129
7.2	TESTE 1 – BASE DE DADOS	131
7.3	TESTE 2 – DEPTH MAP	136
7.4	TESTE 3 - AZIMUTHAL PROJECTION DISTANCE IMAGE	137
7.5	TESTE 4 – 3DLBP	139
7.6	TESTE 5 -LABP	140
7.7	TESTE 6 - LDPQ	141
7.8	TESTE 7 – LAPQ	143
7.9	TESTES 8 E 9– LDGBP_M E LDGBP_P	144

7.10	TESTES 10 E 11 – LAGBPM E LAGBPP	146
7.11	TESTES 12, 13 E 14 – LDMBPM, LDMBPP E LDMBPO	149
7.12	TESTES 15, 16 E 17 – LAMBPM, LAMBPP E LAMBPO	152
7.13	COMENTÁRIOS	156
8	CONCLUSÃO.....	159
8.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	161
	REFERÊNCIAS	163
	ANEXO A – ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO.....	179
A.1	PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS E ELEMENTOS CONSTITUINTES DA ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO	180
	ANEXO B – DISCRIMINAÇÃO DO PRÓPRIO/NÃO-PRÓPRIO NO SIB	188
B.1	DISCRIMINAÇÃO PRÓPRIO/NÃO-PRÓPRIO	189
B.2	SELEÇÃO NEGATIVA.....	190
B.2.1	Seleção Negativa das Células T.....	191
B.2.2	Seleção Negativa das Células B.....	192
B.3	AUTOIMUNIDADE	192
	ANEXO C – PROPRIEDADES E PRINCÍPIOS DA ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO	194
C.1	PROPRIEDADES DOS SIBS	195
C.2	PRINCÍPIOS DA ORGANIZAÇÃO DO SIB.....	197
	ANEXO D - RESULTADOS DO TESTE DE REFERÊNCIA CRUZADA	200

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas duas décadas, a compreensão do comportamento automático humano tem atraído grande interesse na pesquisa científica, principalmente por causa de sua ampla possibilidade de aplicações, abrangendo diversas áreas, como psicologia, informática, medicina e segurança. Sendo assim, pode-se considerar como a grande essência da próxima geração de sistemas de computação, desempenhando um papel crucial na tecnologia de computação no âmbito proativo, interfaces de usuário, sistemas tutoriais de aprendizado adaptativos, etc. (PANTIC et al. 2008).

Por meio da expressão facial, os seres humanos se comunicam de forma convincente e naturalmente proeminente as emoções. Tais emoções servem para esclarecer e dar ênfase para sinal de desacordo, compreensão, para expressar intenções e, mais em geral, para regular as interações com o ambiente e outras pessoas (AMBADY; ROSENTHAL, 1992). Assim, a análise do comportamento facial automático ganha grande importância na expressão facial usando-se manifestações emocionais e do reconhecimento de unidades de ação facial (AU – do inglês *Action Unit*), que se trata de pequenos componentes faciais (DE LA TORRE; COHN, 2011; GUNES; PANTIC, 2010).

A face é capaz de complexos movimentos tornando-se um problema complexo para o reconhecimento das expressões faciais. Por este motivo, a detecção de AUs do Sistema de Codificação da Ação Facial tornou-se uma ampla área de pesquisa. AUs são os blocos de construção de expressões e possuem um número finito, permitindo, assim, um sistema de detecção global a ser produzido.

As recentes pesquisas vêm focando seus esforços no reconhecimento complexo e espontâneo de fenômenos emocionais, como, por exemplo: tédio, falta de atenção, frustração, estresse, etc. Isso porque a maioria dos conjuntos de dados disponíveis de faces expressivas é de tamanho limitado, contendo apenas expressões afetivas, principalmente expressões prototípicas de seis emoções básicas: raiva, aversão, medo, felicidade, tristeza e surpresa (GUNES; PANTIC, 2010; ZENG et al. 2009; NICOLAOU; GUNES; PANTIC, 2011; VINCIARELLI et al. 2012).

A iluminação, oclusões e outras mudanças na aparência facial, como maquiagem e pelos faciais, são condições que deixam a maioria dos sistemas altamente sensíveis. Além disso, na maioria dos casos, quando são utilizadas imagens de intensidade faciais 2D, é necessário manter uma postura facial consistente (de preferência frontal), a fim de alcançar um bom desempenho do reconhecimento, pois mesmo as pequenas alterações na postura facial podem reduzir a precisão do sistema. Além disso, todas as informações exibidas pela face não são exploradas plenamente por meio de uma única visão de análise 2D ou com gravações de vídeo 2D que não podem capturar alterações fora do plano da superfície facial, dificultando assim a percepção das mudanças. Portanto, devem ser utilizadas simultaneamente muitas vistas 2D para que as informações faciais sejam totalmente capturadas.

Para otimização do processo de detecção, dados em 3D são adquiridos e analisados. Por exemplo, para o reconhecimento da AU, onde as mudanças súbitas que ocorrem na profundidade da superfície facial são capturadas em detalhes quando se usa dados 3D: AU18 (Lábio Franzido) não é distinguida facilmente dos AU10 + AU17 + AU24 (Lábio Superior, Queixo Levantado e Lábio Pressionado, respectivamente) em um vídeo frontal 2D, enquanto que em uma captura de ação 3D a identificação é eficaz. Da mesma forma, AU31 (Mandíbula) pode ser difícil de detectar em uma vista 2D, mas é facilmente capturada pelos dados completos em 3D.

Uma área relativamente nova de pesquisa de reconhecimento de identidade são os dados de geometria facial 3D, que permitem uma maior quantidade de informações a serem capturadas, incluindo fora do plano 2D, que não é possível gravar simultaneamente removendo os problemas de iluminação e representações inerentes aos dados 2D. Dados 3D têm sido empregados para o completo reconhecimento de expressão facial (por exemplo, (SANDBACH et al. 2012a) e também detecção facial das AU (SAVRAN; SANKUR; BILGE, 2012). Até agora, a maioria das investigações de características faciais realizadas em malhas 3D estáticas são empregadas com base em pontos faciais (LI; RUAN; MING, 2010; SHA et al. 2011; SOYEL; DEMIREL, 2010), em manchas na tela (LEMAIRE et al. 2011; MAALEJ et al. 2011), ou em modelos “Morphable” (MPIPERIS; MALASSIOTIS; STRINTZIS, 2009; ZHAO; DI HUANGE; CHEN, 2010) e, ainda, nas representações em 2D, como o mapa e curvatura das imagens de profundidade foram explorados (BERRETTI et al. 2011; SAVRAN; SANKUR; BILGE, 2012).

Por outro lado, as dinâmicas faciais são menos afetadas por mudanças físicas, tais

como o envelhecimento, ganho de peso, o uso de óculos, pelos faciais, etc. Assim, essas pesquisas mostram que a informação dinâmica não é redundante e pode ser usada com sucesso em idade, sexo ou de reconhecimento de identidade. Atualmente, há uma grande variedade de bancos de dados faciais 2D, competindo com um número menor de dados 3D e existe uma quantidade menor ainda de bancos de dados 3D dinâmico ou modelo 4D, com o tempo sendo a quarta dimensão.

Assim sendo, foi desenvolvido recentemente, nos laboratórios do *Institute of Systems and Robotic* (ISR) junto à Universidade de Coimbra (UC), uma plataforma 4D de alta resolução para a construção de uma base de dados de 9 seqüências diferentes de 65 pessoas, 7 delas com 4 repetições por expressão, num total de 774 expressões e 38.700 modelos 3D. Nesta base de dados, os movimentos da cabeça são retirados e só o dinamismo da face é considerado (4D FACIAL DATABASE, 2012). Esta será a base de dados utilizada para todo o desenvolvimento e aplicações desta tese.

A técnica dos *Local Binary Patterns* (LBPs) (OJALA; PIETIKAINEN; MAENPAA, 2002) tem sido amplamente aplicada aos problemas de reconhecimento de expressão facial (SHAN; GONG; McOWAN, 2009) e reconhecimento de identidade (AHONEN; HADID, 2006). Eles são um tipo de recurso útil, pois são simples e rápidos para codificar a imagem de cada pixel pelos números binários que refletem a vizinhança local. Variantes da técnica LBPs têm sido propostas para melhorar o desempenho da característica básica, como: *Local Gradient Orientation Binary Patterns* (LGOBPs) (LIAO; CHUNG, 2009), *Local Phase Quantisers* (LPQ) (OJANSIVU; HEIKKILÄ, 2008), *Local Gabor Binary Patterns* (LGBPs) (ZHANG et al. 2005), e *Histogram of Monogenic Binary Patterns* (HMBPs) (YANG; ZHANG; ZHANG, 2010). LBPs, LPQs e LGBPs também foram estendidos para o problema dinâmico na forma de LBP-TOP (ZHAO, PIETIKAINEN, 2007), LPQ-TOP (JIANG; VALSTAR; PANTIC, 2011) e V-LGBPs (XIE et al. 2008). O descritor tradicional LBP também foi aplicado para o *Depth Map* (DM) de uma malha facial 3D em 3DLBPs (HUANG; WANG; TAN, 2006) e para *Multi-resolution Extended Local Binary Patterns* (MELBPs) (HUANG et al. 2011). Mais recentemente, foi proposto o método *Local Normal Binary Patterns* (LNBP) (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC, 2012b) para empregar as normais da malha facial 3D para detecção de AU.

Métodos de recurso de seleção e classificação utilizados para a análise de expressão facial 3D são geralmente semelhantes aos utilizados para os casos em 2D. Uma grande

variedade de técnicas de classificação tem sido empregada em sistemas de reconhecimento de expressão facial 3D. Estes incluem métodos tais como a análise discriminante (WANG et al. 2006; ROSATO; CHEN; YIN, 2008; SHA et al. 2011), classificadores lineares (OCEGUEDA et al. 2011), classificação por vizinhança mais próxima (MAALEJ et al. 2010), agrupamento (RAMANATHAN et al. 2006), probabilidade e máximos classificadores (MPIPERIS; MALASSIOTIS; STRINTZIS, 2008a; _____, 2008b; _____, 2009; SAVRAN; SANKUR, 2009). Mais recentemente o uso de Inteligência Artificial (IA), tais como as Redes Neurais Artificiais (RNA) e Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), tem tomado enormes proporções nos estudos de classificadores como descrito em (SOYEL; DEMIREL, 2007).

Nesta tese, são explorados os tipos de recursos e alternativas adequadas para a análise de expressões faciais 3D (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC, 2012a). Para isso usou-se abordagem de Padrão Binário, que tem sido aplicada com êxito para o problema 2D, em conjunto com os SIAs para alcançar um bom desempenho do reconhecimento de identidade.

Inicialmente, os SIAs foram propostos visando resolver problemas de segurança computacional, apresentando resultados satisfatórios e eficientes (FORREST et al. 1994). Assim, baseado nesta eficiência em outras áreas de pesquisa propõe-se neste trabalho a utilização destes conceitos imunológicos em uma nova abordagem onde será realizado o reconhecimento de identidade.

No campo da IA ou Inteligência Computacional, os SIAs são técnicas promissoras baseadas nos Sistemas Imunológicos Biológicos (SIB). Os SIAs são estratégias tecnológicas que reproduzem computacionalmente as principais características, propriedades e habilidades dos SIBs (DASGUPTA, 1998), sendo uma adequada ferramenta para a realização de diagnósticos, pois possui habilidade de detecção de mudanças de comportamento em padrões. O processo de diagnóstico pode incluir novos padrões anormais sem a necessidade de reiniciar a memória do sistema, permitindo uma aprendizagem contínua. Esta característica faz com que o SIA seja uma estratégia tecnológica eficiente.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O subcampo de Reconhecimento de Identidade vem tomando destaque e se ampliando na área de inteligência computacional. O Reconhecimento de Identidade é realizado através da combinação de duas imagens, sendo uma delas a partir de uma base de dados conhecida. Por exemplo, quando combinado um determinado rosto contra uma base de dados de rostos conhecidos, pode-se obter o Reconhecimento de Identidade. Seu uso tornou-se uma alternativa para a identificação e autenticação de métodos tradicionais, como o uso de chaves, cartões de identificação e senhas.

A aplicabilidade da tecnologia de reconhecimento facial varia desde o controle de acesso para computadores à vigilância de aeroportos, vigilância privada, identificação criminal e até para a segurança nas transações de ATM (Automatic Teller Machine - Caixa Eletrônico). Por causa de sua interpretação natural (reconhecimento visual humano se baseia principalmente em análise facial) e baixa intrusão (ao contrário da impressão digital), o reconhecimento baseado em face é uma das características biométricas mais importantes.

Esta tese de doutorado tem por objetivos e contribuições:

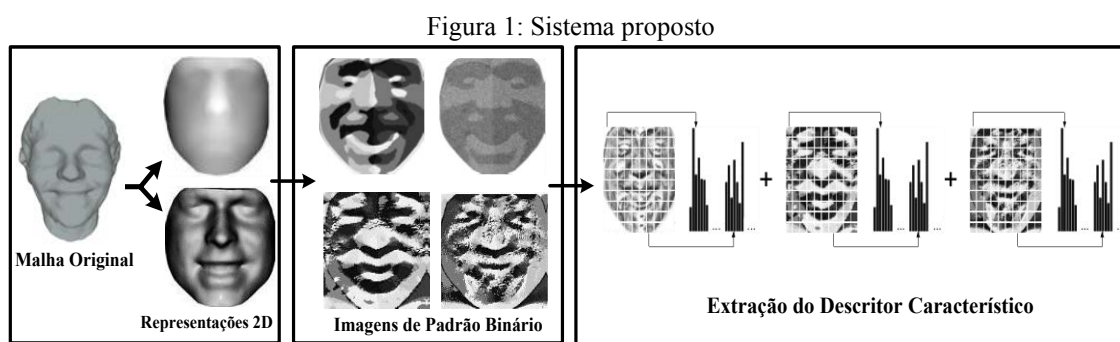
- Desenvolver dezesseis novos descritores que possibilitaram a criação de uma nova base de dados contendo imagens obtidas a partir destes;
- Desenvolver uma estratégia tecnológica inédita, capaz de realizar o reconhecimento de identidade, usando a plataforma de alta resolução de dados 4D, baseada em conceitos da imunologia biológica, com isto, apresentar uma série de resultados, visando validar a eficiência e robustez do método proposto, usando as imagens desta base de dados 3D dinâmico e as imagens resultantes da aplicação da técnica dos LBPs.

1.2 PROPOSTA

Nesta pesquisa, a geometria facial 3D foi transformada em duas representações em 2D, contendo as informações de geometria para, então, serem aplicados os algoritmos. Primeiramente, foi empregada a representação do DM com uma variedade de tipos de recursos,

tais como o Local Phase Quantisers, Gabor Filters e Monogenic Filters, para a produção de novos tipos de recursos. Em seguida, para realizar a captação de informação sobre diferentes geometrias, foi utilizada a representação 2D, denominada de APDI (Azimuthal Projection Distance Image), que representa a direção das normais na geometria facial. Assim, surge a proposta da utilização de sete novos recursos, no reconhecimento de identidade: *Local Azimuthal Binary Patterns* (LABPs), *Local Depth Phase Quantisers* (LDPQs), *Local Azimuthal Phase Patterns* (LAPQs), *Local Depth Gabor Binary Patterns* (LDGBPs), *Local Azimuthal Gabor Binary Patterns* (LAGBPs), *Local Depth Monogenic Binary Patterns* (LDMBPs) e *Local Azimuthal Monogenic Binary Patterns* (LAMBPs) (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC, 2012a).

Um resumo do sistema é apresentado na Figura. 1.



Fonte: Adaptado de Sandbach, Zafeiriou, Pantic, (2012a).

Em posse dessa série de novos recursos, nesta pesquisa propõe-se a aplicação de uma nova estratégia tecnológica computacional para a realização do reconhecimento de identidade baseado em faces e validar a eficiência e robustez do método comparando com métodos propostos na literatura especializada.

1.3 JUSTIFICATIVA

A face é uma das características biométricas do ser humano mais importantes, por causa da concentração de características próprias de cada indivíduo que permitem seu reconhecimento.

Dentre as metodologias utilizadas para o reconhecimento de padrões apresentadas na literatura até o momento, os SIAs tem ganhado destaque tendo em vista a obtenção de resultados mais rápidos, eficazes e seguros.

Na literatura não foi encontrada nenhuma referência baseada em SIA para o reconhecimento de identidade, o que valoriza ainda mais esta pesquisa, proporcionando uma contribuição importante e inédita.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em oito capítulos e quatro anexos, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1: Introdução

Neste capítulo introdutório, são apresentados os principais conceitos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho da seguinte forma: o enfoque central do trabalho, os objetivos e contribuições, a proposta e, por fim, a justificativa.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Para a realização da pesquisa, primeiramente foi feito um levantamento bibliográfico para se obter um forte embasamento teórico, destacando os principais livros, artigos, dissertações e teses. Este capítulo visa a apresentação das principais contribuições sobre os SIAs e Reconhecimento de Identidade identificados no levantamento bibliográfico.

Vale salientar dois grandes trabalhos que são as duas revisões bibliográficas mais completas encontrada sobre SIA: Artificial Immune Systems: A Bibliography (CHAUDHURI et al. 2007) e Sistemas Imunológicos Artificiais: Revisão Bibliográfica (PEREIRA; CAMPOS; VON ZUBEN, 2001).

Capítulo 3: Sistemas Imunológicos Artificiais

Os principais conceitos e formalizações que proporcionam o entendimento de SIA, bem como a Engenharia Imunológica (EI) e o Algoritmo de Seleção Negativa (ASN), são

apresentados neste capítulo. A partir deste capítulo, será possível que o leitor compreenda o funcionamento do SIA com foco no ASN, através dos fluxogramas dele apresentados.

Capítulo 4: Reconhecimento de Identidade Usando Dinâmicas Faciais 4D

Neste capítulo é apresentada a teoria sobre o Reconhecimento de Identidade a partir de uma base de dados 4D, usando o componente temporal como a quarta dimensão. Nele é feita uma abordagem sobre as representações da geometria facial e as características de Padrões Binários, bem como Local Phase Quantisers, Gabor Filters e Monogenic Filters, suas aplicações e como foram desenvolvidos os sete tipos de recursos empregados nesta tese para se fazer o Reconhecimento de Identidade.

Capítulo 5: Base de dados Faciais 4D Dinâmico

No capítulo 5, encontra-se uma descrição de como foi concebida a Base de dados 4D desenvolvida pelo ISR-UC.

Capítulo 6: Metodologia proposta

Toda a explicação a respeito da metodologia proposta para esta tese encontra-se neste capítulo, onde são apresentados os processos pelos quais cada imagem é submetida e como, posteriormente, utilizam-se conceitos imunológicos, para realização do Reconhecimento de Identidade.

Capítulo 7: Aplicações e resultados

São apresentados no Capítulo 7 todos os resultados obtidos pelo método proposto, bem como as diversas aplicações realizadas para testar e analisar seu desempenho.

Capítulo 8: Conclusões

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões desta pesquisa e inúmeras sugestões para trabalhos futuros dentro deste vasto campo de Reconhecimento de Identidade e SIA.

Anexo A: Anatomia do Sistema Imunológico Biológico

Este anexo A tem o intuito de trazer uma informação voltada para a parte da anatomia biológica dos sistemas imunológicos, com foco nos conceitos de imunidade inata e imunidade adquirida, os órgãos primários e secundários do organismo humano e suas funções.

Anexo B: Discriminação do Próprio e Não-Próprio no Sistema Imunológico Biológico

O processo de discriminação próprio/não-próprio do SIB é a base teórica para o ASN e é apresentado no anexo B, de forma a focar no princípio de seleção negativa e a autoimunidade.

Anexo C: Propriedades do Sistema Imunológico Biológico

Procurando facilitar o entendimento do leitor, neste anexo são apresentadas as propriedades que servem de base teórica para entender os SIAs.

Anexo D: Resultados do teste de referência cruzada

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos no teste de referência cruzada para o descritor APDI. O sistema de diagnóstico (fase de monitoramento) foi executado 20 vezes.

1.5 COMENTÁRIOS

Nesta introdução, buscou-se apresentar os detalhes e a importância da análise do comportamento facial automático e sua utilização na ação de Reconhecimento de Identidade seguido pelos objetivos desta tese, as contribuições, a proposta, a justificativa e finalmente a organização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos publicados pela comunidade científica na área de SIA, bem como os métodos e técnicas de aplicação para a solução de problemas e como a metáfora imunológica foi utilizada para o desenvolvimento desta estratégia tecnológica. Ainda, neste capítulo, serão apresentados trabalhos acerca da Classificação e Reconhecimento de Expressões Faciais destacando os métodos utilizados para a resolução deste problema.

2.1 ESTADO DA ARTE EM SIA (SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS)

Nesta seção, será apresentado um levantamento bibliográfico sobre SIA, por se tratar de um assunto relativamente novo nesta linha de pesquisa.

A complexidade das células e moléculas do sistema imunológico foi decifrada por meio de cadeias de atributos binárias para ser representada. O artigo pioneiro a teorizar essa técnica foi publicado por Farmer, Packard e Perelson (1986). Nesse artigo foram propostas equações diferenciais ordinárias visando estabelecer um modelo teórico contínuo do sistema imunológico.

O trabalho desenvolvido por Farmer, Packard e Perelson (1986) dá suporte à relação entre o sistema imunológico e os sistemas classificadores, propostos mais tarde por Holland (1998). No entanto, a edição inicial do livro de Holland, publicada em 1975, dava início a comparação entre a base teórica da rede imunológica e os algoritmos genéticos, expondo determinadas semelhanças. Farmer, Packard e Perelson (1986) demonstraram que, tanto no sistema imunológico, como nos sistemas classificadores, as equações dinâmicas são formalmente iguais. Este fato permite constatar que ambos os sistemas podem ser amplamente empregados para se resolver problemas relacionados à engenharia.

Paralelamente a este, os estudos desenvolvidos por Hoffmann (1986) e Hoffmann et

al. (1986) formalizam um modelo de rede neural artificial a partir do sistema imunológico, sendo um dos primeiros trabalhos a apresentar tal proposta.

Vale salientar que o desenvolvimento de modelos teóricos do sistema imunológico (imunologia teórica) não teve início com estes estudos. Porém, a abordagem se dava prioritariamente na compreensão dos fenômenos imunológicos e não na elaboração de SIA, objetivando uma inovação da teoria de sistemas inteligentes. A revisão acerca da imunologia teórica foi amplamente explorada nos trabalhos de Mohler, Bruni e Gandolfi (1980) e Perelson e Weisbusch (1997).

A seguir, os trabalhos aplicados ao reconhecimento de padrões mais relevantes para o desenvolvimento desta tese, visto que são as principais aplicações do SIA que podem ser relacionados ao reconhecimento de identidade. Porém, não existe na literatura estudos específicos desta área.

Na década de 1990 foi desenvolvido um modelo de SIA que trazia algumas características semelhantes aos sistemas biológicos. Com base no modelo de Farmer, Packard e Perelson (1986) discutido anteriormente, Hunt e Cooke (1996) propuseram esse sistema, o qual exemplifica um mecanismo de aprendizagem evolutiva e possui a capacidade de armazenamento endereçável por conteúdo e de esquecer informações menos utilizadas. Além disso, trata-se também de um exemplo de rede de adaptação não linear com controle descentralizado, na qual o processamento se dá de forma eficaz e eficiente.

Para estudar os processos de reconhecimento e aprendizagem de padrões que acontecem tanto nos níveis individuais como em espécies, Forrest et al. (1993) desenvolveram um modelo em que os antígenos, bem como os anticorpos, são representados por meio de cadeias binárias. O algoritmo utilizado neste modelo é o algoritmo genético, o qual se trata de uma idealização da teoria da evolução de Darwin (princípios da variação genética e da seleção natural) em um modelo computacional. Este algoritmo pode ser dividido em duas linhas: com cruzamento, referente ao modelo de evolução genética, e sem cruzamento, referindo-se de forma razoável à seleção clonal. Os autores mostraram como o algoritmo genético se relaciona com o sistema imunológico e buscaram entender acerca da manutenção da diversidade, bem como reconhecer os aspectos comuns compartilhados entre os antígenos, ou seja, a capacidade de generalização. Essa necessidade de generalização, bem como os resultados da formulação matemática foram explanadas por Smith, Forrest e Perelson (1993).

O sistema proposto foi utilizado para resolver um problema de reconhecimento de padrões simples e, posteriormente, foi testado em um problema real: reconhecimento de sequência de DNA. Os autores fizeram também uma comparação dos resultados obtidos com os sistemas mais comuns àquela altura e notaram sua consistência com os resultados obtidos utilizando-se RNAs, sistemas classificadores e sistemas de raciocínio baseado em casos (CBR – *Case-Based Reasoning*). A necessidade de apenas alguns exemplos positivos e a possibilidade de examinar os padrões aprendidos são as principais vantagens do modelo. Mais tarde, Hunt et al. (1999) implantaram um SIA em linguagem Java, aplicando-o a resolução de problemas reais.

Na química, cada substância é capaz de absorver energia eletromagnética a um determinado comprimento de onda, bem como cada tipo de ligação (energia vibracional e rotacional) gerando um espectro. Dasgupta, Cao e Yang (1999) desenvolveram um modelo capaz de identificar as substâncias que geraram o sinal no espectro eletromagnético de sua cadeia binária gerada por um algoritmo genético. Para tal, foi criada uma espécie de biblioteca contendo essas cadeias binárias, da qual anticorpos especialistas identificavam os antígenos, reconhecendo-os no espectro.

A aplicação do SIA não se limita ao reconhecimento de padrões, podendo se estender a diversas áreas, como por exemplo, segurança computacional, que tem como principal preocupação evitar a exposição do sistema a ataques por vírus e a invasão por *hackers*. Alguns trabalhos desta área são:

- Forrest et al. (1994) propuseram um modelo de reconhecimento de atividades incomuns em sistemas computacionais. Os linfócitos T possuem a capacidade de identificar uma grande variedade de antígenos, através da seleção negativa. Baseando-se nessa habilidade, foi desenvolvido pelos autores um ASN, como componente formal do SIA.
- D'haeseleer, Forrest e Helman (1996) propuseram dois novos algoritmos de detecção afim de melhorar o ASN.
- Kephart (1994) desenvolveu um sistema para o computador não identificar erroneamente software legítimos como ilegítimos.
- Nos trabalhos de Okamoto e Ishida (1999a, b) foi apresentada uma abordagem distribuída contra vírus de computador, utilizando as informações do "próprio" (arquivos de computador host) e "não-próprio" (vírus de computador).
- Kim e Bentley, (1998), propuseram um ASN com *niching* para a detecção de intrusos na rede.

- Wierzychon (2000a, b) aprimorou os métodos de geração do repertório linfocitário propostos por Forrest et al. (1994) propondo assim, um novo algoritmo computacional mais simples.

Alguns trabalhos relevantes para a construção desta tese são aplicados à resolução de problemas de otimização:

- Hajela e Lee (1996), Hajela, Yoo e Lee (1997) e Hajela e Yoo (1999), descreveram uma pesquisa genética com capacidade de reconhecimento de padrão intrínseca.
- Endoh, Toma e Yamada (1998) e Toma, Endoh e Yamada (1999), propuseram um algoritmo baseado em rede imunológica biológica usado para distinguir uma classe celular "próprio" e "não-próprio".
- Baseado no princípio da seleção clonal, De Castro e Von Zuben (1999, 2000a, 2002) propuseram um algoritmo com a função de explicar as características básicas de uma resposta imunológica adaptativa a um estímulo antigênico. Foram realizadas implementações computacionais do algoritmo, levando em conta a afinidade de maturação na resposta imunitária e com objetivo de realizar tarefas de aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões.

Outros trabalhos mais relevantes presentes na literatura e que também deram base para o desenvolvimento desta tese serão mostrados a seguir. Todos os trabalhos abordam o reconhecimento de padrões, aplicado a diversas áreas, fundamentados nos SIA:

- Vertosick e Kelly (1989, 1991) propõe uma modificação das conexões de uma rede neural, podendo ser treinadas para armazenar e recuperar informações padronizadas, de forma que a rede seja capaz de reconhecer padrões completos a partir de entrada incompleta.
- Abbattista et al. (1996) desenvolveram um modelo de memória associativa com capacidade de armazenar e recuperar padrões contendo ruído.
- A partir do modelo de rede imunológica proposto por Farmer, Packard e Perelson (1986), foi proposto por Aisu e Mazutani (1996) um sistema de aprendizagem imunológica. Seu objetivo é incorporar um mecanismo de busca distribuída a um processo de relaxamento de restrições. Este sistema em particular é muito importante para esta tese, pois foi o primeiro a ser testado ao problema de detecção automática de anomalias em imagens, abrindo grandes investigações nesse âmbito. A partir disto, pesquisadores começaram a discutir e propor sistemas de análise de imagens, assim

como o sistema proposto nesta tese, que é um sistema baseado em imunologia aplicado ao reconhecimento de identidade a partir de imagens.

- Deaton et al. (1997) propuseram uma implementação do ASN, baseada em cadeias de DNA usando computadores de DNA capazes de resolver problemas complexos.
- McCoy e Devarajan (1997) abordam a aplicação de um sistema, que faz a identificação de pixels em imagens de satélites, sendo capaz de identificar todos os elementos não pertencentes à classe desejada.
- Foi apresentada por Potter e De Jong (1998) uma abordagem para a concepção de aprendizagem, em que um algoritmo genético co-evolutivo é aplicado para a aprendizagem de conceitos partindo de exemplos positivos (self) e negativos (nonself) pré-classificados.
- Bernaschi, Castiglione e Succi (1998) propuseram a aplicação de conceitos e métodos de uma implementação em paralelo de autômatos celulares, que se mostrou capaz de fornecer novas perspectivas com relação a dinâmica da resposta do sistema imunológico.

2.1.1 Diversidade de Aplicações

Esta seção é destinada à apresentação de outros importantes trabalhos presentes na literatura abordando os SIA. Todos esses trabalhos são baseados nas técnicas imunológicas aplicadas à resolução de algum problema. Existem inúmeros outros trabalhos, porém, serão apresentados aqui os de maior relevância e que servirão de base para a construção de propostas de trabalhos futuros desta tese. Vale ressaltar que, a maioria dos trabalhos aqui apresentada, deram base para toda a teoria de SIA, portanto sendo trabalhos de grande fator de impacto para a comunidade acadêmica pertencente a esta linha de pesquisa.

O reconhecimento mútuo entre um antígeno e um anticorpo aplicado ao diagnóstico de processos foi proposto através do modelo de rede imunológica de Ishida (1993). Posteriormente, Ishida (1996a) aprimorou o seu modelo dinâmico e o aplicou para desenvolver uma rede, contendo sensores, capaz de diagnosticar falhas nos dados recebidos pelos sensores.

Uma das primeiras propostas foi introduzida por Epstein e Axtell (1996), utilizando

um modelo relativamente simples com foco no estudo da dinâmica das infecções intra- e-inter-agentes aplicado a possibilidade de afetar outros processos sociais.

Existe, na literatura, uma variedade de casos de organismos de memória e de técnicas de recuperação com características diferentes, que podem afetar sua utilidade em diferentes aplicações. Hunt, Cooke e Holstein (1995) e Hunt e Fellows (1996) apresentaram uma nova abordagem para a organização da memória e recuperação de caso baseado em metáforas retiradas do sistema imunológico humano. Eles ilustraram como os SIA são inerentemente baseados em casos e como eles se apoiam em sua memória endereçável por conteúdo para realizar a tarefa de identificar novas situações similares a casos anteriores.

Um modelo binário do sistema imunológico é usado para estudar os efeitos da evolução do código genético para as moléculas de anticorpos através dos trabalhos de Hightower, Forrest e Perelson (1995) e Perelson, Hightower e Forrest (1996). Eles estudaram os efeitos da evolução na codificação genética de moléculas de anticorpos através deste modelo binário. Uma importante característica desta codificação é o fato de que nem todos os genes contidos no genótipo estão expressos no fenótipo.

Um importante trabalho foi apresentado por Ishida (1996b), onde ele faz uma comparação do sistema baseado em imunidade com outros sistemas biológicos, tais como redes neurais e algoritmos genéticos. Em seguida, ele propôs que o processo de auto-identificação é ainda um outro aspecto importante do sistema imunológico, porém pouco explorado. A aplicação destes modelos foi feita em redes de computadores.

Posteriormente, uma abordagem mais elaborada, utilizando os modelos de cooperação estabelecidos pelos SIA, foi empreendida para construir um modelo multiagente, que foi apresentado por Ballet, Tisseau e Harrouet (1997). O objetivo era realizar o estudo da cinética da proliferação de anticorpos, em resposta a vários tipos de substâncias antigênicas. Essa abordagem, possui como vantagens, a possibilidade de visualização dos agentes, sua modificação, remoção ou adição ao modelo com muita facilidade. Isso mostra a importância da aplicação, pois muitos dos antígenos letais são fracamente reconhecíveis e muito proliferativos.

A proposta de Slavov e Nikolaev (1998) trouxe a abordagem de um algoritmo de busca evolutiva baseado numa versão discreta de um modelo dinâmico da rede imunológica. Neste trabalho, foram ainda apresentados resultados de evidência empírica para a superioridade desta versão imune ante o algoritmo genético simples em tarefas de indução autômatos com número

finito de estados.

Os mecanismos de reconhecimento e eliminação antigênica constituem exemplos da capacidade de reflexão do sistema imunológico, de acordo com Suzuki e Yamamoto (1998). Eles apresentaram uma proposta que sugere que o problema da distinção próprio/não-próprio fosse reduzido à comparação da reflexão de uma imagem em um espelho com um elemento externo. Este princípio foi também identificado como um padrão de arquitetura de software denominado de *POSA*.

O primeiro livro sobre este assunto foi lançado por Dasgupta (1998), no qual foram definidos os aspectos computacionais dos SIAs e a partir daí ele propôs várias aplicações, modelos e fenômenos com base nos SIBs. Com o lançamento deste livro, as pesquisas nessa área proporcionaram um grande avanço.

Foi exposto um SIA para a produção de *schedules* robustos por Hart e Ross (1998, 1999a, 1999b). Este sistema foi aplicado ao problema de alocação de tarefas em um ambiente sujeito a variações e fluxo contínuo. Exemplos de aplicações foram abordados, como bibliotecas genéticas, a maturação de afinidade e o princípio da seleção clonal

Uma versão imunológica da programação genética foi apresentada por Nikolaev, Iba e Slavov (1999) com o intuito de fazer uma busca progressiva e controlada por uma função de adaptabilidade dinâmica, baseada na analogia com um modelo de rede imunológica.

Uma estrutura, baseada na linguagem de programação Java, foi proposta por Suzuki e Yamamoto (2000), com o objetivo de construir uma rede imunológica artificial aplicada na coordenação de servidores Web abertos.

Posteriormente, Timmis e Neale Hunt (1999, 2000) usaram este SIA para motivar e fundamentar a construção de um modelo "transparente", aplicando-o ao problema de análise de dados e aglomeração.

São apresentadas as similaridades e diferenças entre o SIB, que possui uma estrutura distribuída, robusta, dinâmica, diversificada e adaptável, e os sistemas classificadores, através do trabalho de Forrest e Hofmeyr (1999) e Farmer, Packard e Perelson (1986).

Oprea e Forrest (1998, 1999) apresentaram uma proposta semelhante com a de Hightower, Forrest e Perelson (1995) e Perelson, Hightower e Forrest (1996), com o intuito de

explorar como a probabilidade de sobrevivência de um indivíduo está relacionada ao tamanho do repertório de anticorpos. Em seguida eles ainda estenderam esta análise para medidas de afinidade (regras de ligação ou *matching*) antígeno-anticorpo mais realistas.

Hofmeyr (2000) propôs um novo modelo para realizar a detecção distribuída aplicada à segurança computacional. Esse foi um importantíssimo trabalho para essa área, pois ele definiu todas as propriedades organizacionais que até hoje são conhecidas sobre os SIAs.

Dois pesquisadores brasileiros desta área de sistemas baseados em imunologia são De Castro e Von Zuben. Eles apresentaram várias abordagens aplicadas a soluções de problemas, dentre as quais pode-se citar uma abordagem baseada no algoritmo clássico de *simulated annealing*, com o objetivo de gerar um conjunto inicial de candidatos à solução de um determinado problema. Esse conjunto é dotado de certas características que possibilitam uma boa cobertura do espaço de busca (De Castro e Von Zuben, 2000b). Primeiramente, este algoritmo foi aplicado ao problema de inicialização de redes neurais com múltiplas camadas, o qual obteve grande sucesso (De Castro e Von Zuben, 2001a). Outro grande trabalho proposto por De Castro e Von Zuben (2000c), aborda o desenvolvimento de um modelo de rede imunológica artificial aplicado aos problemas de compressão de informação. Quando utilizada em conjunto com algumas ferramentas de clusterização hierárquica de dados e um método de representação de grafos, esta ferramenta demonstrou capacidade de separar *clusters* mesmo quando os dados de treinamento são não-linearmente separáveis e para configurações arbitrárias dos *clusters* (formato e distribuição dos dados). E, ainda, a rede imunológica (aiNet) foi implementada em associação com uma inferência estatística resultando em uma alternativa às RNAs.

De Castro (2001) sugeriu um novo conceito denominado Engenharia Imunológica (EI), visando fazer uma seleção dos modelos existentes de SIA, de modo a definir quais são os pontos principais e explorá-los a fim possibilitar o desenvolvimento de ferramentas de EI partindo da resenha dos SIAs e da pesquisa dos mecanismos imunológicos. Na EI, o principal objetivo é desenvolver ferramentas utilizando os princípios do sistema imunológico para resolver problemas do mundo real. Ainda neste trabalho, o autor propôs quatro novas ferramentas, denominadas de SAND, CLONALG, ABNET e a já conhecida aiNet, sendo que os algoritmos CLONALG e o aiNet vieram a ser consideradas as duas ferramentas mais populares da literatura e foi a partir dele que os sistemas baseados em imunologia ganharam uma maior notoriedade e atenção dos pesquisadores atuais desta área.

Outro importante livro foi publicado por De Castro e Timmis (2002), onde eles apresentam um novo paradigma para a inteligência computacional com base nos SIAs abordando tanto os conceitos naturais como os artificiais.

Em Lima e Minussi (2012) e Lima, Barros e Minussi (2012) foi apresentado um método para detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica por meio da aplicação do ASN de um SIA. Por meio desta proposta, foi possível a criação de um método simples e de fácil modificação com objetivo de atender a grande evolução das tecnologias das subestações.

De Castro, Hruschka, Rosatelli e Campello (2004) apresentaram um relevante trabalho de revisão bibliográfica sobre o assunto de SIA. Nos últimos anos, diversos trabalhos têm surgido, onde pode-se destacar as principais propostas:

- Cazangi (2004) propôs o controle de navegação de robôs através da computação evolutiva;
- França (2005), visando a otimização dinâmica, propôs a aplicação dos algoritmos bioinspirados;
- Ferreira (2008) propôs a previsão de perdas comerciais em redes de distribuição de energia elétrica através de uma ferramenta de aprendizado de máquina;
- Greensmith e Aickelin (2007) propuseram uma nova abordagem para a detecção de intrusos em redes de computadores;
- Greensmith (2007) apresentou uma tese focando em um algoritmo baseado no funcionamento das células dendríticas, que são pertencentes ao sistema imunológico inato e responsáveis pela resposta imune;
- Silva (2009) propôs um algoritmo imunoinspirado, o qual se trata de uma junção da teoria do perigo e as células dendríticas aplicado a detecção de intrusos em redes de computadores.

Nesta seção foram apresentados os mais importantes e variados trabalhos que usam a abordagem de sistemas imunológicos aplicados aos mais diversos tipos de resolução de problemas.

2.2 ESTADO DA ARTE DE RECONHECIMENTO DE EXPRESSÕES FACIAIS

Nesta seção serão apresentados os mais importantes trabalhos de Classificação e Reconhecimento de Expressões Faciais com enfoque nos métodos utilizados neste problema. Como este assunto já é mais conhecido pela comunidade de pesquisadores, serão apresentados apenas os artigos que deram base para o desenvolvimento desta tese e posteriormente alguns trabalhos mais relevantes.

2.2.1 Principais Trabalhos

Serão apresentados os seis trabalhos que deram base para o desenvolvimento do método de reconhecimento facial proposto nesta tese.

O principal trabalho foi proposto por Sandbach, Zafeiriou e Pantic (2012a). Nele, os autores propõem alguns recursos baseados em padrões binários aplicados ao reconhecimento de AU. Primeiramente, são produzidas duas representações geométricas da imagem facial em 3D que são: *DM* e *APDI*. Posteriormente, essas duas representações são empregadas com uma variedade de tipos de recursos, tais como o *Local Phase Quantisers*, *Gabor Filters* e *Monogenic Filters*. Com isso é possível se obter novos tipos de recursos. Por meio da concatenação dos histogramas formados a partir dos números binários resultantes, são formados os vetores característicos para cada tipo de recurso. Em seguida, é feita a seleção de recurso (*GentleBoost*) utilizando uma abordagem em duas fases. Foram realizados vários testes para a base de dados de imagens faciais de Bosphorus e obtiveram resultados promissores em todos os testes.

Sandbach, Zafeiriou e Pantic (2012b) propuseram dois descritores de recursos que foi uma importante contribuição. Esses novos descritores foram denominados *Local Normal Binary Patterns* (LNBP) e *3D Local Binary Pattern* (3DLBP), os quais serão usados nesta tese. Este descritor é aplicado para se obter a detecção de AUs. Primeiramente, os LNBP são empregados afim de se obter os vetores característicos da imagem possibilitando, assim, a captura da forma detalhada da ação. A seleção de recursos é realizada utilizando um algoritmo de *GentleBoost*. Essa proposta foi aplicada a uma base de dados teste de modo a se fazer uma

junção dos benefícios de cada um dos descritores e, por conseguinte alcançando ótimos resultados.

Outro trabalho tido como base dessa tese foi proposto por Sandbach et al. (2011, 2012a), onde os autores apresentaram um método de exploração dos recursos baseado em movimentos 3D entre os “frames” das sequências da geometria facial, aplicado ao reconhecimento dinâmico de expressões faciais. Primeiramente, uma sequência expressiva é modelada para conter um início, seguido por um vértice e um deslocamento. Posteriormente, para se fazer a extração das características e compensar os segmentos da expressão, são aplicados métodos de seleção de atributos. A diferença entre os dois trabalhos foi que, no primeiro, os autores treinaram o modelo de “markov” e, no segundo, fizeram o treinamento de classificadores *GentleBoost* com o objetivo de construir um modelo de “markov”, a fim de se modelar a dinâmica temporal da expressão. Estas propostas foram totalmente implementadas em uma base de dados contendo seis expressões faciais, que são as mais usadas em toda a literatura: felicidade, tristeza, raiva, nojo, surpresa e medo. Finalmente, foi feita a comparação com um semelhante sistema 2D e os resultados para imagens em 3D foram os que obtiveram melhor precisão.

Em Sandbach et al. (2012b), os autores trouxeram uma abordagem do problema de reconhecimento da expressão facial automático, o qual tem crescido grandemente na área da pesquisa por causa dos recentes avanços observados na computação tecnológica. Os maiores trabalhos nesta área enfrentavam grandes problemas nas poses e na iluminação e até o momento eram realizados com banco de imagens em 2D. Para sanar esse problema, os autores trazem uma abordagem de trabalhos com imagens em 3D ou em 4D - onde a constante temporal é considerada como uma dimensão - também conhecido por 3D dinâmico. Eles discutem os recentes avanços nessa área de pesquisa e os desenvolvimentos para criação de bancos de imagens em 3D. Uma vasta apresentação é feita de bancos de dados de face 3D/4D existentes atualmente e são adequados para serem usados em pesquisas desta área. Por fim, uma ampla discussão é realizada a respeito dos grandes desafios ainda não superados, apresentando diversas propostas para futuras aplicações.

Uma outra abordagem apresentada por Matuszewski (2012) fala sobre a importância da expressão facial, como os seres humanos a usam para se comunicar e como a tecnologia de imagem 3D tem cada vez mais avançado. O autor apresenta uma base de dados 3D e 4D, denominada de Hi4D-ADSIP, voltada para as articulações dinâmicas faciais. Uma grande

importância dessa base é a análise sobre o diagnóstico clínico de disfunções faciais. A validação deste banco foi obtida por meio de experimentos psicofísicos. Além disso, importantes questões são levantadas, abrindo oportunidades para novos estudos, pois está sendo criada uma extensão desta base de dados para se construir um repositório abrangente de disfunções representativas faciais exibidas por pacientes com acidente vascular cerebral, paralisia de Bell e doença de Parkinson.

Estes foram os seis trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento desta tese no que tange ao reconhecimento facial. No capítulo 4 será discutida a construção da base de dados de imagens faciais utilizada e como foram aplicadas as técnicas apresentadas nesta seção.

2.2.2 Outros Trabalhos

Nesta seção, serão apresentados os trabalhos mais relevantes da área de reconhecimento facial. Os trabalhos aqui relacionados também serviram de base nos estudos apresentados na seção anterior.

Uma abordagem da representação de sinais de Fourier é apresentada por Oppenheim e Lim (1981). Os autores analisaram e discutiram os resultados obtidos em diferentes contextos e aplicações.

Um dos trabalhos recentes que mais se destacam foi desenvolvido por Savran e Sankur (2009), onde é abordada a problemática de reconhecimento facial 3D estática, independente de pessoa e de expressões faciais. Os autores moldam os dados faciais 3D sobre imagens 2D. O sistema é totalmente automático e foi testado em 22 unidades de AU do Sistema de Codificação de Ação Facial (FACS) originando encorajadores resultados de forma a validar a proposta.

A generalização do sinal analítico bidimensional (2D) foi abordada por Felsberg e Sommer (2001) com base na transformada de Riesz (usada no lugar da transformada de Hilbert). Os autores ainda trazem uma abordagem da fase geométrica baseada na relação entre o sinal analítico 1D e o sinal monogênico 2D. Concluindo, os autores trazem as aplicações possíveis dessa relação e algumas referências a outras aplicações do sinal monogênico.

Uma abordagem teórica muito simples, porém de grande relevância, foi apresentada

por Ojala, Pietikäinen e Mäenpää (2002). O objeto de estudo foi a multirresolução em escala de cinza e rotação invariante, aplicados à classificação de textura com base nos padrões binários e discriminação não paramétrica de distribuições amostrais. Com este método foi possível detectar os padrões "uniformes" para qualquer quantização do espaço angular e para qualquer resolução espacial. Além disso, foi apresentado um método para combinar vários operadores para análise de multirresolução. Este método apresenta várias qualidades como a robustez em termos de variações da escala de cinza e a simplicidade computacional. Por fim, resultados experimentais demonstram o bom desempenho do método.

A técnica apresentada por Alex, Vasilescu e Terzopoulos (2002) é baseada na álgebra multilinear (álgebra de tensores de ordem superior), a qual oferece uma estrutura matemática potente para analisar a estrutura multifatorial dos conjuntos de imagem. Essa estrutura possibilita a manipulação do problema de desembaraçar os fatores constituintes. Os resultados exemplificadores foram concentrados na análise multilinear de conjuntos de imagens faciais, combinando vários modos, incluindo diferentes geometrias faciais, expressões, poses e condições de iluminação. Várias vantagens são apresentadas validando a técnica proposta.

Um dos maiores problemas nas pesquisas de reconhecimento facial é a generalização nas abordagens com base na análise discriminante ou subespaço de aprendizagem estatística. Afim de solucionar este problema, Zhang et al. (2005) apresentaram um descritor denominado de *Local Gabor Binary Pattern Histogram Sequence* (LGBPHS), onde são realizados treinamentos para construir o modelo facial, evitando, então, o problema de generalização. Resultados experimentais são apresentados afim de validar a proposta.

Um dos primeiros trabalhos abordando a representação da imagem facial baseado em Local Binary Patterns (LBP) é apresentado por Ahonen e Hadid (2006). Nele foi feita uma divisão da imagem de uma face onde são extraídas as características LBP e concatenados em um vetor característico. Posteriormente, este vetor é utilizado como um descritor. Este método é aplicado ao problema de reconhecimento facial e, por fim, outras aplicações também são discutidas no trabalho.

Smith e Hancock (2006) apresentaram uma abordagem do modelo estatístico com o algoritmo denominado *shape-from-shading* (forma de sombreamento). Os autores utilizam a APDI para mapear a distribuição de normais de superfície a partir da representação polar em uma esfera unitária de pontos cartesianos sobre um plano tangente local. O modelo foi validado

por meio de experimentos com bons resultados quanto a precisão.

Huan, Wang e Tan (2006) propõem um método para o reconhecimento facial utilizando um intervalo de dados, onde são analisados os desempenhos de representações geométricas comuns usando histogramas globais para correspondência. Posteriormente, é proposto o método para codificar as relações entre os pontos e os seus vizinhos. Testes são realizados na base de dados faciais 3D, FRGC 2.0, obtendo ótimos resultados comprovando, portanto, a eficácia do método proposto.

A compreensão do comportamento da expressão facial é um dos desafios da pesquisa psicológica e a automação do reconhecimento facial é o grande desafio da engenharia. Com este panorama, Wang et al. (2006) investigaram a importância e a utilidade de formas geométricas faciais 3D aplicadas ao reconhecimento de expressões faciais usando dados 3D. Os autores trouxeram uma abordagem onde se extrai as características primitivas da expressão facial 3D. Posteriormente, aplica-se a distribuição característica, responsável por classificar as expressões faciais prototípicas. Experimentos foram feitos para a validação da proposta com uma base de dados própria, gerando ótimos resultados.

A proposta baseada nos vetores de distância, recuperados de distribuição 3D de pontos característicos faciais para classificar as expressões faciais universais, foi feita por Soyel e Demirel (2007). Os autores ainda aplicam rede neural visando classificar as expressões faciais a partir de um vetor de distância. Testes são apresentados validando essa técnica.

A proposta do modelo de expressão *Morphable* 3D (MEM) é apresentada por Ramanathan et al. (2006), onde os autores adquiriram várias expressões de uma pessoa usando um scanner de rosto, que produz uma malha texturizada em 3D baseada no método de reconstrução estereoscópica e, através deste modelo, se faz o reconhecimento de expressões.

A proposta de Zhao e Pietikainen (2007) traz a abordagem para a chamada Textura Dinâmica, que utiliza a textura no domínio do tempo. Os autores propõem algumas simplificações e extensões para análise de imagem facial, onde se faz a modelagem das texturas usando o método proposto e as texturas são modeladas com *Volume Local Binary Patterns* (VLBP). Foi aplicado também o método LBP-top afim de se simplificar e facilitar a abordagem computacional, onde são considerados apenas as coocorrências dos LBP em três planos ortogonais. Através dos resultados aplicados a duas bases de dados (DynTex e Massachusetts Institute of Technology (MIT)), é possível verificar que ambos, VLBP e LBP-top, superaram

claramente as abordagens anteriores.

Modelos bilineares são explorados por Mpiperis, Malassiotis e Srintzis (2008a, b) para reconhecimento de expressão facial em 3D. O reconhecimento facial invariante para expressões e reconhecimento de expressões faciais com identidade desconhecida se dá pela montagem de modelos para faces desconhecidas. Testes feitos na base de dados BU-3DFE mostraram uma ótima taxa de reconhecimento, qualificando assim a proposta.

Uma abordagem eficaz para estabelecer automaticamente correspondências de vértices e classificar os modelos faciais para expressões específicas foi apresentado por Rosato, Chen e Yin (2008). Eles descrevem uma proposta como forma de estabelecer correspondências entre os modelos individuais com base em um intermediário 2D e 3D. Testes foram realizados para uma base de dados própria validando a proposta.

A interação do homem com o computador foi apresentada por Pantic et al. (2008), onde é apresentada, logo no título do trabalho, uma reflexão de quão longe estamos de alcançar uma interação ótima entre o computador e o homem. Ele fala sobre a importância da compreensão do comportamento automático humano e como as interfaces computacionais devem avançar para além de uma interação de teclado e mouse.

Um descritor robusto de classificação de textura foi proposto por Ojansivu e Heikkilä (2008), onde somente a informação de fase é utilizada, tornando a proposta invariante a mudanças de iluminação. Dessa forma, os autores apresentam resultados experimentais mostrando que a precisão da classificação de imagens de textura, borradas ou não, é muito maior com o modelo proposto do que com a LBP.

Outro trabalho trazendo a abordagem dos modelos bilineares foi realizado por Mpiperis, Malassiotis e Srintzis (2009), onde os autores trazem esse modelo juntamente com uma abordagem elasticamente deformável para reconhecimento de expressão facial. Este modelo elasticamente deformável é capaz de trazer a correspondência anatômica de ponto-a-ponto entre as superfícies de face e os modelos bilineares, que são capazes de desacoplar o impacto de identidade e de expressão. Resultados mostraram um alcance de reconhecimento de expressão facial muito bom para a base de dados faciais BU-3DFE.

Como os métodos existentes só estavam lidando com expressões exageradas de emoções prototípicas, Zeng et al. (2009) desenvolveram um algoritmo para sanar este problema,

o qual tem a capacidade de processar a ocorrência natural do comportamento afetivo humano. Além disso, foram analisados método multimodal, análise audiovisual, fusão linguística e paralinguística e fusões visuais com base em expressões faciais, movimentos de cabeça e gestos corporais, de modo a trazer a solução para o problema da compreensão da máquina sobre o comportamento afetivo humano.

Uma avaliação empírica da representação facial baseada em características locais LBP para o reconhecimento de expressão facial é apresentado por Shan, Gong e McOwan (2009). Vários métodos de aprendizado de máquina são analisados em diferentes bases de dados, mostrando que as características LBP são eficazes e eficientes para o reconhecimento da expressão facial. Uma análise das características LBP para baixa resolução é também apresentada, trazendo uma grande importância para o trabalho por se tratar de um assunto pouco abordado na literatura.

Liao e Chung (2009) propõem um método onde, primeiramente, uma função de medida de saliência é projetada para detectar as regiões mais salientes em imagens faciais e determinar suas melhores escalas. Posteriormente, eles propõem um recurso de imagem, denominado *Local Gradient Orientation Binary Patterns* (LGOBP), capaz de fazer a captura das informações de orientação do gradiente, a qual não é considerada nos LBPs convencionais. Testes são feitos na base de dados FRGC versão 2 e comparados com vários outros métodos utilizados na literatura, mostrando que o método proposto atinge uma maior taxa de reconhecimento.

O descritor denominado *Volume based Local Gabor Binary Patterns* (V-LGBP) foi proposto no trabalho de Xie et al. (2008) e aplicado ao reconhecimento facial. Neste método, o recurso Gabor é considerado como um volume tridimensional, onde as duas primeiras dimensões são do domínio espacial e a terceira dimensão é o índice de filtro de Gabor. Para se refletir as aparências uniformes de V-LGBP, seus padrões uniformes são redefinidos pela análise estatística. Experimentos feitos na base de dados FERET mostram a eficácia do método proposto.

Um outro método foi proposto Yang, Zhang e Zhang (2010) e denominado de Local Binary Monogenic (MBP). Este método é baseado na teoria da análise do sinal monogênico e histograma. Basicamente este método é constituído por duas partes responsáveis pela codificação, onde uma é feita por meio de magnitude monogênico LBP e a outra é pela

orientação monogênica. Testes realizados em base de dados conceituadas mostraram que o algoritmo proposto tem um desempenho melhor quando comparado com os métodos tradicionais.

Um estudo foi realizado por Gunes e Pantic (2010), onde eles descrevem os avanços em modelagem dimensional e contínua e na detecção e reconhecimento automático de modalidades visuais, audíveis e de ondas cerebrais. Eles trouxeram essa abordagem por causa da crescente pesquisa desta área aplicada a neurociência, psicologia, ciências cognitivas e ciências da computação.

Soyel e Demirel (2010) descreveram um processo de seleção de recursos para a expressão facial 3D com postura invariante. Este processo fornece uma representação menor do subespaço dimensional, de forma a se obter uma melhora na precisão da classificação. São empregadas redes neurais probabilísticas para se obter um classificador afim de reconhecer as expressões faciais. Excelentes resultados foram obtidos no reconhecimento das seguintes expressões faciais: neutro, raiva, nojo, medo, felicidade, tristeza e surpresa.

Uma abordagem para realizar reconhecimento de expressões faciais automaticamente e de forma flexível foi proposta por Zhao, Di Huang e Chen (2010). Foram feitos testes desta proposta em uma base de dados de expressões faciais 3D de domínio público (BU-3DFE). Os resultados mostraram que esta abordagem automática permite reconhecer expressões com sucesso, atingindo uma taxa de reconhecimento média ótima.

Foi apresentada por Maalej et al. (2010) uma abordagem baseada na análise de formas locais de várias regiões relevantes de uma face. Com o método proposto, são extraídas essas regiões e representadas por um conjunto de curvas fechadas. Posteriormente, a estrutura Riemanniana é utilizada para derivar a análise da forma e, então, aplica-se técnicas de classificação comumente usadas, como *AdaBoost* e *Support Vector Machines* (SVM). Testes foram feitos para a base de dados BU-3DFE mostrando a eficácia da proposta.

Uma estratégia com base na amostragem de malhas 3D é abordada no trabalho de Venkatesh, Kassim e Murthy (2010), onde os autores propõem um método que necessita converter a estrutura da malha existente irregular 3D da base de dados para uma estrutura matricial 3D uniformemente amostrada. Uma das vantagens desta proposta é que o problema de correspondência é eliminado. Experimentos foram realizados e algumas propostas de aperfeiçoamentos do método para melhorar a precisão da classificação são apresentadas.

Ocegueda et al. (2011) trazem uma abordagem de um sistema semiautomático de reconhecimento de expressão facial 3D. Os autores utilizam mapas expressivos que fornecem uma maneira de analisar as características geométricas em termos de informação discriminativa e sua distribuição por toda a face de forma a reduzir a dimensionalidade do espaço de entrada. Experimentos foram realizados para a base de dados BU-3DFE resultando em bons resultados.

O problema de reconhecimento de expressão facial 3D automática foi apresentado por Lemaire et al. (2011), O qual propõem uma estrutura capaz de lidar com a imprecisão potencial das técnicas de tombamento automático. Os autores descrevem a estrutura proposta e apresentam resultados utilizando o SVM, sendo possível observar a semelhança de resultados com outros métodos existentes sob o mesmo protocolo, sendo totalmente automático.

Uma análise, da forma geométrica das superfícies faciais, é proposta por Maalej et al. (2011), juntamente com técnicas de aprendizado de máquina para a classificação de expressão. É utilizada a técnica de *Riemann* para se obter o cálculo do comprimento do caminho entre as manchas correspondentes geodésicas. Posteriormente, estas medidas são utilizadas como entradas para vários métodos de classificação. Resultados experimentais mostraram a eficácia da abordagem proposta.

Uma proposta completamente automática que se baseia na identificação de um conjunto de pontos chave faciais é apresentada por Berretti et al. (2011). Os autores utilizam o modelo de SVM em cada expressão facial para se obter seu reconhecimento, combinando-os para formar um classificador multiclasse. Testes foram aplicados a base de dados BU-3DFE obtendo-se bons resultados, sendo estes, melhores que os métodos já existentes aplicados a mesma base de dados.

Foi proposto por Sha et al. (2011) uma abordagem em duas fases que combina a funcionalidade de técnicas de seleção e a fusão de recursos para escolher os recursos mais abrangentes e discriminativos para reconhecimento de expressões faciais em 3D. Os resultados mostram que esta proposta supera os métodos convencionais, proporcionando os resultados mais competitivos.

No trabalho de Nicolaou, Gunes e Pantic (2011), foi apresentado uma das primeiras abordagens acerca da fusão de expressão facial, gestos, ombro e áudio para a previsão dimensional e contínua das emoções. É feita uma comparação do desempenho de duas técnicas de aprendizado de máquina e, por fim, é proposto pelos autores uma fusão associativa para se

fazer a incorporação de correlações e covariâncias entre as dimensões da emoção. Testes e validações cruzadas foram feitos para quatro expressões e excelentes resultados foram obtidos para o sistema proposto.

Uma abordagem dos métodos existentes da família de descritores de LBP para detecção de FACS foi apresentado por Jiang, Valstar e Pantic (2011). Os autores compararam os LBPs e os LPQs para análise estática de AU. Seus resultados mostram a eficiência destes descritores quando testados por um sistema de detecção de AU automático e em dados de expressão. Os autores ainda mostram resultados que comprovam que os sistemas baseados em LPQ obtiveram melhores índices de precisão do que os que utilizam LBP.

Uma representação geométrica para faces 3D é apresentada por Huang et al. (2011) para melhorar a distinção de imagens de profundidade. Os autores utilizam uma representação facial baseada no descritor *Multi-Scale Extended Local Binary Patterns* (ELBP), que permite a descrição precisa e rápida de variações nas formas locais dos rostos quando associada com o esquema de correspondência de caráter local (SIFT), que possui uma ótima tolerância relativa da representação. Testes foram feitos para a base de dados facial FRGC v2.0. Encorajadores resultados foram obtidos mostrando ainda que o sistema é robusto para variações de expressão facial.

Um método utilizando a abordagem de Zernike é apresentado por Vretos, Nikolaidis e Pitas (2011). A abordagem de Zernike é utilizada para calcular a imagem de profundidade de um ponto facial 3D. O objetivo do estudo era resolver o problema de transformações dos dados, como translação, rotação e escala, que em outras abordagens são consideradas muito prejudiciais na precisão de um algoritmo. Para isso, os autores propõem um método combinatório de Zernike, as nuvens de pontos 3D e as imagens de profundidade. Resultados são apresentados para validar o método proposto.

O primeiro trabalho a investigar a inteligência social entre seres humanos e máquinas foi realizado por Vinciarelli et al. (2012). Este foi o primeiro levantamento do domínio que considera conjuntamente os aspectos: modelagem, análise e síntese do comportamento social. Os autores incluem uma extensa revisão bibliográfica acerca de um dos aspectos, de forma a rever os principais recursos disponíveis e descrever os desafios mais fundamentais a serem enfrentados.

Savran, Sankur e Bilge (2012) apresentam uma pesquisa totalmente inovadora de

análise de imagens de expressões faciais em 3D, visto que até então, a maioria dos estudos eram realizados com imagens em 2D. Imagens em 2D apresentam algumas limitações de dados, enquanto que nas imagens em 3D é possível obter a captura de dados de superfície facial, além de ser menos perturbado pela iluminação e pose (de preferência frontal). Resultados comparativos de testes com imagens 2D e 3D são apresentados, onde são aplicados às 25 AU e pode-se observar que as imagens 3D têm melhor desempenho.

O objetivo desta seção é mostrar a imensa variedade de métodos e aplicações para o problema da classificação e reconhecimento de expressões faciais. Alguns dos trabalhos mais importantes foram apresentados. Porém, vale ressaltar que existem outros inúmeros trabalhos nesta área.

2.2.3 Comentários

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre as metodologias utilizadas com base nos SIAs e para a Classificação e Reconhecimento de Expressões e Identidade Facial. Os trabalhos citados nesta seção são os pioneiros e os mais relevantes encontrados na literatura especializada. Com base nesse levantamento bibliográfico, foi definido que seria utilizado nesta tese modelo baseado na imunologia, em especial o SIA fundamentado no ASN em conjunto com técnicas promissoras apresentada que são baseadas nas características da geometria facial (DM e APDI) e padrões binários (LBP, LPQ, Gabor Filters e Monogenic Filters).

3 SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Neste capítulo, serão apresentados os principais aspectos sobre os SIAs e a EI, destacando-se os conceitos e formalizações necessários para o entendimento dos modelos e algoritmos baseados nos SIAs, bem como o ASN e os fluxogramas para o seu entendimento.

3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, pesquisadores deram início a novos estudos no âmbito dos fenômenos naturais, principalmente aqueles relacionados aos sistemas naturais ou biológicos, os quais, de forma eficiente, atuam na resolução de problemas em diversas regiões do corpo humano, indo além de qualquer estratégia tecnológica existente (De CASTRO, 2001).

Dentre os diversos fenômenos estudados, podem-se citar alguns exemplos de sistemas naturais utilizados nos últimos anos, que obtiveram muito sucesso no desenvolvimento de estratégias tecnológicas aplicadas à solução de problemas altamente complexos: os algoritmos genéticos, os algoritmos evolutivos, a computação por DNA ou molecular, o comportamento de colônias de insetos, o sistema imunológico e o sistema nervoso central (RNA), etc. (De CASTRO, 2001).

Esses sistemas naturais ou biológicos são compostos por diversos elementos distintos que possuem capacidade limitada e ações específicas. No entanto, quando funcionam de forma colaborativa, adquirem comportamentos complexos e robustos, sendo esta uma das principais características que os tornam atrativos ao estudo. Pode-se definir um sistema complexo como aqueles que são compostos por um conjunto de objetos, agentes, elementos ou processos com características de comportamento dinâmico e agregado, no qual a ação de um objeto possivelmente afeta as ações subsequentes dos demais, de modo a englobar o funcionamento coletivo e sua interação com o ambiente. (BONABEAU; THERAULAZ, 1995).

Assim, a Inteligência Humana ou mais propriamente o cérebro humano é o que tem

recebido mais atenção dentre os sistemas naturais, por possuir um alto nível de complexidade e alta capacidade de processamento, podendo perceber, compreender, prever e manipular inúmeras informações, além de possuir dimensões físicas reduzidas e consumo de energia limitado (RUSSEL; NORVIG, 1995).

Os estudos nesse enfoque receberam a nomenclatura de IA, a partir da qual originaram os primeiros microcomputadores por meio da utilização dos microprocessadores. Posteriormente, foram desenvolvidas as RNAs voltadas para a criação de sistemas de processamento a partir de uma abordagem conexionista embasada pela neurociência, matemática, estatística, física, computação e engenharia (HAYKIN, 1999).

A aplicação das RNAs obteve sucesso em vários aspectos, principalmente na área de reconhecimento de padrões, otimização de funções e aprendizagem de máquina. Seguidamente, surgiram os *sistemas nebulosos* (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998) para a dedução e raciocínio lógicos, o qual permitiu o tratamento de grandezas envolvendo incertezas. Pode-se exemplificar suas aplicações na área de controle através do controle de sinais de trânsito, condicionamento de ar, injeção eletrônica de combustíveis, freios ABS, etc.

Ainda dentro da IA existem outros diversos estudos, tais como a *simulação de processos evolutivos naturais*, cujo objetivo geral é resolver problemas de explosão combinatória e multimodais, ou seja, uma apreciável estratégia para aprendizagem de máquina e estudo de fenômenos auto-organizados, possibilitando a solução de várias classes de problemas (BÄCK; FOGEL; MICHALEWICZ, 2000a, b). Outra área de estudo é a chamada *vida artificial* (LANGTON, 1995) que, resumidamente, faz a junção de alguma propriedade fundamental da vida natural com algumas ferramentas estratégicas desenvolvidas pelo homem (TAYLOR; JEFFERSON, 1995). Ainda nesse ambiente, destaca-se a *computação de DNA* ou *computação molecular* (ADLEMAN, 1994), cujo objetivo principal é manipular operações computacionais e codificar cadeias de DNA por meio da utilização da *biologia molecular*. Além disso, pode-se citar uma estratégia denominada *Semiótica Computacional*, que tem por objetivo central de construir sistemas autônomos que apresentem comportamentos inteligentes, incluindo percepção, modelagem, julgamento e comportamento emergente, com foco atual na descoberta de unidades elementares de inteligência e suas relações semióticas, o qual simula um ciclo *semiótico* (GUDWIN, 1996).

Em 1996, foi realizado no Japão o primeiro workshop sobre sistemas baseados em

imunologia, IMBS (*Immunity-Based Systems*). Desde então, houve a caracterização de uma linha de pesquisa denominada de SIA. Os SIBs são responsáveis pela defesa do corpo humano contra ataques de vírus, bactérias, fungos, protozoários e alguns tipos de vermes denominados patógenos infecciosos. É através de um conjunto de células, moléculas e órgãos que se ocorre tal defesa, por possuírem a capacidade de distinguir moléculas do próprio corpo (self) das moléculas externas (nonself). Essa característica torna o sistema extremamente complexo, sendo necessária uma arquitetura composta por diversas funções e propriedades trabalhando em conjunto para que se obtenha uma rapidez na resposta aos patógenos infecciosos (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

Baseado nessas pesquisas acerca do funcionamento, propriedades e mecanismos dos SIBs e com o intuito de se desenvolver novas estratégias tecnológicas surgiram os SIAs, propondo vários modelos e arquiteturas computacionais para seu desenvolvimento. Suas principais aplicações envolvem o reconhecimento de padrões, segurança computacional, robótica, otimização, controle, detecção de falhas e anomalias, aprendizagem de máquina, autômatos celulares, análise de dados e clusterização, memórias associativas, programação e computação evolutiva, dentre outras (De CASTRO, 2001).

Os pioneiros desta linha de pesquisa destacam três definições de base para os SIAs:

- Os *SIAs* são metodologias de manipulação de dados, classificação, representação e raciocínio que seguem um paradigma biológico plausível: o sistema imunológico humano (HOFMEYR, 2000).
- Um *SIA* é um sistema computacional baseado em metáforas do sistema imunológico natural (TIMMIS, 2000).
- Os *SIAs* são compostos por metodologias inteligentes inspiradas no SIB para a solução de problemas de mundo real (DASGUPTA, 1998).

3.2 SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO (SIB)

Nessa sessão, será apresentada uma breve revisão sobre o SIB, com foco principal nos aspectos biológicos necessários para o desenvolvimento de uma nova estratégia tecnológica, voltada a linha de pesquisa denominada por EI (De CASTRO, 2001). Demais conceitos

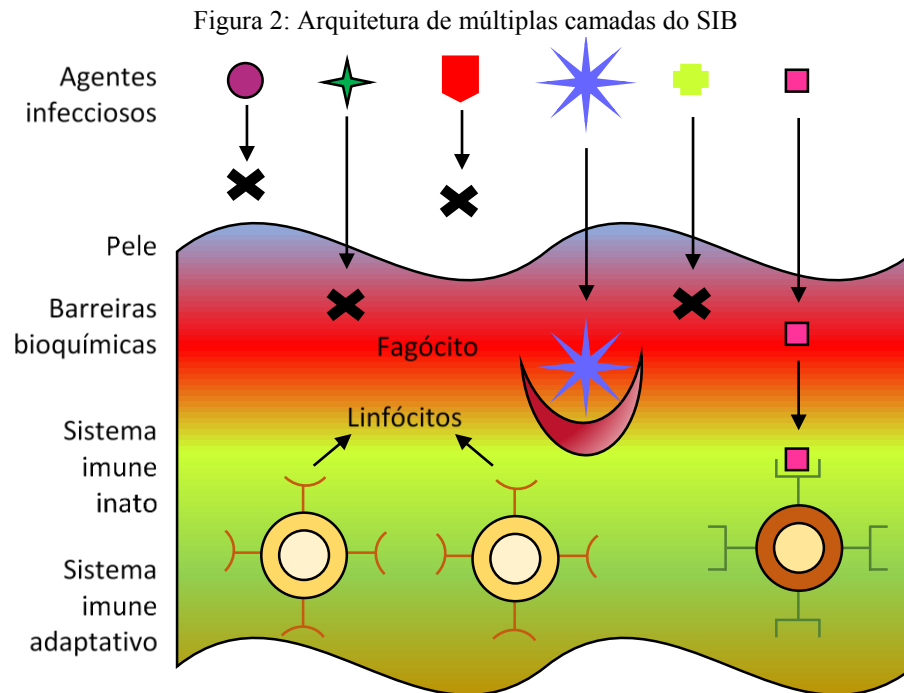
biológicos podem ser encontrados no anexo A, caso sejam necessários estes conceitos para uma melhor compreensão.

Derivada do Latim *immunis* ou *immunitas*, a palavra *imunologia* significa “isento de carga”, referindo-se a uma enfermidade. Qualquer tipo de animal vertebrado é dito *imune* quando é infectado por uma doença e não perece da mesma. Ainda denomina-se *imunidade* quando o animal apresenta uma resistência específica a uma determinada doença. Existem duas definições mais relevantes para o caso que são: “A *imunologia* é o ramo da biologia responsável pelo estudo das reações de defesa que conferem resistência às doenças” (KLEIN, 1990) e “O sistema que defende o animal contra o ataque constante de *microorganismos* é chamado de *sistema imunológico*” (TIZARD, 1995).

Dessa forma, pode-se dizer que, para a sobrevivência de um animal, é necessário que o sistema imunológico funcione de forma eficiente em conjunto com a grande quantidade de componentes e mecanismos presentes, os quais se dividem em dois tipos de acordo com sua atuação: uma parte defende o organismo de um único invasor e a outra parte é capaz de defender de uma grande variedade de agentes infecciosos. Esses mecanismos são ditos como mecanismos de aprendizagem e memória que, a partir do ponto de vista da engenharia e da biologia, são características fundamentais do sistema imunológico, pois tem a capacidade de extrair informações dos agentes infecciosos e disponibilizá-las para uso futuro em casos de novas infecções pelos mesmos agentes ou similares.

Desse modo, os SIBs atuam com um conceito denominado de detecção distribuída de forma a abranger todo o organismo, buscando identificar agentes infecciosos agressores. Essa identificação é distribuída em duas classes: elementos próprios, que são os elementos pertencentes ao organismo, e não-próprios, que se tratam de elementos desconhecidos. A função principal do sistema imunológico é detectar e combater os elementos não-próprios nocivos ao sistema. Entretanto, existem fatores que dificultam essa detecção como, por exemplo, o número de padrões não-próprios no organismo humano, que é bem maior que o número de padrões próprios, sendo uma relação de 10^{16} para 10^6 . Além disso, o ambiente é altamente distribuído durante a detecção não é possível que o organismo faça uma pausa em seu funcionamento. Outro fator é a escassez dos recursos disponíveis para combater os agentes infecciosos agressores (HOFMEYR; FORREST, 1999). Outros detalhes dos conceitos biológicos sobre a discriminação dos elementos próprios e não-próprios podem ser encontrados no Anexo B.

Em contrapartida o SIB é composto por uma arquitetura de múltiplas camadas, com mecanismos de regulação e defesa espalhados em vários níveis para a defesa no corpo humano, conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de LIMA (2013).

Sendo as camadas divididas da seguinte forma (JANEWAY et al. 2000; RENSBERGER, 1996; HOFMEYR; 1997, 2000):

- *Barreiras físicas*: A primeira camada de proteção é a pele, que funciona como uma barreira contra os invasores (agentes infecciosos). Além da pele tem-se o sistema respiratório, que também colabora na manutenção dos antígenos distantes através da apreensão nas mucosas e pelos nasais e a remoção de elementos via tosse e espirros. Tanto o sistema respiratório como a pele contêm macrófagos e anticorpos;
- *Barreiras bioquímicas*: Existem algumas enzimas que combatem agentes estranhos e fluidos no corpo humano que criam um ambiente impróprio para a sobrevivência de organismos estranhos, como a saliva, o suor, as lágrimas e os ácidos estomacais, além de alterarem o pH do meio e a temperatura corporal;
- *Sistema imune inato*: É formado por células capazes de inibir algumas moléculas e

materiais biológicos, limpando o organismo de agentes infecciosos que já foram neutralizados, mas permanecem no organismo. Essas células são responsáveis pelo direcionamento das respostas imunes adaptativas que demoram certo período de tempo para exercer seus efeitos. Além destas células, também estão presentes fatores solúveis, como o complemento e algumas enzimas;

- *Sistema imune adaptativo*: Responsável pela imunidade adquirida ao longo da vida, durante a exposição do organismo a agentes infecciosos, agindo de forma a tomar as decisões necessárias para gerar uma resposta e neutralizar este agente desconhecido.

Os sistemas imune e imune adaptativo agem caso as duas primeiras barreiras não forem suficientes para impedir a entrada dos agentes infecciosos no organismo.

As atuais pesquisas para o desenvolvimento de novas abordagens são baseadas no funcionamento destes processos, pois a adaptabilidade pode oferecer melhores soluções para os problemas. No Anexo C deste texto, pode-se encontrar conceitos e propriedades biológicas para o entendimento dos SIBs e ainda na literatura encontram-se diversos trabalhos que apresentam abordagens biológicas dos SIBs que é um assunto muito interessante e serve de base para todos os conceitos artificiais.

3.3 SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS (SIA) E A ENGENHARIA IMUNOLÓGICA (EI)

Estratégias tecnológicas relacionadas à computação inspirada na natureza, chamada de computação natural, surgiram nos últimos anos para a resolução de problemas do mundo real, sendo uma das mais recentes a técnica baseada no SIB. A partir dessas técnicas, foi sugerido um conceito denominado EI (De CASTRO, 2001), visando fazer uma seleção dos modelos existentes de SIA, de modo a definir quais são os pontos principais e explorá-los a fim de que seja possível desenvolver ferramentas de EI partindo da resenha dos SIAs e da pesquisa dos mecanismos imunológicos envolvidos. Deste modo, foi definida a EI como um processo de meta-síntese, onde a ferramenta de solução de um determinado problema é escolhida com base nas características do próprio problema e depois aplicada para sua resolução. Ao invés de buscar a reconstrução parcial ou total do sistema imunológico tão fielmente quanto possível, a EI deve

procurar desenvolver e implementar modelos pragmáticos inspirados no sistema imunológico que preservem algumas de suas propriedades essenciais e que se mostrem passíveis de implementação computacional e eficazes no desenvolvimento de ferramentas de engenharia (De CASTRO 2001).

Portanto, os fundamentos envolvidos nos processos biológicos são extraídos de forma a se fazer uma analogia entre os componentes biológicos (anticorpos, células, moléculas e órgãos) e componentes da IA (DASGUPTA, 1998). Assim, os SIAs são aplicados na resolução de problemas reais tendo como base um processo natural. Com isso, pode-se dizer que é possível propor uma visão mais globalizada para os componentes dos SIAs, a partir dos conceitos apresentados e dos propósitos vinculados à EI.

Nos últimos vinte anos, a imunologia artificial se consolidou através dos muitos trabalhos relevantes já apresentados podendo-se citar várias aplicações dos SIAs: Reconhecimento de Padrões, Aproximação de Funções, Otimização de Processos, Análise de dados e Clusterização, Aprendizagem de Máquina, Memórias Associativas, Geração e Manutenção de Diversidade, Programação e Computação Evolutiva, Detecção de Falhas e Anomalias, Controle e Scheduling, Segurança Computacional e de Rede e Geração de comportamentos emergentes.

Em síntese, a proposta da EI (De CASTRO, 2001) é modelar genericamente os componentes do sistema imunológico para a formalização e desenvolvimento de novas estratégias tecnológicas.

3.3.1 O Conceito de Computação Natural

A estratégia tecnológica baseada em uma inspiração biológica é denominada Computação Natural (De CASTRO et al. 2004). Trata-se de um conjunto de sistemas que são desenvolvidos com inspiração ou utilização de mecanismos naturais ou biológicos no processamento de informações. Para o caso em estudo, o conceito de SIA tem como inspiração processos biológicos.

Sendo a computação natural o eixo central, envolvida pela Biologia Teórica e

Experimental e Observações Empíricas, pode-se subdividir a computação natural em três linhas de pesquisa (De CASTRO et al. 2004): Simulação de eventos naturais: Síntese da Vida; Computação Bioinspirada: Novas formas de solução de problemas; e Computação com mecanismos naturais: Novos paradigmas de computação.

A primeira linha de pesquisa citada no parágrafo anterior é a mais recente e baseia-se na simulação de eventos naturais e é também chamada de estudo de comportamentos, padrões, processos naturais e biológicos, com foco na vida artificial e geometria fractal que propõe um estudo da natureza no computador. A computação bioinspirada envolve o estudo de ferramentas computacionais concebidas por meio de conceitos baseados em fenômenos naturais, com foco central nas estratégias inspiradas em mecanismos biológicos ou naturais, objetivando incluir as características, funcionalidades e propriedades biológicas ou naturais destes mecanismos nos sistemas desenvolvidos para a resolução dos problemas. As principais abordagens da computação bioinspirada são:

- As RNA (HAYKIN, 1999);
- A computação evolutiva (DARWIN, 1859; DARWIN; WALLACE, 1958);
- A inteligência de colônias de formigas (COLORNI et al. 1992);
- O comportamento de colônia de formigas (DORIGO; MANIEZZO; COLORNI, 1996);
- Os algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975); e
- Os sistemas imunológicos artificiais (De CASTRO, 2001; De CASTRO; TIMMIS, 2002).

Estas abordagens são baseadas nas influências de elementos biológicos nos sistemas de inteligência computacional, as quais possuem diversas características e propriedades específicas tais como, memória, organização, aprendizado, adaptação, robustez, tolerância e diversidade, que são importantes e essenciais no desenvolvimento e concepção de novos paradigmas da computação para resolver problemas e cumprir objetivos (De CASTRO, 2001).

O SIB possui a maioria destas características e propriedades, além de possuir a capacidade de combater os agentes agressores e proporcionar a defesa do organismo, motivando assim os estudos e tornando os SIAs uma realidade.

Vale ainda lembrar que a computação natural não busca imitar a biologia, mas sim, inspirar-se nela, visando conceber algoritmos, estratégias tecnológicas e ferramentas computacionais capazes de resolver problemas reais utilizando os conceitos, funcionalidades e

propriedades dos fenômenos biológicos ou naturais. (De CASTRO et al. 2004).

3.3.2 As Representações Celulares, Moleculares e afinidade

As representações celulares e moleculares irão contribuir para a definição do tipo de distância a ser empregado na avaliação da *afinidade* (ou *grau de ligação*) entre as moléculas por meio da modelagem de um antígeno (Ag) e um anticorpo (Ab), bem como a interação entre eles. Utilizando modelagem matemática e desconsiderando as perdas de generalidade, pode-se representar a forma generalizada de uma molécula m , seja ela um antígeno ou um anticorpo, por um conjunto de coordenadas com valores reais $m = (m_1, m_2, \dots, m_L)$. Estes valores são interpretados como um ponto m em um espaço real S^L ($m \in S^L \subseteq \mathfrak{R}^L$), onde S representa o espaço de formas e L a dimensão, tornando possível o estudo das interações entre um anticorpo e um antígeno seja ele próprio ou não-próprio.

O estudo das interações entre um antígeno e um anticorpo (Ag-Ab), resultará no grau de afinidade que está relacionada à distância entre eles. Este pode ser utilizado para avaliar o grau de ligação, ou *match score*, entre as moléculas. Existem alguns métodos já conhecidos na literatura que possibilitam a medição desta distância. Elas podem ser estimadas pela distância entre dois vetores ou cadeias de atributos, como por exemplo, a distância Euclidiana e a distância de Manhattan.

A interação entre um antígeno e um anticorpo nada mais é que a existência de uma combinação ou, como também chamado, um casamento entre os dois elementos. Por meio do casamento, pode-se dizer que um agente agressor foi reconhecido pelo sistema e será combatido até ser neutralizado. O casamento entre um antígeno e um anticorpo não ocorre somente de forma perfeita. Muitas vezes há um limiar, ou seja, um valor mínimo para que um anticorpo reconheça um antígeno. Este valor mínimo é denominado taxa de afinidade, que representa o grau de semelhança/similaridade que deve haver entre os elementos biológicos para existir o casamento (DASGUPTA, 2006).

Em consequência da taxa de afinidade ocorre a capacidade de reconhecer diversos antígenos, ou seja, um anticorpo é capaz de reconhecer vários antígenos que possuam um valor de afinidade maior que o seu próprio valor mínimo de semelhança ou o limiar (HOFMEYR,

2000). Esta é a base de todo o processo biológico de defesa do corpo humano.

Para o caso da distância Euclidiana, as coordenadas de um do complemento antígeno são representadas pela equação (1) e as coordenadas de um o anticorpo pela equação (2) (De CASTRO, 2001):

$$Ag = Ag_1, Ag_2, Ag_3, Ag_4, \dots, Ag_L \quad (1)$$

$$Ab = Ab_1, Ab_2, Ab_3, Ab_4, \dots, Ab_L \quad (2)$$

sendo:

L : dimensão do espaço do antígeno e do anticorpo.

Assim, quando conhecida a taxa de afinidade, a distância (D) pode ser definida como a semelhança entre os dois elementos e pode ser calculada de duas maneiras (De CASTRO, 2001):

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^L (Ab_i - Ag_i)^2} \quad (3)$$

$$D = \sum_{i=1}^L |Ab_i - Ag_i| \quad (4)$$

sendo a equação (3) para a medida da distância Euclidiana e a equação (4) para a medida da distância de Manhattan.

Para ocorrer o casamento entre as moléculas, esta distância D precisa ser superior ou igual a um limiar preestabelecido de afinidade. Para estas duas maneiras de calcular a afinidade entre as amostras é necessário que o problema esteja codificado em um vetor binário (De CASTRO, 2001).

Nas seções 3.4 e 3.5 serão apresentados o ASN e os critérios de casamento e afinidade propostos por Bradley e Tyrrell (2002), os quais proporcionam um maior dinamismo no diagnóstico para análise de valores nominais.

3.3.3 Processo de Maturação e afinidade

O processo chamado de maturação e afinidade é necessário por causa da grande diversidade de detectores espalhados por todo o sistema imunológico para que se tenha uma cobertura adequada de todos os padrões não-próprios, ou seja, o sistema imunológico trabalha com uma detecção distribuída, de forma a permitir que o sistema detecte praticamente qualquer tipo de agente infeccioso. Esta funcionalidade é garantida pela eficiente capacidade do sistema imunológico em gerar inúmeras réplicas de linfócitos prontos para neutralizar ameaças específicas (De CASTRO, 2001).

As células B são maturadas na medula óssea (*bone marrow*) e fazem parte de um subconjunto de linfócitos do qual a maturação e afinidade faz uso. A sua forma de funcionamento se dá no momento em que, por meio da combinação com um antígeno, são ativadas liberando outros anticorpos no sistema capazes de realizar a combinação com agentes infecciosos do mesmo tipo, de modo a acelerar o processo de neutralização da ameaça.

Ao serem ativadas, as células B se proliferam por meio da clonagem. A mutação com altos níveis de afinidade, as cópias das células não são idênticas à original. Porém, isso não influencia na capacidade destas células se combinarem com outros agentes infecciosos e, por sua vez, serem ativadas liberando os anticorpos e novamente clonadas. Quanto maior for a afinidade com os agentes infecciosos, maior a chance da célula ser ativada e clonada, ou seja, a probabilidade de proliferação está relacionada diretamente com a afinidade. A atividade das células B garantem sua sobrevivência no organismo, ou seja, o fato de serem ativadas e clonadas permite que sempre estejam presentes no sistema. Caso isso não ocorra, elas morrem e são extintas do organismo (De CASTRO, 2001).

O processo descrito no parágrafo anterior é denominado de hipermutação somática, também conhecido como maturação e clonagem. Resumidamente, esse processo faz com que haja uma competição entre as células B, de forma a forçar uma constante busca por agentes infecciosos no organismo, visando serem replicadas para evitar a morte celular. Conforme as células B vão sendo maturadas, elas são evoluídas e transformadas em células B mais eficientes para detectar e capturar os agentes no sistema (SILVA, 2009).

3.3.4 Funcionamento da Memória em um Sistema Imunológico

Como já mencionado anteriormente, quando o sistema imunológico combate um agente agressor, são distribuídas pelo organismo células B, cuja função é neutralizar o agente agressor por meio de uma resposta imunológica bem sucedida, ou seja, há uma proliferação de células B com alto nível de afinidade com o agente agressor. Quando uma nova infecção do mesmo tipo ocorre, o sistema terá de realizar novamente o processo de maturação e afinidade, gerando novos anticorpos para neutralizar a ameaça, pois, a partir do momento que a infecção é sanada, as células B desaparecem do organismo, pelo seu curto período de vida e pela falta de atividade (De CASTRO, 2001).

Para que todo o processo de maturação e afinidade seja refeito e que haja uma resposta rápida, o sistema imunológico guarda uma memória das informações codificadas nestas células B (De CASTRO, 2001).

Alguns autores, como por exemplo Silva (2009), denominam a memória imunológica também como *resposta secundária*, por causa da característica de que o sistema já conhece o agente agressor e pode fornecer uma resposta rápida e específica, neutralizando a ameaça.

3.3.5 Propriedades dos SIBs

Os SIBs possuem inúmeras propriedades. As mais estudadas e incorporadas nos SIAs são: unicidade, universalidade, robustez, autonomia, auto-organização, organização multicamadas, reconhecimento de padrões (tolerância e reatividade), maturação e afinidade (otimização), distributividade, memória/memória associativa, aprendizado por reforço, comportamento presa-predador, tolerância a ruído (reconhecimento imperfeito), coerência sob fluxo de matéria, energia e informação (DASGUPTA, 1998).

A grande maioria destas propriedades tornaram-se, nos últimos anos, tema de grandes pesquisas e contribuíram para a criação de novas estratégias tecnológicas, podendo proporcionar aos sistemas computacionais maior eficiência, desempenho e qualidade.

Maiores detalhes destas propriedades do SIB podem ser encontrados no Anexo C.

3.4 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA (ASN)

O ASN foi proposto pela primeira vez por Forrest et al. (1994) para detecção de anomalias, aplicado em proteção computacional, com base na seleção negativa de linfócitos T dentro do timo, sendo uma técnica que se baseia no processo de reconhecimento de padrões exercido pelo SIB, elaborado como um modelo computacional. Portanto, este é o processo que representa a discriminação que o organismo realiza com as células, entre próprias e não-próprias. O algoritmo é executado em duas fases, como descrito a seguir (De CASTRO, 2001):

- Fase I: Censoriamento
 - Definir o conjunto de cadeias próprias (S) que se deseja proteger;
 - Gerar cadeias aleatórias e avaliar a afinidade (match) entre cada uma delas e as cadeias próprias. Caso a afinidade seja maior que a de um determinado limiar, rejeitar a cadeia. Caso contrário, armazene-a em um conjunto de detectores (R).

No censoriamento do ASN, primeiramente são definidos os detectores próprios, que representam uma condição Normal do organismo, sendo conhecidos como cadeias próprias (S). Têm por objetivo gerar um conjunto de padrões de detectores (R) que tenham a capacidade de reconhecer os padrões não-próprios na fase de monitoramento dos dados. Posteriormente, é feita a leitura dos dados, onde são escolhidas cadeias de modo aleatório e verifica-se a afinidade, comparando-as com um conjunto de cadeias próprias (S). O funcionamento desta fase possui a seguinte lógica: se a afinidade for superior a um determinado limiar, rejeita-se a cadeia, do contrário, esta cadeia é aceita no conjunto de detectores (R) e será utilizada para fazer as classificações durante o monitoramento dos dados, sendo assim dotados com a capacidade de detectar praticamente qualquer elemento não-próprio, uma modificação ou erro nos dados que se deseja monitorar. Os detectores são análogos às células do tipo T maturadas capazes de reconhecer agentes patogênicos (LIMA, 2013).

- Fase II: Monitoramento

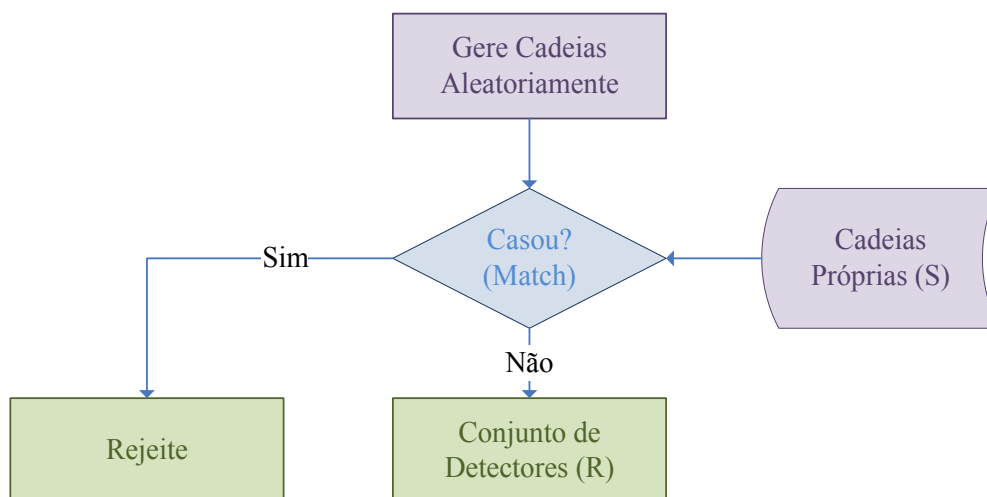
- Dado o conjunto de cadeias que se deseja proteger (cadeias protegidas), avaliar a afinidade entre cada uma delas e o conjunto de detectores. Se a afinidade for maior que um determinado limiar, identifica-se um elemento não-próprio.

Nesta fase é feito um monitoramento nos dados para identificar mudanças no comportamento das amostras. Posteriormente, é feita a classificação das mudanças utilizando o conjunto de detectores criados na fase de sensoriamento. Assim, analisando-se as cadeias protegidas (S) e comparando-as com o conjunto de detectores (R), avalia-se a afinidade entre cada uma das cadeias. Por fim, tem-se a resposta para o monitoramento, onde, se a afinidade entre as cadeias for maior que a um determinado limiar, um elemento não-próprio é detectado e classificado (LIMA, 2013).

A representação no espaço binário de Hamming e a regra dos r -bits consecutivos como medida de afinidade, são utilizados por Forrest et al. (1994). Em seu trabalho são apresentadas equações estimando a probabilidade de ocorrência de uma ligação em pelo menos r -bits consecutivos entre duas cadeias binárias aleatórias.

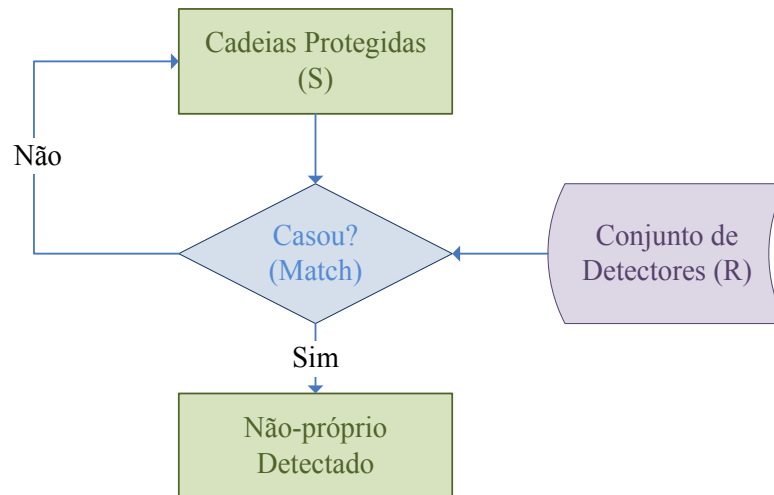
A seguir, são apresentados os fluxogramas da fase de sensoriamento (Figura 3) e monitoramento (Figura 4) do ASN.

Figura 3: Fluxograma da fase de sensoriamento do ASN



Fonte: Adaptado de (De CASTRO, 2001).

Figura 4: Fluxograma da fase de monitoramento do ASN.



Fonte: Adaptado de (De CASTRO, 2001).

Note que este algoritmo é capaz de executar tarefas, como o reconhecimento de padrões, armazenando informações sobre o conjunto complementar (não-próprio) ao conjunto dos padrões que se deseja proteger (próprio). Vale lembrar também que toda a fase de sensoriamento é realizada no modo *offline* e a de monitoramento em tempo real (De CASTRO; TIMMIS, 2002).

Além do que foi exposto, outras importantes observações acerca do ASN devem ser consideradas:

- Não necessariamente haverá o crescimento no tamanho do conjunto de detectores com o número de cadeias a serem protegidas (De CASTRO, 2001);
- Para a regra dos r -bits consecutivos, o ASN é ajustável proporcionalmente à probabilidade de detecção de uma anomalia;
- A quantidade de algoritmos de detecção independente aumenta exponencialmente a probabilidade de detecção de anomalias (De CASTRO, 2001; DASGUPTA, 2006);
- Pode-se dizer que a detecção é simétrica, pois os padrões que se assemelham ou apresentem simetria entre si, são considerados casados, portanto a detecção depende da simetria entre as cadeias em análise (De CASTRO, 2001; FORREST; HOFMEYR; SOMAYAJI, 1997);
- Há um custo exponencial de geração de detectores em relação ao tamanho do conjunto de cadeias a serem protegidas (próprio), isto porque a geração aleatória das cadeias do

conjunto R leva à geração repetida de diversas cadeias (De CASTRO, 2001).

3.5 CRITÉRIO DE CASAMENTO (COMBINAÇÃO) E AFINIDADE

Será utilizado um critério denominado por *casamento*, também conhecido como combinação, afim de avaliar a afinidade entre as cadeias de antígeno e anticorpo, de forma a comprovar que elas são semelhantes. A utilização do método de critério de casamento e afinidade tem como característica positiva a não necessidade de se transformar o problema em escala binária, dessa forma, utilizando-se os valores nominais, obtém-se uma redução do tempo da resposta (LIMA, 2013).

O casamento pode ser dividido em perfeito ou parcial, de acordo com o grau de afinidade, conforme segue (LIMA, 2013):

- Perfeito – É necessário que as duas cadeias analisadas sejam perfeitamente iguais, ou seja, as duas cadeias devem possuir os mesmos valores em todas as posições.
- Parcial – Não existe a necessidade de que todas as posições dos padrões tenham o mesmo valor, sendo necessárias apenas uma quantidade de posições iguais para se confirmar o casamento. Esta quantidade é a denominada taxa de afinidade e é definida previamente.

A taxa de afinidade foi definida pela primeira vez por Bradley e Tyrrell (2002), representando o grau de semelhança necessário para ocorrer o casamento entre as duas cadeias em análise. A taxa de afinidade é dada pela equação 5.

$$TAf = \left(\frac{An}{At}\right) * 100 \quad (5)$$

sendo:

TAf: taxa de afinidade;

An: número de cadeias normais no problema (cadeias próprias);

At: número total de cadeias no problema (cadeias próprias e não-próprias).

A equação (5) propõe uma relação estatística entre todas as amostras do problema,

sendo possível a quantificação de forma correta do valor da taxa de afinidade para o problema proposto.

Nesta pesquisa será utilizado o conceito de casamento parcial proposto por Bradley e Tyrrell (2002) para se realizar a verificação da combinação entre os sinais. Assim, não será medida a distância entre o antígeno e o anticorpo para quantificar a afinidade entre os dois padrões e sim utilizar-se-á o conceito apresentado a seguir.

A combinação entre os padrões será aceita caso esteja dentro de um intervalo de tolerância proposto, dando assim mais dinamismo ao diagnóstico, juntamente com um desvio vinculado ao anticorpo (padrão detector). Este desvio irá atuar de forma individual para cada posição i do vetor, permitindo verificar o casamento em cada posição, como apresentado na equação (6).

$$\underline{Ab}_i \leq Ag_i \leq \overline{Ab}_i \quad (6)$$

sendo:

Ag_i : valor nominal da posição i do antígeno (padrão em análise);

\underline{Ab}_i : valor nominal da posição i menos o desvio adotado no anticorpo (padrão detector);

\overline{Ab}_i : valor nominal da posição i mais o desvio adotado no anticorpo (padrão detector).

Portanto, é considerado o casamento para esta posição, caso o valor da posição i do antígeno estiver no intervalo expresso em (6). Desta forma, torna-se possível quantificar a afinidade entre os padrões, analisando posição por posição. Assim, pode-se destacar a expressão a seguir, a qual representa a afinidade total entre os dois padrões em análise (BRADLEY; TYRRELL, 2002):

$$Af_T = \left(\sum_{i=1}^L Pc / L \right) * 100 \quad (7)$$

sendo:

Af_T : % de afinidade entre os padrões analisados;

L : quantidade total de posições;

P_c : posição casada;

$\sum_{i=1}^L P_c$: soma das posições compensadas.

Por meio da expressão (7) pode-se dizer que, caso Af_T for maior ou igual a TAf , ocorre o casamento entre os dois padrões, ou seja, os dois são considerados semelhantes. Caso contrário, o anticorpo (detector) não reconhece o antígeno, não existindo o casamento entre os sinais.

3.6 COMENTÁRIOS

Neste capítulo foram apresentados os conceitos dos SIAs em conjunto com os SIBs e a EI. Estes conceitos foram apresentados neste trabalho por causa da importância e necessidade de se compreender os modelos e algoritmos baseados nos SIBs. Detalhes mais específicos a respeito dos SIBs podem ser encontrados nos anexos.

4 BASE DE DADOS

Neste capítulo, será mostrado, passo-a-passo, o desenvolvimento da base de dados com imagens faciais 3D dinâmico ou 4D, onde o componente temporal é considerado como a quarta dimensão. Esta base de dados foi construída no laboratório do *ISR* junto a *UC*, contendo 9 sequências diferentes de expressões faciais de 65 pessoas, das quais 7 foram repetidas 4 vezes cada expressão, somando 774 expressões e 38.700 modelos 3D. Nesta base de dados, os movimentos da cabeça foram retirados e apenas o dinamismo da face foi considerado e esta será a base de dados utilizada em todo o desenvolvimento e aplicações desta tese.

4.1 INTRODUÇÃO

Várias pesquisas no âmbito do uso de imagens estáticas faciais de um indivíduo, aplicadas à análise biométrica, vêm sendo desenvolvidas atualmente. O reconhecimento de identidade pela face é uma das aplicações mais importantes, por causa da sua interpretação natural e baixa intrusão. Assim, pode-se dizer que este é um campo que vem ganhando espaço no ambiente acadêmico, que leva em consideração as suas várias aplicações, como por exemplo, identificação, uso de chaves, cartões de identificação e senhas, isto tudo aplicado ao controle de acesso aos computadores, vigilâncias, identificação criminal, segurança nas transações de caixas eletrônicos, entre outras. Estes estudos também levam em consideração os obstáculos a serem enfrentados nesta área, tais como os fatores que afetam no reconhecimento facial (envelhecimento, ganho de peso, óculos, barba, etc). Essas pesquisas mostram que a informação dinâmica da face não é redundante e pode ser usada com sucesso em idade, sexo ou de reconhecimento de identidade.

Nesse ínterim, recentemente foi construída nos laboratórios do *ISR* uma plataforma 4D de alta resolução para a construção de uma base de dados faciais, visto que atualmente há uma quantidade maior de estudos realizados utilizando bancos de dados faciais em 2D, uma menor quantidade em 3D e ainda mais reduzida de dados em 3D dinâmico, também chamado de 4D,

com o tempo considerado como a quarta dimensão. Assim, esta torna-se uma área com muitos desafios inerentes de pesquisa e revela a importância da construção desse tipo de base de dados.

O banco de dados desenvolvido pelo *ISR* contém 9 sequências diferentes de expressões faciais de 65 pessoas, 7 deles com 4 repetições por expressão, num total de 774 expressões e 38.700 modelos 3D. Nas seções seguintes serão exploradas as sequências realizadas para a construção da base de dados. Nelas será possível notar que os movimentos da cabeça são retirados e apenas o dinamismo da face é considerado.

4.2 ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA

Foi montada uma estrutura cúbica de 2 metros de lado com difusor revestido de tecido branco, minimizando as sombras no interior, onde foram instalados dois pares de câmeras ao lado da posição onde a pessoa será posicionada com um ângulo aproximado de 30°. Estas câmeras foram montadas com um monitor, que também serviu de guia para se obter a expressão. As câmeras utilizadas foram a Fujinon 1:1.4 9mm e a Point Grey FL2 Flea2-08S2M/C, maximizando o rosto da pessoa em 1024x768 pixels. Uma linha de base estéreo de cerca de 9 cm foi escolhida, o que permite obter uma boa precisão e ao mesmo tempo faz a correspondência das câmeras muito mais facilmente, além de minimizar a oclusão. Cinco difusores de projetor de luz foram instalados junto a estrutura, de modo que toda a face da pessoa fosse iluminada de maneira uniforme, sendo um difusor de frente para a pessoa, encarregado por iluminar a parte frontal da face e os outros quatro projetores idênticos em cerca de 45° e 135° da pessoa, iluminando toda a superfície, conforme pode ser visto na Figura 5. Para fazer a calibração do sistema, foi utilizado um tabuleiro de xadrez baseado nos métodos de Bouguet (2013) e Zhang (2000).

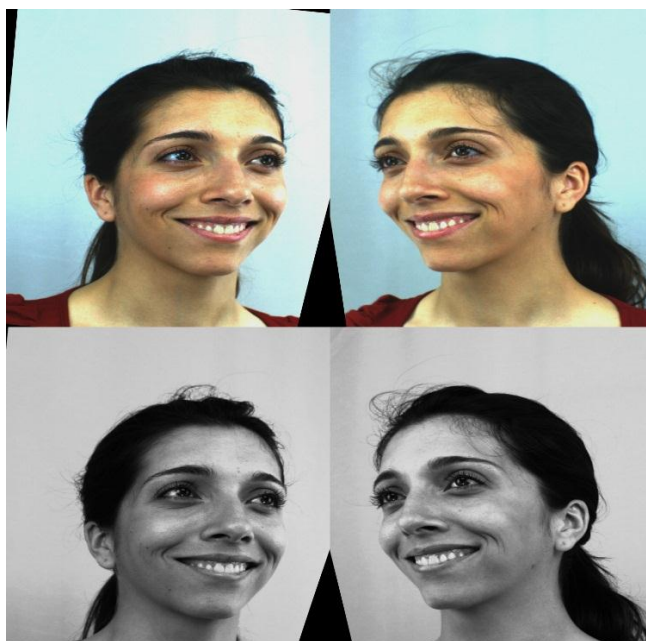
Figura 5: Configuração do sistema



Fonte: 4D Facial Database, 2012.

As imagens captadas pelas quatro câmeras sincronizadas são enviadas à uma máquina com um processador Intel Core i7 950, com resolução máxima em uma taxa de 20 frames por segundo. Cada par de câmera retorna uma imagem em cores (câmera superior) junto com uma imagem monocromático (câmera inferior). Assim, a imagem em cores pode ser usada para se obter a textura do modelo e, ao mesmo tempo, para proporcionar imagens de profundidade ou de disparidade, depois convertida em tons de cinza, conforme pode ser visto na Figura 6. As imagens passam por um processo de pré-correção de acordo com os parâmetros de calibração e finalmente são armazenadas na base de dados.

Figura 6: Imagens da câmera superior (em cores) e da câmera inferior (monocromático).



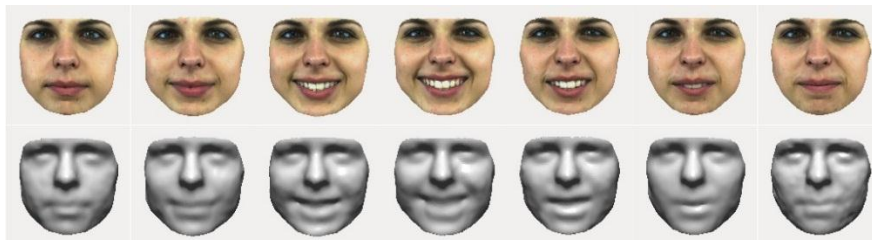
Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.3 MODO DE CAPTURA DAS IMAGENS

As 65 pessoas participantes na composição da base de dados foram instruídas a colocar-se em torno de 60 cm à frente do monitor. A partir daí, foram registrados 9 tipos de expressão facial de cada pessoa, sendo: *raiva*, *desprezo*, *nojo*, *medo*, *alegria*, *tristeza*, *surpresa*, *neutro* e dizendo a frase: "*yes we can*". Cada sequência de expressão tem uma duração de cerca de 4 segundos e inicia num estado neutro, seguindo progressivamente até o pico da expressão e retornando ao estado neutro, conforme exemplificado na Figura 7. Como informado anteriormente, a base de dados é constituída por 65 pessoas, sendo 14 do sexo feminino e 51 do sexo masculino, onde 7 pessoas (1 do sexo feminino e 6 do sexo masculino) realizaram 4 sequências repetidas por expressão. Essas repetições tornam esta base de dados única, pois são conjuntos de dados muito importantes e úteis que permitem treinar e testar algoritmos com dados diferentes de uma mesma pessoa. Este tipo de base de dados é muito raro de se encontrar, mesmo em 2D ou 3D.

As expressões foram implementadas de acordo com o FACS, tornando possível a decomposição em pequenos componentes faciais chamados de AUs para cada expressão. Por exemplo, pode-se caracterizar a expressão de tristeza com três movimentos independentes: Inner Brow Raiser Lowerer + Brow + Lip Corner Depressor (DE LA TORRE; COHN, 2011; GUNES; PANTIC, 2010).

Figura 7: Amostras de rastreamento temporais

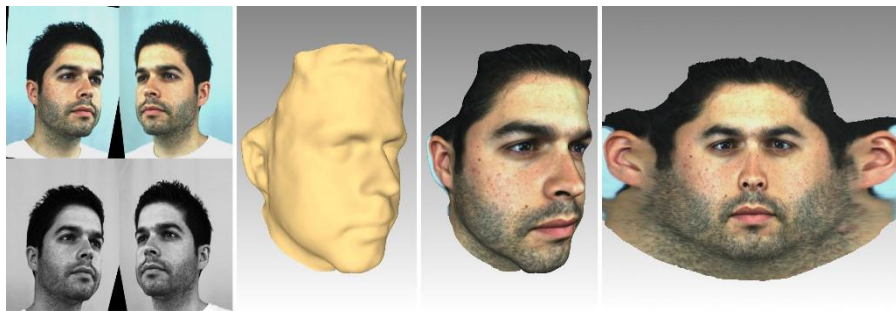


Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.4 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados no banco são estruturados da seguinte forma: para cada pessoa derivam-se 9 blocos com expressões diferentes, contendo uma sequência de imagens retificadas junto com o respectivo vídeo, a sequência de modelos 3D em formato Virtual Reality Modeling Language (VRML) e uma sequência de imagens da projeção cilíndrica da textura (conforme é mostrado na Figura 8), juntamente com arquivos registrados em 2D (pixel) e 3D (indexado ao modelo original 3D). Cada modelo 3D contém cerca de 53.000 vértices. Assim, a base de dados tem 65 participantes, 774 expressões e cerca de 663 gigabytes.

Figura 8: Imagens retificadas à esquerda, o modelo 3D no centro e a projeção correspondente cilíndrica à direita

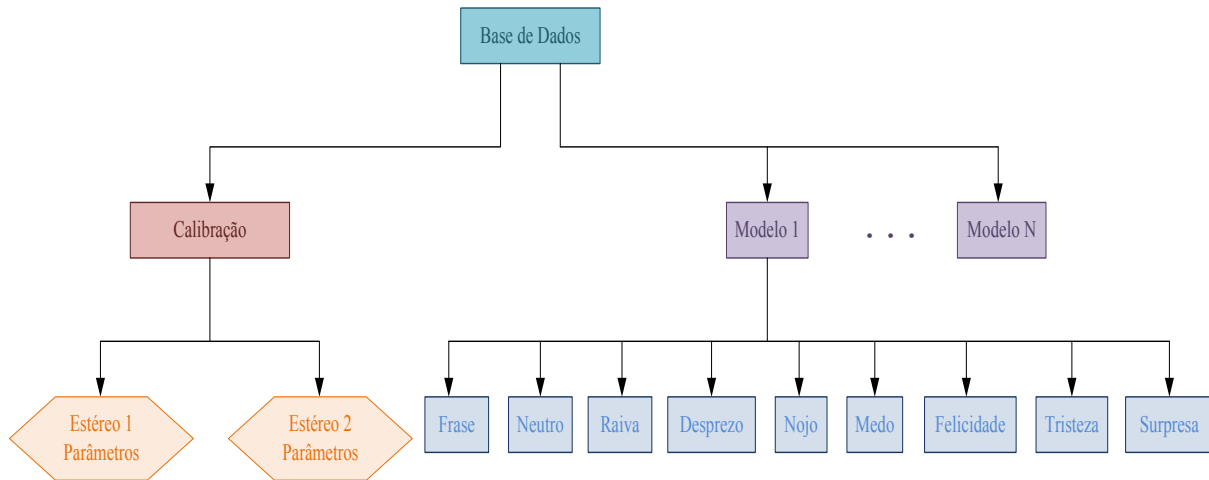


Fonte: 4D Facial Database, 2012.

Todos os dados disponíveis podem ser observados de várias formas (nuvem de pontos, malha, superfície, textura, forma original ou modelo registrado a partir de qualquer ponto de vista), por meio da ferramenta de visualização desenvolvida, a qual não será discutida por não ter sido utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

A Figura 9 apresenta, de forma reduzida, o processo de organização dos dados pelo sistema por meio de um fluxograma.

Figura 9: Organização dos dados



Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.5 ALTA RESOLUÇÃO DE RECONSTRUÇÃO 3D

A criação da base de dados se deu por meio do desenvolvimento da alta resolução da plataforma de reconstrução 3D. A seguir tem-se a explicação das escolhas feitas e os métodos mais importantes utilizados.

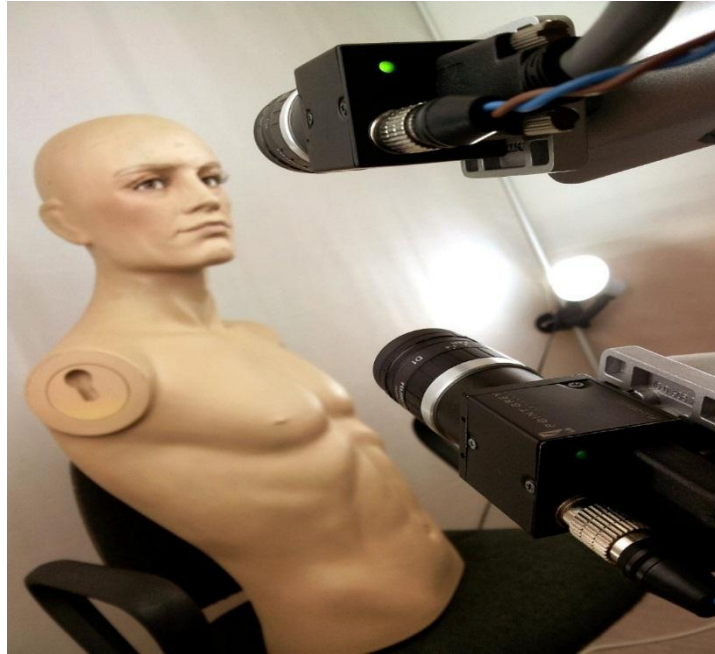
4.5.1 Linha de base estreita

Para fazer a cobertura de um maior campo de visão, foi desenvolvido um sistema para a reconstrução 3D de alta qualidade com base em dois pares estéreo, permitindo, então, que a pessoa tenha mais liberdade de movimentos.

Um fator muito importante para estes sistemas é a distância entre os pontos de foco da câmera que é chamado de linha de base estéreo. Uma longa linha de base fornece resultados mais precisos. Por outro lado, torna o estabelecimento de correspondências entre as câmeras mais difícil e ao mesmo tempo aumenta o risco de obstruções. Porém, uma curta linha de base torna o estabelecimento de correspondência muito mais simples, entretanto diminui a precisão. Assim, chegou-se a determinação de um valor ótimo de cerca de 9 centímetros, o qual poderá

variar dependendo da distância das câmeras em relação à área de interesse e do comprimento focal das lentes. É importante lembrar que as câmeras não são paralelas e a intersecção das linhas ocorre aproximadamente no fundo, otimizando a área visível comum entre elas.

Figura 10: Foto de um dos pares de câmeras



Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.5.2 Construção da linha de base estéreo passiva

Para a obtenção de um ponto 3D de um par estéreo é necessário que se encontre a projeção deste ponto em ambas as câmeras e o algoritmo LibELAS (*Library for Efficient Large-Scale Stereo Matching*) desenvolvido pelo Karlsruhe Institute of Technology é utilizado para esta finalidade (GEIGER; ROSER; URTASUN, 2011). Este algoritmo fornece uma imagem de profundidade, mais tecnicamente, a disparidade (distância, em pixels, entre os pontos correspondentes em cada imagem) de um aparelho estéreo corrigido.

É necessário fazer uma retificação da imagem para reduzir a procura de uma dimensão, que permite que o ponto correspondente seja encontrado na mesma linha da outra imagem. A disparidade e os parâmetros de calibração permitem gerar uma nuvem de pontos 3D, assim cada

par estéreo fornece uma nuvem de pontos 3D com 1024x768. A partir daí, faz-se a segmentação da face de modo a remover o fundo, excluindo os pontos mais distantes da nuvem central, obtendo assim a face da pessoa. A Figura 11 traz a representação da nuvem de pontos das disparidades (à esquerda) e do estéreo (à direita).

Figura 11: As disparidades à esquerda e o estéreo à direita

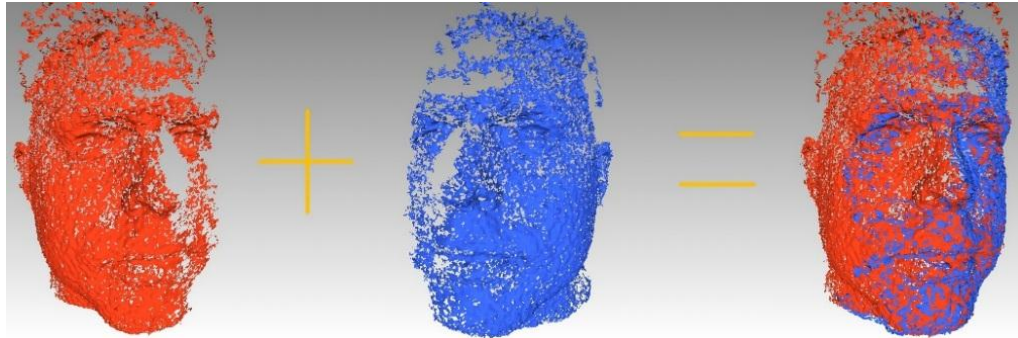


Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.5.3 Alinhamento e fusão das nuvens de pontos

Uma vez que se possui as duas nuvens de pontos, o próximo passo é encontrar a melhor maneira de mesclá-las (Figura 12). Por meio dos parâmetros de calibração, é possível fazer a transformação necessária para referir todos os pontos em um quadro com a precisão adequada, uma vez que cada um tem sua própria referência. Com esta transformação é possível mesclar as nuvens de pontos com eficiência. Entretanto, com a execução do algoritmo *Interactive Closest Point (ICP)*, este acoplamento pode ser melhorado. O ICP encontra pares entre nuvens e cria uma transformação de corpo rígido que minimiza a distância entre eles até a convergência.

Figura 12: A fusão de duas nuvens de pontos



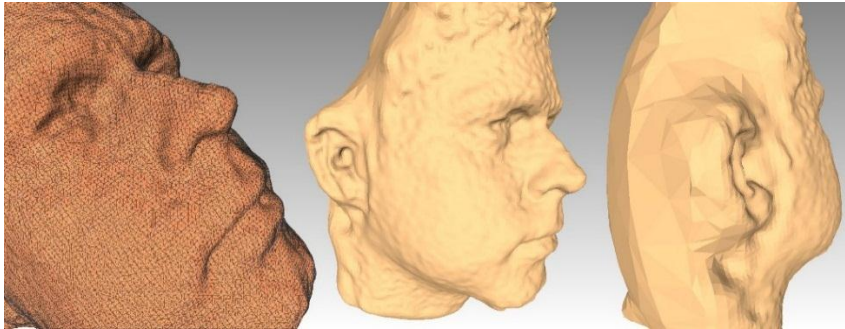
Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.5.4 Reconstrução da Superfície de Poisson

Com a fusão de duas nuvens de pontos, a nuvem resultante tem concentrações de pontos variáveis por causa das nuvens que se sobrepõem (Figura 12). Para se criar uma superfície homogênea, foi utilizado o algoritmo de Reconstrução de Superfície Poisson desenvolvido pela Universidade Johns Hopkins. Esse algoritmo possui algumas características que o torna particularmente adequado para esta finalidade, ou seja, operar a partir de uma nuvem de pontos e fornecer uma superfície fechada, sem buracos.

Posteriormente, é realizado um ajuste dos parâmetros de modo a controlar o grau de fidelidade dos pontos originais da superfície, permitindo uma filtragem de ruídos e também a economia de tempo de processamento. A Figura 13 mostra a redução da quantidade de informação necessária para representar o modelo 3D de uma aproximação da superfície de uma malha de polígonos (triangular).

Figura 13: Amostra da Reconstrução de Superfície Poisson

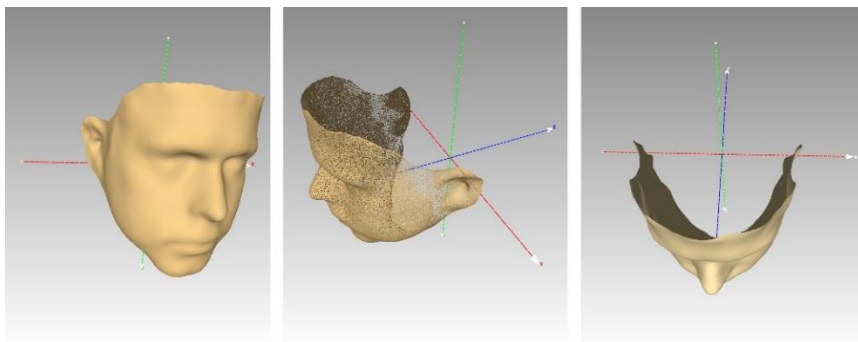


Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.5.5 Alinhamento de face

O foco desta base de dados é somente a face da pessoa. Portanto, é necessário retirar a região da superfície em volta da face. Para isso foi gerada uma pré-máscara, centrada em um sistema fixo de coordenadas comum a todos os participantes, contendo apenas a superfície desejada. O algoritmo ICP é usado de modo que o modelo 3D seja ajustado para essa máscara e que as áreas não sobrepostas sejam removidas, fazendo com que todas as faces sejam alinhadas em uma estrutura estática comum. A Figura 14 traz a representação do posicionamento da pré-máscara gerada sob os eixos.

Figura 14: Pré-máscara gerada



Fonte: 4D Facial Database, 2012.

4.5.6 Texturização

Para um nível mais elevado de realismo, realiza-se a fase de texturização da superfície do modelo utilizando uma técnica que consiste em atribuir pequenos trechos de textura, provenientes das câmeras em cores, para todos os polígonos da superfície do modelo 3D. Para que isso seja feito, é necessário utilizar dois sistemas diferentes de coordenadas, sendo o primeiro com as coordenadas (x, y, z) , correspondentes ao modelo 3D, e o segundo com as coordenadas (u, v) , que corresponde ao nível do plano da imagem.

4.5.6.1 Geração das coordenadas de textura

Até este momento não há nenhuma conexão entre as coordenadas, sendo necessário que se estabeleça uma ligação entre todos os pontos do modelo 3D e a textura das imagens. Assim, todos os pontos 3D são projetados para os planos da câmera, de modo que cada ponto 3D (x, y, z) tenha um ponto (u, v) associado em cada textura da imagem.

4.5.6.2 Seleção da fonte de textura ótima

Na seleção da fonte de textura, é necessário decidir qual é a melhor vista para cada região da face. Quando há apenas uma fonte de textura, a seleção é bastante simples, uma vez que a projeção do modelo 3D para o plano da câmera é suficiente para fornecer as coordenadas de mapeamento necessárias, pois não há mais do que um ponto de vista da pessoa. Assim, é necessário decidir o fornecimento ideal da textura para cada uma das superfícies, de modo a maximizar a resolução dos polígonos e evitar obstruções que podem ocorrer quando uma região é visível apenas de um lado. Para essa tarefa, pode-se utilizar vários critérios de decisão, sendo que o mais utilizado é o de escolher uma fonte que fornece a maior área projetada do triângulo nas imagens onde se tem uma maximização da resolução. Porém, por meio desse critério, pode acontecer de se obter uma baixa qualidade por causa da larga distância entre as câmeras. Caso

isso ocorra, pode ser selecionado o acréscimo de um fator que favorece a menor distância entre o centro de polígonos e câmeras.

Por fim, pode-se adicionar um terceiro fator buscando dividir o rosto em duas partes (esquerda e direita), direcionando-os para a câmera mais próxima, uma vez que a face está centrada. Este critério adapta-se perfeitamente a rostos humanos e é o mais simples de se colocar em prática, tornando-se o fator mais importante na escolha do critério.

Em alguns casos, por causa do processo de reconstrução da superfície de Poisson por exemplo, pode não ser visível a área abaixo do queixo a partir de qualquer câmera. Então os critérios de seleção de fonte de textura citados assumem o controle completo, de forma a atribuir uma textura proveniente da vizinhança. Conforme a Figura 15, à direita pode-se observar uma certa irregularidade na área citada, no entanto, visto que esta é uma aproximação, é absolutamente aceitável.

Então para finalizar o processo de seleção da fonte de textura ótima, todas as coordenadas (u, v) não referenciadas são eliminadas.

Figura 15: À esquerda e ao centro as distorções causadas pelas múltiplas fontes de textura são quase imperceptíveis. À direita pode se ver que a área sob o queixo contém algumas distorções não visíveis para qualquer uma das câmeras



Fonte: 4D Facial Database, 2012.

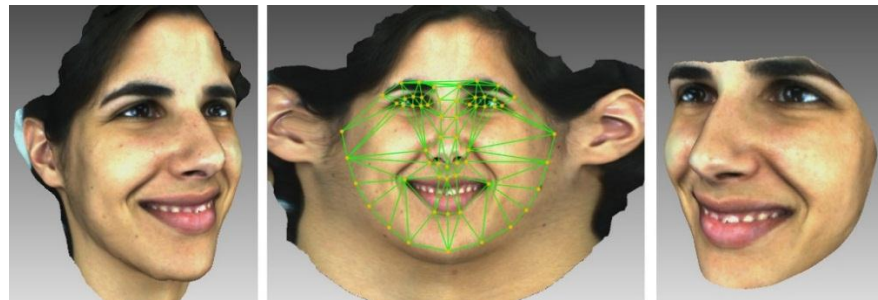
4.6 REGISTRO DAS CARACTERÍSTICAS FACIAIS

Esta base de dados é formada por modelos faciais dinâmicos (sequências de modelos 3D ao longo do tempo) onde a sua principal finalidade é a análise da variação de um conjunto coerente de pontos no espaço e no tempo.

Foi desenvolvida uma combinação dos algoritmos *Active Appearance Model* (AAM) com o *Thin Plate Splines* (TPS) a fim de controlar um certo número de características do rosto ao longo do tempo, visto que o modelo criado até agora carece de um número constante de pontos e não há correlação entre a ordem dos pontos ou pontos de partida entre quadros consecutivos no tempo. Porém, o algoritmo AAM não é construído a partir de imagens de uma câmera frontal, visto que estes modelos não podem ser totalmente vistos de um único ponto de vista.

A Figura 16 mostra a criação de uma imagem virtual do modelo 3D, em que a superfície é mapeada por uma saliência cilíndrica (θ, h, ρ) para a referência da pré-máscara gerada e, em seguida, desprezando ρ , é feita a conversão de (θ, h) para o plano de imagem (u, v) .

Figura 16: Rastreamento das Características Faciais



Fonte: 4D Facial Database, 2012.

O algoritmo AAM é definido por 58 pontos (P_i) a serem instalados em cada quadro ao longo da sequência, sendo P_{prior} os 58 pontos escassos em relação à média de todas as faces treinadas e D_{prior} o conjunto denso de pontos contidos na casca convexa de P_{prior} . Quando executado o algoritmo AAM, com imagens de 1024 x 1024 pixels, D_{prior} será um conjunto denso de cerca de 48000 pontos constantes ao longo de toda a base de dados. A partir daí é feita uma comparação de P_i com P_{prior} por meio do algoritmo TPS, o qual fornecerá uma função que define a deformação entre estes dois conjuntos de pontos no espaço da imagem, que serão usados para mapear D_{prior} em cada quadro proveniente de D_i .

É possível alcançar um registro de face densa com um conjunto constante e persistente de pontos ao longo da sequência por meio da deformação entre D_i e D_{prior} , assumindo-se como

uma réplica densa da relação dos pontos escassos de P_i e P_{prior} . Em resumo, pode-se dizer que esses pontos são reprojatados para o espaço 3D de forma a calcular o ponto de intersecção da linha ($\theta, h, \rho = 1$) com a superfície do modelo 3D e finalizando com o armazenamento do ponto 3D mais próximo.

Com estas projeções, também são extraídas as coordenadas de textura, gerando uma malha fina de textura a ser armazenada no formato VRML junto com os pontos em pixel D_i e os arquivos indexados em 3D.

Como informado anteriormente, cada sequência de expressão começa com um estado neutro, seguindo progressivamente até o pico de expressão e voltando para o estado neutro com cerca de 4 segundos de duração. Para o banco de imagens, cada sequência foi separada em 50 imagens com esta mesma progressão. Então o arquivo no formato VRML é criado para cada uma das imagens, sendo 29250 arquivos de VRML com o seguinte formato:

```
#VRML V2.0 utf8

# Produced by Da Tulha Productions export plug-in.
# ISR4studio

Group {
  children [
    Shape {
      appearance Appearance {
        materialMaterial{
          diffuseColor 0.5882 0.5882 0.5882
          ambientIntensity 1.0
          specularColor 0 0 0
          shininess 0.145
          transparency 0
        }
        texture ImageTexture {
          url "000s.jpg"
        }
      }
      geometry DEF ISR4Dstudio-FACES IndexedFaceSet {
        ccw TRUE
        solid TRUE
        coord DEF ISR4Dstudio-COORD Coordinate {
point [
          -0.050437 -0.055738 0.555054,
          -0.049646 -0.055630 0.553641,
          -0.049646 -0.055630 0.553641,
          .
          .
          .
          0.010176 0.076502 0.561161,
          0.010176 0.076502 0.561161,
```

```

                                0.011693 0.076504 0.561169,
                                ]
                                }
                                texCoord DEF ISR4D-TEXCOORD
TextureCoordinate { point [
                                0.374023 0.682617,
                                0.375000 0.682617,
                                0.376953 0.682617,
                                .
                                .
                                .
                                0.496094 0.249023,
                                0.498047 0.249023,
                                0.500000 0.249023,
                                ]
                                }
                                texCoordIndex [
                                5837, 5836, 6042, -1
                                4643, 5836, 5633, -1
                                6041, 6248, 6249, -1
                                .
                                .
                                .
                                24526, 24805, 24806, -1
                                24563, 24284, 24283, -1
                                24471, 24472, 24192, -1
                                ]
                                creaseAngle 1.5
                                coordIndex [
                                5837, 5836, 6042, -1
                                4643, 5836, 5633, -1
                                6041, 6248, 6249, -1
                                .
                                .
                                .
                                24526, 24805, 24806, -1
                                24563, 24284, 24283, -1
                                24471, 24472, 24192, -1
                                ]
                                }
                                }
                                ]
                                }
}

```

A partir destes arquivos, serão feitas todas as implementações computacionais para os Padrões Binários apresentados no próximo capítulo.

4.7 COMENTÁRIOS

Neste capítulo foi apresentado como foi criada a base de dados faciais 3D dinâmico ou 4D onde o componente temporal é considerado como a quarta dimensão. É mostrado e exemplificado toda a parte de organização do sistema, modo de captura das imagens e organização de dados. Posteriormente, mostrou-se a alta resolução de reconstrução 3D, composta pela linha de base estreita, a construção da linha de base estéreo passiva, o alinhamento e fusão das nuvens de pontos, a reconstrução da superfície de Poisson, o alinhamento de face e a texturização (geração das coordenadas de textura e seleção da fonte de textura ótima). Por fim, mostrou-se, por meio de um exemplo, como foi feito o registro das características faciais em arquivo no formato VRML.

5 RECONHECIMENTO DE IDENTIDADE USANDO DINÂMICAS FACIAIS 4D

Este capítulo abordará a importância do subcampo de reconhecimento de identidade e suas principais aplicações práticas. Posteriormente, será exposta a técnica de representações da geometria facial usada neste trabalho, bem como as características de Padrões Binários (*Local Binary Patterns*, *Local Phase Quantisers*, *Gabor Binary Patterns* e *Monogenic Binary Patterns*). Exemplos destas imagens obtidas pela aplicação dos padrões binários serão apresentados e as mesmas serão utilizadas para se fazer os testes de reconhecimento de identidade apresentados no Capítulo 7.

5.1 INTRODUÇÃO

O estudo da biometria facial vem crescendo rapidamente nos últimos anos, principalmente em pesquisas na área de inteligência computacional. Por meio do Reconhecimento Facial é possível construir sistemas de identificação e autenticação de pessoas, cuja aplicabilidade varia desde o controle de acesso em computadores à vigilância de aeroportos, vigilância privada, identificação criminal e na segurança nas transações de ATM (*Automatic Teller Machine* ou Caixa Eletrônico). Por causa da sua interpretação natural (reconhecimento visual humano se basear principalmente em análise facial) e baixa intrusão (ao contrário da impressão digital), o reconhecimento com base em face é uma das características biométricas mais importantes.

Ao longo dos anos, diversas pesquisas foram desenvolvidas sobre o uso de imagens estáticas da face de um indivíduo como uma biométrica (análise estática). Entretanto, as dinâmicas faciais são menos afetadas por mudanças físicas, tais como o envelhecimento, ganho de peso, o uso de óculos, barba, etc. Assim, essas pesquisas mostram que a informação dinâmica não é redundante e pode ser usada com sucesso considerando-se a idade, sexo e o reconhecimento de identidade. Com base nessas informações, foi desenvolvido recentemente no laboratório do *ISR* junto a UC, uma plataforma 4D de alta resolução para a construção de

uma base de dados de 9 sequências diferentes de 65 pessoas, das quais 7 com 4 repetições por expressão, num total de 774 expressões e 38.700 modelos 3D. Nesta base de dados, os movimentos da cabeça são retirados e somente o dinamismo da face é considerado (4D FACIAL DATABASE, 2012).

A análise da textura é uma importante área em sistemas de visão artificial ou visão computacional, pois a maioria das superfícies contém texturas únicas tornando possível a interpretação de um sistema de visão artificial por meio das variações das propriedades óticas. Sendo assim, a textura é uma importante fonte de informações para a classificação facial

A textura pode ser definida como a variação espacial das intensidades dos pixels em uma imagem e a relação entre estes pixels e seus vizinhos, assim como em uma função (OJANSIVU; HEIKKILÄ, 2008).

A análise de textura pode ser feita por meio da abordagem estrutural que considera a textura sendo composta de um padrão de repetição e descrevem o padrão por regras capazes de gerar este padrão e reproduzi-lo (fundamento da análise fractal em imagens), muito utilizado em texturas naturais, como estruturas biológicas (GÓMEZ, 2012). Ainda é possível fazer a análise de textura por meio da abordagem estatística, onde descrevem a textura usando regras estatísticas que governam a distribuição e relação espacial dos níveis de cinza na imagem e é muito utilizado na análise de texturas com baixa resolução (WESZKA; DYER; ROSENFELD, 1976). Por fim, pode-se fazer a análise de textura pelo método espectral que se baseia na transformação da imagem para outro espaço de análise, como no caso da aplicação da transformada de Fourier (ROSENFELD; WESZKA, 1980), Filtros de Gabor (DAUGMAN, 1985) e transformada *wavelet* (MALLAT, 1989). Na análise espectral, transforma-se a imagem no espaço cujo sistema de coordenadas tem uma interpretação relacionada às características de uma textura (frequência ou tamanho).

Em Sandbach, Zafeiriou e Pantic (2012a) é apresentada uma proposta de um conjunto de descritores com base em Padrões Binários usados com sucesso para a detecção AU. DM e APDIs representam as geometrias faciais 3D, onde quatro descritores diferentes são aplicados originando oito vetores de características diferentes. Estes descritores fazem uso de Local Binary Patterns (LBP), Local Phase Quantisers (LPQ), Filtros Gabor e Filtros Monogênicos.

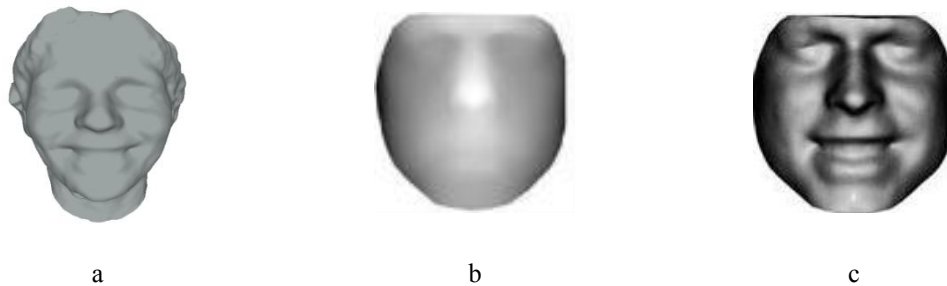
A seguir são apresentadas nas seções 5.2. e 5.3. as representações de geometrias faciais 2D e as características de Padrão Binário, seguida de exemplos de imagens para cada uma das

representações. As imagens de exemplo foram implementadas por meio de programas laboratoriais e são semelhantes aos apresentados em Sandbach, Zafeiriou e Pantic (2012a), o que sugere que os recursos foram corretamente implementados.

5.2 REPRESENTAÇÕES DA GEOMETRIA FACIAL

Conforme mostrado na Figura 17, duas imagens 2D representam as geometrias faciais 3D, que são os DMs e APDI.

Figura 17: Representações em 2D da malha facial a) A malha facial inicial, b) O DM interpolados, c) APDI

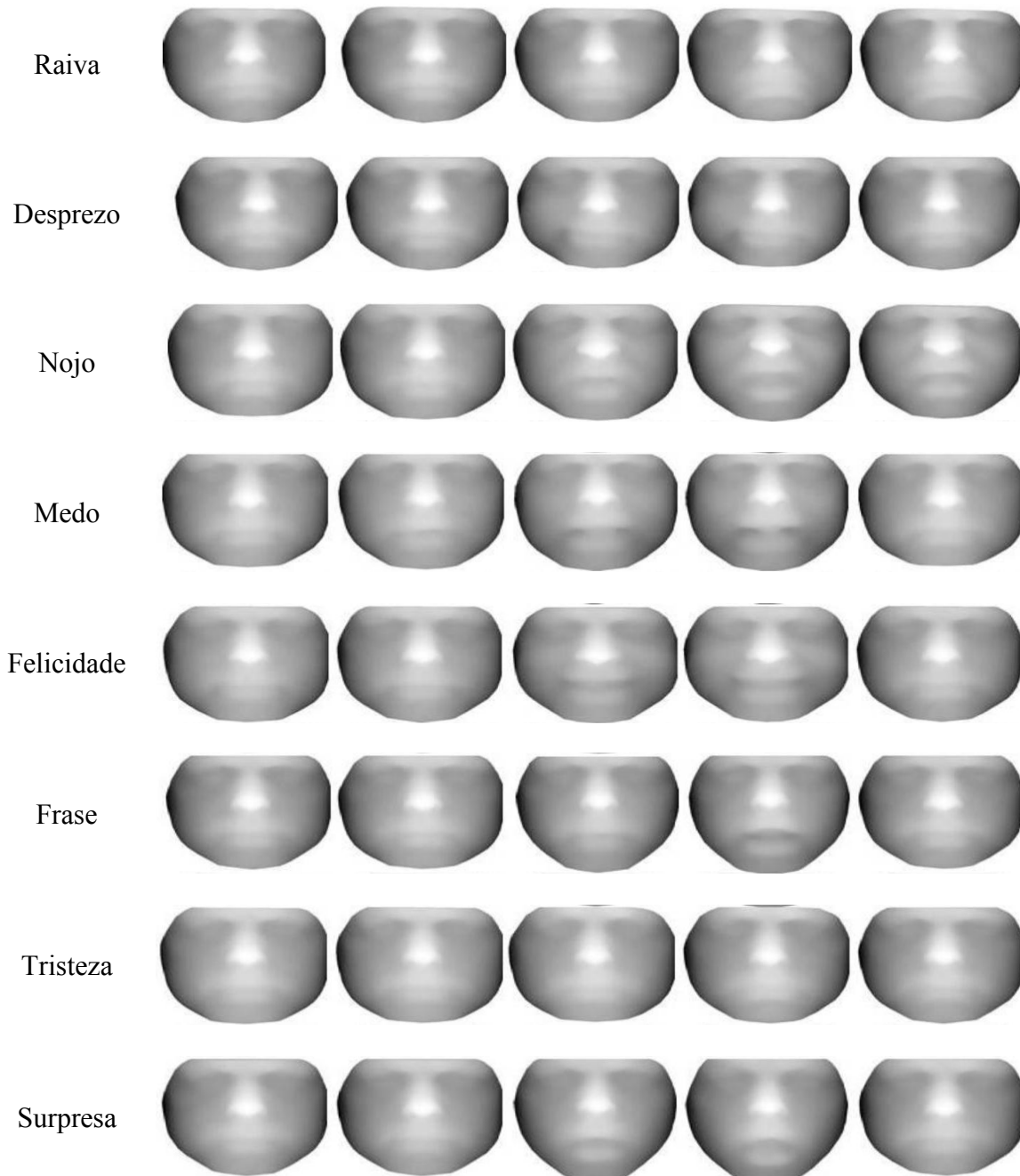


Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

O DM é criado por meio da definição de uma grade regular de valores x e y e a triangulação de Delaunay é utilizada para interpolar a altura da malha facial, originando uma grade regular de valores de z , que constitui o DM (BERRETTI et al. 2011; HUANG et al. 2011; SMITH; HANCOCK, 2006).

A Figura 18 mostra os exemplos dos DM calculados para amostras temporais de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) para cada uma das expressões faciais.

Figura 18: Amostras temporais de DM calculados para amostras de quadros (frames) da base de dados (4D Facial Database, 2012), para cada uma das expressões faciais



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

Também pode-se delinear uma segunda representação, a APDI. O objetivo deste método é encontrar uma representação que permite a comparação exata das direções das normais na vizinhança local. A *Azimuthal Equidistant Projection* (AEP) é capaz de projetar normais em pontos em um espaço euclidiano de acordo com a direção e é utilizado para capturar as variações locais na forma facial (OPPENHEIM: LIM, 1981), podendo ser aplicado com as

normais afim de projetar cada direção para a posição em 3D em um plano euclidiano 2D. Portanto, para uma grade regular de normais definida como $n(i, j) = (u_{i,j}, v_{i,j}, w_{i,j})$, em que cada ponto da AEP no plano é dado por $p(i, j) = (x_{i,j}, y_{i,j})$ e é definido como (SANDBACH, ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a):

$$x_{i,j} = k' \cos\theta(i, j) \text{sen}[\emptyset(i, j) - \widehat{\emptyset}(i, j)] \quad (8)$$

$$y_{i,j} = k' \{ \cos\widehat{\theta}(i, j) \text{sen}\emptyset(i, j) - \text{sen}\widehat{\emptyset}(i, j) \cos\theta(i, j) \cos[\emptyset(i, j) - \widehat{\emptyset}(i, j)] \} \quad (9)$$

em que $\theta(i, j) = \frac{\pi}{2} - \arcsen(w_{i,j})$ é o ângulo de elevação medido a partir do eixo z, $\emptyset(i, j) = \arctan \frac{v_{i,j}}{u_{i,j}}$ é o ângulo de azimute, $\widehat{\theta}(i, j)$ e $\widehat{\emptyset}(i, j)$ são a elevação e azimute da Normal $\widehat{n}(i, j)$ no ponto p , e $k' = \frac{c}{\text{sen}(c)}$ em que C é definido como:

$$\cos(c) = \text{sen}\widehat{\theta}(i, j) \text{sen}\emptyset(i, j) + \cos\widehat{\emptyset}(i, j) \cos\theta(i, j) \cos[\emptyset(i, j) - \widehat{\emptyset}(i, j)] \quad (10)$$

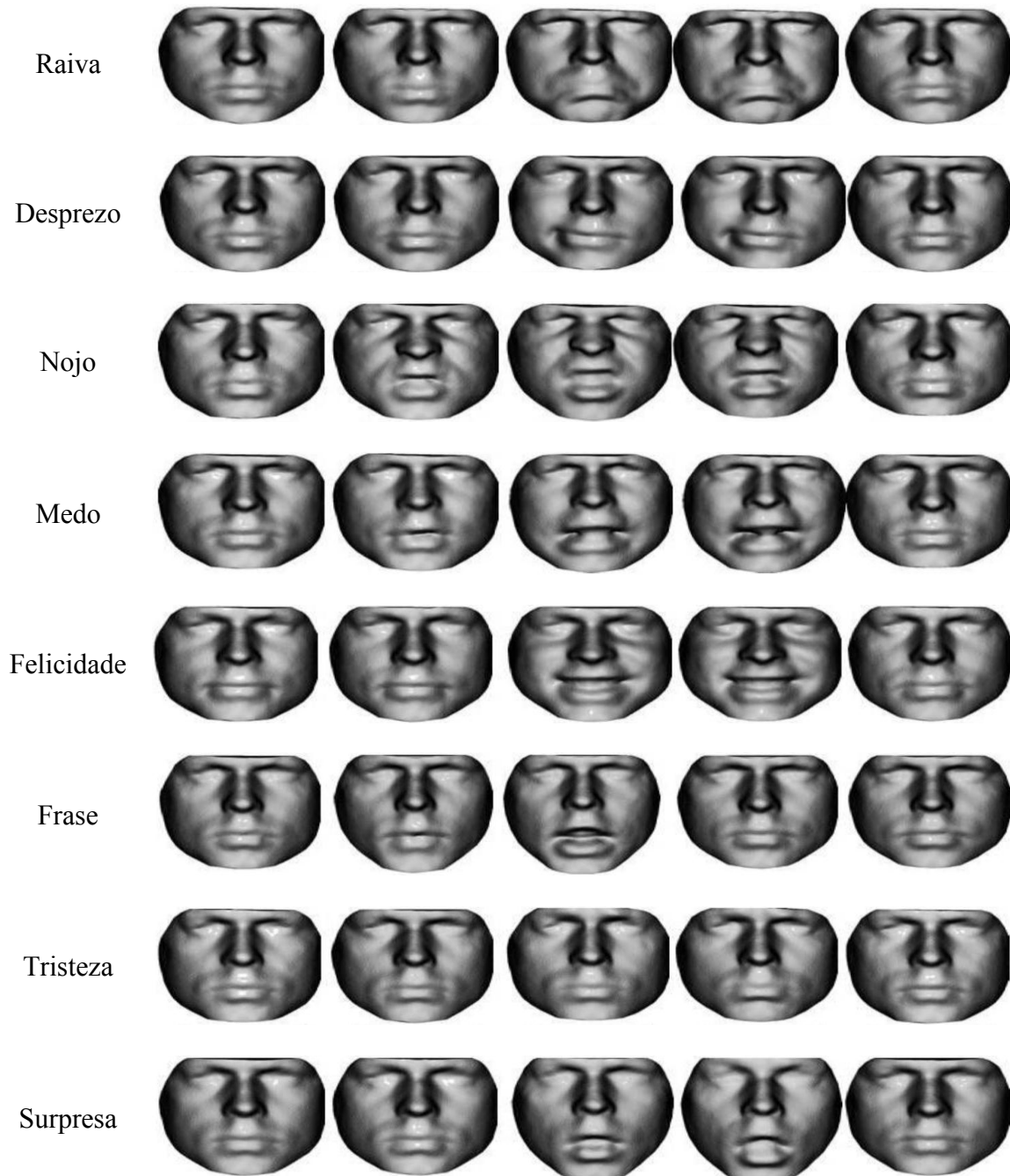
O objetivo é comparar diretamente a projeção de coordenadas de pontos vizinhos, por esta razão, $\widehat{\theta}$ e $\widehat{\emptyset}$ em cada ponto são definidas por $\frac{\pi}{2}$ e 0, respectivamente, de modo que a distância calculada é sempre em relação a uma Normal $\widehat{n} = (1, 0, 0)$ escolhida como referência para criar uma imagem apropriada para posterior análise. Esta suposição de $\cos(c) = \text{sen}\theta(i, j)$, permite que $x_{i,j}, y_{i,j}$ seja simplificado para:

$$x_{i,j} = k' \cos\theta(i, j) \text{sen}\emptyset(i, j) \quad (11)$$

$$y_{i,j} = k' \cos\theta(i, j) \cos\emptyset(i, j) \quad (12)$$

Com base na formulação acima, as distâncias entre as normais no espaço euclidiano podem ser encontradas diretamente e esta simplificação também reduz a complexidade da função de extração. A fim de empregá-la no Padrão Binário, as coordenadas são utilizadas para encontrar uma distância absoluta a partir da origem $d_{i,j} = \sqrt{x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2}$, surgindo as APDIs para a malha facial. A Figura 17(c) mostra um exemplo de APDI para a Figura 17(a) e a Figura 19 mostra os exemplos dos APDIs calculados para amostras temporais de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012), para cada uma das expressões faciais.

Figura 19: Amostras temporais de APDIs, calculados para amostras de quadros (frames) da base de dados (4D Facial Database, 2012), para cada uma das expressões faciais



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

5.3 CARACTERÍSTICAS DE PADRÕES BINÁRIOS

Nesta seção será explicado o conjunto proposto de novas funcionalidades para Padrão

Binário empregado na análise de informações de geometria facial 3D. Primeiramente, a característica 3DLBP é descrita, bem como a sua extensão usando o APDI. Em seguida, descreve-se a aplicação de *Local Phase Quantisers*, *Gabor Binary Patterns* e *Monogenic Binary Patterns* para malhas faciais em 3D. Conforme descrito em Sandbach, Zafeiriou; Pantic (2012a).

5.3.1 Local Binary Patterns (LBP)

Os LBPs foram inicialmente utilizados para a análise de texturas (OJALA; PIETIKAINEN; HARWOOD, 1996) e mais recentemente têm sido empregados em reconhecimento de imagens faciais com muito sucesso. Esta técnica faz com que uma imagem seja descrita como uma composição de micro padrões. Por isso, o seu grande sucesso na área de reconhecimento de identidade (AHONEN; HADID, 2006).

Pode-se ainda dizer que os LBPs são técnicas de extração de características de texturas não morfológicas de abordagem estática, com vantagens que vão desde a não influência das variações de iluminação até a capacidade de codificar detalhes e permitir realizar análise local das informações com baixa complexidade computacional, tornando-se uma técnica de extração de texturas de imagens robusta e exata (NANNI; LUMINI; BRAHNAM, 2010).

O LBP tem como metodologia atribuir um valor binário para cada pixel da imagem. Este valor é determinado pela comparação de uma matriz quadrada contendo os pixels vizinhos, onde cada vizinho é comparado com o valor central. Isto ocorre quando se percorre cada pixel de uma imagem de modo a fazer uma análise levando em consideração a diferença entre os níveis de cinza deste pixel com os seus pixels vizinhos e, com isto, obtém-se o código local daquele pixel. Assim, para uma imagem I , uma vizinhança é definida como um círculo em torno de cada pixel com um raio r e do número de pontos espaçados em ângulos P regulares em torno da circunferência. A central de valor de pixel é então utilizada como um limite para atribuir bits binários para os pixels na vizinhança, produzindo assim um número binário para cada pixel, conforme descrito na equação a seguir (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a):

$$LBP_{(P,R)} = \sum_{p=0}^P 2^p s(I(x_p, y_p) - (x_c, y_c)) \quad (13)$$

$$s(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v \geq 0 \\ 0, & \text{se } v < 0 \end{cases} \quad (14)$$

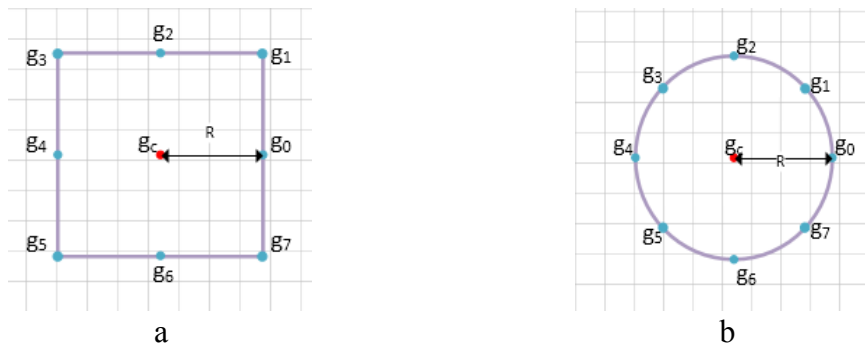
em que (x_c, y_c) , (x_p, y_p) são os pixels centrais e vizinhos, respectivamente. P é o número de vizinhos, R é o raio. Além disso, o tamanho da vizinhança analisada pode variar na quantidade de pontos comparados e no raio da vizinhança.

Se a coordenada do pixel central x_c, y_c é $(0, 0)$. Então, as coordenadas de x_p, y_p são dadas pela equação a seguir:

$$g_p = (x_p, y_p) = \left(R \cos\left(\frac{2\pi p}{P}\right), R \sin\left(\frac{2\pi p}{P}\right) \right) \quad (15)$$

A Figura 20 (a) mostra como o operador LBP é calculado para um pixel alinhado com o pixel central e, se caso ele não estiver alinhado, o LBP é calculado por meio de interpolação bilinear, conforme mostra a Figura 20(b) (TAKALA; AHONEN; PIETIKÄINEN, 2005).

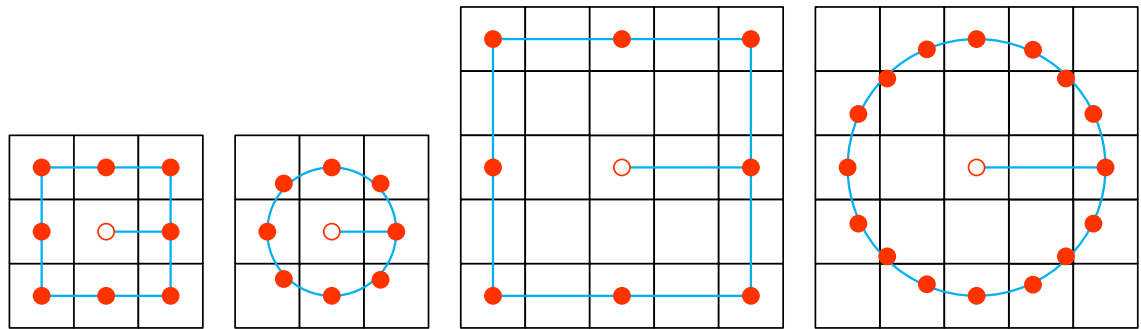
Figura 20: Obtenção de informações para vizinhança de 8 pixels



Fonte: Adaptado de Duarte et al. (2014).

Então, pode-se dizer que a vizinhança pode ser circular ou quadrada, de acordo com a Figura 21 e, conforme dito anteriormente, o valor dos pontos descentralizados é determinado pela interpolação bilinear dos pixels vizinhos.

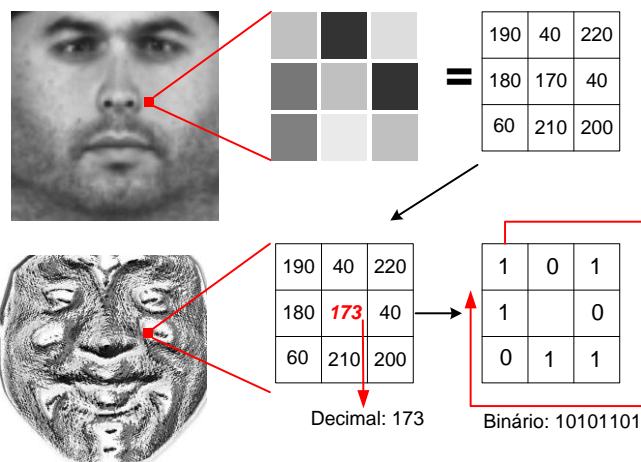
Figura 21: Vizinhança quadrada (8,1), circular (8,1), quadrada (8,2) e circular (16,2)



Fonte: Adaptado de Amaral (2011).

Assim, o método LBP obtém os valores para cada vizinho e os concatena de forma a converter para a base decimal o número binário gerado e substituir o valor central de v . A Figura 22 mostra como este processo foi realizado para as imagens deste trabalho com um exemplo de uma matriz 3×3 de pixels vizinhos.

Figura 22: Processo realizado pelo operador LBP



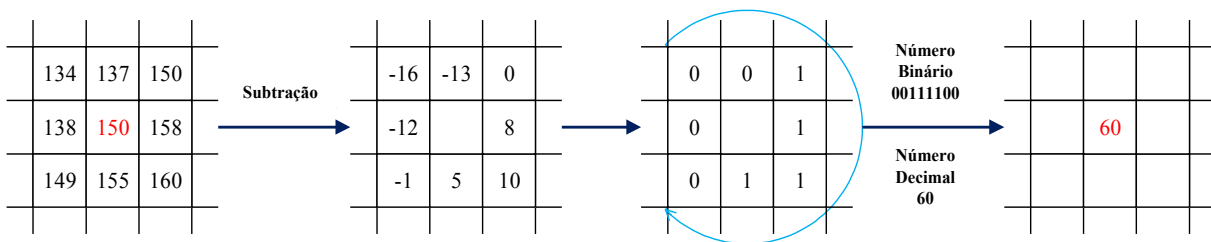
Fonte: Adaptado de Amaral(2011).

E, finalmente, o processo LBP realizará a extração das características em histograma de intensidade dos pixels pelos números binários, que serão os descritores de textura da imagem para cada região isolada, gerando assim vetores que serão concatenados em uma única matriz.

Este processo também pode ser processado, como mostrado na Figura 23, onde cada

pixel da imagem é subtraído pelos seus vizinhos. Posteriormente, as diferenças são convertidas em unidades binárias (0 ou 1 de acordo com os seus sinais) e, finalmente, as unidades binárias são dispostas no sentido horário resultando assim em um conjunto de unidades de binários como o LBP do pixel (HUANG; WANG; TAN, 2006).

Figura 23: Processo básico realizado pelo operador LBP



Fonte: Adaptado de Huang (2006).

Este processo possibilita a codificação das relações dos pixels com seus vizinhos e esta codificação é denominada de "recursos correlatos" (*correlative features*). Portanto, o LBP pode ser visto como uma espécie de características locais correlativas, onde as informações estruturais de superfície facial devem existir nas características correlativas de pontos sobre a superfície. Baseado nesta propriedade intrínseca do LBP, foi definido que o operador LBP possui potencial para codificar informações estruturais faciais em superfícies 3D (HUANG; WANG; TAN, 2006).

Após os LBPs terem sido aplicados com sucesso para o reconhecimento de face 2D (TIMO; ABDENOUR; MATTI, 2004), seu uso foi proposto para malhas faciais em 3D (HUANG; WANG; TAN, 2006), onde é explorada a representação do DM em 3D, interpolado numa grelha regular, de modo a codificar a forma local em torno de cada ponto, surgindo então o *3D Local Binary Pattern* (3DLBP). E, ainda, com base nos LBPs, é proposto o *Local Azimuthal Binary Patterns* (LABP), onde será utilizado o APDI ao invés do DM para calcular o Padrão Binário na vizinhança de cada ponto, em que a forma da malha é codificada por meio da direção das normais em cada ponto, permitindo que a informação mais sutil seja capturada sobre a estrutura da malha (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a). Exemplos das imagens 3DLBP e LABP são vistos nas Figuras 24(a) e 24(b), respectivamente.

Figura 24: a) 3DLBP e b) LABP para uma pessoa da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2 Local Phase Quantisers

O método *Local Phase Quantisers* (LPQs) baseia-se na extração das informações de fase local que contêm características direcionais importantes que descrevem as deformações faciais (desfoque, manchas, borrões, arestas, etc.). Esta propriedade origina-se do espectro de fase de Fourier (OJANSIVU; HEIKKILA, 2008).

Quando se faz um processamento de imagens digital, o modelo discreto para indefinição espacialmente invariante de uma imagem original $f(x)$ resulta numa imagem observada $g(x)$. Esta imagem $g(x)$ pode ser expressa pela convolução, dada pela equação (BANHAM; KATSAGGELOS, 1997):

$$g(x) = (f * h)(x) \quad (16)$$

em que $h(x)$ é a função de propagação do ponto de desfoque (PSF), $*$ denota convolução 2D e x é um vector de coordenadas $[x, y]^T$.

Transformando esta convolução no domínio de Fourier, tem-se:

$$G(u) = F(u) \cdot H(u) \quad (17)$$

em que $G(u)$, $F(u)$ e $H(u)$ são as transformadas de Fourier discreta (DFT) da imagem desfocada $g(x)$, a imagem original é $f(x)$, e a PSF $h(x)$, respectivamente, e u é um vector de

coordenadas $[u, v]^T$.

Com isto, é possível fazer a separação da magnitude e fase da equação anterior, em que se tem:

$$|G(u)| = |F(u)| \cdot |H(u)| \quad e \quad (18)$$

$$\angle G(u) = \angle F(u) + \angle H(u) \quad (19)$$

Quando o desfoque PSF $h(x)$ é centralmente simétrico, isto é $h(x)=h(-x)$, a transformada de Fourier sempre será de valor real e, conseqüentemente, a fase é apenas uma função de dois valores, dada por:

$$\angle H(u) = \begin{cases} 0 & \text{se } H(u) \geq 0 \\ \pi & \text{se } H(u) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

Isto significa que:

$$\angle G(u) = \angle F(u) \quad \text{para todo } H(u) \geq 0 \quad (21)$$

Com isto, pode-se dizer que as frequências da fase da imagem observada $\angle G(u)$, é invariante para o desfoque centralmente simétrico quando $H(u)$ for positivo e quando existir um caso ideal de movimento (fora de desfoque), a secção transversal de $h(x)$ é retangular, resultando em um espectro $H(u)$ de secção transversal, que é uma função *sinc* (seno cardinal) contendo valores negativos e valores positivos sempre antes do primeiro zero cruzar a frequência (comprimento desfoque)/(frequência de amostragem), sempre satisfazendo a equação (21) (BANHAM; KATSAGGELOS, 1997).

O desfoque de invariância não pode ser completamente alcançado por causa da finita das imagens observadas. Parte da informação é perdida na convolução da imagem ideal com o desfoque PSF, pois se estende para além das fronteiras da imagem observada. Quando o grau de nitidez é suficientemente grande em comparação com o tamanho da imagem, o efeito fronteira torna-se perceptível (BANHAM; KATSAGGELOS, 1997).

A Transformada de Fourier (STFT - *Short-Term Fourier Transform*) (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a) é calculada em quatro pares de frequência diferentes (23) para calcular oito dígitos binários para cada ponto de imagem, que são então utilizados para códigos computacionais usando a expressão de LBP ou, ainda, pode-se extrair a informação de fase

local usando o 2D DFT, de forma similar ao LBP. Para um ponto $f(x)$ com $M \times M$ pixels na vizinhança de N_x , STFT é definido como:

$$F(u, x) = \sum_{y \in N_x} f(x - y) e^{-j2\pi u^T y} = w_u^T f x \quad (22)$$

em que w_u^T é o vetor base da 2D DFT à frequência de u , e $f x$ é um outro vetor contendo todos M^2 das amostras de imagem de N_x .

Assim, pode ser implementado, com eficiência, a STFT a partir da equação acima usando as convoluções 2D de $f(x) * e^{-j2\pi u^T x}$ para todos os u . Então, quatro pares de coeficientes complexos das frequências são empregados, sendo:

$$u_1 = ([a, 0]^T, \quad u_2 = [0, a]^T, \quad u_3 = [a, a]^T \text{ e } u_4 = [a, -a]^T) \quad (23)$$

sendo a a frequência escalar abaixo da primeira passagem pelo zero em $H(u)$ (BANHAM; KATSAGGELOS, 1997) e estas permitem o cálculo de dois dígitos binários cada um, a fim de formar 8 dígitos binários para o ponto x da seguinte forma:

$$F_x^c = [F(u_1, x), F(u_2, x), F(u_3, x), F(u_4, x)], \quad e \quad (24)$$

$$F_x = [Re\{F_x^c\}, Im\{F_x^c\}]^T$$

em que $Re\{\cdot\}$ e $Im\{\cdot\}$ são as partes real e imaginária de um número complexo, respectivamente. O correspondente $8 \times M^2$ é a matriz de transformação:

$$W = [Re\{w_{u_1}, w_{u_2}, w_{u_3}, w_{u_4}\}, Im\{w_{u_1}, w_{u_2}, w_{u_3}, w_{u_4}\}]^T \quad (25)$$

então

$$F_x = W f_x \quad (26)$$

A Figura 25(a) mostra a imagem de entrada de pixels na vizinhança de N_x e a Figura 25b mostra por meio dos círculos brancos, os quatro pares de coeficientes complexos da frequência empregados.

Para se fazer uma análise estatística dos coeficientes, suponha-se que a função da imagem $f(x)$ seja um resultado do processo de Markov de primeira ordem, onde o coeficiente de correlação entre os valores dos pixels adjacentes é ρ e a variância de cada amostra é σ^2 . Desprezando as perdas de generalidade, pode-se supor que $\sigma^2 = 1$. Como resultado, a covariância entre as posições x_i e x_j será (OJANSIVU; HEIKKILA, 2008):

$$\sigma_{ij} = \rho^{\|x_i - x_j\|} \quad (27)$$

em que $\|\cdot\|$ denota o modelo de L_2 , e a matriz de covariância de todas as amostras de M em N_x , é definida por:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1M} \\ \sigma_{21} & 1 & \dots & \sigma_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{M1} & \sigma_{M2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Conseqüentemente, a matriz de covariância da transformada do vetor de coeficiente Fx é obtida por:

$$D = WCW^T \quad (29)$$

Os coeficientes são correlacionados (D não é uma matriz diagonal para $\rho > 0$).

Portanto, faz-se a quantização dos coeficientes, onde eles são descorrelacionados primeiramente, afim de se mostrar que a informação será preservada no máximo escalar de quantização quando as amostras a serem quantizadas são estatisticamente independentes. Levando em consideração o princípio de distribuição de Gauss, tem-se:

$$G_x = V^T F_x \quad (30)$$

sendo V uma matriz ortogonal derivada da decomposição do valor singular da matriz D tal que:

$$D = U\Sigma V^T \quad (31)$$

em que V pode ser resolvido com um valor fixo de ρ e em seguida G_x pode ser calculado para todas as posições da imagem, ou seja, $x \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ e os vetores resultantes são quantificados utilizando um quantizador escalar relativamente simples, como segue:

$$q_j = \begin{cases} 1, & \text{se } g_j \geq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (32)$$

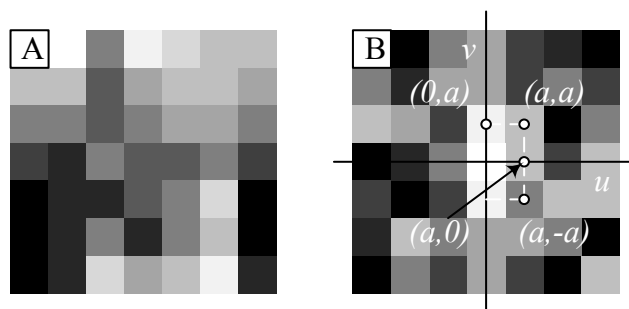
sendo g_j o componente j -ésimo de G_x . Usando código binário, os coeficientes quantizados são representados como valores inteiros entre 0-255, tal que:

$$b = \sum_{j=1}^8 q_j 2^{j-1} \quad (33)$$

Por fim, é gerado um histograma destes valores inteiros de todas as posições da imagem e utilizado na classificação como um vetor de característica de dimensão de 256. Os valores de b são invariantes para o desfoque centralmente simétrico fornecido por N_x , pois são infinitamente grandes e o espectro de frequência do desfoque PSF é positivo na amostragem de u_1-u_4 . Na prática, os pixels vizinhos estão altamente correlacionados em imagens reais, o que levará a dependência dos coeficientes de Fourier que são quantificados nos LPQ (OJANSIVU; HEIKKILA, 2008).

Resumidamente, para se compreender estes métodos deve se considerar algumas propriedades da Transformada de Fourier, em que F_x contém toda a informação presente em N_x . Então, é feito a extração de F_x um código que seja compacto e ao mesmo tempo capture o máximo da informação da textura em N_x . Ainda deve-se notar que a informação contida em F_x se concentra nas frequências mais baixas e que o valor da Transformada de Fourier na origem corresponde ao brilho médio da vizinhança, sendo que, para efeitos de textura, é irrelevante. Deste modo, os quatro pares de coeficientes complexos das frequências indicados na Figura 25b e suas simétricas são os 8 componentes de F_x em que se concentra a maior parte da informação da textura na vizinhança (MUSCI et al. 2011).

Figura 25: a) Imagem de entrada de pixels vizinhos N_x e b) módulo da transformada de Fourier $|F_w(u)|$ da imagem de entrada



Fonte: Adaptada de Musci et al. (2011).

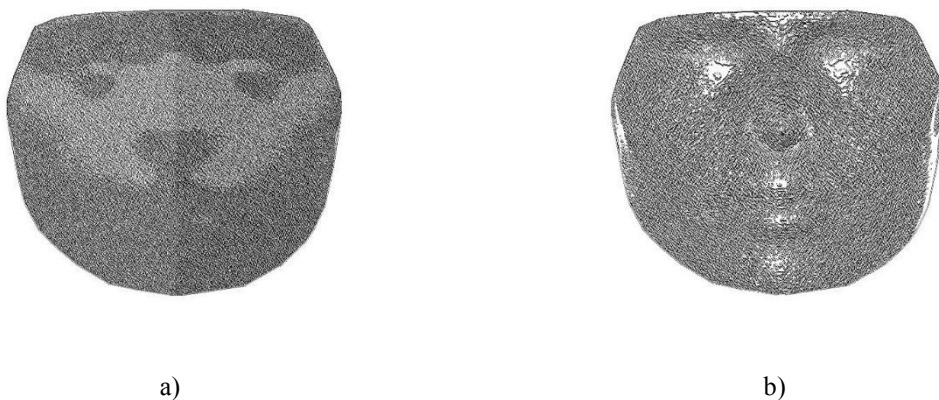
Os 8 bits obtidos são o código que representa a textura na vizinhança e ainda é possível efetuar uma redução dos 8 valores complexos para 4 sem perda de informação, pois a Transformada de Fourier em posições simétricas são conjugadas (informações redundantes). Por isso somente são aplicados os 4 pares de coeficientes complexos das frequências. Caso necessite compactar ainda mais esses 4 números complexos, é possível fazer-se uma redução,

porém com pequenas perdas de informação (MUSCI et al. 2011).

A decorrelação é um método simples aplicado aos coeficientes de Fourier antes da quantização para se maximizar a informação preservada no código da textura. É possível ainda descrever a textura em múltiplas escalas. Para isto, basta calcular a imagem LPQ para diferentes valores de M (MUSCI et al. 2011).

O método dos LPQs foi aplicado para o DM e a APDI, originando assim dois novos descritores: *Local Depth Phase Quantisers* (LDPQ) e *Local Azimuthal Phase Patterns* (LAPQ). Exemplos são mostrados nas Figuras 26a e 26b, respectivamente (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a).

Figura 26: a) LDPQ e b) LAPQ para uma pessoa da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.3 Gabor Binary Patterns (GBP)

Denis Gabor (1946) propôs a transformada de Gabor e, com o passar dos anos e estudos desta técnica, os Filtros de Gabor vêm sendo amplamente utilizados para a captura de informações estruturais de imagens e utilizados em reconhecimento de expressão facial 2D (MPIPERIS; MALASSIOTIS; STRINTZIS, 2009; SOYEL; DEMIREL, 2007), bem como à análise 3D (SAVRAN; SAKUR; BILGE, 2012). Com este método é possível melhorar as características faciais para posteriormente se fazer a extração do histograma do GBP,

melhorando a robustez dos LBP quando houver mudanças de iluminação (ZHANG et al. 2006; ZHANG et al. 2007).

Como proposto por Sandbach, Zafeiriou e Pantic, (2012a), os Filtros de Gabor podem ser usados em quatro escalas e orientações (0° , 45° , 90° e 135°). Assim, originaram-se um total de 16 filtros. Cada um dos descritores é composto por um componente de magnitude e um componente de fase. A transformada de Gabor bidimensional é uma função gaussiana bi-dimensional modulada com uma senoide orientada contendo uma determinada frequência W e orientação θ . A forma bi-dimensional no domínio do espaço e da frequência pode ser expressa pelas seguintes equações, respectivamente:

$$g(x, y) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) + 2\pi j W x \right] \quad (34)$$

$$G(u, v) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(u - W)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2} \right] \right\} \quad (35)$$

Ainda, a transformada de Gabor pode ser adaptada como o famoso método de *wavelet*. Portanto, estas equações são chamadas de *wavelet mãe*, assim pode-se obter vários filtros pela dilatação e rotação por meio da seguinte função (MANJUNATH; MA, 1996):

$$g_{v,\theta}(x, y) = a^{-v} g(x', y') \quad (36)$$

em que $a > 1$ e v, θ são a escala e a orientação do filtro, respectivamente com $v = 0, 1, \dots, v-1$ e $\theta = 0, 1, \dots, \theta-1$. E, ainda, pode-se definir $x' = a^{-v}(x \cos \theta + y \sin \theta)$ e $y' = a^{-v}(-x \sin \theta + y \cos \theta)$.

Pode-se afirmar que a função de transferência dos filtros utilizados consiste de um filtro radial de Gabor multiplicado pelo componente angular de Gauss, como segue (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a):

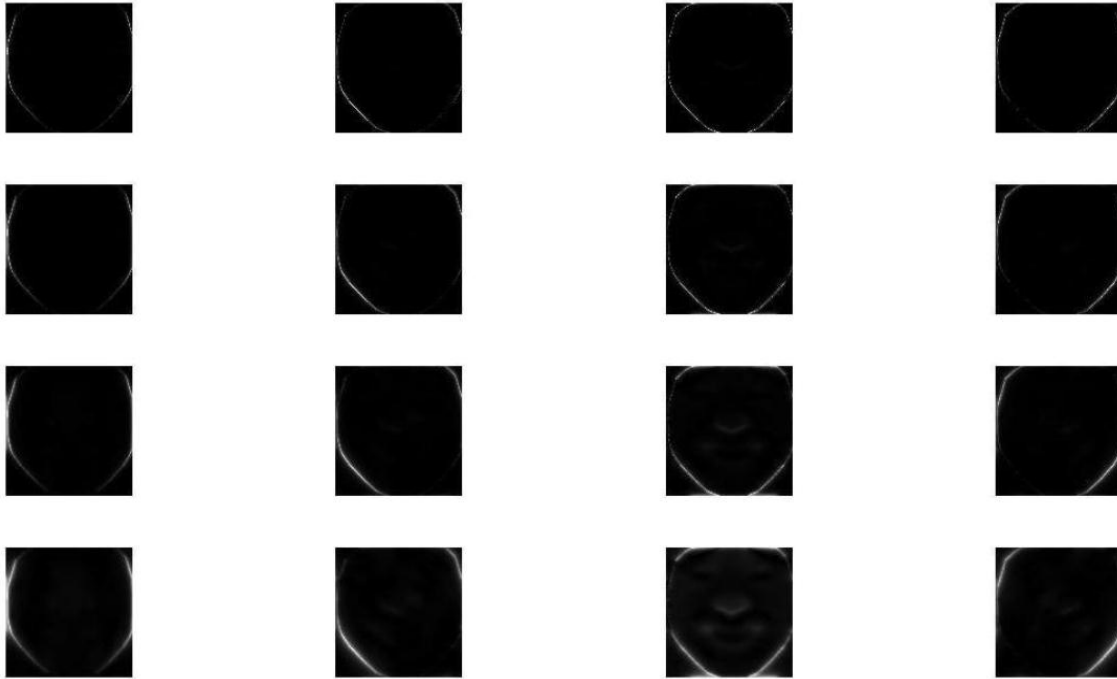
$$G(u)_{v,\theta} = \exp \left(\frac{-(\log(v|u|))^2}{2(\log \sigma)^2} \right) \exp \left(\frac{-(\angle u - \theta)^2}{2\sigma_\theta} \right) \quad (37)$$

em que σ e σ_θ define a disseminação do filtro nas direções radial e angular, respectivamente.

As Figuras 27 e 28 mostram a magnitude e os componentes de fase do exemplo de imagens obtidas usando filtros Gabor de quatro escalas diferentes (variando em colunas) e

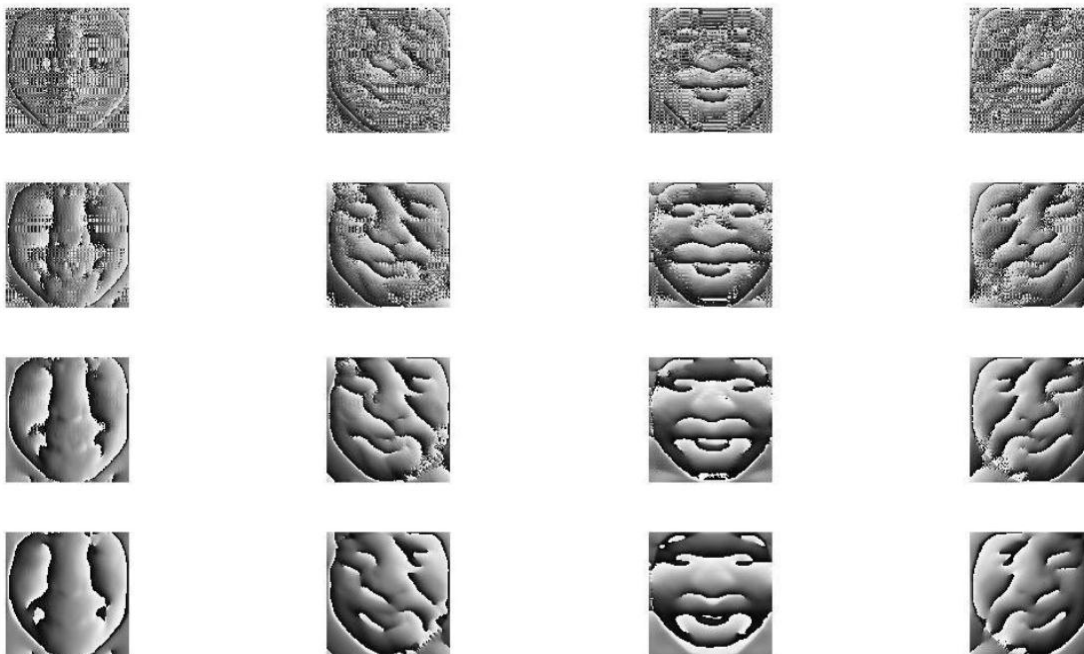
quatro orientações diferentes (variando em linhas) aplicada a um DM.

Figura 27: Imagens de magnitude dos coeficientes de Gabor de um DM obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

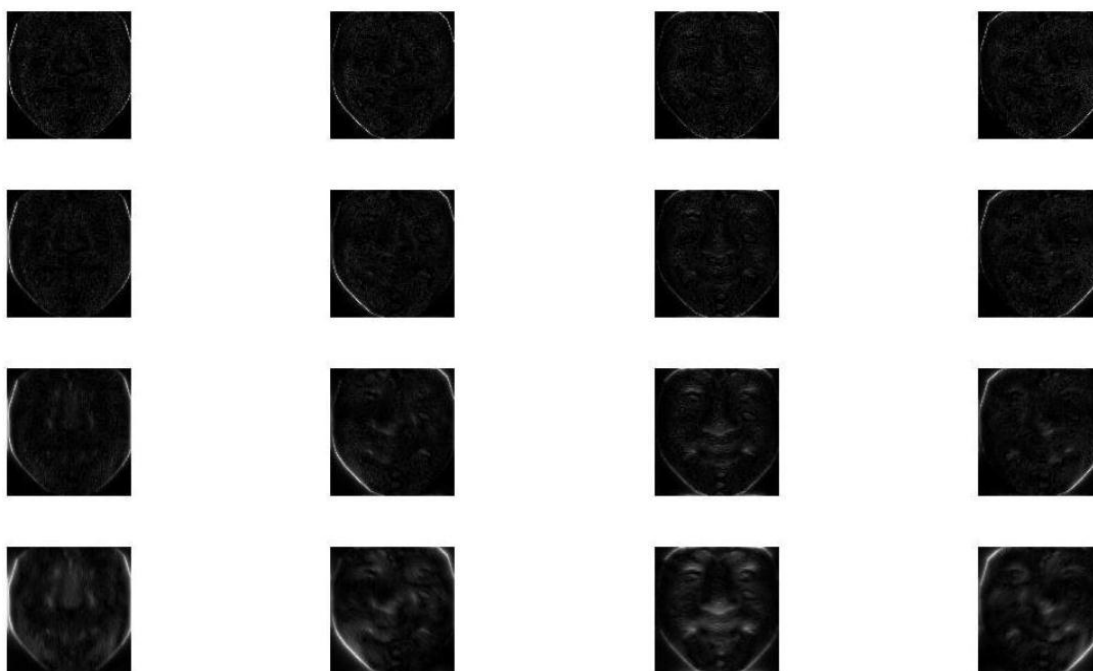
Figura 28: Imagens de fase dos coeficientes de Gabor de um DM obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

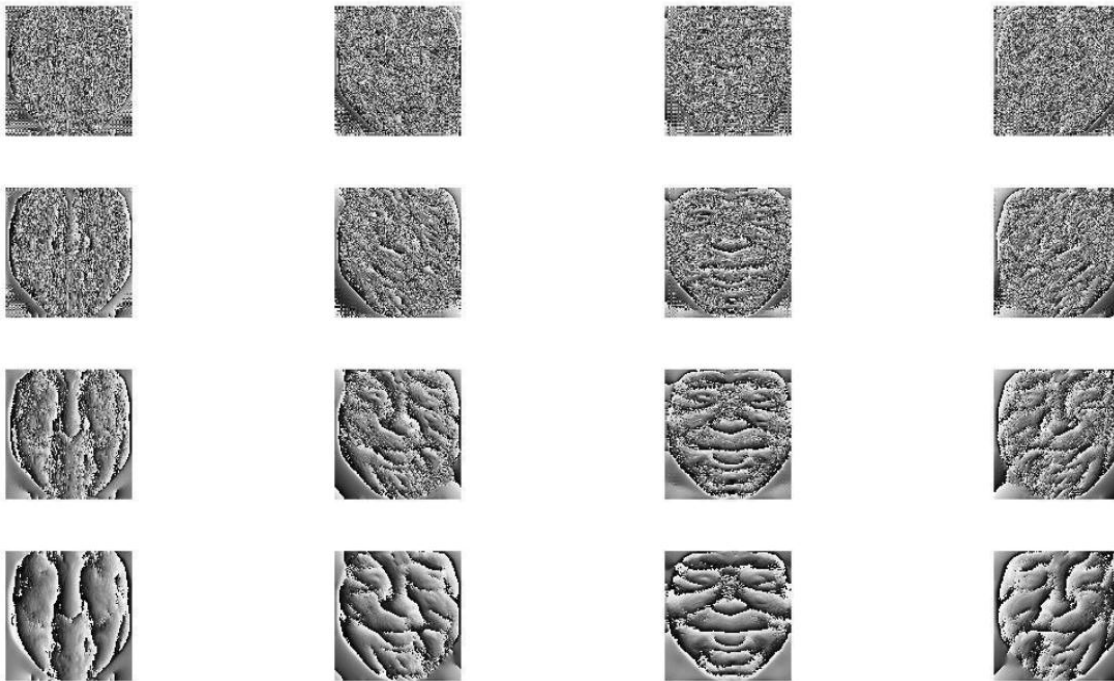
As imagens obtidas com um APDI estão representadas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29: Imagens de magnitude dos coeficientes de Gabor de uma APDI obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

Figura 30: Imagens de fase dos coeficientes de Gabor de uma APDI obtidos utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

Então, dando origem aos recursos, os Padrões Binários são computados para a magnitude e para os componentes de fase das imagens filtradas. As mesmas são obtidas quando calculado utilizando o DM, originando *Local Depth Gabor Binary Patterns* (LDGBP). Este novo descritor é obtido por meio da multiplicação da equação (37) pela transformada de Fourier para imagens do DM e APDI em quatro escalas diferentes e quatro orientações e, em seguida, faz-se a transformada inversa para encontrar o coeficiente resultante Gabor descrito pela equação a seguir:

$$g(x, y) = F^{-1}(GF(I)) \quad (38)$$

em que I é a imagem, F é a transformada de Fourier em 2D e G é o filtro radial de Gabor multiplicado pelo componente angular de Gauss.

A magnitude e a fase desse descritor em seguida são tidas como novas imagens $g_M(x, y) = |g(x, y)|$ e $\angle g(x, y)$. O algoritmo do Padrão Binário é, então, aplicado a cada uma das imagens resultantes, de modo a codificar a informação estrutural e também codificar a informação de fase em cada imagem, usando uma variante do método LBP por causa da

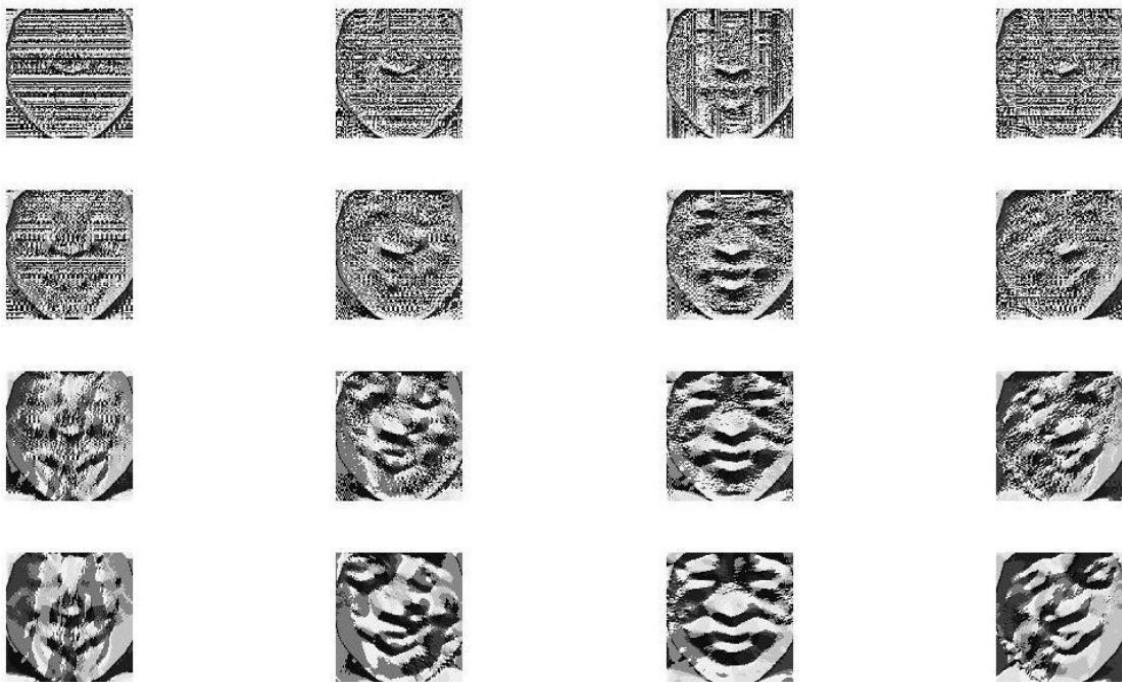
natureza circular de fase. Neste caso, a diferença é feita entre a fase no ponto central e nos dois pontos vizinhos e esta diferença é comparada a um valor limiar γ , de forma a atribuir um valor zero ou um para cada ponto vizinho. Para este caso, o valor limite foi definido como sendo $\frac{\pi}{4}$. Portanto, o operador LDGBP aplicado à fase das características de profundidade Gabor é calculada como (SANDBACH; ZAFEIRIOU; PANTIC 2012a):

$$LDGBP(xc, yc) = \sum_{P=0}^{P-1} 2^P s(\Psi - |gp(xc, yc) - gp(xp, yp)|) \quad (39)$$

em que $gp(xc, yc)$ é a imagem da fase no ponto central e $gp(xp, yp)$ é a imagem de fase no ponto de P -ésimo na vizinhança do ponto P , sendo P o número de pontos na vizinhança.

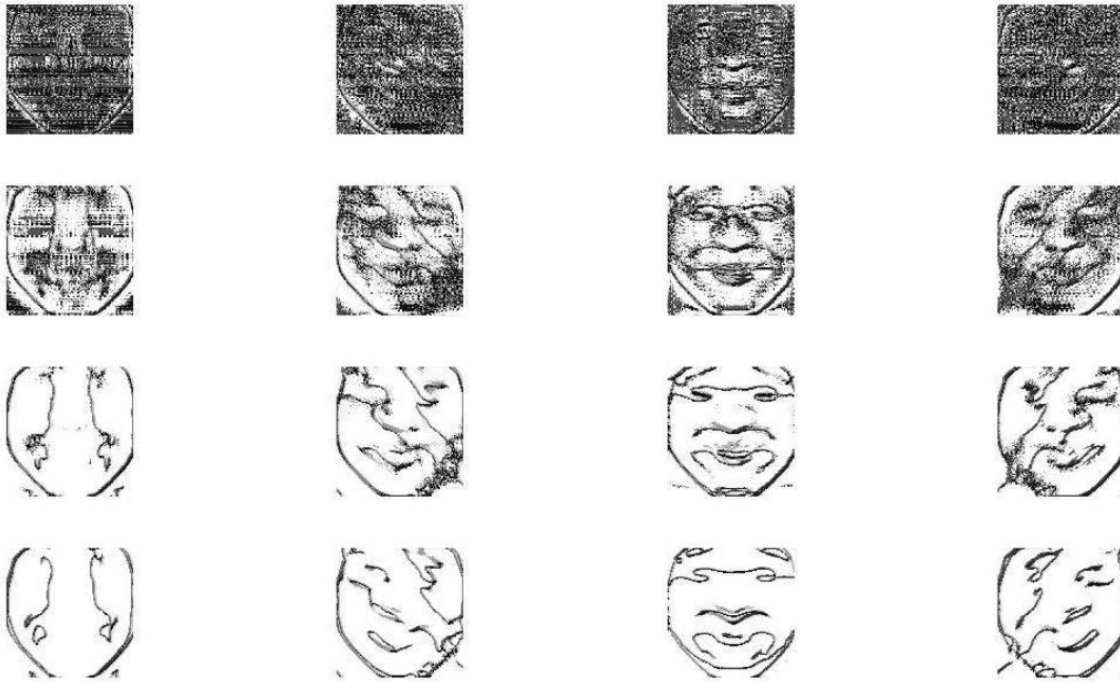
As Figuras 31 e 32 mostram exemplos de imagens do descritor LDGBP obtidos a partir das imagens de magnitude e das imagens de fase usando as diferentes escalas e orientações.

Figura 31: LDGBPs obtidos a partir das imagens de magnitude utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (variando em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

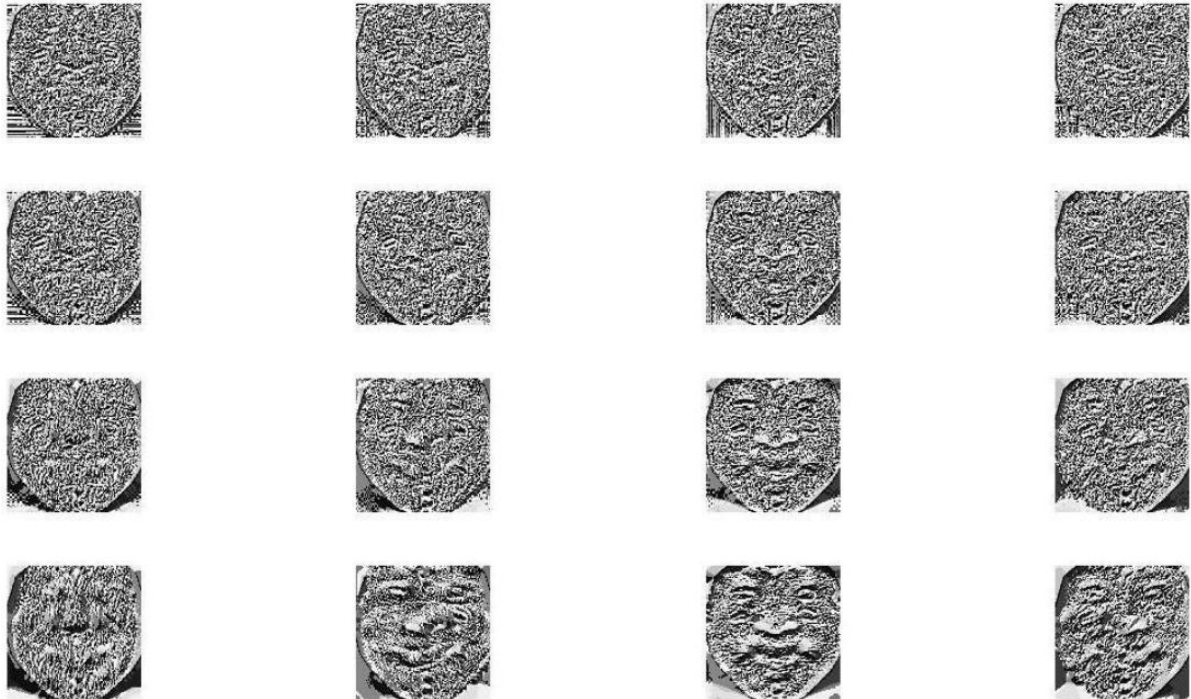
Figura 32: LDGBPs obtidos a partir das imagens de fase, usando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

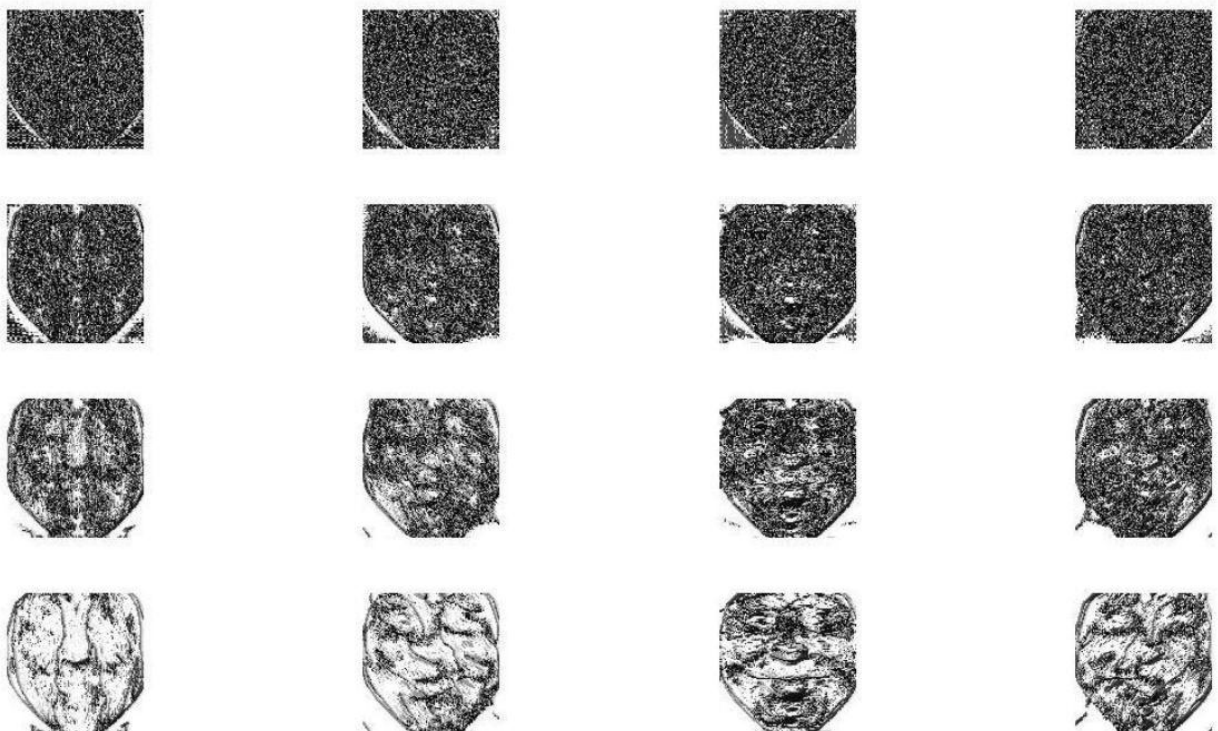
Este método aplicado ao APDI gera o novo descritor chamado *Local Azimuthal Gabor Binary Patterns* (LAGBP) e é formado de forma semelhante, mas aplicado à fase das características Gabor da imagem APDI. As Figuras 33 e 34 mostram exemplos de imagens do descritor LAGBP obtidos a partir das imagens de magnitude e das imagens de fase usando as diferentes escalas e orientações.

Figura 33: LAGBPs obtidos a partir das imagens de magnitude utilizando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

Figura 34: LAGBPs obtidos a partir das imagens de fase, usando diferentes escalas (variando em colunas) e orientações (em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

5.3.4 Monogenic Binary Patterns (MBP)

O *Monogenic Binary Patterns* (MBP) é um dos métodos de extração de características mais recentemente desenvolvidos. Este método baseia-se na análise do sinal monogênico e no histograma de MBP (HMBP), que é composto de duas partes, sendo a codificação da magnitude monogênica por meio do sinal uniforme de LBP e a codificação da orientação monogênica como códigos dos quadrantes de bits. Além disso, possui a vantagem de ser robusto ao sofrer variações na imagem, tais como, iluminação, pose, expressão e oclusão. O método MBP baseia-se na teoria da análise do sinal monogênico, que é a generalização bidimensional do sinal analítico baseado na transformada de Riesz. Com isto, ao fazer-se a junção de um sinal 2D com a transformada Riesz, resultará em um excelente sinal analítico 2D que é denominado então como sinal monogênico (FELSBERG; SOMMER, 2001).

O método MBP possui outra grande vantagem em relação ao método de Gabor, descrito anteriormente, que é a sua menor complexidade, reduzindo assim o tempo de execução e o armazenamento das informações, pois a análise do sinal monogênico precisa de menos circunvoluções e gera vetores de características mais compactos com um desempenho melhor ou comparável. Este fato se dá porque a análise do sinal monogênico é em si uma representação compacta de recursos com pouca perda de informação (YANG; ZHANG; ZHANG, 2010).

Em uma imagem 2D, o sinal monogênico permite uma análise em termos de magnitude, fase e orientação, originando assim uma representação 2D da informação estrutural dos dados, não requerendo a aplicação de filtros em múltiplas orientações. Esta análise é possível pois sinal monogênico é uma generalização bidimensional do sinal analítico unidimensional, por meio da qual a multirresolução da magnitude, fase e orientação de um sinal 2D pode ser estimada. Portanto, não é mais necessário aplicar filtros em várias orientações, como com filtros de Gabor. Assim, o método MBP se torna mais econômico do que o método de Gabor nos custos computacionais e no espaço de armazenamento (YANG; ZHANG; ZHANG, 2010). No entanto, múltiplas escalas ainda são úteis para capturar diferentes níveis de estrutura na imagem (ALEX et al. 2002).

Para a representação monogênica é feita a análise do sinal monogênico para magnitude, fase e orientação dos componentes das imagens filtradas por meio da transformada de Riesz. Na prática, os três componentes do sinal monogênico, a magnitude m_M , fase m_P e

orientação m_O , podem ser calculados por meio da utilização de dois filtros monogênicos ortogonais com funções de transferência $H_1(u) = \frac{ju_1}{|u|}$ e $H_2(u) = \frac{ju_2}{|u|}$ e filtros Gabor radiais com diferentes escalas (YANG; ZHANG; ZHANG 2010):

$$m_M(x, y) = \sqrt{g'(x, y)^2 + h'_1(x, y)^2 + h'_2(x, y)^2} \quad (40)$$

$$m_P(x, y) = \arctan\left(\frac{h'_2(x, y)^2}{h'_1(x, y)^2}\right) \quad (41)$$

$$m_O(x, y) = \arctan\left(\frac{g'(x, y)}{\sqrt{h'_1^2 + h'_2^2}}\right) \quad (42)$$

em que:

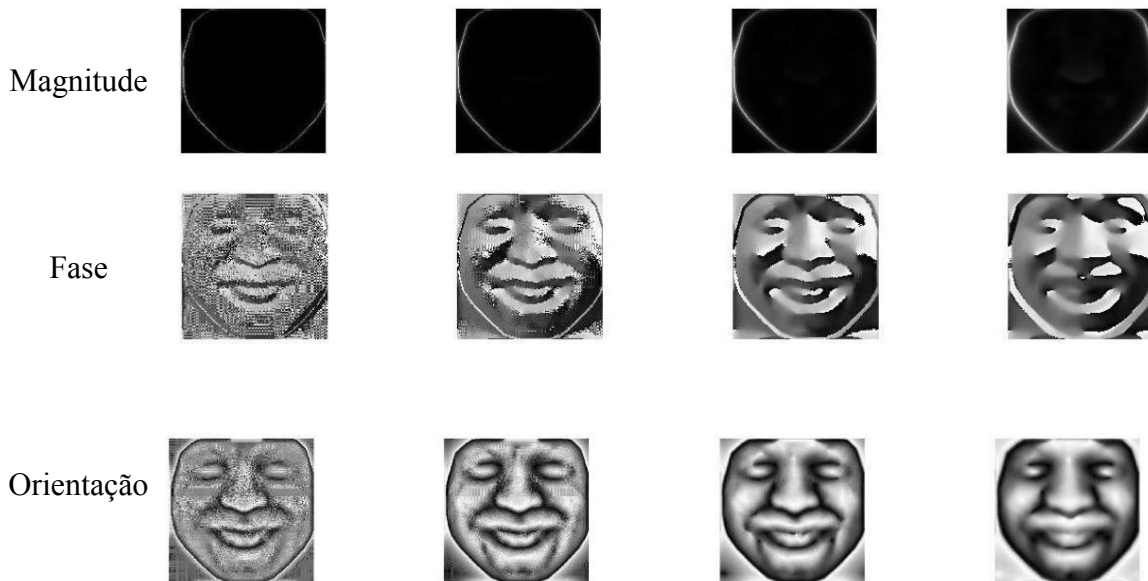
$$\begin{cases} h = I * F^{-1}(G(\omega)) \\ h_d = F^{-1}\left(\left(\sqrt{-1} \cdot \omega_d / \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}\right) H\right), d \in \{x, y\} \end{cases} \quad (43)$$

sendo “*” o operador de convolução, $h'_i = F^{-1}(H_i G' F(I))$, I é a imagem, F é a transformada de Fourier 2D, e $G'(u)_v = \frac{\exp(-\log(v|u|))^2}{2(\log\sigma^2)}$ é a função de transferência do componente radial dos filtros de Gabor descrito na seção anterior, $g' = F^{-1}(G' F(I))$ e ω_x e ω_y são as frequências horizontais e verticais respectivamente (YANG; ZHANG; ZHANG, 2010).

As Figuras 35 e 36 mostram a representação monogênica de uma imagem facial obtida a partir do DM e APDI utilizando diferentes escalas, sendo possível observar que as estruturas locais faciais são bem capturadas em seus componentes monogênicos.

Nestas representações monogênicas de imagens faciais, a magnitude m_M é uma medida da estrutura de energia local, podendo-se então usar o operador LBP convencional (OJALA; PIETIKAINEN; HARWOOD, 1996) para codificar a variação de energia local. Inicialmente o operador LBP foi usado para codificar um espaço de 3×3 em um código binário de 8-bits. Posteriormente, foi proposto que o operador LBP (OJALA; PIETIKAINEN; MAENPAA, 2002) contenha no máximo duas transições de bit sendo zero ou um para uma cadeia binária circular.

Figura 35: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens monogênicas obtidas a partir de um DM, utilizando diferentes escalas (variando em linhas)



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

Figura 36: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens monogênicas obtidas a partir de um APDI utilizando diferentes escalas (variando em linhas)



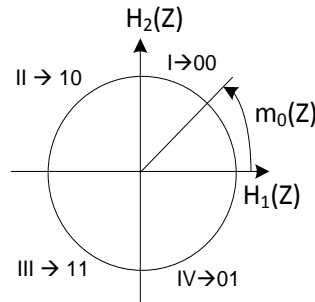
Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

O componente monogênico de fase m_P também pode ser representado de forma monogênica para as imagens faciais de acordo com o sinal monogênico de fase dado pela equação (41) desenvolvida anteriormente. Por fim, tem-se o componente monogênico de

orientação m_O que indica a direção dominante de variação da imagem local.

A Figura 37 mostra como é feita a codificação da informação para o componente monogênico de orientação por meio dos quadrantes.

Figura 37: Codificação do quadrante do componente monogênico de orientação



Fonte: Adaptado de Yang; Zhang; Zhang, (2010).

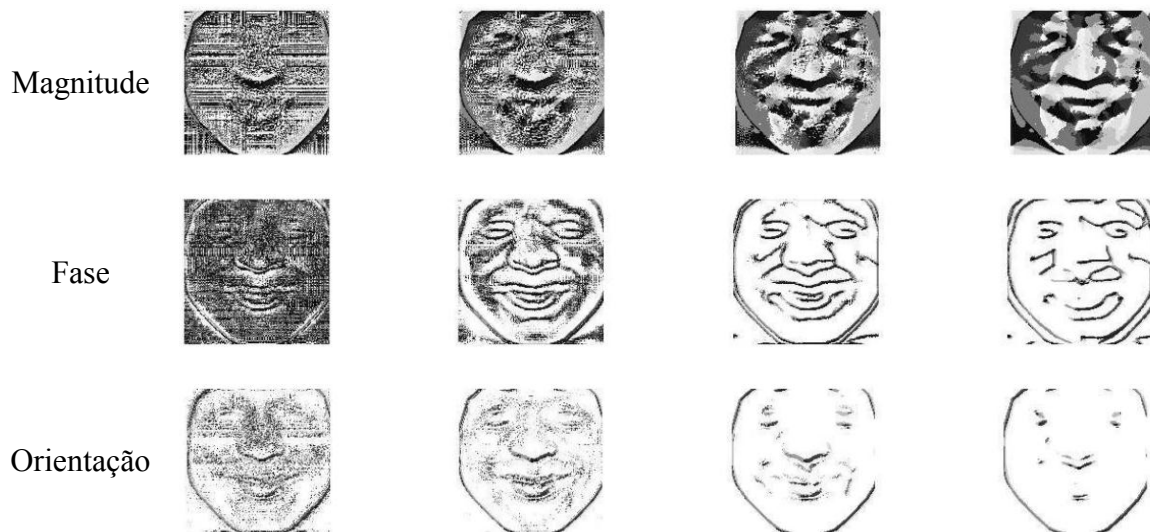
Um pixel (Z) no mapa de orientação em cada escala é codificado em dois bits, sendo $B_{\theta}^x(Z)$ e $B_{\theta}^y(Z)$, obtidos através da seguinte equação (YANG et al. 2010):

$$B_{\theta}^d(Z) = \begin{cases} 0 & \text{se } h_d(Z) > 0 \\ 1 & \text{se } h_d(Z) \leq 0 \end{cases}, d \in \{x, y\} \quad (44)$$

em que h_x e h_y são as transformadas de Riesz horizontal e vertical, respectivamente, referidos na equação (43).

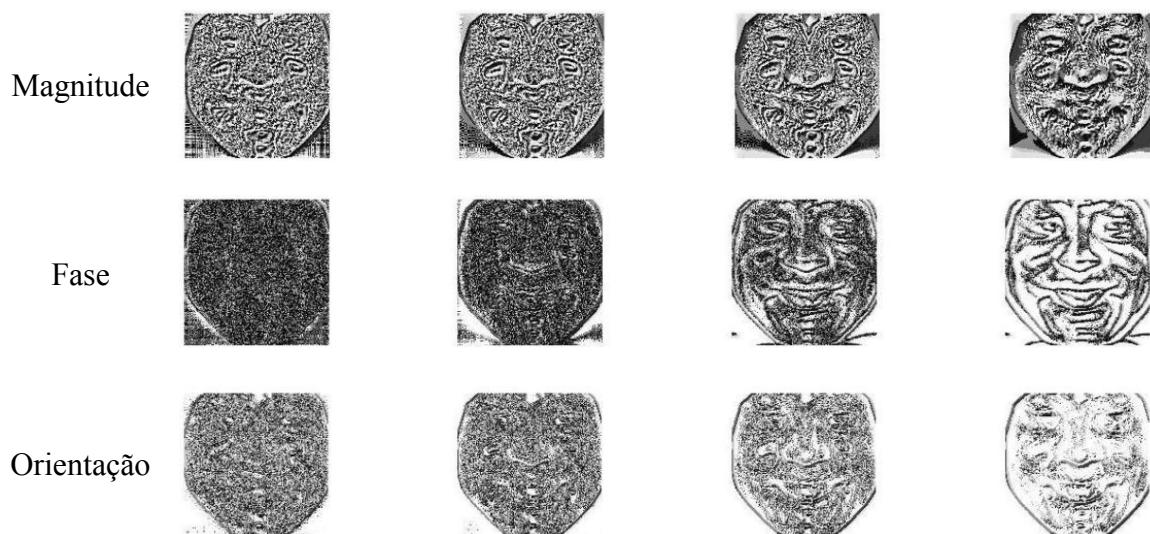
Assim, dando origem a novos recursos, os Padrões Binários são computados para os componentes de magnitude, fase e orientação das imagens filtradas (como nos GBP). As mesmas são obtidas quando calculadas utilizando o DM, originando *Local Depth Monogenic Binary Patterns* (LDMBP) e *Local Azimuthal Monogenic Binary Patterns* (LAMBP), quando aplicado aos APDI. A aplicação de Padrões Binários origina as imagens das Figuras 38 e 39.

Figura 38: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens LDMBP obtido usando as imagens da Figura 35



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

Figura 39: Componentes de Magnitude, Fase e Orientação de imagens LMBP obtido usando as imagens da Figura 36



Fonte: Adaptado de Raposo (2013).

5.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo foi apresentada a importância do estudo de reconhecimento de identidade facial e suas aplicações práticas. Posteriormente, foram abordadas as técnicas de representações da geometria facial existentes na bibliografia e utilizadas neste trabalho. Diversos exemplos de imagens obtidas por meio de implementação computacional foram apresentados, tornando, assim, mais claro toda a teoria, também apresentada, das características de Padrões Binários aplicadas ao *Local Binary Patterns*, *Local Phase Quantisers*, *Gabor Binary Patterns* e *Monogenic Binary Patterns*.

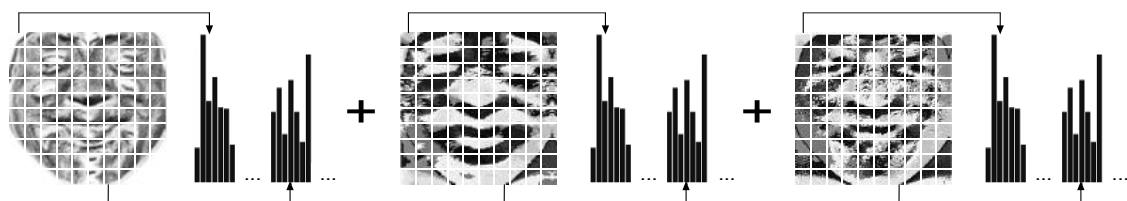
6 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se uma exposição da metodologia proposta para Reconhecimento de Identidade. Primeiramente será explicado como foi feita a manipulação das imagens e, posteriormente, como foram utilizados os conceitos baseados nos SIA, em especial o ASN, para se realizar o Reconhecimento de Identidade.

6.1 MANIPULAÇÃO DAS IMAGENS

Como em Sandbach, Zafeiriou e Pantic, (2012a), as 8 propostas de Padrão Binário são computadas para cada imagem. Os vetores característicos são criados para cada um dos descritores por meio da utilização de histogramas. Primeiramente, o plano x-y da malha é dividido em blocos quadrados de tamanho igual 10x10, onde, para cada um deles, é formado um histograma a partir dos números binários calculados. Estes histogramas são então concatenados em uma grade de vetor. Cinquenta caixas foram usadas para produzir os descritores. No caso de LDGBPs, LAGBPs, LDMBPs e LAMBPs, várias imagens serão usadas, considerando vários componentes (magnitude, fase e orientação), bem como diversas escalas e orientações, gerando um histograma separado. Assim, os vetores obtidos para todas as imagens são concatenados, originando vetores característicos de até 192.000 variáveis, formando descritores de recurso mais concatenação de histograma. Este processo pode ser visto na Figura 40 e a Figura 41 mostra as imagens geradas via histograma.

Figura 40: Construção do vetor característico pela concatenação de histogramas de cada bloco na imagem, e em seguida, a concatenação de modelos de histogramas de imagem



Fonte: Adaptado de Sandbach, Zafeiriou e Pantic (2012a).

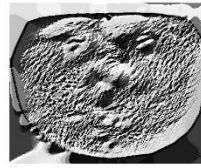
Figura 41: a-LDGBPm, b- LDGBPp, c- LAGBPm, d- LAGBPp, e- LDMBPm, f- LDMBPp, g- LDMBPo, h- LAMBPm,i- LAMBPp, j- LAMBPo para uma pessoa da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012).



a)



b)



c)



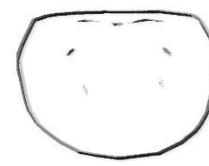
d)



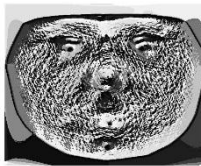
e)



f)



g)



h)



i)



j)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por meio das Figura 42, 43 e 44 será possível um melhor entendimento de todo o processo de manipulação das imagens.

Figura 42: Espelho do diretório do Banco de Dados 4D (4D FACIAL DATABASE, 2012)

Nome	Tipo
F_00	Pasta de arquivos
F_01	Pasta de arquivos
F_02	Pasta de arquivos
F_03	Pasta de arquivos
F_04	Pasta de arquivos
F_05	Pasta de arquivos
F_06	Pasta de arquivos
F_07	Pasta de arquivos
F_08	Pasta de arquivos
F_09	Pasta de arquivos
F_10	Pasta de arquivos
F_11	Pasta de arquivos
F_12	Pasta de arquivos
M_00	Pasta de arquivos
M_01	Pasta de arquivos
M_02	Pasta de arquivos
M_03	Pasta de arquivos
M_04	Pasta de arquivos
M_05	Pasta de arquivos
M_06	Pasta de arquivos
M_07	Pasta de arquivos
M_08	Pasta de arquivos
M_09	Pasta de arquivos
M_10	Pasta de arquivos
⋮	⋮
RF_00	Pasta de arquivos
RM_00	Pasta de arquivos
RM_01	Pasta de arquivos
RM_02	Pasta de arquivos
RM_03	Pasta de arquivos
RM_04	Pasta de arquivos
RM_05	Pasta de arquivos

Fonte: 4D Facial Database, (2012).
























Primeiramente, na Figura 42, tem-se o banco de imagens 4D (4D FACIAL DATABASE, 2012), composto por 65 pessoas, sendo 13 mulheres e 52 homens. Na Figura 43 é possível visualizar as 8 pastas com as expressões, Angry (Raiva), Contempt (Desprezo), Disgust (Nojo), Fear (Medo), Happy (Felicidade), Phrase (Frase), Sad (Tristesa) e Surprise (Surpresa).

Figura 43: Oito expressões do banco de dado 4D (4D FACIAL DATABASE, 2012)

Nome	Tipo
Angry	Pasta de arquivos
Contempt	Pasta de arquivos
Disgust	Pasta de arquivos
Fear	Pasta de arquivos
Happy	Pasta de arquivos
Phrase	Pasta de arquivos
Sad	Pasta de arquivos
Surprise	Pasta de arquivos

Fonte: 4D Facial Database, (2012).

Figura 44: Arquivos para cada uma das expressões (4D FACIAL DATABASE, 2012)

Nome	Tipo	Tamanho
 000	Arquivo JPG	762 KB
 000	Arquivo WRL	7.517 KB
 000	Documento XML	1 KB
 000i	Arquivo TXT	275 KB
 000p	Arquivo TXT	1 KB
 000s	Arquivo JPG	194 KB
 000s	Arquivo WRL	8.033 KB
 001	Arquivo JPG	762 KB
 001	Arquivo WRL	7.342 KB
 001	Documento XML	1 KB
 001i	Arquivo TXT	274 KB
 001p	Arquivo TXT	1 KB
 001s	Arquivo JPG	193 KB
 001s	Arquivo WRL	8.033 KB
⋮	⋮	⋮
 049	Arquivo JPG	763 KB
 049	Arquivo WRL	7.530 KB
 049	Documento XML	1 KB
 049i	Arquivo TXT	274 KB
 049p	Arquivo TXT	1 KB
 049s	Arquivo JPG	193 KB
 049s	Arquivo WRL	8.034 KB
 cartMovie	Arquivo AVI	9.769 KB
 cylMovie	Arquivo AVI	2.827 KB

Fonte: 4D Facial Database, (2012).

Por fim, tomando-se a Figura 44, é possível ver os arquivos existentes para cada uma das expressões, onde se tem 100 imagens (Arquivo JPG), sendo 50 imagens iguais a Figura 6, demonstrada no Capítulo 4 (000 até 049) e 50 imagens iguais a Figura 8 à direita, mostradas no Capítulo 4 (000s até 049s). Além disso, tem-se um arquivo de WRL, o qual se trata de um arquivo da imagem em VRML (como demonstrado no Capítulo 4), um documento XML e dois arquivos TXT, que carregam as informações em formato de TXT das imagens. Para as imagens com final “s”, também foi aplicado o SIA e os resultados serão mostrados no Capítulo 7.

Assim, foi desenvolvido um novo banco de imagens com as imagens a partir dos descritores. Este novo banco de imagens, contém imagens a partir dos 10 descritores, sendo DM, APDI, 3DLBP, LABP, LDPQ, LAPQ, LDGBP, LAGBP, LDMBP e LMBP, para as 8

expressões de cada uma das 65 pessoas. Foi aplicado o SIA para cada um dos 10 descritores e os resultados serão mostrados no Capítulo 7.

O sistema de Reconhecimento de Identidade apresentado nesta seção é baseado nos SIAs, em especial o ASN, que foi apresentado no Capítulo 3. Assim, o Reconhecimento de Identidade será composto por duas fases, sendo o sensoriamento e o monitoramento das imagens. Na fase de sensoriamento realiza-se um censo das imagens (dados), criando um conjunto de detectores, para identificação das anomalias no processo de monitoramento. Por fim, na fase de monitoramento os dados são analisados em tempo real, sendo comparados com o conjunto de detectores criados na fase de sensoriamento, visando apresentar um diagnóstico através da discriminação próprio/não-próprio.

A seguir apresentam-se as fases de sensoriamento e monitoramento dos dados do sistema de Reconhecimento de Identidade proposto neste trabalho.

6.1.1 Cálculo da taxa de afinidade

O conceito de casamento e afinidade apresentado em (BRADLEY; TYRRELL, 2002) é o conceito utilizado neste trabalho. Assim, utilizar-se-á a definição apresentada na equação (5) para se fazer o cálculo da taxa de afinidade.

Para realizar o cálculo da taxa de afinidade para este sistema de reconhecimento de identidade, foi considerado a quantidade total de imagens analisadas ($A_t=520$) e a quantidade de imagens utilizadas para gerar os detectores ($A_n=416$), (próprios). Assim:

$$TAf = \left(\frac{416}{520}\right) * 100 = 80\% \quad (45)$$

Com isto, tem-se que o valor da taxa de afinidade, é de 80%, ou seja, para confirmar um casamento entre dois sinais é necessário que, no mínimo, 80% dos pontos detectores sejam iguais. Porém este valor da taxa de afinidade pode ser alterado facilmente. Atribui-se um valor aleatório à afinidade, pois não existe nenhuma regra para definir a afinidade necessária para se confirmar um casamento, de forma que a cada tipo de problema existe um contexto diferente.

6.1.2 Fase de sensoriamento

Na fase de sensoriamento de um sistema de reconhecimento de identidade, tem-se como objetivo gerar o conjunto de detectores (anticorpos artificiais) para serem utilizados pelo SIA durante o processo de monitoramento dos dados. Esta fase é dividida em dois módulos, onde se tem o módulo de aquisição de dados e o módulo de geração de detectores. Esta fase, também chamada de fase de geração de detectores, necessita de maior tempo computacional, porém é executada de forma *off-line* não acarretando prejuízo ao algoritmo.

A seguir, na Figura 45, apresenta-se um diagrama simplificado do funcionamento da fase de sensoriamento do sistema de reconhecimento de identidade.

Assim, no módulo de aquisição de dados é feita a leitura das imagens das 8 expressões faciais das 65 pessoas. Então, após a leitura das imagens, o módulo de geração de detectores cria um conjunto de detectores próprios que serão armazenados e, posteriormente, utilizados na fase de monitoramento de dados para se verificar a afinidade. Após a criação dos detectores, é feita a análise de casamento dos detectores para que não haja repetições de detectores armazenados. Resumidamente, tem-se a fase de sensoriamento descrita passo-a-passo a seguir:

1º Passo: Definir o valor da taxa de afinidade;

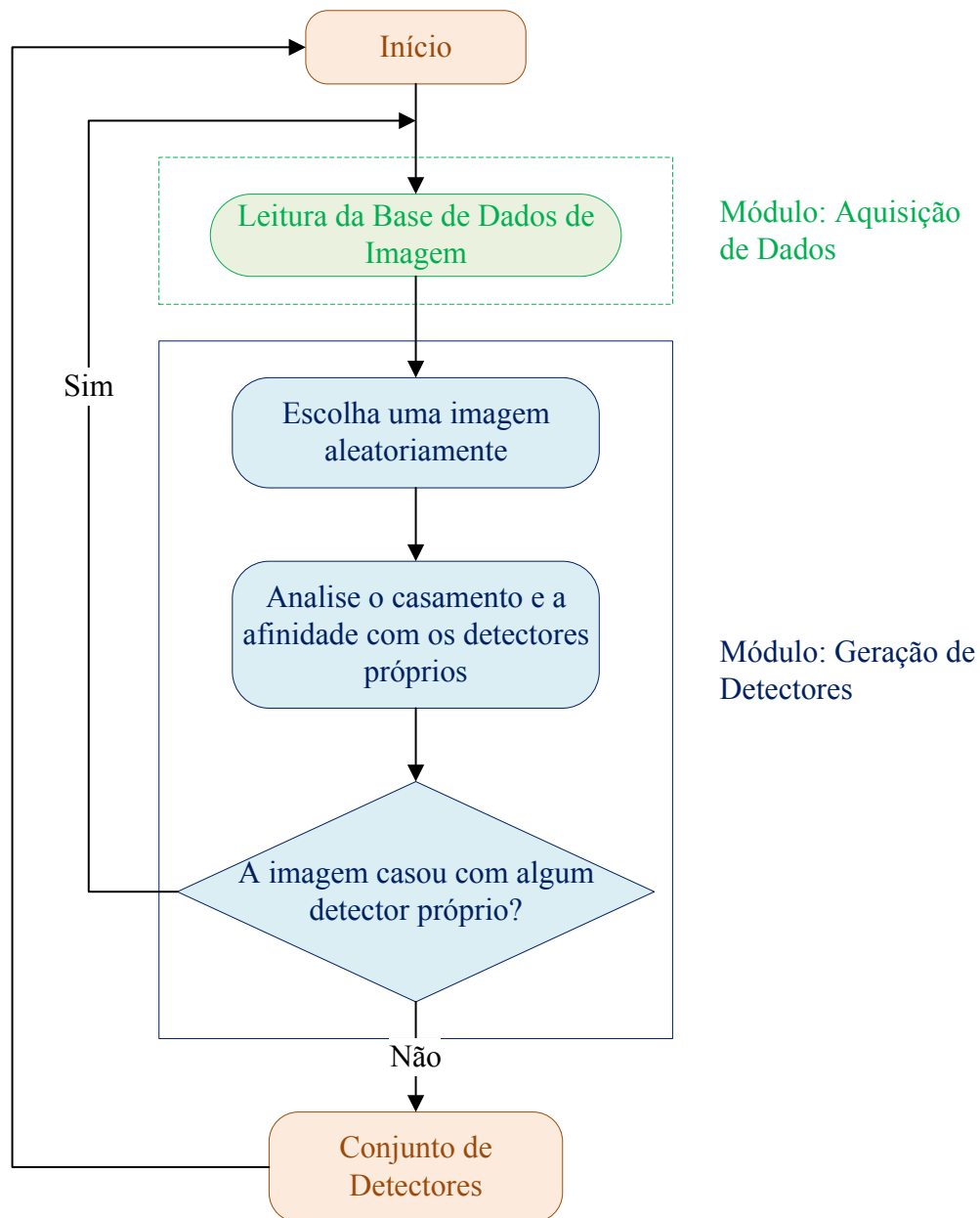
2º Passo: Criar um conjunto de detectores próprios;

3º Passo: Realizar a leitura das imagens

4º Passo: Escolher uma imagem aleatoriamente;

5º Passo: Verificar a afinidade e o casamento entre a imagem e o conjunto de detectores próprios. Caso seja encontrado um casamento, rejeitar a imagem e caso contrário, armazenar a imagem como detector no conjunto de detectores;

Figura 45: Diagrama de módulos da fase de sensoriamento

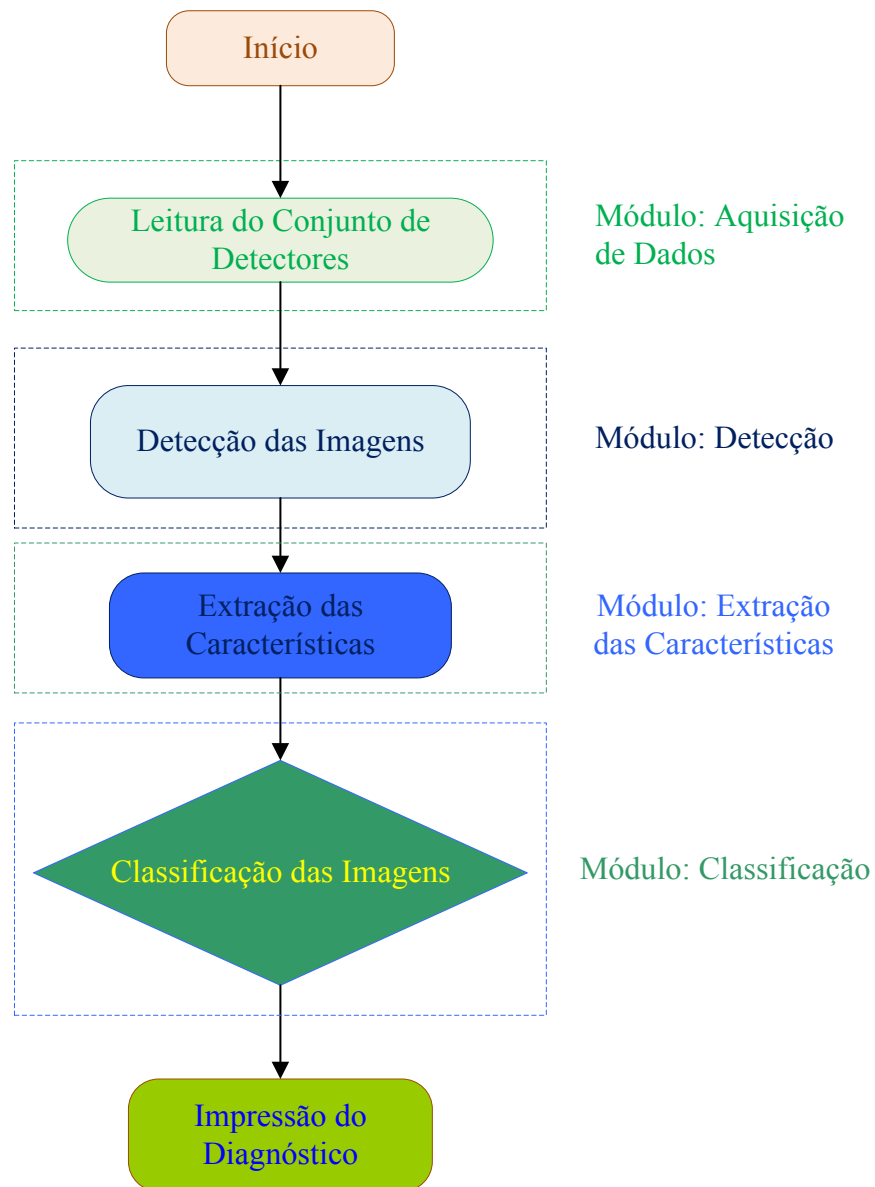


Fonte: Adaptado de LIMA (2013).

6.1.3 Fase de monitoramento

A fase de monitoramento é subdividida em quatro módulos, os quais são responsáveis por fazer a aquisição dos dados, realizar a detecção próprio/não-próprio, realizar a extração das características e a classificação das imagens. Na Figura 46 apresenta-se um diagrama simplificado do funcionamento da fase de monitoramento dos dados.

Figura 46: Diagrama de módulos da fase de Monitoramento



Fonte: Adaptado de LIMA (2013).

O módulo de aquisição de dados realiza a leitura do conjunto de detectores gerados na fase de sensoriamento. Após realizar a leitura, o módulo de detecção é responsável pela detecção da imagem, ou seja, este módulo detecta as imagens próprias/não-próprias, utilizando como detector próprio o conjunto de detectores gerados na fase de sensoriamento. Então, este módulo aciona o módulo de extração das características, que é o módulo responsável por fazer a extração das características para, então, fazer-se a classificação das imagens. Finalmente, é gerado o diagnóstico que mostrará uma classificação das imagens analisadas em próprio e não-

próprio, de forma que as imagens classificadas como próprias são imagens que houve a classificação de identidade, e as imagens não-próprias são as imagens que não houve a classificação de identidade.

Para imagens retiradas da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012), imagens a partir do descritor APDI e LDGBPm foram realizados dois tipos de testes, sendo um teste utilizando todas as imagens das 8 expressões das 65 pessoas para o monitoramento e o outro teste exclui-se as imagens utilizadas para a geração de sensores na fase de sensoriamento.

6.2 COMENTÁRIOS

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta por esse trabalho. Esta metodologia consiste em realizar o Reconhecimento de Identidade por meio da biometria facial. Foi mostrado como se criou o novo banco de imagens com imagens obtidas a partir dos dez descritores mostrados no Capítulo 5. Por fim, foi abortada uma IA denominada SIA, com ênfase no ASN, que realizará o Reconhecimento de Identidade.

7 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os testes e resultados obtidos por meio da aplicação da técnica proposta nas simulações apresentadas nos Capítulos 3 (Sistema Imunológico Artificial) e no capítulo 5 (Reconhecimento de Identidade Usando Dinâmicas Faciais 4D). Toda a metodologia aplicada neste trabalho foi desenvolvida em MATLAB (MATLAB, 2011). A seguir serão descritos os testes e resultados obtidos evidenciando o Reconhecimento de Identidade. Para a apuração dos resultados foi utilizado um microcomputador intel core i5, 1.9 GHz, 2 GB de Memória RAM, e sistema operacional Windows 7, 32 bits.

7.1 ELABORAÇÃO DOS TESTES

Para analisar o desempenho do método proposto foram utilizadas as imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012) e, posteriormente, foram aplicadas as técnicas descritas no Capítulo 5 para se extrair novas imagens a partir dos 10 (dez) descritores. A partir dessas imagens, foi usado o ASN para se fazer o Reconhecimento de Identidade.

Como proposto por FORREST et al. (1994), o conjunto de dados pode ser utilizado tanto no sensoriamento como no monitoramento do sistema, respeitando um limite máximo de 30% dos dados para se gerar o conjunto de detectores. Este limite se dá ao fato de que em um sistema biológico natural a quantidade de detectores distribuídos pelo organismo representa 30% de todos os agentes infecciosos presentes no corpo. Portanto, afim de tornar o processo dinâmico e real, foi adotada a utilização de no máximo 30% dos dados como detectores na fase de sensoriamento, sendo um valor entre 10 a 30%, dependendo das características de cada teste.

Vale ressaltar que para o bom desempenho do ASN, o parâmetro taxa de afinidade (*Taf*) é fundamental na obtenção de resultados eficientes, robustos e precisos para o método proposto. Ao fazer uma análise das imagens é facilmente observável que aproximadamente 70% dos pixels são iguais, por causa das várias partes semelhantes de um rosto (espaços em

branco ou preto). Assim, são os 30% restantes que representam as características de cada pessoa. São nesses 30% que se concentram as características diferentes de uma imagem para a outra, resultando, assim, no possível reconhecimento de identidade. Desta forma, a taxa de afinidade nada mais é que a representação do grau mínimo necessário para afirmar que duas imagens são iguais, havendo, então, o casamento na fase de monitoramento.

Nos testes aqui apresentados, foi fixada a taxa de afinidade em 80% conforme descrito no Capítulo anterior. Esse valor representa, na comparação entre duas imagens, a quantidade de pixels que devem ser iguais para que as imagens sejam atestadas como iguais, resultando no reconhecimento de identidade. Alguns testes foram feitos para uma taxa de afinidade maior, como, por exemplo, 90% e 95%. Porém, quanto maior a afinidade, mais difícil é de se atestar o casamento entre as imagens, pois com essas altas porcentagens de afinidade, é necessário que os padrões sejam praticamente idênticos. Pode-se afirmar que altas porcentagens de afinidade é um inconveniente, pois, as imagens poderiam ser reconhecidas como se fossem pessoas diferentes. Assim, conclui-se que ao aumentar o valor da taxa de afinidade, a precisão do sistema proposto é drasticamente afetada. Nos exemplos citados, apenas cerca de 95% e 80% das imagens são reconhecidas corretamente, utilizando taxa de afinidade de 90% e 95%, respectivamente.

Nos testes a seguir, foi utilizada cada expressão separadamente para gerar o conjunto de sensores na fase de sensoriamento, sendo mostrados os resultados da fase de monitoramento para cada conjunto de sensores. Vale ressaltar que, na fase de sensoriamento, utiliza-se apenas uma expressão para gerar um conjunto de sensores e na fase de monitoramento, todas as expressões são utilizadas para se fazer a classificação. Esse tipo de teste foi feito para que se tenha uma avaliação de qual a melhor expressão para se utilizar na fase de sensoriamento tendo em vista três objetivos: avaliar quais os melhores descritores e as melhores expressões para se realizar o reconhecimento de identidade e, por fim, validar o desempenho da nova solução de reconhecimento de identidades baseado nos SIAs.

Serão apresentados os tempos da fase de sensoriamento e da fase de monitoramento juntamente com os valores em porcentagem do total de detecções corretas e incorretas, além dos valores médios destes resultados. Também são apresentadas as margens de erro que foram obtidas nos testes, ou seja, o desvio padrão. Para isto, utiliza-se a expressão apresentada a seguir:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (46)$$

sendo n : número de elementos;

x_i : valor correspondente ao elemento i ;

\bar{x} : média aritmética.

A seguir são apresentadas todas as configurações dos testes e seus resultados.

7.2 TESTE 1 – BASE DE DADOS

Neste teste, o objetivo é realizar uma análise do Reconhecimento de Identidade para as imagens retiradas da Base de Dados (4D FACIAL DATABASE, 2012). Conforme já mencionado anteriormente, esta base de dados faciais é 3D dinâmico ou 4D, em que a componente temporal é considerada como a quarta dimensão. Sendo assim, cada sequência de expressão, começa com um estado neutro, seguido progressivamente até o pico da expressão e voltando para o estado neutro com cerca de 4 segundos de duração, possibilitando a obtenção da expressão Neutral (Neutro) para cada uma das pessoas. Assim, este primeiro teste possuirá uma expressão a mais que os demais. O valor da taxa de afinidade foi fixado em $TAf = 80\%$ conforme já mencionado anteriormente. Na Tabela 1, as expressões faciais são identificadas no idioma inglês visando melhor evidenciá-las no texto.

Neste teste serão mostrados alguns exemplos de imagens que não obtiveram detecção correta. Com esta amostragem de imagens é possível analisar que elas são parecidas e por isso não foram classificadas, ou seja, mais de 20% dos pixels da imagem são diferentes, de forma que não atingem o valor fixado da taxa de afinidade. Apesar do não reconhecimento, a fase monitoramento tem capacidade de selecionar um detector que mais se aproxima da imagem analisada, mas não se pode afirmar com total precisão a classificação da pessoa.

Pode-se concluir que os resultados obtidos neste teste são satisfatórios, pois

apresentam um alto índice de acerto com uma média de 99,01% e desvio padrão de $\pm 1,32$ utilizando todas as imagens na fase de monitoramento e acerto médio de 98,98% e desvio padrão de $\pm 1,31$ quando excluída as imagens utilizadas para geração dos detectores, para se realizar o monitoramento.

Tabela 1: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens retiradas da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

BASE DE DADOS								
Expressão	Tempo censoria-mento (s)	Tempo monito-ramento (s)	Detecções corretas (%)*	Detecções incorretas (%)*	Tempo censoria-mento (s)	Tempo monito-ramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Neutral	221,82	694,99	99,15	0,85	224,38	701,23	99,14	0,84
Angry	229,29	716,09	99,58	0,42	247,35	687,15	99,47	0,53
Contempt	229,57	701,31	99,36	0,64	247,69	708,97	99,36	0,64
Disgust	249,36	744,34	99,58	0,42	234,31	710,79	99,53	0,47
Fear	233,95	748,91	95,55	4,45	221,79	713,97	95,53	4,47
Happy	220,32	714,41	99,80	0,20	219,75	691,78	99,74	0,26
Phrase	222,84	685,49	99,36	0,64	256,7	701,56	99,36	0,64
Sad	283,17	691,56	99,58	0,42	243,97	708,34	99,51	0,49
Surprise	251,45	746,61	99,15	0,85	247,16	687,32	99,15	0,85
Média	237,97	715,97	99,01	0,99	238,12	701,23	98,98	1,02
Desvio padrão	$\pm 20,36$	$\pm 25,03$	$\pm 1,32$	$\pm 1,32$	$\pm 13,44$	$\pm 10,28$	$\pm 1,31$	$\pm 1,31$

*usando as imagens do censoriamento no monitoramento.

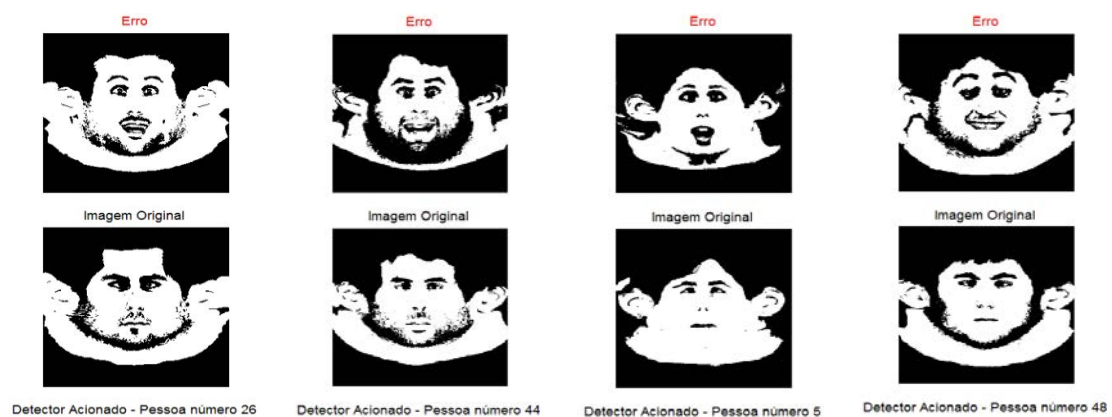
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por meio dos resultados da Tabela 1, pode-se realizar diversas observações: a variação do tempo de censoriamento não influencia proporcionalmente a classificação das imagens. Por exemplo: o maior tempo de censoriamento foi de aproximadamente 5 minutos para a expressão *sad*, porém a expressão *sad* não foi a que obteve maior índice de classificação correta, além de obter o mesmo número de detecções corretas que a expressão *angry*, que teve uma diferença de 1 minuto no tempo de censoriamento. A expressão *happy* teve o menor tempo de censoriamento com aproximadamente 4 minutos e o melhor índice de classificação. Para o tempo de

monitoramento, também conclui-se que não influencia proporcionalmente, pois o maior tempo foi para a expressão *fear*, que obteve menor índice de classificação correta. Por outro lado, o menor tempo de monitoramento foi da expressão *phrase*, mas esta não obteve o maior índice de classificação correta. Por fim, conclui-se que, para imagens puramente retiradas da base de dados e utilizando todas as 8 expressões das 65 pessoas para realizar o monitoramento, a melhor expressão para se fazer o sensoriamento é a expressão *happy* que apresentou 99,80% de acerto, enquanto que ao se utilizar a expressão *fear*, obteve-se o resultado mais baixo, com 95,55%. No entanto, todas as expressões apresentaram um alto desempenho na classificação, com uma média de 99,01% \pm 1,32. E ainda, para imagens puramente retiradas da base de dados e utilizando somente as imagens que não foram utilizadas para gerar os sensores, a melhor expressão para se fazer o sensoriamento continuou sendo a expressão *happy* que apresentou 99,74% de acerto e, ao se utilizar a expressão *fear*, obteve-se o resultado mais baixo, com 95,53%. Para este segundo teste, todas as expressões apresentaram um alto desempenho na classificação, com uma média de 98,98% \pm 1,31.

A seguir, são apresentados alguns exemplos de imagens que não obtiveram classificação correta. Na parte inferior das figuras são mostradas as imagens utilizadas no sensoriamento e que foram acionadas como o detector que mais se aproxima das imagens analisadas (imagens da parte superior das figuras).

Figura 47: Amostra de imagens não detectadas corretamente para a expressão Neutral

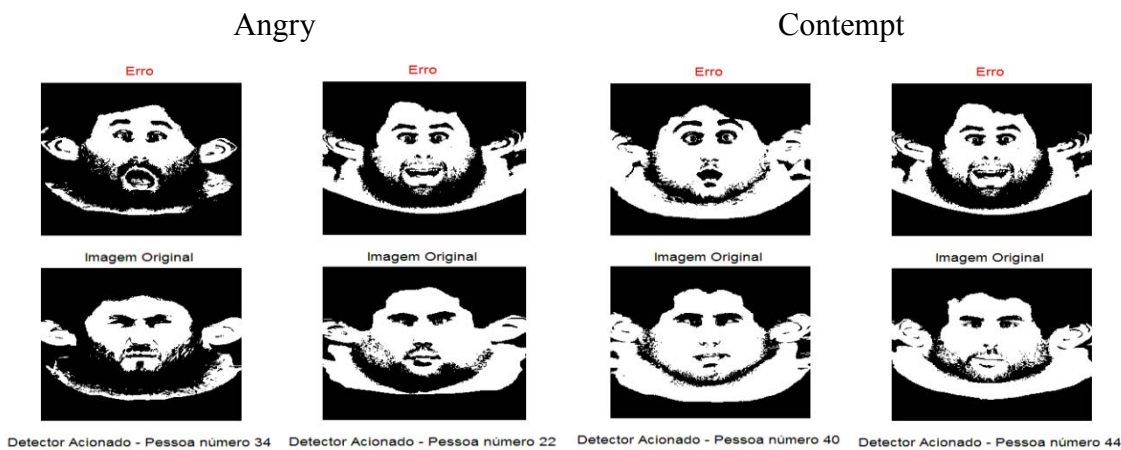


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 47 apresenta algumas incorreções ao se realizar o censoriamento com expressão *neutral*. Por meio destes exemplos, pode-se observar que as imagens são parecidas e por isso não foram classificadas corretamente. Porém, ainda é possível estimar uma classificação, ou seja, selecionar um detector que mais se aproxima da imagem analisada.

A Figura 48, apresenta alguns erros detectados com censoriamento realizado com as expressões *angry* e *contempt*. Por meio da Tabela 1, pode-se concluir que estas duas expressões obtiveram ótimos resultados de classificação correta e como pode ser observado por meio da Figura 48, apenas imagens muito diferentes não foram classificadas corretamente, porém estima-se uma classificação.

Figura 48: Amostra de imagens não detectadas corretamente para expressões Angry e Contempt



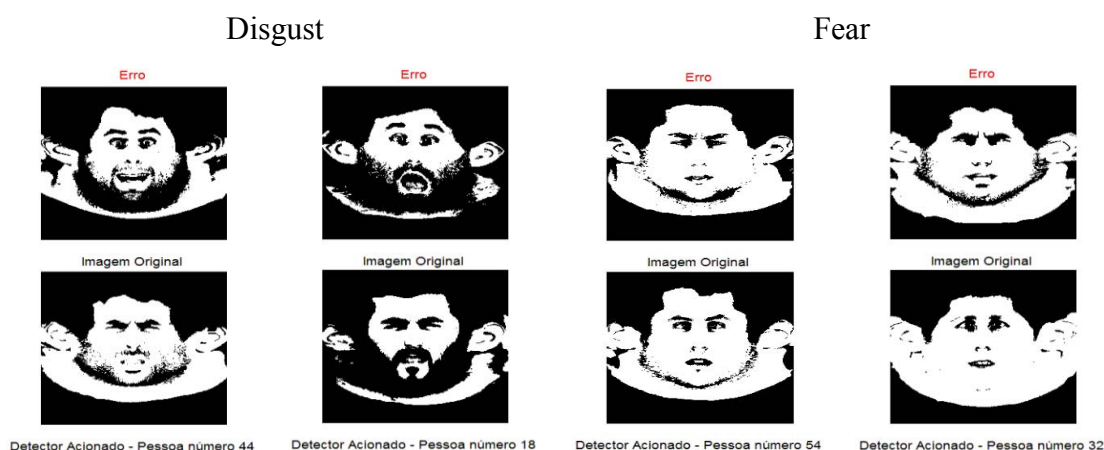
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Alguns erros detectados para o censoriamento realizado com as expressões *disgust* e *fear* são mostradas na Figura 49. Vale salientar que a expressão *fear* foi a que obteve resultados para classificação menos satisfatórios e, por meio das imagens exemplo, pode-se notar que ao usar esta expressão como detector, existem muitas características pessoais em evidência, dificultando para o sistema obter uma classificação correta quando comparada com outras expressões.

A Figura 50 mostra alguns exemplos de imagens que não obtiveram detecção correta utilizando as expressões *happy* e *phrase* na fase de censoriamento. A expressão *happy* foi a que obteve melhor índice de classificação, sendo que para todas as imagens da base de dados

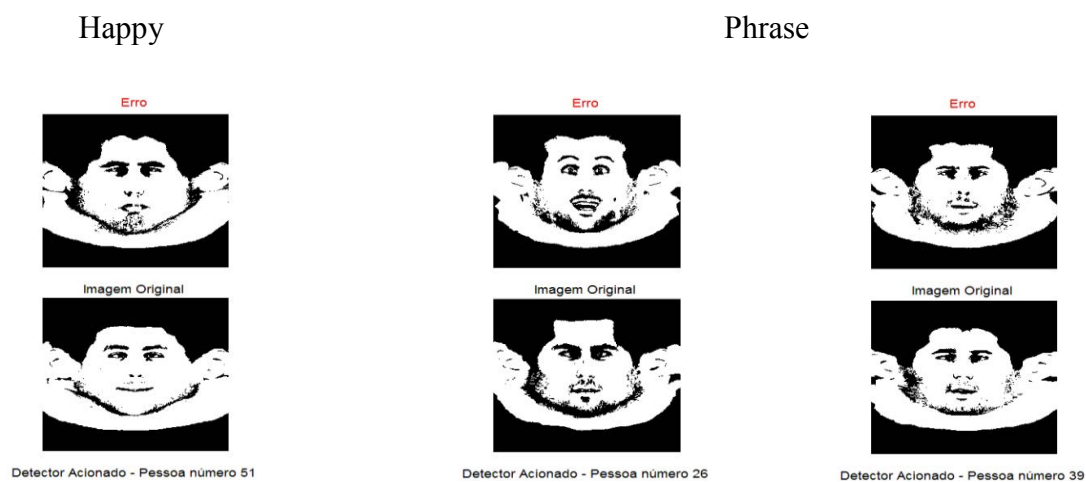
analisada, apenas uma não foi classificada corretamente, porém apresenta uma estimativa de classificação para a imagem. Vale salientar ainda que esta expressão é uma das expressões que mais utiliza os músculos faciais evidenciando, assim, as características pessoais de cada imagem.

Figura 49: Amostra de imagens não detectadas corretamente para as expressões Disgust e Fear



Fonte: Elaboração do próprio autor.

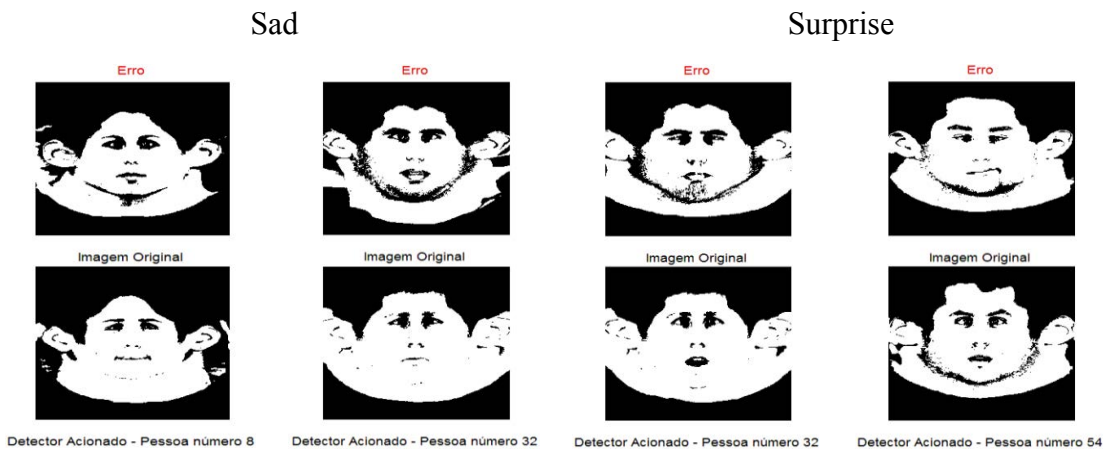
Figura 50: Amostra de imagens não detectadas corretamente para as expressões Happy e Phrase



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Exemplos de imagens que não obtiveram classificação correta para as expressões *sad* e *surprise* usadas no censuriamento, podem ser vistos por meio da Figura 51.

Figura 51: Amostra de imagens não detectadas corretamente para as expressões Sad e Surprise



Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3 TESTE 2 – DEPTH MAP

Nos testes seguintes, serão utilizadas imagens obtidas a partir dos 10 (dez) descritores apresentados no Capítulo 5. Estes descritores foram escolhidos e desenvolvidos por serem os de maior fator de impacto na bibliografia de reconhecimento de padrões. O objetivo será avaliar o desempenho de cada um dos descritores em conjunto com a proposta dos SIAs.

Neste teste serão apresentados os resultados de imagens geradas a partir da representação da geometria facial 2D denominada DMs. O valor da taxa de afinidade foi fixado em $Taf = 80\%$ e os resultados são apresentados na Tabela 2.

Por meio da Tabela 2, facilmente observa-se que os tempos de sensoriamento e de monitoramento não influenciam diretamente na classificação correta das imagens e ainda que eles tenham valores extremamente aproximados e com um desvio padrão baixo, de $\pm 1,06$ e $\pm 1,34$ para as fases de sensoriamento e monitoramento, respectivamente, diferentemente dos valores obtidos no teste para as imagens retiradas diretamente da base de dados. Pode-se ainda, comparar o desempenho do sistema no reconhecimento de identidade ao se utilizar cada uma das expressões. A expressão *disgust* apresenta o maior índice de classificação e a expressão *happy* o menor, sendo $91,96\%$ e $87,50\%$, respectivamente.

Tabela 2: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens DM calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

Depth Map				
Expressão	Tempo de censuriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	44,07	118,41	90,77	9,23
Contempt	44,34	119,27	91,37	8,63
Disgust	43,95	118,89	91,96	8,04
Fear	42,59	118,62	90,77	9,23
Happy	42,85	117,83	87,50	12,50
Phrase	42,63	120,85	88,39	11,61
Sad	44,64	121,05	89,29	10,71
Surprise	45,54	121,26	89,88	10,12
Média	43,83	119,52	89,99	10,01
Desvio padrão	±1,06	±1,34	±1,52	±1,52

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conclui-se que foram obtidos bons resultados de reconhecimento de identidade para imagens de representação geométrica 2D – DM e a melhor expressão a ser utilizada no censuriamento para esta técnica de representação e de reconhecimento é a *disgust*. No geral, todas as expressões possuem um bom desempenho de classificação correta com uma média de 89,99% ±1,52.

7.4 TESTE 3 - AZIMUTHAL PROJECTION DISTANCE IMAGE (APDI)

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos no teste feito utilizando imagens geradas a partir da representação da geometria facial 2D, denominada APDI.

Neste teste foram realizados dois tipos de simulação, sendo na primeira simulação utilizando todo o conjunto de imagens (8 expressões das 65 pessoas) para obtenção do

diagnóstico realizado através da fase de monitoramento e a segunda simulação foram utilizadas somente as imagens que não foram usadas para gerar os sensores na fase de sensoriamento. Ainda no primeiro caso, foi realizado o teste de referência cruzada, onde é executado 20 vezes os programas e os resultados apresentados na Tabela 3 são a média aritmética dos resultados obtidos na execução da fase de sensoriamento e monitoramento para cada uma das expressões. Os resultados das 20 execuções são idênticos e os mesmos são apresentados no Anexo D.

Tabela 3: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens APDI calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

APDI								
Expressão	Tempo censoriamento (s)	Tempo monitoramento (s)	Detecções corretas (%)*	Detecções incorretas (%)*	Tempo censoriamento (s)	Tempo monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	44,21	117,48	98,81	1,19	46,14	103,82	98,61	1,39
Contempt	50,43	119,28	98,81	1,19	43,27	114,01	98,61	1,39
Disgust	47,67	115,20	99,40	0,60	47,97	120,87	99,31	0,69
Fear	45,82	123,25	99,11	0,89	42,97	124,32	98,96	1,04
Happy	44,63	113,98	97,92	2,08	48,41	122,36	97,57	2,43
Phrase	46,16	111,88	97,92	2,08	51,07	101,35	97,57	2,43
Sad	46,39	115,85	99,40	0,60	53,04	114,32	99,31	0,69
Surprise	45,76	116,95	97,62	2,38	42,09	147,32	97,49	2,51
Média	46,38	116,73	98,62	1,38	46,87	118,55	98,43	1,57
Desvio padrão	±1,95	±3,46	±0,71	±0,71	±3,98	±14,30	±0,78	±0,78

*usando as imagens do sensoriamento no monitoramento.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o primeiro conjunto de testes com imagens de APDI é possível observar por meio dos resultados demonstrados na Tabela 3 que, ao utilizar as expressões *disgust* e *sad* como sensores, o desempenho atingiu um excelente índice de classificação correta, com 99,40%. A expressão *surprise* originou o menor índice de classificação correta, porém excelente, com 97,62%. Por fim, observa-se que a média de desempenho foi $98,62 \pm 0,71$, o que mostra um excelente e encorajador resultado. Para o segundo conjunto de teste, é possível analisar que novamente as expressões *disgust* e *sad* quando utilizadas como sensores, tem um excelente

desempenho com índice de classificação correta de 99,31% e a expressão *surprise* originou o menor índice de classificação correta com 97,49%. Então por meio dos resultados expostos na Tabela 3, tem-se um desempenho satisfatório para o segundo conjunto de teste com $98,43 \pm 0,7$. Novamente observa-se que os tempos de sensoriamento e monitoramento não influenciam na classificação da imagem. Neste momento, por meio da técnica de reconhecimento proposta neste trabalho, ao utilizar imagens de representação geométrica 2D – APDIs, encontra-se um desempenho de classificação de imagem substancialmente melhor que utilizando imagens de DM. Novas conclusões serão feitas neste sentido quando apresentados os resultados para os descritores baseados em DM e APDI.

7.5 TESTE 4 – 3DLBP

A abordagem das Características de Padrões Binários será apresentada nos testes seguintes. Neste teste, serão apresentados resultados de imagens geradas a partir dos LBP, que recentemente tem sido empregados em reconhecimento de imagens faciais 2D com grandes margens de sucesso. Neste trabalho, foi proposta no Capítulo 5 a utilização desta técnica em conjunto com malhas faciais em 3D, explorando a representação do DM, originando o *3D Local Binary Pattern* (3DLBP). O valor da taxa de afinidade foi fixado em $Taf = 80\%$ como nos testes anteriores e os resultados são apresentados na Tabela 4. Como observado nos outros testes os tempos da fase de sensoriamento e monitoramento não influenciam na classificação das imagens.

Pode-se observar que, para este teste, as imagens das expressões *fear* e *sad*, quando usadas como sensores apresentam um ótimo desempenho na classificação das imagens, com 99,11%. As imagens da expressão *happy* apresentam o menor índice de classificação, com 94,64%. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o reconhecimento de imagens baseadas no descritor 3DLBP obtiveram excelentes resultados na classificação, com uma média de $97,28\% \pm 1,71$.

Tabela 4: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor 3DLBP calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

3DLBP				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	41,74	111,22	98,21	1,79
Contempt	42,17	109,69	97,02	2,98
Disgust	42,73	107,40	95,54	4,46
Fear	41,57	109,26	99,11	0,89
Happy	42,92	111,08	94,64	5,36
Phrase	42,98	113,54	96,13	3,87
Sad	42,29	108,81	99,11	0,89
Surprise	42,13	112,83	98,51	1,49
Média	42,32	110,48	97,28	2,72
Desvio padrão	±0,52	±2,08	±1,71	±1,71

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.6 TESTE 5 -LABP

Ainda com base nos LBPs, foi proposto no Capítulo 5 o *Local Azimuthal Binary Patterns* (LABP), onde é utilizado o APDI ao invés do DM para calcular o Padrão Binário na vizinhança de cada ponto. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos a partir de imagens geradas pelo do descritor LABP.

Com base nos resultados, pode-se observar que para as imagens da expressão *sad*, quando usadas como sensores foi obtido o melhor índice de classificação correta das imagens com 95,83%. Utilizando as imagens da expressão *disgust* como sensores, obteve-se o menor índice de classificação, com 90,18%. O valor da taxa de afinidade foi fixado em $T Af = 80\%$ como nos testes anteriores e, como observado nos outros testes, os tempos da fase de censoriamento e monitoramento não influenciam na classificação correta das imagens.

Tabela 5: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LABP calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LABP				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	50,07	115,61	92,86	7,14
Contempt	46,27	113,16	95,54	4,46
Disgust	45,06	113,29	90,18	9,82
Fear	45,97	111,55	95,54	4,46
Happy	45,65	111,42	94,64	5,36
Phrase	45,39	112,66	91,96	8,04
Sad	46,03	115,45	95,83	4,17
Surprise	45,50	115,20	94,64	5,36
Média	46,24	113,54	93,90	6,10
Desvio padrão	±1,59	±1,70	±2,03	±2,03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conclui-se que o reconhecimento de imagens baseadas no descritor LABP apresentou uma média de classificação correta de 93,90%±2,03. Como mencionado anteriormente e observado por Sandbach, Zafeiriou, Pantic, (2012a), os recursos baseados em DM fornecem resultados mais precisos do que os computados para APDI e esta observação torna-se clara com base nestes dois primeiros testes, pois a média de classificação correta para 3DLBP (recurso baseado em DM) foi de 97,28%±1,71 contra a média de classificação correta para LABP (recurso baseado em APDI) de 93,90%±2,03.

7.7 TESTE 6 - LDPQ

Neste e no próximo teste, serão utilizadas imagens obtidas a partir dos descritores

baseados no método *Local Phase Quantisers* (LPQs). Este método faz a extração das informações de fase local que contém características direcionais importantes que descrevem as deformações faciais (espectro de fase de Fourier). Desta forma, quando aplicado o método LPQ para o DM origina o descritor denominado *Local Depth Phase Quantisers* (LDPQ). A Tabela 6 apresenta os resultados para as imagens originadas a partir do descritor LDPQ.

Como pode ser observado, este método LPQ computado para a representação geométrica facial DM não mostrou um bom desempenho em conjunto com a técnica de reconhecimento proposta neste trabalho. A expressão que obteve o melhor índice de classificação correta foi a *happy*, com 63,54%. Em comparação com resultados anteriores, esta expressão obteve resultados de até 94,64% para o descritor 3DLBP que também tem base no DM. A expressão que obteve menor desempenho de classificação foi a *surprise* com 42,01% de acerto e, comparando com testes anteriores baseados em DM, esta mesma expressão obteve índice de até 98,51%. Conclui-se que este descritor não possui um bom desempenho em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseado no SIA, obtendo uma média de classificação de 48,97% \pm 6,34.

Tabela 6: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDPQ calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LDPQ				
Expressão	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	49,06	109,42	49,65	50,35
Contempt	40,69	107,47	48,61	51,39
Disgust	41,98	108,67	47,31	52,69
Fear	49,73	108,21	45,14	54,86
Happy	40,12	109,46	63,54	36,46
Phrase	49,65	108,02	47,92	52,08
Sad	40,06	108,64	47,57	52,43
Surprise	49,64	109,30	42,01	57,99
Média	45,12	108,65	48,97	51,03
Desvio padrão	\pm4,75	\pm0,72	\pm6,34	\pm6,34

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.8 TESTE 7 – LAPQ

Neste teste também foram utilizadas imagens baseadas no método *Local Phase Quantisers* (LPQs) aplicado ao APDI, originando o descritor denominado *Local Azimuthal Phase Patterns* (LAPQ). Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos de imagens geradas a partir do descritor LAPQ.

Tabela 7: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAPQ calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LAPQ				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	45,43	121,46	2,12	97,88
Contempt	46,63	117,39	2,08	97,92
Disgust	47,50	118,10	2,16	97,84
Fear	47,13	120,75	8,33	91,67
Happy	46,48	118,30	2,68	97,32
Phrase	47,32	118,59	4,17	95,83
Sad	47,00	117,52	3,87	96,13
Surprise	51,54	126,05	2,21	97,79
Média	47,38	119,77	3,45	96,55
Desvio padrão	±1,80	±2,94	±2,14	±2,14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como já observado no teste anterior, o método LPQ em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseado no SIA não mostrou um bom desempenho. Este método computado para a representação geométrica facial APDI originou o descritor LAPQ que também não mostrou um bom desempenho na classificação. A expressão que obteve o melhor índice de classificação correta foi a *fear* com 8,33%, mostrando ser um descritor ineficiente comparando-se os resultados obtidos a partir de outros descritores: 99,11% para a representação geométrica APDI e 95,54% para o descritor LABP (LBP aplicado ao APDI). A expressão que

obteve menor desempenho de classificação foi a *contempt* com 2,08% de acerto. Comparando com testes anteriores baseado em APDI, esta mesma expressão obteve índice de até 95,54%. Vale ainda salientar a observação feita por Sandbach, Zafeiriou, Pantic, (2012a) que diz que os recursos baseados em DM fornecem resultados mais precisos do que os computados para APDI e, de fato, isso pode ser observado mesmo com os resultados insatisfatórios obtidos para o método LPQ. Por fim, conclui-se que o descritor LABP não possui um bom desempenho em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseado no SIA, obtendo uma média de classificação extremamente baixa de 3,45% \pm 2,14.

7.9 TESTES 8 E 9– LDGBP_M E LDGBP_P

Para os próximos dois testes serão utilizadas imagens geradas a partir dos descritores baseados no método de Filtros de Gabor que são possuidores de um componente de magnitude e um componente de fase. Esses descritores vêm sendo amplamente utilizados para a captura de informações estruturais de imagens utilizadas em reconhecimento de expressões faciais 2D e também em análise de imagens 3D. O método dos Filtros de Gabor foi computado utilizando o DM dando origem ao *Local Depth Gabor Binary Patterns magnitude* (LDGBP_m) e *Local Depth Gabor Binary Patterns phase* (LDGBP_p). Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os resultados de imagens geradas a partir dos descritores LDGBP_m e LDGBP_p, respectivamente.

Para os resultados da Tabela 8 foram usadas imagens a partir do descritor LDGBP com base no componente de magnitude (LDGBP_m). Novamente os tempos da fase de sensoriamento e monitoramento não influenciam nos resultados. Para este teste foram realizados dois tipos de simulação: utilizando todo o conjunto de imagens na fase de monitoramento para obtenção dos resultados e utilizando somente as imagens que não foram usadas na fase de sensoriamento para gerar os sensores.

Para ambos os testes, a expressão com melhor desempenho foi a expressão *fear*, apresentando um excelente índice de classificação correta de 99,70% e 99,68%, respectivamente. As expressões que obtiveram os menores índices de classificação, porém índices satisfatórios, foram a *contempt* e a *surprise*, ambas com 97,32% e 97,22%, respectivamente. Conclui-se que esta é uma excelente técnica para reconhecimento de imagens

quando em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseado no SIA. Com uma média de classificação de $98,51\% \pm 0,89$ e $98,47\% \pm 0,92$, respectivamente, torna-se, até o momento, o descritor aplicado ao DM com os melhores resultados.

Tabela 8: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDGBPm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LDGBPm								
Expressão	Tempo censoria-mento (s)	Tempo monito-ramento (s)	Detecções corretas (%)*	Detecções incorretas (%)*	Tempo censoria-mento (s)	Tempo monito-ramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	43,96	110,18	98,51	1,49	43,07	114,32	98,51	1,49
Contempt	43,13	110,06	97,32	2,68	42,87	111,25	97,22	2,78
Disgust	43,80	111,46	99,40	0,60	43,97	121,32	99,39	0,61
Fear	42,61	112,53	99,70	0,30	41,87	104,01	99,68	0,32
Happy	42,94	108,36	98,51	1,49	43,57	106,32	98,47	1,53
Phrase	44,91	108,69	98,21	1,79	42,87	113,89	98,21	1,79
Sad	42,55	109,92	99,11	0,89	44,97	107,94	99,08	0,92
Surprise	44,41	111,12	97,32	2,68	44,12	107,21	97,22	2,78
Média	43,54	110,29	98,51	1,49	43,41	110,78	98,47	1,53
Desvio padrão	±0,87	±1,39	±0,89	±0,89	±0,95	±5,61	±0,92	0,92

*usando as imagens do censoriamento no monitoramento.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para os resultados da Tabela 9 foram usadas imagens a partir do descritor LDGBP com base no componente de fase (LDGBPp). Observa-se que os tempos de censoriamento e monitoramento não influenciam no reconhecimento de identidade. A expressão com melhor desempenho foi a expressão *sad* com um excelente índice de classificação correta de 97,62%. A expressão que obteve menor índice de classificação, foi a *phrase* com 94,64%.

Tabela 9: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDGBPp calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LDGBPp				
Expressão	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	42,62	113,20	95,54	4,46
Contempt	42,36	114,21	96,13	3,87
Disgust	43,16	114,44	95,83	4,14
Fear	43,97	112,76	97,32	2,68
Happy	42,36	113,93	96,73	3,27
Phrase	43,62	112,23	94,64	5,36
Sad	42,71	112,82	97,62	2,38
Surprise	42,77	113,31	94,94	5,06
Média	42,95	113,36	96,09	3,90
Desvio padrão	±0,63	±0,77	±1,07	±1,07

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conclui-se que o reconhecimento de imagens a partir do método de Filtros de Gabor computado para o DM baseado no componente de fase, obteve um bom desempenho com média de 96,09% \pm 1,07. Mesmo com bons resultados, vale salientar que esta mesma técnica, quando computada para o componente de magnitude obteve resultados um pouco melhores.

7.10 TESTES 10 E 11 – LAGBPM E LAGBPP

Ainda, a partir dos descritores do método de Filtros de Gabor, as imagens foram computadas utilizando o APDI, originando novos descritores, denominados *Local Azimuthal Gabor Binary Patterns* com um componente de *magnitude* (LAGBPM) e *Local Azimuthal Gabor Binary Patterns* com um componente de *fase* (LAGBPP). As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados de reconhecimento utilizando as imagens geradas a partir dos descritores LAGBPM e LAGBPP, respectivamente.

Tabela 10: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAGBPm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LAGBPm				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	44,58	108,57	98,21	1,79
Contempt	44,10	110,58	98,81	1,19
Disgust	44,47	110,24	98,51	1,49
Fear	44,41	109,43	99,40	0,60
Happy	45,50	110,47	95,81	1,19
Phrase	45,58	108,60	96,13	3,87
Sad	45,16	110,03	99,11	0,89
Surprise	44,71	109,38	95,24	4,76
Média	44,81	109,66	97,65	1,97
Desvio padrão	±0,54	±0,79	±1,65	±1,51

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Tabela 10, a expressão com melhor desempenho foi *fear* com um excelente índice de classificação correta de 99,40%. A expressão *surprise* apresentou o menor índice de classificação, porém, com menos de 5% de detecções incorretas, pode-se considerar como um resultado satisfatório. Conclui-se que esta é uma excelente técnica para reconhecimento de imagem quando utilizada em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseado no SIA, apresentando uma média de reconhecimento correto de 97,65% ±1,65.

Por meio da Tabela 11, tem-se a análise dos resultados de reconhecimento de imagens baseadas no descritor LAGBPp. Pode-se observar que a expressão *sad*, quando usada para o censoriamento, origina um excelente resultado de 99,11% de classificação correta. Em contrapartida, a expressão *phrase* obteve o menor índice de classificação com 93,15%.

Tabela 11: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAGBPp calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LAGBPp				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	43,78	110,70	98,21	1,79
Contempt	44,06	110,07	97,62	2,38
Disgust	44,41	110,88	97,92	2,08
Fear	44,64	108,27	98,81	1,19
Happy	44,02	109,94	96,73	3,27
Phrase	47,61	109,83	93,15	6,85
Sad	44,79	110,64	99,11	0,89
Surprise	49,28	112,85	96,73	3,27
Média	45,32	110,40	97,29	2,72
Desvio padrão	±2,01	±1,29	±1,88	±1,88

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com uma média de classificação correta de 97,29% \pm 1,88, a proposta de reconhecimento de imagem em conjunto com este método torna-se uma boa alternativa. Vale salientar também que houve uma pequena diferença de 1,22% na média dos resultados finais para LAGBPM e LAGBPp. Assim, pode-se dizer que as análises para imagens tanto com o componente de magnitude como o componente de fase resultam em um bom desempenho no reconhecimento de identidade em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento proposta neste trabalho.

Conclui-se que, para imagens geradas a partir dos descritores baseados no método de Filtros de Gabor, quando computados utilizando o DM obtém-se melhores resultados assim como observado por Sandbach, Zafeiriou, Pantic, (2012a) que diz que os recursos baseados em DM fornecem resultados mais precisos do que os computados para APDI.

7.11 TESTES 12, 13 E 14 – LDMBPM, LDMBPP E LDMBPO

Neste conjunto de testes serão utilizadas imagens originadas do método denominado *Monogenic Binary Patterns* (MBP), que é um dos métodos de extração de características mais recentes. Este método baseia-se na generalização bidimensional do sinal analítico e na transformada de Riesz, resultando em um sinal monogênico capaz de realizar análises em termos de magnitude, fase e orientação. Dessa forma, os Padrões Binários são computados para os componentes de magnitude, fase e orientação das imagens filtradas e quando calculado utilizando o DM originam-se os descritores *Local Depth Monogenic Binary Patterns* com um componente de *magnitude* (LDMBPM), *Local Depth Monogenic Binary Patterns* com um componente de *fase* (LDMBPP) e *Local Depth Monogenic Binary Patterns* com um componente de orientação (LDMBPO).

Nos testes seguintes serão feitas análises do reconhecimento de imagens para cada um dos componentes, a fim de estabelecer qual a melhor opção de reconhecimento em conjunto com a estratégia tecnológica baseada nos SIAs.

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os resultados para cada um dos descritores com os componentes de magnitude, fase e orientação, respectivamente.

Os resultados da Tabela 12 mostram uma média de desempenho de reconhecimento de 97,66% \pm 0,76 para imagens usando o descritor LDMBPM. Para este teste, a expressão com melhor desempenho foi a expressão *sad* com um bom índice de classificação correta de 98,81% e a expressão com menor índice de classificação foi a *phrase* com 96,43%. Pode-se dizer que o método MBP calculado utilizando o DM dando origem ao descritor LDMBP e, levando em consideração o componente de magnitude, obteve bons resultados. Nas próximas tabelas serão mostrados os resultados dos testes para o componente de fase e orientação e novas conclusões serão feitas acerca da melhor opção a ser utilizada em conjunto com o recurso tecnológico proposto por esta tese.

Tabela 12: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDMBPm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LDMBPm				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	41,60	109,04	98,21	1,79
Contempt	44,17	108,98	97,32	2,68
Disgust	42,89	108,23	98,51	1,49
Fear	45,28	110,46	98,21	1,79
Happy	44,52	114,74	97,92	2,08
Phrase	45,05	111,96	96,43	3,57
Sad	42,04	110,87	98,81,	1,19
Surprise	43,76	111,45	97,02	2,98
Média	43,66	110,72	97,66	2,20
Desvio padrão	±1,36	±2,08	±0,76	±0,81

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para os resultados da Tabela 13 foram utilizadas imagens a partir do descritor LDMBPp, o qual mostrou um bom desempenho médio no reconhecimento de imagens com 91,84% \pm 2,19. Para este caso quando usa-se a expressão *fear* como censor, obteve-se 95,24% de acerto na classificação e com um menor resultado tem-se a expressão *phrase* que obteve 88,10% de acerto na classificação. Os resultados aqui apresentados já mostram a inferioridade da média de classificações corretas em relação ao descritor baseado no componente de magnitude.

Tabela 13: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDMBPp calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LDMBPp				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	42,71	120,05	91,67	8,33
Contempt	46,33	115,77	93,75	6,25
Disgust	43,48	113,24	91,67	8,33
Fear	41,64	111,78	95,24	4,76
Happy	42,57	114,41	91,96	8,04
Phrase	47,46	111,72	88,10	11,90
Sad	42,30	113,92	89,88	10,12
Surprise	45,22	108,84	92,56	7,44
Média	43,96	113,72	91,85	8,15
Desvio padrão	±2,12	±3,31	±2,19	±2,19

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A seguir serão mostrados os resultados para imagens do descritor LDMBP considerando o componente de orientação e se concluirá qual o melhor descritor baseado nesse método para realizar o reconhecimento de identidade em conjunto com a técnica baseada no SIA.

Na Tabela 14 são mostrados os resultados usando imagens a partir do descritor LDMBP baseado no componente de orientação (LDMBPo). Observa-se que a expressão com *contempt* apresentou um melhor índice de classificação correta (81,25%) e a expressão *phrase* apresentou apenas 75,00%, sendo o menor resultado obtido. Por fim, pode-se constatar uma média de reconhecimento correto de imagens de 77,49% ±2,08.

Tabela 14: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LDMBPo calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LDMBPo				
Expressão	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	41,74	113,23	79,46	20,54
Contempt	41,52	113,85	81,25	18,75
Disgust	40,71	113,81	76,49	23,51
Fear	40,95	112,35	77,08	22,92
Happy	41,27	114,51	77,68	22,32
Phrase	45,33	114,82	75,00	25,00
Sad	41,18	112,81	75,30	24,70
Surprise	41,38	112,76	77,68	22,32
Média	41,76	113,52	77,49	22,51
Desvio padrão	±1,48	±0,88	±2,08	±2,08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conclui-se que o método MBP calculado utilizando o DM dá origem a três novos descritores denominados LDMBP que podem ser computados para os componentes de magnitude (LDMBPm), fase (LDMBPp) e orientação (LDMBPo). As Tabelas 12, 13 e 14 mostraram os resultados da análise de reconhecimento das imagens geradas a partir de cada descritor. Tem-se que o descritor LDMBPm foi o que obteve melhor índice de reconhecimento de imagem com 97,66% $\pm 0,76$ quando em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseada em SIA. O Segundo melhor foi o descritor LDMBPp com 91,85% $\pm 2,19$ seguido do LDMBPo com 77,49% $\pm 2,08$.

7.12 TESTES 15, 16 E 17 – LAMBPM, LAMBPP E LAMBPO

Nestes últimos testes será analisado o reconhecimento de imagens baseado no método *Monogenic Binary Patterns* (MBP) com imagens computadas para a geometria facial APDI.

Este novo descritor é denominado de *Local Azimuthal Monogenic Binary Patterns* (LAMBp) e também terá componentes de magnitude, fase e orientação formando os descritores LAMBpm, LAMBpp e LAMBpo. Os resultados são apresentados separadamente para cada um dos componentes nas Tabelas 15, 16 e 17, respectivamente.

Tabela 15: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAMBpm calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LAMBpm				
Expressão	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	47,11	110,61	97,32	2,68
Contempt	49,53	126,57	98,51	1,49
Disgust	49,26	122,00	98,21	1,79
Fear	46,33	119,13	98,81	1,19
Happy	47,47	119,10	98,51	1,49
Phrase	45,57	117,67	96,13	3,57
Sad	47,03	117,50	98,81	1,19
Surprise	48,42	116,08	95,83	4,17
Média	47,59	118,58	97,77	2,20
Desvio padrão	±1,39	±4,60	±1,20	±1,15

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Fazendo-se o reconhecimento com imagens usando o descritor LAMBpm, obteve-se uma média de classificação correta de 97,77% \pm 1,20, conforme mostrado na Tabela 15. Pode-se observar que quando usadas as expressões *fear* e *sad* como censor, obteve-se um bom índice de classificação correta de 98,81% e a expressão *surprise* apresenta o menor índice de classificação correta, com 95,83%. Assim, conclui-se que o método MBP aplicado ao APDI e considerando o componente de magnitude, obtiveram bons resultados. Novas observações serão feitas nos testes seguintes para este descritor, porém com imagens considerando o componente de fase e orientação.

Tabela 16: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAMBPP calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LAMBPP				
Expressão	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	43,96	108,12	97,11	2,89
Contempt	45,94	109,13	97,22	2,78
Disgust	43,75	110,30	96,18	3,82
Fear	45,24	109,18	97,57	2,43
Happy	46,45	103,29	95,83	4,17
Phrase	46,93	103,86	93,06	6,94
Sad	45,49	109,35	97,22	2,78
Surprise	44,33	109,44	97,92	2,08
Média	45,26	107,83	96,51	3,49
Desvio padrão	±1,17	±2,70	±1,56	±1,56

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 16 mostra os resultados de reconhecimento com imagens a partir do descritor LAMBPP que mostrou um desempenho médio no reconhecimento de imagens próximo ao obtido para o descritor contendo o componente de magnitude ($96,51\% \pm 1,56$). Para este caso, usando-se a expressão *surprise* como censor, obteve-se o melhor índice de classificação correta com 97,92% de acerto e o resultado mais inferior foi obtido utilizando-se a expressão *phrase* que obteve 93,06% de acerto na classificação. A seguir serão mostrados os resultados para imagens do descritor LAMBPP considerando o componente de orientação.

Tabela 17: Resultados do reconhecimento de identidade para imagens do descritor LAMBPO calculados para amostras de imagens da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012)

LAMBPO				
Expressão	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções corretas (%)	Detecções incorretas (%)
Angry	43,00	111,32	72,32	27,68
Contempt	42,80	113,50	80,06	19,94
Disgust	41,16	109,44	68,75	31,25
Fear	42,04	115,26	77,38	22,62
Happy	44,25	118,60	74,70	25,30
Phrase	46,69	115,20	64,58	35,42
Sad	42,86	113,08	73,21	26,79
Surprise	43,27	112,63	67,56	32,44
Média	43,26	113,63	72,32	27,68
Desvio padrão	±1,78	±2,78	±5,17	±5,17

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 17 são mostrados resultados usando imagens a partir do descritor LAMBPO baseado no componente de orientação (LAMBPO). Tem-se que a expressão com melhor desempenho foi a *contempt* com um índice de classificação correta de 80,06% e a expressão que obteve o menor índice de classificação foi a *phrase* com 64,58%. Neste teste obteve-se um regular desempenho no reconhecimento de imagens com uma média de classificação correta de 72,32% ±5,17, bastante inferior aos descritores computados para os componentes de magnitude e fase, que apresentaram reconhecimento de mais de 95%.

Por fim, conclui-se que o método MBP calculado utilizando a representação da geometria facial APDI, dá origem a três novos descritores denominados LAMBPO que podem ser computados para os componentes de magnitude (LAMBPM), fase (LAMBPP) e orientação (LAMBPO). As Tabelas 15, 16 e 17 mostraram os resultados para cada um desses três tipos de imagens geradas e tem-se que o melhor descritor foi o LAMBPM com o maior índice médio de reconhecimento de imagem com 97,77% ±1,20, seguido pelo descritor LAMBPP com 96,51% ±1,56 de média e pelo LAMBPO com 72,32% ±5,17 de média. Vale salientar outra observação

a respeito dos componentes de magnitude, fase e orientação: nos testes utilizando o método MBP, tanto computado para DM como para o APDI, sempre imagens do componente de magnitude obtiveram resultados melhores seguidas pelas imagens do componente de fase e em último lugar as imagens do componente de orientação. De acordo com Sandbach, Zafeiriou, Pantic, (2012a), os recursos baseados em DM fornecem resultados superiores aos recursos computados para APDI, porém, combinados ao SIA, para os descritores LDMBP e LAMBP, apenas quando considerada o componente de orientação, o resultado foi de acordo com a referência citada. Quando se considera o componente de magnitude, obteve-se uma diferença de 0,11% e para o componente de fase a diferença foi próxima de 5%.

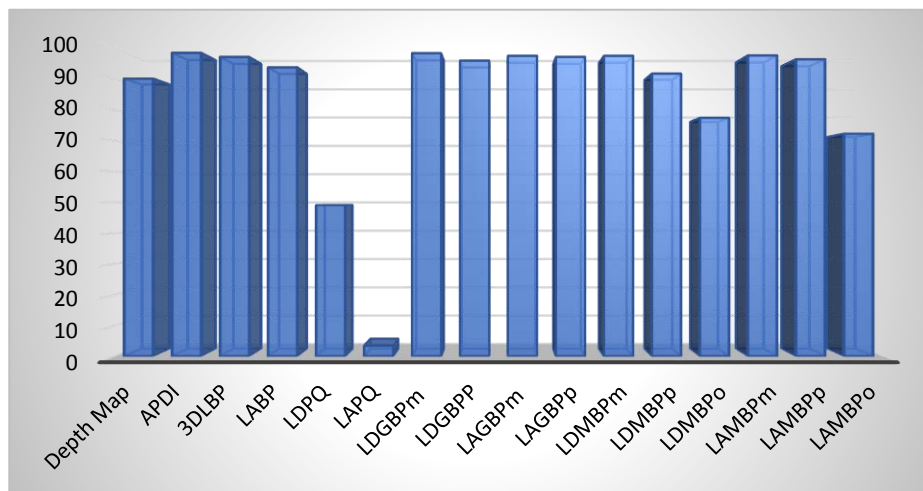
7.13 COMENTÁRIOS

Neste capítulo foram apresentados os testes e resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta e desenvolvida no Capítulo 5 (descritores) em conjunto com a estratégia tecnológica de reconhecimento baseada em SIA (Capítulo 3). O objetivo destes testes foi avaliar qual o melhor descritor e qual a melhor expressão para se realizar o reconhecimento de identidade, de forma a validar o desempenho da nova solução de reconhecimento de identidades baseada no SIA.

Para imagens retiradas da base de dados (4D FACIAL DATABASE, 2012), imagens a partir do descritor APDI e LDGBPm foram realizados dois tipos de testes, sendo: o primeiro teste utilizando todas as imagens das 8 expressões das 65 pessoas para gerar o diagnóstico na fase de monitoramento e o outro teste exclui-se as imagens utilizadas para a geração de sensores na fase de sensoriamento. Este tipo de teste foi realizado afim de se obter uma comparação dos dois resultados e conclui-se que pouco se diferem na taxa de detecções corretas dada em porcentagem (%). Foi utilizado esses três descritores pois os mesmos são os que fornecem resultados mais satisfatórios.

A Figura 52 mostra um gráfico da média de classificação correta para todos os descritores. Com este gráfico é possível visualizar de forma comparativa o desempenho de reconhecimento de identidade para cada um dos descritores.

Figura 52: Gráfico da média de classificações correta



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por fim conclui-se que a alternativa tecnológica baseada em SIA resulta em excelentes e encorajadores índices de reconhecimento de identidade quando aplicada a determinados descritores e, ainda, observa-se que o maior índice de classificação correta foi para o descritor APDI com $98,62\% \pm 0,71$ seguido pelo descritor LDGBPm com $98,51\% \pm 0,89$. A expressão que obteve maior índice de classificação correta quando usada como sensor foi *fear* para o descritor LDGBPm com 99,70% de acerto.

8 CONCLUSÃO

Nesta tese, foi apresentado um método de reconhecimento de identidade baseado na biometria facial, realizado usando-se um SIA fundamentado no ASN. Foram utilizadas imagens geradas a partir de técnicas de características de padrões binários em conjunto com representações da geometria facial 2D mais utilizadas na literatura.

O reconhecimento de identidade, a partir da face, vêm sendo amplamente utilizado e é considerado a grande essência das pesquisas atuais na área de sistemas inteligentes, por causa das inúmeras características particulares possíveis de serem identificadas por meio da biometria facial. Motivado pela vasta aplicabilidade da biometria facial, esta tese foi desenvolvida e pôde proporcionar uma série de contribuições, tais como: a partir das aplicações da representação da geometria facial mais importantes e utilizadas na literatura, a DM e a APDI, e suas aplicações combinadas às características de Padrões Binários foram desenvolvidos dezesseis novos descritores que possibilitaram a criação de uma nova base de dados contendo imagens obtidas a partir destes. De posse dessa nova base de dados proposta, foi possível utilizar a estratégia tecnológica do SIA, baseado no ASN, para realizar o reconhecimento de identidade e validar a eficiência e robustez do método.

O parâmetro utilizado no algoritmo, denominado como taxa de afinidade, tem grande importância por ser por meio dele que o sistema atesta se houve ou não o casamento entre as imagens, resultando assim no reconhecimento de identidade. Neste trabalho, foi utilizado o conceito desenvolvido por Bradley e Tyrrell (2002), garantindo uma maior eficiência e precisão na classificação das imagens. A taxa de afinidade foi, então, fixada em 80% para os testes e esse valor representa, na comparação entre duas imagens, a quantidade de pixels que devem ser iguais para que as imagens sejam classificadas. Assim, o casamento usado neste trabalho é denominado por *casamento parcial*, onde duas cadeias que estão sendo analisadas não necessitam serem iguais, ou seja, não existe a necessidade de que todas as posições dos padrões tenham o mesmo valor para se confirmar o casamento.

Os resultados foram gerados a partir de testes, tendo em vista três principais objetivos: avaliar quais os melhores descritores e as melhores expressões para se realizar o

reconhecimento de identidade e, por fim, validar o desempenho da nova solução de reconhecimento de identidades baseado no SIA.

Vale salientar que o método de reconhecimento de identidade baseado nos SIAs apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos, sendo que o conhecimento uma vez gerado não precisa ser zerado para realização de novos testes, ou seja, a qualquer momento pode-se adicionar novas imagens ao sistema para se realizar o reconhecimento de identidade sem ter de reiniciar ou zerar sua memória. O SIA não possui fase de treinamento, como o realizado nas redes neurais, além de utilizar um conjunto reduzido de informações para se realizar a classificação (conceito de detecção distribuída), gerando uma grande redução no tempo de processamento do sistema.

O método proposto apresentou excelentes resultados, obtendo um índice médio de acerto de 99,01% \pm 1,32 para as imagens retiradas diretamente da base de dados do ISR-UC. Além disso, ao utilizar a expressão *happy* na fase de censoriamento, obteve-se 99,80% de classificação correta. Com isso, observou-se a robustez e eficácia do sistema, impulsionando o uso do mesmo aplicado aos descritores baseados nas características de padrões binários em conjunto com as duas representações da geometria faciais 2D citadas anteriormente.

Por meio dos resultados, pôde-se observar que o melhor desempenho no reconhecimento de identidade utilizando a estratégia tecnológica proposta foi ao aplicar o descritor APDI, com um índice médio de reconhecimento de 98,62% \pm 0,71, seguido pelo descritor LDGBPm com 98,51% \pm 0,89 de reconhecimento. A expressão utilizada como censor que apresentou um maior índice de classificação correta foi a *fear*, sendo esta aplicada ao descritor LDGBPm, com 99,70% de acerto. Por meio dessa observação, pode-se concluir que de todos os descritores propostos, o que se baseia no método de Filtros de Gabor considerando o componente de magnitude e computado utilizando o DM obteve o melhor resultado.

Os descritores baseados no método *Local Phase Quantisers* foram os que obtiveram os resultados mais decepcionantes e os recursos baseados em DM forneceram uma classificação mais precisa que aqueles computados para o APDI, como observado por Sandbach, Zafeiriou, Pantic, (2012a). Esta observação se estende para todos os testes apresentados, exceto para aqueles em que se utilizam os descritores baseados no método *Monogenic Binary Patterns* considerando o componente de magnitude e de fase, onde se observou um maior índice de classificação ao se utilizar os recursos baseados em APDI.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o sistema baseado na estratégia tecnológica dos SIAs para a realização do reconhecimento de identidade apresentou robustez, precisão, segurança e confiabilidade. Além disso, vale ressaltar o excelente desempenho que o ASN apresentou na realização dos testes executados, possibilitando alcançar os objetivos propostos neste trabalho e revelando sua eficiência.

8.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A abordagem utilizada nesta tese é apenas uma das diversas possíveis de se aplicar os SIAs e o ASN. Diante dos resultados satisfatórios, obtidos na execução dos testes, que possibilitaram alcançar os objetivos propostos, algumas sugestões para a exploração desse estudo podem ser destacadas:

- Incorporação de outras estratégias dos SIAs, tal como Algoritmo de Célula Dendríticas (ACD)
- Investigar o uso de outras inteligências artificiais aplicadas a esta base de dados, tais como RNA;
- Aplicar ruídos nas imagens da fase de monitoramento, de forma a avaliar a sua capacidade de classificação mediante a distúrbios;
- Utilizar outros softwares, de preferência livre, para possíveis diminuições de tempo de sensoriamento e monitoramento, assim diminuindo o esforço computacional;
- Aplicar esta alternativa tecnológica de reconhecimento de identidade baseado nos SIAs em processos rotineiros, como, por exemplo, um sistema de segurança nas transações de ATM, nas quais o indivíduo insere o cartão na máquina e uma câmera capta uma imagem da pessoa e realiza o reconhecimento, identificando se é realmente a proprietária do cartão. Ainda como uma prospecção futurística, pode-se dizer que a utilização de cartões magnéticos será ultrapassada e não haverá necessidade da inserção do cartão na máquina, pois pela biometria facial, os caixas reconhecerão a pessoa e liberará as transações na conta da mesma. Esta aplicação pode ainda ser ampliada para outros segmentos, como, por exemplo, o controle de acesso a empresas e a computadores, vigilância privada, vigilância de aeroportos, identificação criminal, etc.;
- Aplicar o conceito de reconhecimento de padrões baseados nos SIAs para inúmeras

outras finalidades. Um exemplo é o reconhecimento de imagens de DNA's, que carregam consigo inúmeras informações genéticas, sendo possível também identificar anomalias causadoras de doenças;

- Ampliar os estudos da biometria facial, pois a mesma contém inúmeras informações a respeito da pessoa. Por exemplo, a tendência a determinadas doenças, como o Esquizofrenia, Autismo, Doença de Parkinson, Acidente Vascular Cerebral e Paralisia de Bell.

Como observado, a aplicação dos SIAs não se limita a engenharia. Dessa forma, é importante que se amplie seu estudo em todos os sentidos, permitindo grandes contribuições à sociedade, papel fundamental da comunidade científica.

REFERÊNCIAS

- 4D FACIAL Database. Identity Recognition using 4D-Facial Dynamics. Universidade de Coimbra, Institute of Systems and Robotics, 2012.
- ABBAS, A. K.; LICHTMAN, A. H. **Imunologia básica: funções e distúrbios do sistema imunológico**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 247 p.
- ABBAS, A. K.; LICHTMAN, A. H.; PILLAI, S. **Imunologia básica: funções e distúrbios do sistema imunológico**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013 336 p.
- ABBATTISTA, F.; DI GIOIA G.; DI SANTO G.; FARINELLI A. M. **An associative memory based on the immune networks**. In: 2nd. Online WORKSHOP ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2, 1996, Nagoya. **Workshop...** Nagoya: [s.n.], 1996.
- ADLEMAN, L. M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems. **Science**, Washington, v. 266, n. 5187, p. 1021-1024, 1994.
- AHMED, R.; SPRENT, J. Immunological memory. **The Immunologist**, Boston, v. 7, n. 1-2, p. 23-26, 1999.
- AHONEN, T.; HADID, A. Face description with local binary patterns: application to face recognition. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 28, n. 12, p. 2037–2041, 2006.
- AISU H.; MIZUTANI H. **Immunity-based learning-integration of distributed search and constraint relaxation**. In International Workshop on the Immunity-Based Systems (IMBS 96) part of International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'96), 1996.
- ALEX, M.; VASILESCU, O.; TERZOPOULOS, D. **Multilinear analysis of image ensembles: tensor faces**. In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION, Copenhagen, p. 447-460, 2002. Disponível em: < <http://www.cs.ucla.edu/~dt/papers/eccv02/eccv02.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2015.
- AMARAL, V. **Extração e comparação de características locais e globais para o reconhecimento automático de imagens de faces**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2011. Disponível em: < http://fei.edu.br/~cet/dissertacao_VagnerAmaral_2011.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2015.
- AMBADY, N.; ROSENTHAL, R. Thin slices of expressive behavior as predictors of interpersonal consequences: a meta-analysis. **Psychological Bulletin**, Washington, v. 111, n. 2, p. 256-274, 1992.
- BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary computation 1: basic algorithms and operators**. Bristol: Institute of Physics Publishing (IOP), Bristol and Philadelphia, 2000a.
- BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary computation 2: advanced algorithms and operators**. Bristol: Institute of Physics Publishing (IOP), Bristol and Philadelphia, 2000b.

- BALLET, P.; TISSEAU, J.; HARROUET, F. A Multiagent system to model an human humoral response. **IEEE International Conference On Systems, Man, And Cybernetics**, New York, v. 1, p. 357-362.
- BANHAM, M. R.; KATSAGGELOS, A. K. Digital image restoration. **IEEE Signal Processing Magazine**, Piscataway, v. 14, n. 2, p. 24-41, 1997.
- BERNASCHI, M.; CASTIGLIONE, F.; SUCCI, S. A Parallel simulator of the immune response. **Lecture Notes in Computer Science**, Secaucus, v. 1401, p. 163-172, 1998.
- BERRETTI, S.; AMOR, B. B.; DAOUDI, M.; BIMBO, A. D. 3D facial expression recognition using SIFT descriptors of automatically detected keypoints. **The Visual Computer**, Heidelberg, v. 27, p. 1021-1036, 2011.
- BESL, P.; MCKAY, N. A Method for Registration of 3-D Shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 14, n. 2, p. 239-256 1992.
- BONABEAU, E. W.; THERAULAZ, G. Why do we need artificial life? **Artificial Life**, Massachussets, v. 1, n. 3, p. 303-325, 1995.
- BOUGUET, J. Y. **Camera calibration toolbox**. December 2. ed. 2013. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ Last updated>. Acesso em: 20 ago. 2014.
- BRADLEY, D. W.; TYRRELL, A. M. Immunotronics -novel finite-state-machine architectures with built-in self-test using self-nonsel self differentiation. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 227-238, 2002.
- BROOKS, R. A.; MAES, P. (Ed.). Artificial Life IV. In: PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE SYNTHESIS AND SIMULATION OF LIVING SYSTEMS, 1, 1994, Cambridge. **Proceedings of the...** p. 130-139, Cambridge, USA, 1994.
- CAZANGI, R. R. **Uma proposta evolutiva para controle inteligente em navegação autônoma de robôs**. 2004. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- CHAUDHURI, K.; SAHA, S.; AZEEM, R.; BALACHANDRAN, S.; YU, S.; MAJUMDAR, N.; NINO, F. **Artificial immune systems: a bibliography**. Memphis: Cs Technical Report, Computer Science Department, The University of Memphis, 2007.
- COLORNI, A.; DORIGO, M.; MANIEZZO, V. Distributed optimization by ant colonies. In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE (ECAL-1991), 1, 1991, Paris. **Proceedings of the...** p. 134-142, Paris, FR, 199.
- COOTES T. F.; EDWARDS G. J.; TAYLOR C. J. Active appearance models. In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 2, 1998, Berlin. **Proceedings of the...** p. 484-498, Berlin, 1998.
- COUTINHO, A.; FORNI, L.; HOLMBERG, D.; IVARS, F.; VAZ, N. From an antigen-centered, clonal perspective of immune responses to an organism-centered, network perspective of autonomous activity in a self-referential immune system. **International Review**, Toronto, v. 79, p. 152-168, 1984.
- D'HAESELEER, P.; FORREST, S.; HELMAN, P. An Immunological Approach to Change Detection: Algorithms, Analisis and Implications. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE SYMPOSIUM ON SECURITY AND PRIVACY, 1996, Oakland. **Proceedings of the...** p. 110-119, Oakland, CA, 1996.

DARWIN, C.; WALLACE, A. R. **Evolution by natural selection**. Cambridge: Cambridge University Press, 1958.

DARWIN, C. **The origin of species by means of natural selection or the preservation of favored races in the struggle for life**. London: John Murray, 1859. (Reprinted as Penguin Classics, 1985).

DASGUPTA, D. Advances in artificial immune systems. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, New York, v. 1, n. 4, p. 40-49, 2006.

DASGUPTA, D. **Artificial immune systems and their applications**. New York: Springer-Verlag, 1998.

DASGUPTA, D.; CAO, Y.; YANG, C. An immunogenetic approach to spectra recognition. In: PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION (GECCO-1999), 1999, Orlando, **Proceedings of the...** p. 149-155, Orlando, USA, 1999.

DAUGMAN, J. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. **Journal of the Optical Society of America**, Washington, v. 2, p. 1160-1169, 1985.

DE BOER, R. J.; PERELSON, A. S. Size and connectivity as emergent properties of a developing immune network. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 149, p. 381-424, 1991.

DE CASTRO, L. N. **Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais**. 2001. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

DE CASTRO, L. N.; HRUSCHKA, E. R.; ROSATELLI, M. C.; CAMPELLO, R. J. G. B. Computação natural: uma breve visão geral. In: ANAIS DO WORKSHOP EM NANOTECNOLOGIA E COMPUTAÇÃO INSPIRADA NA BIOLOGIA, 1, 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UniSantos, 2004. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fengenhariadesistemas.com%2Fapostilas%2F7-introcompunat%2Fdownload&ei=JkkKUevvNYm-9QTah4CQDQ&usq=AFQjCNFwuLn4kZH04rWQD_FHcm5acPxLg&bvm=bv.41642243,d.eWU>. Acesso em: 22 mai. 2013.

DE CASTRO, L. N.; TIMMIS, J. **Artificial immune systems: a new computational intelligence approach**. New York: Springer, 2002. p. 357-360.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. An Evolutionary Immune Network for Data Clustering. In: IEEE BRAZILIAN SYMPOSIUM ON NEURAL NETWORKS, 2000, Rio de Janeiro. **Proceedings of the...** p. 84-89, Rio de Janeiro, BR, 2000c.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. An Immunological Approach to Initialize Feedforward Neural Network Weights. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND GENETIC ALGORITHMS (ICANNGA-2001), 2001, Prague. **Proceedings of the...** p. 126-129, Prague, CZ, 2001c.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. An Improving Pruning Technique with Restart for the Kohonen Self-Organizing Feature Map. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE

ON NEURAL NETWORKS (IJCNN - 1999), v.3, 1999, Washington. **Proceedings of the...** p. 1916-1919, Washington, USA, 1999b.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. Artificial immune systems: Part II – a survey of applications. Technical Report – RT DCA 02/00, February, 2000b. Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/lnunes/rtdca0200.pdf> Acesso em: 12 abr. 2014.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. Automatic determination of radial basis function: an immunity-based approach. **International Journal of Neural Systems**, Singapore, v. 11, p. 523-535, 2001e.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. Learning and optimization using the clonal selection principle. **IEEE Transaction on Evolutionary Computation**, Piscaway, v. 6, p. 239-251, 2002.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. the construction of a boolean competitive neural network using ideas from immunology. **International Journal of Neurocomputing**, London, v. 50, p. 51-85, 2003.

DE LA TORRE, F.; COHN, J. F. Facial Expression Analysis. In: MOESLUND, T. B.; HILTON, A.; KRÜGER, V.; SIGAL, L. (Ed.). **Visual analysis of humans: looking at people**. New York: Springer, 2011. p. 377-409.

DEATON, R.; GARZON, M.; ROSE, J. A.; MURPHY, R. C.; STEVENS, S. E.; FRANCESCHETTI, D. R. A DNA based artificial immune system for self-nonsel self discrimination. In: **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 1, p. 862-866, 1997.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics**, Piscataway, v. 26, n. 1, p. 29-41, 1996.

DUARTE, Y. A. S.; NASCIMENTO, M. Z.; DUARTE, S. C.; NEVES, L. A. Evaluating LBP and CLBP in classifying of mammograms lesions. In: WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL, 10, 2014, Uberlândia. **Workshop...** Uberlândia: [s.n.], 2014.

DUCHON, J. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. **Revue Française D'automatique, Informatique, Rechercher, Opérationnelle Analyse Numérique**, Paris, v. 10, n. 3, p. 5-12, 1976.

ENDO, S.; TOMA, N.; YAMADA, K. Immune algorithm for n-TSP. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v.4, p. 3844-3849, 1998.

EPSTEIN J.; AXTELL R. Disease processes. In: _____. **Growing artificial societies**. London: MIT Press, 1996. p. 138-152.

FARMER, J. D.; PACKARD, N. H.; PERELSON, A. S. The immune system, adaptation, and machine learning. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Amsterdam, v. 22, p. 187-204, 1986.

FELSBERG, M.; SOMMER, G. The monogenic signal. **IEEE Transactions on Signal Processing**, Piscataway, v. 49, p. 3136-3144, 2001.

FERREIRA, H. M. **Uso de ferramentas de aprendizado de máquina para prospecção de perdas comerciais em distribuição de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade

de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

FORREST, S.; HOFMEYR, S. A. John Holland's Invisible Hand: An Artificial Immune System. In: PRESENTED AT THE FESTSCHRIFT HELD HONOR OF JOHN HOLLAND, University of Michigan, 1999. Disponível em: <
<https://www.cs.unm.edu/~forrest/publications/festschrift.pdf>> Acesso em: 06 mai. 2014

FORREST, S.; HOFMEYR, S. A.; SOMAYAJI, A. Computer immunology. **Communications of the ACM**, New York, v. 40, n. 10, p. 88-96, 1997.

FORREST, S.; JAVORNIK, B.; SMITH, R. E. ; PERELSON, A. S. Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system. **Evolutionary Computation**, Cambridge, v. 1, n. 3, p.191-211, 1993.

FORREST, S.; PERELSON, A. S.; ALLEN, L.; CHERUKURI, R. Self-Nonself Discrimination in a Computer. In: IEEE COMPUTER SOCIETY SYMPOSIUM ON RESEARCH IN SECURITY AND PRIVACY, 1994, Oakland. **Proceedings of the...**p. 202-212, Oakland, USA, 1994.

FRANÇA, F. O. **Algoritmos bio-inspirados aplicados à otimização dinâmica**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GABOR, D. Theory of communication. **Proceeding of the Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part III: Radio and Communication Engineering**, Stevenage, v. 93, n. 26, p. 429-457, 1946.

GEIGER, A.; ROSER, M.; URTASUN, R. Efficient large-scale stereo matching. In: PROCEEDINGS OF THE ASIAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 10, Queenstown. **Proceedings of the...** Hiedelberg: Springer Berlin Hiedelberg, 2011. v. 6492, p. 25-38.

GÓMEZ, A. M. **Sistema de visão artificial para identificação do estado nutricional de plantas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GREENSMITH, J. **The dendritic cell algorithm**. 2007. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Nottingham, Nottingham, 2007

GREENSMITH, J.; AICKELIN, U. Dendritic cells for syn scan detection. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION (GECCO'07), 9, 2007, New York. **Proceedings of the...** New York: ACM, 2007. p. 49–56.

GUDWIN, R. R. **Contribuições ao estudo matemático de sistemas inteligentes**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

GUNES, H.; PANTIC, M. Automatic, dimensional and continuous emotion recognition. **International Journal Synthetic Emotions**, Hershey, v. 1, n. 1, 68–99, 2010.

HAJELA, P.; LEE, J. Constrained genetic search via schema adaptation: an immune network solution. **Structural Optimization**, Heidelberg, v. 12, n. 1, p. 11-15, 1996.

HAJELA, P.; YOO, J. S. Immune network modelling in design optimization. In: CORNE, D.; DORIGO, M.; GLOVER, F. (Ed.). **New ideas in optimization**. London: McGraw Hill, 1999. p. 203-215.

HAJELA, P.; YOO, J.; LEE, J. GA based simulation of immune networks - applications in structural optimization. **Journal of Engineering Optimization**, Hershey, v. 29, p. 131-149, 1997.

HART, E.; ROSS, P. An immune system approach to scheduling in changing environments. In: PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO'99), 1999b. p. 1559-1566. Disponível em: <<http://www.cs.bham.ac.uk/~wbl/biblio/gecco1999/RW-723.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2014.

HART, E.; ROSS, P. The evolution and analysis of a potential antibody library for use in job-shop scheduling. In: CORNE, D.; DORIGO, M.; GLOVER, F. (Ed.). **New ideas in optimization**. London: McGraw Hill, 1999a p. 185-202.

HART, E.; ROSS, P.; NELSON, J. Producing robust schedules via an artificial immune system. In: The IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION PROCEEDINGS, IEEE WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, 1998, Anchorage. **Proceedings of the...** Anchorage: IEEE, 1998. p. 464-469.

HAYKIN S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. 2. ed. New York: Prentice Hall, 1999.

HIGHTOWER R. R.; FORREST, S.; PERELSON, A. S. The evolution of emergent organization in immune system gene libraries. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC ALGORITHMS, 6, 1995, Morgan Kaufmann. **Proceedings of the...** Morgan Kaufmann: [s.n], 1995. p. 344-350, 1995.

HOFFMANN, G. W. A neural network model based on the analogy with the immune system. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 122, p. 33-67, 1986.

HOFFMANN, G. W.; BENSON, M. W.; BREE, G. M.; KINAHAN, P. E. A Teachable neural network based on an unorthodox neuron. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Amsterdam, v. 22, n. 1-3, p. 233-246, 1986.

HOFMEYR S. A. **An overview of the immune system. Tutorial sobre imunologia computacional**, 1997. Disponível em: <<http://www.cs.unm.edu/~immsec/html-imm/immune-system.html>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

HOFMEYR S. A.; FORREST, S. Immunity by design: an artificial immune system. In: PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO'99), 1999. **Proceedings of the...** p. 1289-1296, 1999. Disponível em: <<http://www.cs.unm.edu/~immsec/publications/gecco-steve.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2015.

HOFMEYR, S. A. An interpretative introduction to the immune system. In: COHEN, I.; SEGEL, L. A. (Ed.). **Design principles for the immune system and other distributed autonomous systems**. Oxford: Oxford University Press, 2000.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. 5 ed.. Cambridge: MIT Press, 1998.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: Ann Arbor, 1975.

HUANG, D.; ARDABILIAN, M.; WANG, Y.; CHEN, L. A novel geometric facial representation based on multi-scale extended local binary patterns. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC FACE & GESTURE RECOGNITION AND WORKSHOPS, 2011, Santa Barbara. **Proceeding of the...** Santa Barbara: IEEE, 2011. p. 1–7.

HUANG, Y.; WANG, Y.; TAN, T. Combining statistics of geometrical and correlative features for 3D face recognition. In: PROCEEDINGS OF THE BRITISH MACHINE VISION CONFERENCE, 2006. **Proceedings of the...** 2006. p. 879–888. Disponível em: <<http://www.macs.hw.ac.uk/bmvc2006/papers/392.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2014.

HUNT, J. E.; COOKE, D. E. Learning using an artificial immune system. **Journal of Network and Computer Applications: Special Issue on Intelligent Systems: Design and Application**, London, v. 19, p. 189-212, 1996.

HUNT, J. E.; COOKE, D. E.; HOLSTEIN, H. Case memory and retrieval based on the immune system. **Lecture Note in Artificial Intelligence: Case-Based Reasoning Research and Development**, v. 1010, p. 205 -216, 1995. Disponível em: <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-60598-3_19#page-1>. Acesso em: 06 abr. 2015.

HUNT, J. E.; FELLOWS, A. Introducing an immune response into a CBR system for data mining. In: PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE AND PUBLISHED AS RESEARCH AND DEVELOPMENT IN EXPERT SYSTEMS XIII (BCS ESG -1996). p. 35-42, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.

HUNT, J.; TIMMIS, J.; COOKE, D.; NEAL, M.; KING, C. JISYS: The development of an artificial immune system for real world applications. In: DASGUPTA, D. (Ed.). **Artificial immune systems and their applications**. London: Springer-Verlag, 1999. p. 157-186.

ISHIDA, Y. Agent-based architecture of selection principle in the immune system. In: PROCEEDINGS OF THE WORKSHOP ON IMMUNITY-BASED SYSTEMS (IMBS-1996), 1996, Kyoto. **Proceedings of the...** p. 92-104, Kyoto, JM, 1996b.

ISHIDA, Y. An immune network model and its applications to process diagnosis. **Systems and Computers in Japan**, Hoboken, v. 24, n. 6, p. 646-651, 1993.

ISHIDA, Y. The Immune system as a self-identification process: a survey and a proposal. In: PROCEEDINGS OF THE WORKSHOP NOTES-WORKSHOP 4: IMMUNITY-BASED SYSTEMS, INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIAGENT SYSTEMS/INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODELS FOR SOFTWARE ARCHITECTURE (IMBS-1996), 1996, Tokyo. . **Proceedings of the...** p. 2-13, Tokyo, JM, 1996a.

JANEWAY, C. A.; TRAVERS, P.; WALPORT, M.; CAPRA, J. D. **Imunobiologia: o sistema imunológico na saúde e na doença**. 4. ed. São Paulo: Artes Médicas, 2000.

JERNE, N. K. Towards a network theory of the immune system. **Annals of Immunology**, Poznan, v. 125C, p. 373-389, 1974.

JIANG, B.; VALSTAR, M. F.; PANTIC, M. Action unit detection using sparse appearance descriptors in space-time video volumes. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON

AUTOMATIC FACE & GESTURE RECOGNITION, 2011, Santa Barbara. **Proceedings of the...** Santa Barbara: IEEE, 2011. p. 314-321.

KAZHDAN, M.; BOLITHO, M.; HOPPE, H. Poisson surface reconstruction. In: PROCEEDINGS OF THE EUROGRAPHICS SYMPOSIUM ON GEOMETRY PROCESSING, 4, 2006. p. 61–70, 2006. Disponível em: < <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/poissonrecon.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

KEPHART, J. O. A biologically inspired immune system for computers. In: BROOKS, A. R.; MAES, P. (Ed.). **Artificial life IV**: proceedings of the fourth international workshop on the synthesis and simulation of living systems. Cambridge: MIT Press, 1994. p. 130-139.

KIM, J.; BENTLEY, P. **Negative selection and niching by an artificial immune system for network intrusion detection**. In: PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO'99), 1998 p. 149-158. Disponível em:< <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.6381&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

KLEIN, J. **Immunology**. London: Blackwell Scientific Publications, 1990.

LANGTON, C. G. (Ed.) **Artificial life an overview**. Cambridge: The MIT Press, 1995.

LEMAIRE, P.; AMOR, B. B.; ARDABILIAN, M.; CHEN, L.; DAOUDI, M. Fully automatic 3D facial expression recognition using a regionbased approach. In: PROCEEDINGS OF THE 2011 JOINT ACM WORKSHOP ON HUMAN GESTURE AND BEHAVIOR UNDERSTANDING (J-HGBU '11), 2011, New York. **Proceedings of the...** New York: ACM, 2011. p. 53–58.

LI, X.; RUAN, Q.; MING, Y. 3D Facial expression recognition based on basic geometric features. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING, 10, 2010, Beijing. **Proceedings of the...** Beijing: IEEE, 2010. p. 1366 –1369.

LIAO S.; CHUNG, A. Face recognition with salient local gradient orientation binary patterns. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2009. p. 3317 – 3320. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5413904>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R. Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica usando o algoritmo de seleção negativa. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS – BRACIS-2012, Curitiba. **Encontro Nacional de Inteligência Artificial**. Curitiba: PUC, 2012. p. 1-12.

LIMA, F. P. A. **Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada em sistemas imunológicos artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

LIMA, F. P. A.; BARROS, A. C.; MINUSSI, C. R. Detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando sistemas imunológicos artificiais. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 19, 2012, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFCG, 2012. p. 3380-3387.

MAALEJ, A.; AMOR, B. B.; DAOUDI, M.; SRIVASTAVA, A.; BERRETTI, S. Local 3D shape analysis for facial expression recognition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

PATTERN RECOGNITION, 2010, Stanbul. **Proceedings of the...** Stanbul: IEEE, 2010. p. 4129–4132.

MAALEJ, A.; AMOR, B. B.; DAOUDI, M.; SRIVASTAVA, A.; BERRETTI, S. Shape analysis of local facial patches for 3D facial expression recognition. **Pattern Recognition**, Amsterdam, v. 44, n. 8, p. 1581–1589, 2011.

MACHADO, R. B. **Uma abordagem de detecção de intrusão baseada em sistemas imunológicos artificiais e agentes móveis**. 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MALLAT, S. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing**, Piscataway, v. 37, n. 12, p. 2091-2110, 1989.

MANJUNATH, B. S.; MA, W. Y. Texture features for browsing and retrieval of image data. **IEEE Transactions on. Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 18, n. 8, p. 837-842, 1996.

MATUSZEWSKI, B. J.; QUAN, W.; SHARK, L-K.; McLOUGHLIN, A. S.; LIGHTBODY, C. E.; EMSLEY, H. C. A.; WATKINS, C. L. HI4D-ADSIP 3-D dynamic facial articulation database. **Image and Vision Computing**, Amsterdam, v. 30, n. 10, p. 713-727, 2012.

McCOY, D. F.; DEVARALAN, V. Artificial immune systems and aerial image segmentation. **International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 1, p. 867-872, 1997.

MELDA, D. C. **Doenças autoimunes**. São Paulo. 2013. Disponível em: <
<http://www.infoescola.com/saude/doencas-auto-imunes/>>. Acesso em: 02 set 2014.

MOHLER, R. R.; BRUNI, C.; GANDOLFI, A. A systems approach to immunology. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 68, n. 8, p. 964-990, 1980.

MPIPERIS, I.; MALASSIOTIS, S.; STRINTZIS, M. Bilinear decomposition of 3D face images: an application to facial expression recognition. In: WORKSHOP ON IMAGE ANALYSIS FOR MULTIMEDIA INTERACTIVE SERVICES (WIAMIS 2009), 2009, 10, London. **Proceedings of the...** London: IEEE, 2009. p. 1-4.

MPIPERIS, I.; MALASSIOTIS, S.; STRINTZIS, M. Bilinear elastically deformable models with application to 3D face and facial expression recognition. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC FACE & GESTURE RECOGNITION, 2008, 8, Amsterdam. **Proceedings of the...** Amsterdam: IEEE, 2008. p. 1–8.

MPIPERIS, I.; MALASSIOTIS, S.; STRINTZIS, M. Bilinear models for 3-D face and facial expression recognition. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 498–511, 2008b.

MUSCI, M.; FEITOSA, R. Q.; VELLOSO, M. L.; NOVACK, T.; COSTA, G. O. An evaluation of texture descriptors based on local binary patterns for classifications of remote sensing images. **Boletim de Ciencias Geodésicas**, Curitiba, v. 17, n. 4, p 549-570, 2011.

NANNI, L.; LUMINI, A.; BRAHNAM, S. Local binary patterns variants as texture descriptors for medical image analysis. **Artificial Intelligence in Medicine**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 117–125, 2010.

NICOLAOU, M. A.; GUNES, H.; PANTIC, M. Continuous prediction of spontaneous affect from multiple cues and modalities in valence-arousal space. **IEEE Transactions on Affective Computing**, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 1949-3045, 2011.

NIKOLAEV, N. I.; IBA, H.; SLAVOV, V. Inductive genetic programming with immune network dynamics. In: KINNEAR, K. E. (Ed.). **Advances in genetic programming**. London: MIT Press, 1999. p. 355-376.

NOSSAL, G. J. V. Life, death and the immune system. **Scientific American**, New York, v. 269, n. 3, p. 21-30, 1993.

OCEGUEDA, O.; FANG, T.; SHAH, S. K.; KAKADIARIS, I. Expressive maps for 3D facial expression recognition. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION WORKSHOPS, 2011. **Proceedings of the...** p. 1270–1275. Disponível em: <http://cbl.uh.edu/pub_files/06130397.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2015.

OJALA, T.; PIETIKÄINEN, M.; HARWOOD, D. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions. **Pattern Recognition**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 51–59, 1996.

OJALA, T.; PIETIKÄINEN, M.; MÄENPÄÄ, T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 24, n. 7, p. 971–987, 2002.

OJANSIVU, V.; HEIKKILÄ, J. Blur insensitive texture classification using local phase quantisers. **Image and Signal Processing**, v. 5099, p. 236–243, 2008.

OKAMOTO, T.; ISHIDA, Y. A distributed approach to computer virus detection and neutralization by autonomous and heterogeneous agents. In: PROCEEDINGS OF THE 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTONOMOUS DECENTRALIZED SYSTEMS (ISADS'99). INTEGRATION OF HETEROGENEOUS SYSTEMS, 4, 1999, Tokyo. **Proceedings of the...** Tokyo: IEEE, 1999a. p. 328-331.

OKAMOTO, T.; ISHIDA, Y. Multiagent approach against computer virus: an immunity-based system. In: PROCEEDINGS OF THE 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 1999, Tokyo. **Proceedings of the...** p. 69-72, Tokyo, JM, 1999b.

OPPENHEIM, A. V.; LIM, J. S. The importance of phase in signals. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 69, n. 5, p. 529–541, 1981.

OPREA, M.; FORREST, S. How the immune system generates diversity: pathogen space coverage with random and evolved antibody libraries. In: PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO'99), v. 2, p. 1651-1656, 1999. Disponível em: <<http://www.santafe.edu/media/workingpapers/99-02-014.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

OPREA, M.; FORREST, S. Simulated evolution of antibody gene libraries under pathogen selection. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 4, p. 3793-3798, 1998.

PANTIC, M.; NIJHOLT, A.; PENTLAND, A.; HUANG, T. Human-centred intelligent human– computer interaction (HCI²): how far are we from attaining it? **International Journal Autonomous and Adaptive Communications Systems**, Bucks, v. 1, n. 2, p. 168–187, 2008.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. A. C. **An introduction to fuzzy sets analysis and design**. London: MIT Press, 1998.

PEREIRA, A. M. de S.; CAMPOS, T. J.; VON ZUBEN, F. J. **Sistemas imunológicos artificiais**: Revisão Bibliográfica. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação – FEEC, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2001.

PERELSON, A. S.; HIGHTOWER, R.; FORREST, S. Evolution and somatic learning of V-region genes. **Research in Immunology**, Issy les Moulineaux, v. 147, p. 202-208, 1996.

PERELSON, A. S.; WEISBUCH, G. Immunology for physicists. **Reviews of Modern Physics**, Hoboken, v. 69, p. 1219-1267, 1997.

POTTER, M. A.; DE JONG K. A. The coevolution of antibodies for concept learning. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE, 5, 1998, **Proceedings of the...** 1998. p. 530-539. Disponível em: <<http://cs.gmu.edu/~mpotter/pubs/ppsn98.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

RAMANATHAN, S.; KASSIM, A.; VENKATESH, Y. V.; WAH, W. S. Human facial expression recognition using a 3D morphable model. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2006, Atlanta. **Proceedings of the...** Atlanta: IEEE, 2006. p. 661-664.

RAPOSO, C. **Identity recognition using 4D facial dynamics**. Coimbra: Universidade de Coimbra/Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2013. (Trabalho de disciplina de Doutorado da Universidade de Coimbra).

RENSBERGER, B. In Self-Defense. In: _____. **Life Itself**. Oxford: Oxford University Press, 1996. p. 212-228.

ROSATO, M.; CHEN, X.; YIN, L. Automatic registration of vertex correspondences for 3D facial expression analysis. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMETRICS: Theory, Applications and Systems, 2008, Arlington. **Proceedings of the...** Arlington: IEEE, 2008. p. 1-7.

ROSENFELD, A.; WESZKA, J. S. Picture recognition. Digital Pattern Recognition, In: DIGITAL PATTERN RECOGNITION COMMUNICATION AND CYBERNETICS, 1980, New York. **Proceedings of the...** New York: Springer-Verlag, 1980. v. 10, p. 135-166.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence a modern approach**. New York: Prentice Hall, 1995.

SANDBACH, G.; ZAFEIRIOU, S.; PANTIC, M. Binary pattern analysis for 3D facial action unit detection. In: PROCEEDINGS OF THE BRITISH MACHINE VISION CONFERENCE (BMVC 2012), 2012a. **Proceedings of the...** 12 p. 2012. Disponível em: <<http://ibug.doc.ic.ac.uk/media/uploads/documents/sandbach2012binary.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

SANDBACH, G.; ZAFEIRIOU, S.; PANTIC, M. Local normal binary patterns for 3D facial action unit detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING (ICIP 2012), 19, 2012, Orlando. **Proceedings of the...** Orlando: IEEE, 2012b. p. 1813-1816.

SANDBACH, G.; ZAFEIRIOU, S.; PANTIC, M.; RUECKERT, D. A dynamic approach to the recognition of 3D facial expressions and their temporal models. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC FACE & GESTURE

RECOGNITION AND WORKSHOPS, 2011, Santa Barbara. **Proceedings of the...** Santa Barbara: IEEE, 2011. p. 406-413.

SANDBACH, G.; ZAFEIRIOU, S.; PANTIC, M.; RUECKERT, D. Recognition of 3D facial expression dynamics. **Image and Vision Computing**, Amsterdam, v. 30, n. 10, p. 762-773, 2012a.

SANDBACH, G.; ZAFEIRIOU, S.; PANTIC, M.; YIN, L. Static and dynamic 3D facial expression recognition: A comprehensive survey. **Image and Vision Computing**, Amsterdam, v. 30, n. 10, p. 683-697, 2012b.

SAVRAN, A.; SANKUR, B. Automatic detection of facial actions from 3D data. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION WORKSHOPS, 12, Kyoto. **Proceeding of the...** Kyoto: IEEE, 2009. p. 1993-2000.

SAVRAN, A.; SANKUR, B.; BILGE, M. T. Comparative evaluation of 3D vs. 2D modality for automatic detection of facial action units. **Pattern Recognition**, Amsterdam, v. 45, n. 2, p. 767-782, 2012.

SCHWARTZ, R. S.; BANCHEREAU, J. Immune tolerance. **The Immunologist**, Boston, v. 4/6, p. 211-218, 1996.

SCROFERNEKER, M. L.; POHLMANN, P. R. **Imunologia básica e aplicada**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1998.

SHA, T.; SONG, M.; BU, J.; CHEN, C.; TAO, D. Feature level analysis for 3D facial expression recognition. **Neurocomputing**, Amsterdam, v. 74, n. 12-13, p. 2135-2141, 2011.

SHAN, C.; GONG, S.; McOWAN, P. W. Facial expression recognition based on local binary patterns: a comprehensive study. **Image and Vision Computing**, Amsterdam, v. 27, n. 6, p. 803-816, 2009.

SILVA, G. C. **Detecção de intrusão em redes de computadores: algoritmo imunoinspirado baseado na teoria do perigo e células dendríticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SLAVOV, V.; NIKOLAEV, N. I. Immune network dynamics for inductive problem solving. **Lectures Lecture Notes in Computer Science**, Heidelberg, v. 1498, p. 712-721, 1998.

SMITH, R. E.; FORREST, S.; PERELSON, A. S. Searching for diverse, cooperative populations with genetic algorithms. **Evolutionary Computation**, Cambridge, v. 1, p. 127-149, 1993.

SMITH, W. A. P.; HANCOCK, E. R. Recovering facial shape using a statistical model of surface Normal direction. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 28, n. 12, p. 1914-1930, 2006.

SOMAYAJI, A.; HOFMEYR, S.; FORREST, S. Principles of a computer immune system. In: PROCEEDINGS OF THE NEW SECURITY PARADIGMS WORKSHOP, 1997, New York. **Proceedings of the...** New York: ACM, 1997. p. 75-82.

SOYEL, H.; DEMIREL, H. Optimal feature selection for 3D facial expression recognition using coarse-to-fine classification. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, Kavaklıdere, v. 18, n. 6, p. 1031-1040, 2010.

SOYEL, H.; DEMIREL, H. Facial expression recognition using 3D facial feature distances. **Image Analysis and Recognition**, p. 831–838, 2007. Disponível em: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/5175.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

STORB, U. Progress in understanding the mechanism and consequences of somatic hypermutation. **Immunological Reviews**, Malden, v. 162, p. 5-11, 1998.

SUZUKI, J.; YAMAMOTO, Y. iNet: an extensible framework for simulating immune network. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 1, p. 119-124, 2000.

SUZUKI, J.; YAMAMOTO, Y. The reflection pattern in the immune system. In: PROCEEDINGS OF THE OOPSLA'98, WORKSHOP ON NON-SOFTWARE EXAMPLES OF SOFTWARE ARCHITECTURE, 1998. **Proceedings of the...** Disponível em: <<http://wenku.baidu.com/view/f54881c0d5bbfd0a79567394.html>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

TAKALA, V.; AHONEN, T.; PIETIKÄINEN, M. Block-based methods for image retrieval using local binary patterns. In: IMAGE ANALYSIS: 14TH SCANDINAVIAN CONFERENCE, 14, 2005, Heidelberg. **Proceedings of the...** Heidelberg: Springer Berlin, 2005. v. 3540, p. 882–891.

TAYLOR, C.; JEFFERSON, D. Artificial life as a tool for biological inquiry. In: LANGTON, C. G. (Ed.). **ArtificialLife an overview**. Cambridge: The MIT Press, 1995. p. 1-13.

TIMMIS, J. I. **Artificial immune systems: a novel data analysis technique inspired by the immune network theory**. 2000. Thesis (Doctor of Philosophy of the University of Wales) - Department of Computer Science, University of Wales, Aberystwyth, 2000.

TIMMIS, J.; NEAL, M.; HUNT, J. An artificial immune system for data analysis. **Biosystems**, Shannon, v. 55, n. 1-3, p. 143-150, 2000.

TIMMIS, J.; NEAL, M.; HUNT, J. Data analysis using artificial immune systems, cluster analysis and kohonen networks: some comparisons. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 3, p. 922-927, 1999.

TIMO, A.; ABDENOUR, H.; MATTI, P. Face recognition with Local Binary Patterns. In: PAJDLA, T.; MATAS, J. **Computer Vision – ECCV 2004**. Heidelberg: Springer Berlin, v. 3021, p. 469-481, 2004.

TIZARD, I. R. **Immunology an introduction**. 4. ed. New York: Saunders College Publishing, 1995.

TOMA, N.; ENDOH, S.; YAMADA, K. Immune algorithm with immune network and mhc for adaptive problem solving. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 4, p. 271-276, 1999.

VENKATESH, Y.; KASSIM, A.; MURTHY, O. Resampling approach to facial expression recognition using 3D meshes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 2010, Stanbul. **Proceedings of the...** Stanbul: IEEE, 2010. p. 3772–3775.

VERTOSICK, F. T.; KELLY, R. H. Immune network theory: a role for parallel distributed processing. **Immunology**, Chichester, v. 66, p. 1-7, 1989.

VERTOSICK, F. T.; KELLY, R. H. The immune system as a neural network: a multi-epitope approach. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 150, n. 2, p. 225-237, 1991.

VINCIARELLI, A.; PANTIC, M.; HEYLEN, D.; PELACHAUD, C.; POGGI, I.; D'ERICCO, F.; SCHROEDER, M. Bridging the gap between social animal and unsocial machine: a survey of social signal processing. **IEEE Transactions on Affective Computing**, Piscataway, v. 3, p. 69-87, 2012.

VRETOS, N.; NIKOLAIDIS, N.; PITAS, I. 3D facial expression recognition using Zernike moments on depth images. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 18, 2011, Brussels. **Proceedings of the...** Brussels: IEEE, 2011. p. 773 – 776.

WANG, J.; YIN, L.; WEI, X.; SUN, Y. 3D facial expression recognition based on primitive surface feature distribution. **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, Piscataway, v. 2, p. 1399–1406, 2006.

WESZKA, J. S.; DYER, C. R.; ROSENFELD, A. A comparative study of texture measures for terrain classification. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. SMC-6, n. 4, p. 269-285, 1976.

WIERZCHON, S. T. Discriminative Power of the Receptors Activated by k-Contiguous Bits Rule. **Journal of Computer Science and Technology**, La Plata, v. 1, n. 3, p. 1-13, 2000a.

WIERZCHON, S. T. Generating Optimal Repertoire of Antibody Strings in an Artificial Immune System. In: KLOPOTEK, M.; MICHALEWICZ, M.; WIERZCHON, S. T. (Ed.). **Intelligent information systems**. Heidelberg: Physica-Verlag, 2000b. v. 4, p. 119-133.

XIE, S.; SHAN, S.; CHEN, X.; GAO, W. V-LGBP: Volume based local Gabor binary patterns for face representation and recognition. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 19, 2008, Amsterdam. **Proceedings of the...** Amsterdam: IEEE, 2008. p. 1–4.

YANG, M.; ZHANG, L.; ZHANG, D. Monogenic binary pattern (MBP): a novel feature extraction and representation model for face recognition. In: PROCEEDINGS OF THE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 20, 2010. p. 2680–2683. **Proceedings of the...** Disponível em: <
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5596004>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

ZENG, Z.; PANTIC, M.; ROISMAN, G. I.; HUANG, T. S. A survey of affect recognition methods: audio, visual, and spontaneous expressions. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 31, p. 39-58, 2009.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 22, p. 1330–1334, 2000.

ZHANG, B.; SHAN, S.; CHEN, X.; GAO, W. Histogram of gabor phase patterns (HGPP): a novel object representation approach for face recognition. **IEEE Transactions on Image Processing**, Piscataway, v. 16, p. 57-68, 2007.

ZHANG, W.; SHAN, S.; GAO, W.; CHEN, X.; ZHANG, H. Local gabor binary pattern histogram sequence (LGBPHS): a novel non-statistical model for face representation and recognition. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 2005, [S.l.]. **Proceedings of the...** [s.n.]: IEEE, 2005. v. 1, p. 786-791.

ZHANG, W.; SHAN, S.; QING, L.; CHEN, X.; GAO, W. Are gabor p-hases really useless for face recognition? In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON

PATTERN RECOGNITION, 2006a. p. 606-609. Disponível em: <
<http://www.jdl.ac.cn/user/xlchen/Paper/ICPR06n.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2015.

ZHAO, G.; PIETIKAINEN, M. Dynamic texture recognition using local binary patterns with an application to facial expressions. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 29, n. 6, p. 915–928, 2007.

ZHAO, X.; DI HUANG, E.D.; CHEN, L. Automatic 3D facial expression recognition based on a bayesian belief net and a statistical facial feature model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION (ICPR), 20, 2010, Istanbul. **Proceedings of the...** Istanbul: IEEE, 2010. p. 3724–3727.

ZINKERNAGEL, R. M.; KELLY, J. How Antigen Influences Immunity. **The Immunologist**, Boston, v. 4, n. 5, p. 114-120, 1997.

ANEXO A – ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

Visando facilitar a leitura desta pesquisa, são apresentados, neste anexo, a anatomia do SIB e os conceitos que servem de base teórica para entender a estrutura e anatomia do SIB

Todos os dados e conceitos apresentados neste anexo foram retirados e adaptados dos seguintes livros e trabalhos:

- (ABBAS; LICHTMAN; PILLAI, 2013), disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=kNRgMJELID0C&printsec=frontcover&dq=livro+imunologia+celular+e+molecul ar+pdf&hl=en&sa=X&ei=9GEyUbDcOqbZ0wG9nYC4Ag&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>. Acessado em: 8 de nov. de 2014.
- (ABBAS; LICHTMAN, 2007), disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=Xucz-MuYsOgC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acessado em: 8 de nov. de 2014.
- (De CASTRO, 2001), disponível em: <http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes_dout/tese/cap_2.pdf>. Acessado em: 8 de nov. de 2014.
- (MACHADO, 2005), disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~bosco/grupo/MestradoRenato.pdf>>. Acessado em: 8 de nov. de 2014.
- (LIMA, 13), disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/fernando-parra-dos-anjos-lima_finalpdf>. Acessado em: 8 de nov. de 2014.

E ainda, como citado anteriormente, os conceitos biológicos são facilmente encontrados na literatura especializada, bem como livros de biologia que abordam especificamente o SIB e em trabalhos relacionados com a aplicação dos SIAs.

A.1 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS E ELEMENTOS CONSTITUINTES DA ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

O SIB é a principal barreira contra as infecções, com capacidade de realizar dois tipos de respostas. A resposta rápida e efetiva contra os patógenos invasores, dotado de uma anatomia composta por diversas camadas com funções específicas, de natureza congênita, com uma capacidade limitada em diferenciar agentes infecciosos externos, tendo uma reação semelhante contra a maior parte dos agentes infecciosos, denominado de sistema imune inato. E o outro tipo de resposta igualmente eficaz, porém mais lenta e duradoura, e com capacidade de realizar discriminações específicas de agentes externos, proporcionando memória imunológica e produção de respostas especializadas, denominado por sistema adaptativo (De CASTRO, 2001).

Assim, quando houver um primeiro contato com algum agente infeccioso desconhecido pelo organismo, ocorrerá o aprendizado que será armazenado em forma de memória imunológica, proporcionando uma resposta mais rápida e eficaz em um segundo contato com o mesmo agente (MACHADO, 2005).

Desta forma, pode-se dizer que as células do sistema imunológico inato são as células responsáveis pelo combate contra uma ampla variedade de patógenos, atuando igualmente para todos os indivíduos normais, sem a necessidade de uma prévia exposição aos patógenos. No sistema imunológico inato existem os granulócitos e os macrófagos, sendo os granulócitos, ou leucócitos polimorfonucleares, de um grupo de células com núcleos multilobulados os quais contêm grânulos citoplasmáticos preenchidos com elementos químicos (enzimas). Os macrófagos possuem a capacidade de ingerir e digerir vários microorganismos e partículas antigênicas. Os macrófagos também são responsáveis por apresentar antígenos a outras células, denominados de célula apresentadora de antígeno (APC – antigen presenting cells). Os granulócitos se subdividem em três classes: os neutrófilos com a capacidade de ingerir patógenos, sendo estes os elementos celulares mais numerosos e importantes da resposta imunológica inata; os eosinófilos que são importantes principalmente na defesa contra infecções por parasitas; e os basófilos ainda não é bem conhecida a sua função (JANEWAY et al. 2000).

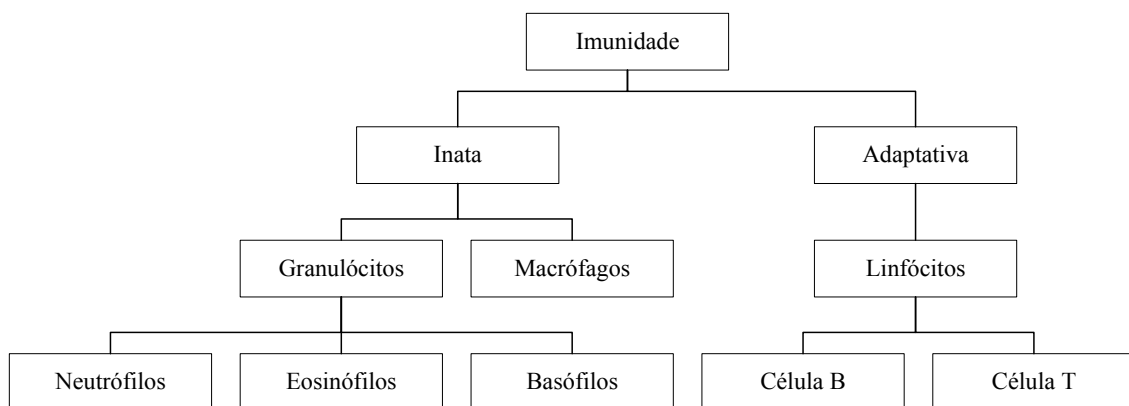
Na resposta imune adaptativa, ou seja, a produção de anticorpos a um determinado

agente infeccioso, os anticorpos são produzidos pelos linfócitos B (ou células B) em resposta a infecções, e sua presença em um indivíduo reflete as infecções às quais o mesmo já foi exposto anteriormente. Como dito anteriormente, o SIB possui uma memória imunológica, que é responsável por fazer o reconhecimento do mesmo estímulo antigênico, caso ele entre novamente em contato com o organismo, evitando, assim, o restabelecimento da doença. Isto é feito por meio dos linfócitos que são os responsáveis por reconhecer e eliminar os agentes patogênicos, de forma que a imunidade seja duradoura. Desta forma, pode-se dizer que a resposta imunológica adaptativa aperfeiçoa-se a cada encontro com um antígeno.

Grande parte dos linfócitos estão em estado inativo, e quando houver algum tipo de interação com um estímulo antigênico passam para o estado ativo. Os dois principais tipos de linfócitos são: linfócitos B (ou células B) e linfócitos T (ou células T). Sendo as células B e T os receptores de antígeno altamente específicos para um determinante antigênico (AHMED; SPRENT, 1999). Existem milhões de células de linfócitos circulando pelo corpo por meio do sistema linfático, caracterizando-se como detectores móveis e independentes que cooperam na detecção e eliminação de invasores (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007).

O sistema imunológico inato é mediado, principalmente, pelos macrófagos e granulócitos e o imune adaptativo é mediado pelos linfócitos e ambos dependem da atividade das células brancas, ou leucócitos. A Figura A1 mostra um fluxograma dos mecanismos de defesa do SIB.

Figura A1: Fluxograma dos mecanismos de defesa do SIB



Fonte: Adaptado de De CASTRO (2001).

A grande diferença entre a resposta adaptativa e a resposta inata é que a resposta adaptativa resulta na imunidade contra a re-infecção ao mesmo agente infectante e a resposta imune inata permanece constante ao longo da vida de um indivíduo, independente da exposição ao antígeno (SCROFERNEKER; POHLMANN, 1998). E a ação conjunta delas faz com que exista uma defesa eficaz mesmo quando o indivíduo passa sua vida cercado por germes potencialmente patogênicos e mesmo assim apresenta resistência às enfermidades (De CASTRO, 2001).

A seguir será apresentado a anatomia do SIB, e os mecanismos básicos de defesa do SIB.

a) Mecanismos Básicos de Defesa do SIB

A proteção do corpo de um indivíduo se dá pela ação conjunta de uma grande variedade de células e moléculas, de forma que o objetivo principal de uma resposta imunológica é o antígeno (Ag).

Como informado anteriormente, as células APCs circulam pelo corpo ingerindo e digerindo os patógenos encontrados. Esta ação fragmenta os patógenos encontrados em peptídeos antigênicos, gerando as seguintes ações (NOSSAL, 1993):

- Partes destes peptídeos são apresentados na superfície celular e se ligam a moléculas do complexo de histocompatibilidade principal (MHC – major histocompatibility complex) e as células T possuem receptores de superfície que têm a função de reconhecer diferentes complexos MHC/peptídeo.
- Posteriormente, a ativação do reconhecimento dos MHC/peptídeo, as células T se dividem em linfocinas (sinais químicos) que mobilizam outros componentes do sistema imunológico.
- Então, as células B são capazes de reconhecer partes livres solúveis dos antígenos, sem as moléculas do MHC respondendo a estes sinais, pois também possuem moléculas receptoras de especificidade única em suas superfícies e quando ativadas, as células B

se dividem e se diferenciam em plasmócitos, secretando anticorpos em altas taxas, que são formas solúveis dos seus receptores.

- Assim, os patógenos são neutralizados por causa da ligação dos anticorpos aos antígenos, levando a sua destruição pelas enzimas do sistema complemento ou por fagócitos.
- Por fim, algumas células B e T se transformam em células de memória, permanecendo na circulação, de forma a garantir uma resposta rápida e eficaz contra uma futura exposição àquele antígeno.

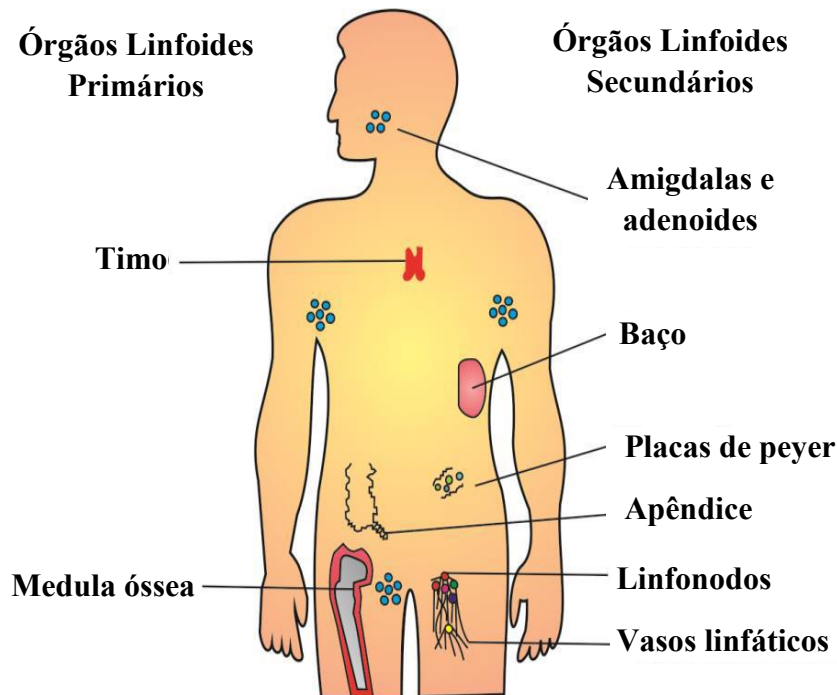
b) Anatomia do SIB

O SIB é composto de tecidos e órgãos distribuídos ao longo de todo o corpo humano e são denominados órgãos linfoides, pois estão relacionados com a produção, crescimento e desenvolvimento dos linfócitos (De CASTRO; VON ZUBEN, 2003).

Nestes órgãos linfoides, há o chamado processo de maturação e o início de uma resposta imunológica adaptativa, por meio da interação dos linfócitos com diversos tipos de células. Eles são divididos em primários (ou centrais), constituídos pelo timo e a medula óssea e são responsáveis pela produção e maturação de linfócitos. Os secundários (ou periféricos) são constituídos pelas adenoides, baço, placas de *Peyer*, apêndice, linfonodos e vasos linfáticos e são responsáveis por estimularem a produção de anticorpos, ou seja, os linfócitos encontram os estímulos antigênicos, iniciando as respostas adaptativas (De CASTRO, 2001).

Os órgãos linfoides estão distribuídos pelo corpo humano conforme apresentado na Figura A2.

Figura A2: Anatomia do sistema imunológico biológico



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

A seguir uma breve descrição dos órgãos linfoides e suas principais funções:

1. Órgãos linfoides primários: (De CASTRO, 2001).

- Medula óssea: é onde ocorre a geração dos elementos celulares do sangue, incluindo as hemácias, os monócitos, os leucócitos polimorfonucleares (granulócitos), os linfócitos B e as plaquetas, ou seja, o local da hematopoese. Nos mamíferos, a medula óssea é também o local de desenvolvimento das células B e a fonte de células-tronco que dão origem aos linfócitos T após a migração para o timo (De CASTRO, 2001);
- Timo: é onde ocorre o desenvolvimento das células T e está localizado na porção superior do tórax. A partir da medula óssea ocorre a migração de algumas células para o timo, e posteriormente se multiplicam e amadurecem, transformando-se em células T (De CASTRO, 2001).

2. Órgãos linfoides secundários: (De CASTRO, 2001).

- Amígdalas e Adenoides: são parte do sistema imunológico associado a mucosas ou ao intestino as quais constituem grandes agregados de células linfoides (De CASTRO, 2001);
- Linfonodos: são regiões onde ocorre a convergência de um extenso sistema de vasos

que coletam o fluido extracelular dos tecidos, produzido continuamente por filtração do sangue e é denominado de linfa, fazendo-o retornar para o sangue. São também regiões onde ocorre a resposta imunológica adaptativa. (De CASTRO, 2001);

- Apêndice e Placas de *Peyer*: são destinadas a proteção do sistema gastrointestinal por meio dos linfonodos especializados contendo células imunológicas (De CASTRO, 2001);
- Baço: é o único órgão linfoide entreposto na corrente sanguínea constituindo-se, portanto, no local onde os linfócitos combatem os organismos que invadem a corrente sanguínea. Nele existe uma polpa vermelha responsável pela remoção de células sanguíneas envelhecidas, e uma polpa branca de células linfoides que responde aos antígenos levados ao baço pelo sangue. O baço é o maior órgão linfoide secundário (De CASTRO, 2001);
- Vasos linfáticos: Por meio desses vasos, ocorre o transporte da linfa para o sangue e órgãos linfoides, ou seja, são canais de transporte. Seu funcionamento se dá da seguinte forma: os vasos aferentes drenam o líquido dos tecidos e carregam as células portadoras dos antígenos dos locais de infecção para os órgãos linfáticos (linfonodos). Nos linfonodos, as células apresentam o antígeno aos linfócitos que estão recirculando, os quais elas ajudam a ativar. Uma vez que estes linfócitos específicos passaram por um processo de proliferação e diferenciação, eles deixam os linfonodos como células efetoras através dos vasos linfáticos eferentes (De CASTRO, 2001).

c) **Imunidade**

A imunidade inata e a imunidade adquirida constituem os mecanismos de defesa do corpo humano, onde:

- Imunidade Inata: também chamada de imunidade natural ou nativa, é a imunidade responsável pela proteção inicial contra infecções. Este tipo de imunidade sempre está presente nos indivíduos saudáveis bloqueando a entrada de agentes infecciosos e eliminando rapidamente aqueles que conseguem adentrar nos tecidos do corpo humano (ABBAS; LICHTMAN, 2007). Pode-se dizer que ela é a herança genética que todos recebem ao nascer, sendo a primeira linha de defesa após a entrada do agente infeccioso

no organismo. O tipo de resposta gerada pelo sistema imunológico inato é rápida. Assim, o sistema imunológico adaptativo tem um tempo maior para gerar sua resposta (MACHADO, 2005). Sua primeira linha de defesa é fornecida pelas barreiras epiteliais, ou seja, pelos tecidos que formam a pele humana, que são células especializadas e antibióticos naturais presentes nos epitélios, que bloqueiam a entrada dos agentes infecciosos, de forma que se esses agentes infecciosos conseguirem penetrar o epitélio e entrarem nos tecidos ou na circulação eles são atacados pelos fagócitos, linfócitos especializados, e diversas proteínas plasmáticas (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

- **Imunidade Adquirida:** também chamada de imunidade específica ou adaptativa, é responsável pela defesa mais tardia e mais eficaz contra as infecções. Ela se desenvolve mais lentamente, se caracterizando no tipo de defesa estimulada pelos agentes infecciosos que invadem os tecidos, adaptando-se à presença dos invasores (ABBAS; LICHTMAN, 2007). Seu funcionamento basicamente se dá pela capacidade do organismo aprender a reconhecer tipos específicos de agentes infecciosos e armazenar o conhecimento em memórias imunológicas, proporcionando respostas mais rápidas a um mesmo tipo de agente infeccioso (MACHADO, 2005). Esta memória imunológica se dá ao processo de aprendizagem que ocorre no primeiro contato com o agente desconhecido (HOFMEYR, 2000).

Ambos sistemas, inato e adaptativo, dependem da atividade das células brancas (leucócitos), sendo que o sistema imunológico inato tem como principais elementos os macrófagos e granulócitos, e o sistema imunológico adaptativo os linfócitos, em especial as células B e T. Todo processo realizado pelo sistema imunológico adaptativo está relacionado com as células B e as células T, as quais são responsáveis pela detecção, geração de anticorpos e a incorporação do conhecimento (De CASTRO, 2001).

O tipo do antígeno e a quantidade são dois fatores que interferem no grau e duração de uma resposta imunológica e a hereditariedade é um fator que interfere na intensidade da resposta imunológica variando de organismo para organismos, onde organismos possuem uma resposta forte para alguns antígenos, enquanto que em outros a resposta é fraca. As crianças recém-nascidas possuem respostas imunológicas fracas. Entretanto, estão protegidas nos primeiros meses de vida pela imunidade natural passiva recebida de sua mãe, por meio do leite materno e um conjunto de anticorpos presentes na placenta (MACHADO, 2005; De CASTRO, 2001).

A imunidade pode ser reforçada por intermédio de vacinas, que em crianças devem ser administradas antes de um ano de idade, pois os anticorpos maternos transmitidos, por via transplacentária, podem interferir na resposta que imunizam o indivíduo em relação a um agente infeccioso específico (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

ANEXO B – DISCRIMINAÇÃO DO PRÓPRIO/NÃO-PRÓPRIO NO SIB

Apresentar-se-á neste anexo uma breve descrição dos conceitos do processo de discriminação próprio/não-próprio do SIB, com objetivo de proporcionar ao leitor uma facilidade e praticidade no entendimento deste processo. Neste trabalho, é utilizado ASN que é a base do processo de discriminação próprio/não-próprio.

Este processo é facilmente encontrado na literatura especializada, tanto em trabalhos relacionados com a aplicação dos SIAs, como em livros de biologia que abordam especificamente o sistema imunológico natural. Todos os dados e conceitos apresentados neste anexo foram retirados e adaptados dos seguintes livros, trabalhos e artigos:

- (ABBAS; LICHTMAN, 2007), disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=Xucz-MuYsOgC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acessado em: 9 de nov. de 2014.
- (De CASTRO, 2001), disponível em: <http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes_dout/tese/cap_2.pdf>. Acessado em: 9 de nov. de 2014.
- (MACHADO, 2005), disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~bosco/grupo/MestradoRenato.pdf>>. Acessado em: 9 de nov. de 2014.
- (MELDA, 2013), disponível em: <<http://www.infoescola.com/saude/doencas-auto-imunes/>>. Acessado em: 9 de nov. de 2014.
- (LIMA, 2013), disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/fernando-parra-dos-anjos-lima_finalpdf>. Acessado em: 9 de nov. de 2014.

B.1 DISCRIMINAÇÃO PRÓPRIO/NÃO-PRÓPRIO

Três classes de repertórios celulares são consideradas para cada um dos dois tipos principais de linfócitos, B e T, sendo (JERNE, 1974; COUTINHO et al. 1984; De BOER; PERELSON, 1991; PERELSON; WEISBUCH, 1997; STORB, 1998):

- Repertório potencial: este repertório é determinado pela quantidade, estrutura e mecanismos de expressão dos genes que codificam os BCRs ou TCRs, mais as possíveis variantes somáticas derivados deles (De CASTRO, 2001);
- Repertório disponível (ou expresso): são todos aqueles receptores que podem ser utilizados. Porém, não necessariamente estão sendo utilizados. Assim, pode ser definido como o conjunto de moléculas que está disponível para ser utilizado como receptores celulares (De CASTRO, 2001);
- Repertório ativo: são participantes diretos da resposta imunológica e são usados pelas células ativas (De CASTRO, 2001).

O SIB possui habilidade de detectar elementos próprios e não-próprios nocivos ao sistema sendo dotado de uma capacidade de reconhecer e neutralizar agentes infecciosos no organismo. Essa habilidade se dá pelas moléculas de anticorpo e os receptores de linfócitos T que conseguem fazer o reconhecimento de qualquer molécula própria ou não-própria. Alguns fatores que tornam este processo de reconhecimento de elementos não-próprios muito complexo são o número de padrões não-próprios no organismo humano (aproximadamente 10^{16}) é bem maior que o número de padrões próprios (aproximadamente 10^6), o ambiente é altamente distribuído. O organismo deve continuar funcionando e os recursos disponíveis para combater os agentes infecciosos agressores são escassos (HOFMEYR; FORREST, 1999).

Várias camadas de defesa, e com funções específicas que permitem identificar todos elementos não-próprios, são dispostas de forma distribuída, afim de discriminar os mesmos dos elementos próprios, pois como apresentado, a quantidade de padrões próprios no organismo representa aproximadamente 37% dos padrões não-próprios.

A grande vantagem do SIB é que ele consegue reconhecer quase todos os antígenos presentes no organismo, pois as moléculas de anticorpos e os receptores de linfócitos T possuem capacidade de reconhecer qualquer molécula própria ou não-própria no organismo, até mesmo

aquelas artificialmente sintetizadas (De CASTRO, 2001).

A nomenclatura “próprio” se dá às células e moléculas do próprio organismo, naturalmente os “não-próprio” são qualquer outro tipo de moléculas estranhas. Assim, o pleno funcionamento do SIB se dá pelo fato de sua capacidade em distinguir as células e moléculas do próprio organismo e as moléculas estranhas (a princípio, indistinguíveis para o SIB).

Um grave problema pode ocorrer se o sistema imunológico não for capaz de fazer esta distinção, que será uma resposta imunológica desencadeada contra os elementos próprios, causando doenças autoimunes e, ainda, se houver a ausência de resposta contra um elemento próprio é chamada de tolerância ao próprio (De CASTRO, 2001).

Outro problema é que além da característica aleatória na produção dos receptores linfocitários, um encontro entre um receptor e um antígeno não resulta inevitavelmente na ativação do linfócito, mas pode casualmente produzir a morte ou inativação (anergia) celular. Deste modo, existe um importantíssimo mecanismo denominado de seleção negativa, que é responsável por evitar que os linfócitos autoespecíficos (autorreativos) se tornem autoagressivos, ou seja, evitar que os linfócitos sejam acionados para neutralizar elementos próprios do organismo, como se fossem agentes infecciosos. E, ainda, existem a denominada seleção positiva que uma porção pequena de células são capazes de montar uma resposta imunológica, chamadas de células imunocompetentes, para constituir o repertório linfocitário disponível (De CASTRO, 2001).

B.2 SELEÇÃO NEGATIVA

O processo de seleção negativa permite o controle dos linfócitos B e T que possuem receptores não-próprios, assim que linfócitos com essa característica são eliminados (De CASTRO, 2001). Neste processo, há uma interação do linfócito com o antígeno o qual resulta na morte (deleção clonal) ou anergia (anergia clonal) deste linfócito, ou seja, a célula B ou T é eliminada do repertório ou inativada (NOSSAL, 1994).

Este processo pode ocorrer tanto nos órgãos linfoides centrais como nos periféricos. Os órgãos centrais ou os linfoides primários, desenvolvem a função de bloqueio a entrada de

elementos próprios. Os órgãos periféricos ou linfoides secundários, têm a função de filtrar e concentrar os elementos não-próprios, promovendo reações coestimulatórias a uma resposta imunológica (De CASTRO, 2001; MACHADO, 2005; ZINKERNAGEL; KELLY, 1997).

A seguir será apresentado a seleção negativa das células T e B separadamente.

B.2.1 Seleção Negativa das Células T

Também chamado de seleção tímica, a seleção negativa das células T ocorre dentro do Timo. É baseada no fator de que o timo é composto por uma grande quantidade de células acessórias e elas são: macrófagos, células dendríticas e células epiteliais especializadas. Um outro fator importantíssimo do timo é que ele é protegido por uma barreira sanguínea que faz com que as APC apresentem os complexos MHC-próprio/peptídeo ao repertório de células T que está sendo formado.

O processo denominado seleção tímica resulta *n* interação das células T imaturas chamadas de timócitos, como os ligantes do MHC-próprio/peptídeo resulta na morte citada anteriormente e, também, conhecida como deleção clonal, daquelas células T que forem auto-reativas (De CASTRO, 2001; MACHADO, 2005).

A afinidade da ligação do TCR ao antígeno próprio faz com que o tempo e a extensão do processo de deleção variem. Esta ligação se dá pelas células T que se ligarem aos antígenos próprios com uma alta afinidade são deletadas precocemente e de forma mais efetiva do que aquelas que se ligam com baixas afinidades (De CASTRO, 2001).

Porém, há alguns riscos com a seleção tímica, como, por exemplo, algumas células T autorreativas podem escapar para a periferia como células imunocompetentes e isto causa graves riscos de uma doença autoimune. Outro exemplo é que o sinal para a ativação de uma célula T requer mais do que a simples ligação do complexo MHC/peptídeo ao TCR, sendo necessários vários processos adjuntos, tais como a ligação de moléculas de adesão, são necessários para a ativação celular. Se não houver atividade coestimulatória, a união do TCR ao complexo MHC/peptídeo pode levar à inativação (anergia) deste linfócito. E para se ter uma resposta imune adaptativa, é necessário que o sistema imunológico inato faça a liberação de

uma grande quantidade de sinais coestimulatórios (De CASTRO, 2001).

B.2.2 Seleção Negativa das Células B

A proteção contra doenças autoimunes não depende somente da tolerância promovida pelas células T. Com isso, as células B imaturas dentro da medula óssea também são sensíveis a uma indução de tolerância por seleção negativa, caso elas encontrem um antígeno na ausência dos sinais coestimulatórios liberados principalmente pelas células T (De CASTRO, 2001; MACHADO, 2005).

Os linfócitos B autorreativos podem escapar da seleção negativa centralizada. Assim, como as células T, desta forma, tem-se como a ativação ou tolerância da célula B o resultado da quantidade, avidéz, tempo e de quais sinais coestimulatórios estarão presentes. O mecanismo de tolerância periférica que abrange as células B e T é entendido como uma ligação brusca e repentina, advindas de antígenos estranhos, do receptor ao antígeno induzir uma resposta clonal e uma estimulação constante e relativamente fraca leva à inibição e posterior apoptose (SCHWARTZ; BANCHEREAU, 1996).

B.3 AUTOIMUNIDADE

É denominado autoimunidade quando ocorre uma falha em uma divisão funcional do SIB que caracteriza, então, o princípio de seleção negativa. É definida como sendo uma resposta imunológica contra os elementos próprios do organismo e é uma causa importante de doenças.

Atualmente, entre 1% e 2% dos indivíduos sofrem de doenças autoimunológicas. Porém, na maioria dos casos as doenças associadas a uma resposta imune descontrolada são chamadas de autoimunes sem qualquer evidência formal de que as respostas sejam direcionadas contra os elementos próprios do organismo (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

A herança de genes suscetíveis é um dos principais fatores no desenvolvimento da autoimunidade e como consequência disto, pode haver a quebra da autotolerância e estímulos

do meio, como infecções, que podem ativar os linfócitos autorreativos (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

Um das características ruins da autoimunidade é que ela pode resultar na produção de anticorpos, ou na ativação de células T reativas aos elementos do próprio, resultando em danos nos tecidos do organismo, conseqüentemente causando doenças autoimunes (ABBAS; LICHTMAN, 2007). Existem entre 30 e 40 doenças autoimunes conhecidas atualmente e cada uma com seus sintomas e características específicas, manifestando-se em órgãos distintos e algumas delas são: diabetes mellitus tipo 1, artrite reumatoide, lúpus eritematoso sistêmico, doença de Crohn, doença de Reiter, tireoidite autoimune, espondilite anquilosante, retocolite ulcerativa, síndrome de Churg-Strauss, síndrome de Behçet, sarcoidose, esclerose múltipla, tireoidite de Hashimoto, miastenia gravis, síndrome de Sjögren, vitiligo, psoríase, doenças autoimunes do sistema nervoso, doença de Addison, anemia hemolítica, autoimune síndrome antifosfolipídica, dermatite herpetiforme, febre familiar do mediterrâneo, glomerulonefrite por iga, glomerulonefrite membranosa, síndrome de goodpasture, doença de graves, oftalmopatia de graves, doença celíaca, hepatite autoimune, síndrome miastênica de Lambert-Eaton, oftalmia simpática, penfigoide bolhoso poliendocrinopatias, púrpura autoimune, trombocitopenia idiopática (MELDA, 2013; ABBAS; LICHTMAN, 2007).

ANEXO C – PROPRIEDADES E PRINCÍPIOS DA ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

Neste anexo, serão apresentadas as propriedades do SIB, que também podem ser facilmente encontradas na literatura especializada, em trabalhos relacionados com a aplicação dos SIAs e em livros de biologia que abordam especificamente o sistema imunológico natural. Entretanto, para um melhor entendimento do leitor. Neste anexo apresenta as propriedades que são a base teórica para entender os SIAs.

Todas as propriedades e conceitos, foram tomadas como referência e adaptados dos seguintes livros e trabalhos:

- (ABBAS; LICHTMAN, 2007), disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=Xucz-MuYsOgC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acessado em: 10 de nov. de 2014.
- (SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997), disponível em: <https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos_projetos/projeto_144/Resumo%20-%20Princ%edpios%20de%20um%20Sistema%20Imunol%3gico%20Computacionaldoc>. Acessado em: 10 de nov. de 2014.
- (MACHADO, 2005), disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~bosco/grupo/MestradoRenato.pdf>>. Acessado em: 10 de nov. de 2014.
- (LIMA, 2013), disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/fernando-parra-dos-anjos-lima_finalpdf>. Acessado em: 10 de nov. de 2014.

C.1 PROPRIEDADES DOS SIBS

Afim de garantir uma defesa eficaz, o SIB possui quatro propriedades: detecção, diversidade, aprendizado e tolerância. Estas propriedades foram definidas em (HOFMEYR; FORREST, 1999).

a) Detecção

A propriedade de detecção caracteriza o processo de reconhecimento de padrões, que é realizado por intermédio do estabelecimento de ligações químicas e físicas entre os receptores das células imunológicas e os epítopos localizados na superfície dos agentes patogênicos (TIMMIS, 2000). É denominado como afinidade, a força de ligação ou qualidade de reconhecimento entre um receptor e um epítipo, que faz com que o receptor específico consiga ligar-se somente a alguns epítopos e de igual modo, os linfócitos são específicos para determinados tipos de epítopos, pelo fato de possuírem receptores idênticos, fato este denominado como monoespecificidade.

No entanto, as patogenias possuem distintos e múltiplos epítopos e, por conseguinte diferentes linfócitos podem ser específicos para a mesma patogenia. Por fim, a ativação dos linfócitos é efetivada quando os receptores conectados excedem um montante e caso sua afinidade seja compatível com a patogenia (MACHADO, 2005).

b) Diversidade

O SIB necessita ter diversidade suficiente de linfócitos receptores para assegurar a reação aos elementos patogênicos, pois a detecção no SIB está relacionada com os elementos não-próprios. Porém, este é um grave problema para os SIBs, pois o corpo humano não gera tantas proteínas quanto os possíveis agentes patogênicos. Contudo, afim de sanar este problema,

o SIB está em constante renovação de linfócitos, gerando uma proteção dinâmica, onde os novos linfócitos possuem uma memória imunológica que torna mais rápida e eficaz a proteção contra os elementos não-próprios (MACHADO, 2005; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997).

c) Aprendizado

O SIB deve ter a capacidade de detectar e eliminar rapidamente esses intrusos, dando origem a propriedade de aprendizado, ou seja, o SIB possui características (HOFMEYR, 2000) que permitem a aprendizagem dos linfócitos (HOFMEYR; FORREST, 1999), sua adaptação a estruturas estrangeiras específicas e capacidade para lembrar esses padrões rapidamente, por causa do crescimento exponencial das patogenias.

Essas funções são executadas pelas células B (HOFMEYR; FORREST, 1999). Seu funcionamento se dá no momento em que elas são ativadas, sofrendo um processo de clonagem associado a uma possível mutação para gerar novas células B que possuam receptores distintos da célula original e, por conseguinte, diferentes afinidades. A capacidade do linfócito eliminar a infecção está diretamente ligada a capacidade dessa afinidade, em que quanto maior a afinidade, mais semelhante é o clone e mais eficiente. Quando há uma concorrência entre a reprodução da patogenia e das células B, tornando o sistema vencedor, aquele onde as células B proliferam mais rápido que os patógenos, então ganha-se ênfase neste aspecto

Uma reação mais rápida para com a mesma patogenia ou outra similar quando encontrada é definida pela retenção da informação codificada nas células B que constitui a memória imunológica (MACHADO, 2005; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997).

d) Tolerância

Existem certas moléculas que determinam a qual antígeno um organismo é capaz de reagir e com qual intensidade, essas moléculas são responsáveis por assinalar uma célula como

própria codificando-as em seções do cromossomo MHC, conhecida como polimorfismo. A propriedade de tolerância torna possível que as células imunológicas se reconheçam mutuamente e comuniquem-se (HOFMEYR, 2000; MACHADO, 2005).

C.2 PRINCÍPIOS DA ORGANIZAÇÃO DO SIB

Os princípios da organização são dados pelos estudos de conceitos imunológicos que possibilitam definir um conjunto de propriedades e essas propriedades provem uma inspiração em aplicações em outras áreas do conhecimento. E estes princípios são apresentados a seguir (SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997; ABBAS; LICHTMAN, 2007):

- **Distribuição:** Sem a necessidade de uma coordenação centralizada, os linfócitos possuem uma capacidade de determinar o local da presença de infecções. Essa característica indica a inexistência de um ponto central de falha, assegurando uma maior robustez. Isto faz com que o SIB tenha uma arquitetura distribuída agindo em diferentes localidades paralelamente (MACHADO, 2005; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Multicamadas:** Por meio de um sistema integrado de defesa, composto por um grande número de células e moléculas, que atuam cooperativamente com suas especialidades definidas, faz com que o SIB tenha segurança. (MACHADO, 2005; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Diversidade:** Não há a possibilidade de existirem dois organismos com o mesmo sistema imunológico como consequência da diversidade dele fazer, assim, que o SIB possua uma robustez à população, pois os indivíduos de uma população não são vulneráveis às mesmas patogenias. O sistema imunológico é individual e os componentes são diferentes. Então, é possível oferecer diversos modelos de reconhecimento para uma variedade de patogenias (MACHADO, 2005; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Robustez e Tolerância a Falhas:** As células isoladas do SIB possuem a característica de serem substituídas se elas forem infectadas ou mortas. Isso ocorre sem o comprometimento do funcionamento do sistema. Tendo a ausência de um controle hierárquico centralizado, torna esse princípio possível em função da disponibilidade das

células imunológicas, tornando, assim, o SIB robusto e tolerante a falhas (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007);

- **Autonomia:** O SIB possui a capacidade de se autonomamente detectar, classificar e eliminar os agentes patogênicos, assim como efetuar a remoção e substituição de células danificadas de forma geral. Esse processo não necessita de gerenciamento ou manutenção externa (MACHADO, 2005; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Adaptabilidade e Memória Imunológica:** A capacidade que o SIB possui para aprender durante a detecção de novos patógenos é denominado de Adaptabilidade ou Memória Imunológica. Seu funcionamento se dá via o conhecimento sobre o invasor e posteriormente armazenando em uma memória, presente nas células B, denominada memória imunológica (ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Autoproteção:** As células do corpo estão vulneráveis a ataques a qualquer momento de um agente patogênico. Isto inclui as células do sistema imunológico. Porém, como os linfócitos também são células, que podem proteger o organismo contra outros linfócitos comprometidos por patógenos (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007);
- **Mudanças Dinâmicas:** A fim de maximizar a capacidade de detecção, o SIB mantém uma amostra aleatória de detectores que circulam pelo corpo, e constantemente, ela é renovada por meio da morte de células e da produção de novas células (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Identidade por meio do Ambiente:** Por meio da exposição a peptídeos ou proteínas fragmentadas ocorre a identificação das células imunológicas, uma vez que as proteínas podem passar através do corpo e os peptídeos servem como identificadores do ambiente (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Detecção por Anomalia:** O SIB possui a capacidade de detectar uma variedade de patogenias por meio da identificação de atividades não usuais anômalas, por meio de diversos mecanismos, tornando assim possível a detecção de intrusões e violações desconhecidas (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- **Especificação de Política Implícita:** Empiricamente, é definida pelo SIB, os elementos próprios. Por intermédio do monitoramento das proteínas que estão atualmente no corpo é que são determinados os componentes desse conjunto. Tendo como vantagem que o

conjunto próprio são os componentes disponíveis atualmente, sem a preocupação com os elementos que deveriam estar disponíveis (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);

- Flexibilidade: O SIB é flexível no sentido de que ele faz a alocação de recursos para a proteção do corpo em função da severidade da infecção, aumentando a geração de componentes (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997);
- Crescimento: O SIB é dotado de uma perspectiva de processamento distribuído que permite sua expansão de forma que são localizadas a comunicação e interação entre todos os componentes, de maneira que o aumento dos componentes ocorre somente em locais onde existe infecção, assim a sobrecarga no sistema será pequena (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI; HOFMEYR; FORREST, 1997).

ANEXO D – RESULTADOS DO TESTE DE REFERÊNCIA CRUZADA

Neste anexo, serão apresentados os resultados obtidos pelo método denominado de Teste de Referência Cruzada. Para este trabalho foi executado 20 vezes a fase de sensoriamento e monitoramento para o descritor **APDI**. Os resultados são apresentados nas tabelas abaixo separado por cada uma das 8 expressões conforme intitulado em cada tabela. Por fim, foi calculado o acerto médio.

Tabela D1: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Angry** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de sensoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	41,74	110,05	98,81	1,19
2	44,33	111,93	98,81	1,19
3	42,42	122,23	98,81	1,19
4	46,91	111,02	98,81	1,19
5	46,93	126,95	98,81	1,19
6	41,33	126,34	98,81	1,19
7	41,47	113,36	98,81	1,19
8	43,01	119,25	98,81	1,19
9	45,12	117,29	98,81	1,19
10	43,25	128,37	98,81	1,19
11	41,26	111,19	98,81	1,19
12	40,98	119,34	98,81	1,19
13	41,25	127,34	98,81	1,19
14	42,12	112,28	98,81	1,19
15	49,01	120,61	98,81	1,19
16	40,25	113,17	98,81	1,19
17	47,55	114,97	98,81	1,19
18	41,17	113,85	98,81	1,19
19	45,12	118,27	98,81	1,19
20	59,12	111,98	98,81	1,19
Acerto médio	44,21	117,48	98,81	1,19

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D2: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Contempt** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	51,94	118,35	98,81	1,19
2	60,28	120,87	98,81	1,19
3	50,43	119,28	98,81	1,19
4	50,25	125,97	98,81	1,19
5	52,37	130,21	98,81	1,19
6	51,14	119,01	98,81	1,19
7	51,39	114,35	98,81	1,19
8	45,35	119,31	98,81	1,19
9	52,39	112,96	98,81	1,19
10	54,36	124,36	98,81	1,19
11	51,31	120,37	98,81	1,19
12	51,37	119,87	98,81	1,19
13	50,07	137,98	98,81	1,19
14	53,25	114,86	98,81	1,19
15	43,47	118,24	98,81	1,19
16	51,36	110,15	98,81	1,19
17	51,94	116,62	98,81	1,19
18	44,81	109,78	98,81	1,19
19	42,76	115,24	98,81	1,19
20	48,45	117,99	98,81	1,19
Acerto médio	50,43	119,28	98,81	1,19

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D3: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Disgust** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censuramento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	41,97	118,35	99,40	0,60
2	51,87	103,35	99,40	0,60
3	55,78	114,01	99,40	0,60
4	47,67	105,20	99,40	0,60
5	42,97	119,09	99,40	0,60
6	48,37	116,34	99,40	0,60
7	49,78	128,07	99,40	0,60
8	52,97	110,01	99,40	0,60
9	51,78	117,24	99,40	0,60
10	51,91	110,15	99,40	0,60
11	50,73	111,25	99,40	0,60
12	47,55	110,31	99,40	0,60
13	43,61	101,28	99,40	0,60
14	42,97	134,38	99,40	0,60
15	42,88	114,97	99,40	0,60
16	47,77	117,97	99,40	0,60
17	42,36	103,78	99,40	0,60
18	49,67	143,11	99,40	0,60
19	47,86	115,18	99,40	0,60
20	42,94	110,12	99,40	0,60
Acerto médio	47,67	115,20	99,40	0,60

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D4: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Fear** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censuriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	43,10	124,97	99,11	0,89
2	41,98	130,87	99,11	0,89
3	48,02	150,21	99,11	0,89
4	46,31	154,31	99,11	0,89
5	45,82	123,25	99,11	0,89
6	51,97	131,99	99,11	0,89
7	41,53	137,64	99,11	0,89
8	40,78	141,97	99,11	0,89
9	41,47	150,78	99,11	0,89
10	43,82	153,15	99,11	0,89
11	46,37	162,37	99,11	0,89
12	47,21	119,14	99,11	0,89
13	59,58	116,28	99,11	0,89
14	53,14	134,28	99,11	0,89
15	47,25	124,37	99,11	0,89
16	40,37	168,25	99,11	0,89
17	48,36	141,02	99,11	0,89
18	42,37	118,34	99,11	0,89
19	45,04	120,02	99,11	0,89
20	42,10	124,07	99,11	0,89
Acerto médio	45,82	123,25	99,11	0,89

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D5: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Happy** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censuriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	40,26	117,32	97,92	2,08
2	41,63	113,98	97,92	2,08
3	51,02	104,31	97,92	2,08
4	54,35	113,94	97,92	2,08
5	49,21	117,31	97,92	2,08
6	40,01	105,91	97,92	2,08
7	41,38	115,21	97,92	2,08
8	54,32	104,41	97,92	2,08
9	40,97	128,01	97,92	2,08
10	42,78	110,87	97,92	2,08
11	47,31	118,21	97,92	2,08
12	41,03	121,75	97,92	2,08
13	41,37	121,32	97,92	2,08
14	42,03	110,17	97,92	2,08
15	43,01	111,52	97,92	2,08
16	42,97	124,86	97,92	2,08
17	41,78	102,78	97,92	2,08
18	49,91	114,31	97,92	2,08
19	40,32	107,21	97,92	2,08
20	47,12	116,31	97,92	2,08
Acerto médio	44,63	113,98	97,92	2,08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D6: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Phrase** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censuriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	45,12	112,33	97,92	2,08
2	44,12	110,31	97,92	2,08
3	45,16	112,88	97,92	2,08
4	40,04	117,33	97,92	2,08
5	46,27	121,99	97,92	2,08
6	47,31	101,71	97,92	2,08
7	41,02	111,33	97,92	2,08
8	49,37	114,38	97,92	2,08
9	48,08	119,14	97,92	2,08
10	47,31	107,73	97,92	2,08
11	47,01	118,33	97,92	2,08
12	41,21	101,28	97,92	2,08
13	47,12	117,79	97,92	2,08
14	51,08	113,56	97,92	2,08
15	46,32	104,78	97,92	2,08
16	40,11	104,97	97,92	2,08
17	57,06	113,87	97,92	2,08
18	44,33	105,32	97,92	2,08
19	47,27	115,87	97,92	2,08
20	47,99	112,72	97,92	2,08
Acerto médio	46,16	111,88	97,92	2,08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D7: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Sad** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censuriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	45,22	117,32	99,40	0,60
2	46,33	117,84	99,40	0,60
3	45,33	150,12	99,40	0,60
4	46,39	115,85	99,40	0,60
5	41,25	104,75	99,40	0,60
6	51,22	114,33	99,40	0,60
7	50,12	104,33	99,40	0,60
8	54,33	115,33	99,40	0,60
9	54,39	127,39	99,40	0,60
10	41,12	105,54	99,40	0,60
11	43,78	115,58	99,40	0,60
12	50,12	104,31	99,40	0,60
13	41,32	114,22	99,40	0,60
14	43,34	110,27	99,40	0,60
15	41,32	114,78	99,40	0,60
16	41,01	127,33	99,40	0,60
17	54,32	105,49	99,40	0,60
18	41,24	117,64	99,40	0,60
19	44,32	111,33	99,40	0,60
20	51,33	123,33	99,40	0,60
Acerto médio	46,39	115,85	99,40	0,60

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela D8: Resultados da referência cruzada usando a expressão **Surprise** para gerar os detectores

Quantidade de execuções	Tempo de censoriamento (s)	Tempo de monitoramento (s)	Detecções correta (%)	Detecções incorreta (%)
1	41,09	109,59	97,62	2,38
2	51,35	119,72	97,62	2,38
3	46,68	119,95	97,62	2,38
4	41,21	113,39	97,62	2,38
5	48,07	126,99	97,62	2,38
6	46,01	134,78	97,62	2,38
7	43,15	101,82	97,62	2,38
8	49,34	124,64	97,62	2,38
9	52,43	115,53	97,62	2,38
10	46,11	119,91	97,62	2,38
11	42,26	123,35	97,62	2,38
12	41,23	114,76	97,62	2,38
13	39,33	127,97	97,62	2,38
14	40,53	106,44	97,62	2,38
15	40,54	116,93	97,62	2,38
16	42,87	110,78	97,62	2,38
17	43,28	107,57	97,62	2,38
18	47,01	121,73	97,62	2,38
19	48,95	118,62	97,62	2,38
20	43,94	104,65	97,62	2,38
Acerto médio	45,76	116,95	97,62	2,38

Fonte: Elaboração do próprio autor.