

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

ENGENHARIA IMUNOLÓGICA: DESENVOLVIMENTO E
APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS
INSPIRADAS EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Autor: Leandro Nunes de Castro Silva
Orientador: Prof. Dr. Fernando José Von Zuben

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

ENGENHARIA IMUNOLÓGICA: DESENVOLVIMENTO E
APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS
INSPIRADAS EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Autor: Leandro Nunes de Castro Silva
Orientador: Prof. Dr. Fernando José Von Zuben

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos pré-requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Engenharia de Computação

Campinas – SP – Brasil

Maio de 2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38e

Silva, Leandro Nunes de Castro

Engenharia Imunológica: Desenvolvimento e Aplicação de Ferramentas Computacionais Inspiradas em Sistemas Imunológicos Artificiais / Leandro Nunes de Castro Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Fernando José Von Zuben.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Engenharia. 2. Sistema imune. 3. Computação. 4. Inteligência Artificial. I. Zuben, Fernando José Von II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Fernando José Von Zuben
(DCA/FEEC/Unicamp)

Prof. Dr. Felipe M. G. França
(COPPE/UFRJ)

Profa. Dra. Dagmar Ruth Stach Machado
(DMI/IB/Unicamp)

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho
(DENSIS/FEEC/Unicamp)

Prof. Dr. Márcio Luiz de Andrade Netto
(DCA/FEEC/Unicamp)

Prof. Dr. Fernando Antônio Campos Gomide
(DCA/FEEC/Unicamp)

Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Gudwin
(DCA/FEEC/Unicamp)

Novos paradigmas são propostos e aceitos constantemente não necessariamente por serem fiéis à sua fonte inspiradora ou por representarem verdades absolutas, mas por serem úteis e factíveis.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Fernando José Von Zuben pela orientação e amizade durante todos estes anos de pós-graduação na Unicamp.

À Profa. Dr. Dagmar R. Stach-Machado do DMI/IB pela orientação indispensável nos tópicos referentes à imunologia.

Aos membros da banca pelas contribuições na geração da versão final da tese.

Aos meus pais pelo apoio e carinho que dedicam à nossa família.

Aos meus amigos que compartilharam comigo, direta ou indiretamente, este período de muito trabalho, alegrias e tristezas.

A todas aquelas pessoas que estiveram comigo e que me motivaram e apoiaram no desenvolvimento da tese.

À Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação e ao Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial pelo fornecimento de instalações e condições de trabalho apropriadas.

À FAPESP pela concessão de uma bolsa de doutoramento (processo n. 98/11333-9) no país.

Ao Prof. Dr. Juan Manuel Corchado pela viabilização de uma visita ao Instituto de Linguagens e Sistemas de Informática da Universidade de Vigo, Ourense/Espanha em janeiro/fevereiro de 1999.

Ao Instituto Santa Fé, pela concessão de auxílio para participação no workshop intitulado “Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems”, realizado no Instituto Santa Fé, Novo México/U.S.A., em julho de 1999.

Ao IEEE e à AAAI pela concessão de auxílios financeiros para participação em diversas conferências internacionais nos anos de 1998, 1999 e 2000.

À força suprema responsável pela criação e destino da humanidade.

É com muito orgulho que dedico este trabalho à meus pais, irmãos e sobrinhos. Tenho a certeza de que mesmo distantes estamos sempre unidos pela força inexplicável que denominamos de amor.

Sumário

BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	v
SUMÁRIO	ix
RESUMO.....	xiii
 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	 1
1.1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES.....	2
1.3. NOTAÇÃO	3
1.4. FORMALIZAÇÃO DA TESE	4
1.4.1. Estrutura da Tese.....	4
1.4.2. Trabalhos Complementares	5
 CAPÍTULO 2: O SISTEMA IMUNOLÓGICO	 7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. BREVE HISTÓRICO DA PESQUISA EM IMUNOLOGIA.....	8
2.3. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS E ELEMENTOS CONSTITUINTES.....	12
2.4. MECANISMOS BÁSICOS DE DEFESA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO	13
2.5. ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO	14
2.6. SISTEMA IMUNE ADAPTATIVO	17
2.7. RECONHECIMENTO DE PADRÕES	18
2.7.1. A Molécula de Anticorpo e a Diversidade Imunológica.....	20
2.7.2. O Receptor de Célula T (TCR) e a Diversidade Imunológica.....	22
2.8. PRINCÍPIO DA SELEÇÃO CLONAL.....	23
2.8.1. Aprendizagem por Reforço e Memória Imunológica	25
2.8.2. Maturação de Afinidade	27
2.9. DISTINÇÃO PRÓPRIO/NÃO-PRÓPRIO	30
2.9.1. Seleção Positiva	32
2.9.2. Seleção Negativa.....	33
2.10. TEORIA DA REDE IMUNOLÓGICA.....	35
 CAPÍTULO 3: ENGENHARIA IMUNOLÓGICA	 39
3.1. INTRODUÇÃO	39
3.2. SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS E ENGENHARIA IMUNOLÓGICA.....	41
3.3. ESTADO DA ARTE EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS	45
3.3.1. Alguns Trabalhos Pioneiros	45
3.3.2. Reconhecimento de Padrões	46
3.3.3. Segurança Computacional	47
3.3.4. Robótica.....	48
3.3.5. Otimização.....	48
3.3.6. Controle.....	49
3.3.7. Abordagens Conexionistas	49
3.3.8. Detecção de Falhas e Anomalias.....	50
3.3.9. Abordagens Baseadas em Agentes.....	51
3.3.10. Aprendizagem de Máquina	51
3.3.11. Autômatos Celulares	52
3.3.12. Outras Aplicações	52
3.4. UMA ESTRUTURA FORMAL PARA A ENGENHARIA IMUNOLÓGICA	53
3.4.1. O Espaço de Formas (Shape-Space).....	54

3.4.2. Representações Celulares, Moleculares e Suas Afinidades.....	56
3.4.3. Algoritmos e Processos.....	64
3.5. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES	73
3.5.1. Um Sistema Imunológico Artificial	74
3.5.2. Aplicações de Engenharia Imunológica.....	77
CAPÍTULO 4: SISTEMAS INTELIGENTES E O SISTEMA IMUNOLÓGICO	83
4.1. INTRODUÇÃO	83
4.2. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	84
4.2.1. Características Principais.....	85
4.2.2. Modelos Neurais e Algoritmos de Treinamento.....	91
4.3. O SISTEMA IMUNOLÓGICO E O SISTEMA NERVOSO CENTRAL	99
4.3.1. Aspectos Cognitivos	100
4.3.2. Similaridades e Diferenças	104
4.3.3. Engenharia Imunológica e Redes Neurais Artificiais	107
4.4. COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA.....	108
4.4.1. Evolução Natural.....	109
4.4.2. Algoritmo Evolutivo Básico	111
4.4.3. Algoritmos Genéticos	113
4.4.4. Programação Genética.....	117
4.4.5. Nichos e Espécies.....	118
4.5. MICROEVOLUÇÃO: UMA EVOLUÇÃO DENTRO DO INDIVÍDUO.....	120
4.6. OUTRAS ABORDAGENS DE SISTEMAS INTELIGENTES.....	122
4.6.1. Computação Molecular.....	122
4.6.2. Sistemas Nebulosos	124
CAPÍTULO 5: FERRAMENTAS DE ENGENHARIA IMUNOLÓGICA.....	127
5.1. INTRODUÇÃO	127
5.1.1. Características Gerais	128
5.1.2. Complexidade Computacional	129
5.1.3. Funções Para Pseudocódigos	131
5.2. SAND: SIMULATED ANNEALING APLICADO AO PROBLEMA DE DIVERSIDADE POPULACIONAL.....	132
5.2.1. Motivação e Escopo de Aplicações	133
5.2.2. Simulated Annealing	133
5.2.3. Descrição e Análise do SAND	134
5.2.4. Caracterização e Comparação	139
5.2.5. Complexidade Computacional	140
5.3. CLONALG: IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DO PRINCÍPIO DE SELEÇÃO CLONAL.....	141
5.3.1. Motivação e Escopo de Aplicações	141
5.3.2. Descrição e Análise do CLONALG	142
5.3.3. Caracterização e Comparação	147
5.3.4. Complexidade Computacional	149
5.4. ABNET: UMA REDE DE ANTICORPOS.....	150
5.4.1. Motivação e Escopo de Aplicações	150
5.4.2. Descrição e Análise da ABNET.....	150
5.4.3. Pseudocódigo	156
5.4.4. Caracterização e Comparação	157
5.4.5. Complexidade Computacional	158
5.5. aiNET: UM MODELO DE REDE IMUNOLÓGICA ARTIFICIAL	159
5.5.1. Motivação e Escopo de Aplicações	160
5.5.2. Descrição	160
5.5.3. Pseudocódigo	165
5.5.4. Extração de Conhecimento e Estrutura da aiNet Treinada.....	166
5.5.5. Caracterização e Comparação	174

5.5.6. Complexidade Computacional	176
CAPÍTULO 6: APLICAÇÕES EM ENGENHARIA	179
6.1. INTRODUÇÃO	179
6.2. CLONALG	180
6.2.1. Reconhecimento de Padrões	180
6.2.2. Otimização	181
6.2.3. Análise de Sensibilidade	188
6.2.4. Discussão	190
6.3. SAND	191
6.3.1. Espaço de Formas Binário de Hamming	192
6.3.2. Espaço de Formas Euclidianos	197
6.3.3. Análise de Sensibilidade	202
6.3.4. Discussão	203
6.4. ABNET	203
6.4.1. Decisão de Lógica Majoritária	203
6.4.2. Classificação de Lentes de Contato	207
6.4.3. Reconhecimento de Caracteres Binários	208
6.4.4. Análise de Sensibilidade	211
6.4.5. Discussão	213
6.5. AI.NET	214
6.5.1. Análise de Dados	214
6.5.2. Projeto Automático de Redes Neurais de Funções de Base Radial	224
6.5.3. Análise de Sensibilidade	231
6.5.4. Discussão	234
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	237
7.1. INTRODUÇÃO	237
7.2. CONTRIBUIÇÕES	238
7.3. PERSPECTIVAS	239
7.3.1. Novos Algoritmos Inspirados em Mecanismos Imunológicos	239
7.3.2. Variações dos Algoritmos Propostos	242
7.3.3. Especulações Sobre o Futuro da Área	244
BIBLIOGRAFIA	245
APÊNDICE: GLOSSÁRIO BIOLÓGICO	267
ÍNDICE REMISSIVO	277

Resumo

DE CASTRO, L. N., **Engenharia Imunológica: Desenvolvimento e Aplicação de Ferramentas Computacionais Inspiradas em Sistemas Imunológicos Artificiais**. Campinas: FEEC/UNICAMP, Maio de 2001. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, p. 286.

Esta tese propõe a *engenharia imunológica* como um novo paradigma de computação a ser empregado na análise, síntese e aplicação de ferramentas computacionais para a solução de problemas complexos de engenharia. A engenharia imunológica (EI) irá definir a ferramenta de solução de um determinado problema baseado nas características do próprio problema, e depois utilizar a ferramenta desenvolvida na obtenção da solução. Ao invés de buscar a modelagem parcial ou total do sistema imunológico, a EI procura desenvolver e implementar modelos computacionais que preservem alguns dos principais mecanismos dos sistemas naturais. A concatenação de grande parte da literatura disponível sobre sistemas imunológicos artificiais, a comparação teórica e empírica com outras abordagens de sistemas inteligentes, a proposição de quatro ferramentas de EI, e a discussão sobre aspectos cognitivos e evolutivos dos sistemas imunológicos fazem parte das contribuições desta tese.

Palavras-chave: representação e extração de conhecimento, problemas complexos de engenharia, sistemas inteligentes, sistema imunológico.

Abstract

DE CASTRO, L. N., **Immune Engineering: Development and Application of Computational Tools Inspired by Artificial Immune Systems**. Campinas: FEEC/UNICAMP, May 2001. Dr. E. E. Thesis – School of Electrical and Computer Engineering, State University of Campinas, p. 286.

This thesis proposes the *immune engineering* (IE) as a new computational paradigm to be employed in the analysis, synthesis and application of computational tools to the solution of complex engineering tasks. The immune engineering is going to define the solution tool for a certain problem based on the characteristics of the problem itself. The resulting tool is then applied to obtain the solution. Instead of partially or fully modeling the immune system, the IE seeks to develop and implement computational models that preserve some of its main mechanisms. The concatenation of most of the works on artificial immune systems, the theoretical and empirical comparisons to other computational intelligence strategies, the proposal of four IE tools, and a discussion concerning cognitive and evolutionary aspects of the immune system are part of the contributions of this thesis.

Keywords: knowledge extraction and representation, complex engineering problems, intelligent systems, immune system.