

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Este capítulo visa introduzir e discutir os principais aspectos que levaram ao desenvolvimento e formalização da engenharia imunológica como uma nova abordagem para o tratamento de problemas complexos de engenharia. O enfoque do trabalho, as motivações, objetivos, contribuições e estrutura da tese fazem parte deste capítulo.

*“A construção do conhecimento constitui uma conjugação de intelecto e emoção, de razão e vontade; a episteme é fruto de inteligência e de amor.” – Platão*

### 1.1. Introdução e Motivação

Atualmente, existe um grande interesse pelo estudo dos sistemas imunológicos biológicos. Imunologistas e profissionais da área médica estão tentando compreender melhor o sistema imunológico para que eles possam combater doenças infecciosas como a AIDS, doenças auto-imunes como esclerose múltipla, e outros problemas de saúde. Biólogos e imunologistas teóricos estão interessados em modelar o sistema imunológico visando reproduzir fenômenos observados em laboratório e/ou prever comportamentos ainda não obtidos experimentalmente. Outros pesquisadores que começam a se interessar pela imunologia são os engenheiros e cientistas da computação, que tentam simular mecanismos imunológicos particulares com o objetivo de criar sistemas artificiais para a solução de problemas de engenharia. Por exemplo, podem ser traçados fortes paralelos entre o reconhecimento de padrões do sistema imunológico e o reconhecimento de padrões em computação. Uma metáfora ainda mais abrangente, poderia relacionar as características de *imunovigilância* e *resposta imune* com os procedimentos de segurança computacional, que podem incluir detecção e eliminação de vírus, intrusos de rede, e assim por diante.

Esta tese interpreta o sistema imunológico (SI) particularmente como um mecanismo biológico capaz de reconhecer e eliminar elementos causadores de patologias. Deve-se mencionar, entretanto, que esta visão “armamentista” do SI é algumas vezes criticada pelos imunologistas, que preferem abordar o sistema imunológico como um mecanismo de identificação do próprio indivíduo, responsável pela manutenção da integridade física e homeostase do organismo. Trata-se, então, de um ponto de vista particular e intencional sobre os objetivos do SI. A ênfase é dada aos problemas de reconhecimento de padrões pelo sistema imune adaptativo, embora sejam apresentadas discussões sucintas sobre a relação entre o sistema imunológico, o sistema nervoso central e o sistema endócrino. São levantados aspectos cognitivos do SI e alguns de seus mecanismos são caracterizados como

evolutivos, sob o ponto de vista da teoria originalmente proposta por Charles Darwin (1859).

Embora restrito a tópicos específicos, um aspecto peculiar desta tese está na abordagem de alguns conceitos em imunologia que não estão mais em voga ou que são contestados por alguns pesquisadores, como por exemplo a teoria da rede imunológica e seus aspectos cognitivos. No entanto, sob o ponto de vista de engenharia, estes conceitos mostraram-se adequados e úteis por razões que serão apresentadas e discutidas ao longo do texto.

Nas áreas de engenharia e computação, tem surgido um forte interesse pelo estudo dos sistemas imunológicos devido, principalmente, à sua capacidade de processamento de informação. Sob uma perspectiva de engenharia, existem diversas características do SI que podem ser destacadas:

- Unicidade: cada animal possui seu próprio sistema imunológico, com suas capacidades e vulnerabilidades particulares;
- Reconhecimento de padrões internos e externos ao sistema: as células e moléculas que não pertencem ao organismo são reconhecidas e eliminadas pelo SI;
- Detecção de anomalia: o SI pode detectar e reagir a agentes patogênicos (causadores de anomalias) a que o organismo nunca havia sido exposto anteriormente;
- Detecção imperfeita (tolerância a ruídos): um reconhecimento perfeito não é necessário para que o SI reaja contra um elemento causador de patologia (*patógeno*);
- Diversidade: existe uma quantidade limitada de células e moléculas no SI que são utilizadas para se obter o reconhecimento de um número praticamente infinito de elementos, incluindo aqueles sintetizados em laboratório;
- Aprendizagem por reforço: a cada encontro com o mesmo patógeno, o sistema imunológico melhora a qualidade de sua resposta; e
- Memória: os componentes do SI bem sucedidos no reconhecimento e combate às patologias são armazenados para uma resposta futura mais intensa e efetiva.

## 1.2. Objetivos e Contribuições

Os *Sistemas Imunológicos Artificiais* (SIA) (Dasgupta, 1998a), que surgiram a partir de tentativas de modelar e aplicar princípios imunológicos no desenvolvimento de novas ferramentas computacionais, já vêm sendo utilizados em diversas áreas, como reconhecimento de padrões, detecção de faltas e anomalias, segurança computacional, otimização, controle, robótica, scheduling, análise de dados, aprendizagem de máquina, dentre outras.

Esta tese representa uma iniciativa pioneira no sentido de apresentar uma estrutura formal para o desenvolvimento de sistemas imunológicos artificiais. Mais especificamente, ela propõe a *Engenharia Imunológica* (EI). Partindo da proposição da engenharia imunológica como um novo paradigma de computação e uma nova área de atuação dentro dos SIA, é ilustrado como diversos princípios e mecanismos do sistema imunológico natural podem ser empregados no desenvolvimento de novas ferramentas computacionais para a solução

de problemas em diversas áreas do conhecimento e suas relações com aprendizado de máquina, processamento de informação e resolução de problemas.

Enquanto as técnicas convencionais de engenharia usualmente requerem a especificação detalhada do comportamento preciso de cada componente do sistema, a engenharia imunológica, requer apenas uma especificação geral, ou aproximada, de alguns aspectos que caracterizam o comportamento global do sistema, como uma medida (ou função) de desempenho, afinidade ou adaptabilidade.

Além disso, também é feito um esforço no sentido de relacionar os sistemas imunológicos artificiais com outros paradigmas de inteligência computacional como, *redes neurais artificiais* (RNA), *computação evolutiva* (CE), *lógica nebulosa* (FL – *fuzzy logic*) e *computação de DNA*, ou *computação molecular* (*DNA computing*).

São propostas quatro ferramentas de computação, implementadas sob a forma de algoritmos, ou programas, de computador:

1. SAND (Simulated ANnealing for Diversity): algoritmo baseado na técnica clássica de *Simulated Annealing* (Kirkpatrick *et al.*, 1987) cujo objetivo principal é aumentar a diversidade de uma população de indivíduos (repertório de anticorpos) representado sob a forma de cadeias binárias ou vetores com elementos pertencentes ao conjunto dos números reais;
2. CLONALG (CLONal selection ALGORITHM): implementação computacional do algoritmo de seleção clonal e maturação de afinidade;
3. ABNET (AntiBody NETwork): rede neural artificial Booleana com processos de crescimento (inserção de unidades), poda (remoção de unidades) e atualização de pesos, também baseados nos princípios imunológicos da seleção clonal e maturação de afinidade;
4. aiNet (Artificial Immune Network): modelo de rede imunológica artificial com aplicações a problemas de análise de dados, como compressão de informação e clusterização.

Estes algoritmos são provas concretas de como idéias extraídas de sistemas naturais podem ser empregadas no desenvolvimento de novas ferramentas computacionais para a solução de problemas de engenharia e para a implementação de mecanismos de aprendizagem de máquina. Eles foram aplicados a diversas classes de problemas, destacando otimização, reconhecimento de padrões e análise de dados. Os desempenhos apresentados foram comparados com outras abordagens de inteligência computacional já consolidadas, como as baseadas em RNAs e nos algoritmos de computação evolutiva.

### 1.3. Notação

Para facilitar a leitura e interpretação do conteúdo proposto e apresentado no texto desta tese, foi adotada a seguinte notação genérica:

- Expressões (ou caracteres) em **negrito** representam matrizes: ex. **Ab**, **Ag**;
- Expressões (ou caracteres) em *negrito e itálico* correspondem a vetores: ex. *Ab<sub>i</sub>*, *Ag<sub>j</sub>*, *f*;

- Expressões (ou caracteres) em *itálico* são variáveis: ex.  $n, m, d, x, y$ ;
- Subíndices entre chaves indicam cardinalidade: ex.  $\mathbf{Ab}_{\{m\}}$ ; e
- Expressões (ou caracteres) em *itálico com subíndice(s)* correspondem a elementos de um vetor ou matriz: ex.  $Ab_{i,j}, m_{i,j}, f_j$ .

## 1.4. Formalização da Tese

Esta tese está formalizada em um texto composto por sete capítulos e um apêndice, complementados por dois relatórios técnicos e uma Home Page (web site), como descrito a seguir.

### 1.4.1. Estrutura da Tese

#### Capítulo 1: Introdução

Introduz e discute os principais aspectos que levaram ao desenvolvimento e formalização da engenharia imunológica como uma nova abordagem para o tratamento de problemas complexos de engenharia. O enfoque do trabalho, as motivações, os objetivos, e a estrutura da tese fazem parte desta introdução.

#### Capítulo 2: Sistemas Imunológicos

Neste capítulo é feita uma revisão sobre o sistema imunológico dos animais vertebrados visando fundamentar os aspectos biológicos necessários ao desenvolvimento e formalização da engenharia imunológica como um novo paradigma de computação. Um maior enfoque é dado aos tópicos imprescindíveis ao desenvolvimento das ferramentas propostas nesta tese embora o conteúdo apresentado ofereça margens ao desenvolvimento de novos algoritmos inspirados no sistema imunológico.

#### Capítulo 3: Engenharia Imunológica

Este capítulo apresenta uma estrutura formal para o desenvolvimento da engenharia imunológica (EI) como uma nova linha de pesquisa a ser empregada na análise e síntese de ferramentas computacionais para a solução de problemas complexos de engenharia. É discutida a relação entre a engenharia imunológica e os sistemas imunológicos artificiais (SIA) e é feita uma revisão bibliográfica de grande parte da literatura atual em SIA.

#### Capítulo 4: Sistemas Inteligentes e o Sistema Imunológico

Este capítulo tem por objetivo revisar alguns tópicos específicos da teoria de sistemas inteligentes, destacando as redes neurais artificiais e os algoritmos evolutivos. O objetivo é o de salientar similaridades e diferenças entre estas teorias, o sistema imunológico (Capítulo 2) e a engenharia imunológica (Capítulo 3).

## **Capítulo 5: Ferramentas de Engenharia Imunológica**

Este capítulo concretiza a proposta de engenharia imunológica através da proposição de quatro ferramentas computacionais desenvolvidas com base nos princípios imunológicos introduzidos no Capítulo 2 e no paradigma de engenharia imunológica proposto no Capítulo 3. Dentre os princípios fundamentais do sistema imunológico biológico utilizados, destacam-se o princípio da seleção clonal e a teoria da rede imunológica. A formalização teórica e o desenvolvimento dos algoritmos SAND, CLONALG, ABNET e aiNet são apresentados. Algumas das ferramentas propostas constituem estratégias híbridas que utilizam além de conceitos imunológicos, noções de outras técnicas computacionais como as redes neurais artificiais competitivas e os algoritmos evolutivos apresentados no Capítulo 4.

## **Capítulo 6: Aplicações em Engenharia**

Este capítulo apresenta os resultados computacionais da aplicação das quatro ferramentas de engenharia imunológica propostas no Capítulo 5, SAND, CLONALG, ABNET e aiNet, a diversos problemas de engenharia, enfocando as áreas de aprendizado de máquina, reconhecimento de padrões, aproximação de funções, clusterização e otimização. O desempenho das ferramentas propostas é comparado com o de diversas outras estratégias de sistemas inteligentes, como aquelas baseadas em RNAs e algoritmos evolutivos.

## **Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas Futuras**

As diversas implicações resultantes da proposição da engenharia imunológica como um novo paradigma computacional são discutidas neste capítulo. Como complemento, uma discussão sobre a tendência da área de sistemas imunológicos artificiais e a proposta de possíveis extensões deste trabalho e novas direções a serem tomadas fazem parte deste capítulo.

## **Apêndice: Glossário de Biologia**

Este apêndice contém uma vasta lista com o significado de grande parte da terminologia biológica utilizada nesta tese visando ajudar o leitor no processo de compreensão dos conceitos empregados.

### **1.4.2. Trabalhos Complementares**

#### **Relatório Técnico – Parte I**

RT DCA 01/99 – Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial.

“Artificial Immune Systems and Their Applications – Part I: Basic Theory and Applications”, p. 95.

<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/techrep/1999/DCA99-001.pdf>

<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/lnunes/rtdca0199.pdf>

Neste relatório, após uma breve introdução sobre o sistema imunológico biológico dos animais vertebrados, são discutidas as principais estratégias empregadas pelo sistema

---

imunológico na solução de problemas, e é introduzido o conceito de engenharia imunológica. A engenharia imunológica faz uso dos respectivos conceitos biológicos objetivando criar ferramentas computacionais para a determinação de soluções para problemas complexos de engenharia, partindo de informações contidas nos próprios problemas. O texto é concluído com o desenvolvimento de diversos algoritmos de engenharia imunológica. Estes algoritmos são amplamente discutidos e exemplos de suas aplicações potenciais à diversos tipos de problemas são apresentados.

### **Relatório Técnico – Parte II**

RT DCA 02/00 – Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial.  
“Artificial Immune Systems and Their Applications – Part II: A Survey of Applications”, p. 65.

<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/techrep/2000/DCA00-002.pdf>

<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/lnunes/rtdca0100.pdf>

Nesta segunda parte do relatório técnico, é feita uma breve descrição de diversas aplicações que utilizam metáforas ou mecanismos imunológicos para resolver problemas que são usualmente abordados por técnicas de sistemas inteligentes, como redes neurais artificiais, inteligência artificial, lógica nebulosa e computação evolutiva. São reunidos diversos trabalhos envolvendo aplicações em engenharia dos chamados sistemas imunológicos artificiais. Além disso são listadas e destacadas as principais características e aplicações em potencial destas ferramentas. Os métodos estão distribuídos por assunto e/ou aplicação, respeitando a terminologia original e o enfoque adotado pelos autores.

### **Web Site Sobre Engenharia Imunológica**

<http://www.dca.fee.unicamp.br/~lnunes/immune.html>

Este site contém as principais contribuições do autor para a área de sistemas imunológicos artificiais (SIA) e para a engenharia imunológica. Estão também disponíveis links para web sites de grupos de pesquisa em SIA e diversas páginas pessoais de pesquisadores com expressiva contribuição para a área. Uma versão de um tutorial contendo o código fonte das ferramentas de engenharia imunológica propostas pelo autor durante o desenvolvimento desta tese também está disponível para download, assim como links para outros materiais introdutórios à área de SIA.