

Engenharia Imunológica: Desenvolvimento e Aplicação de Ferramentas Computacionais Inspiradas em Sistemas Imunológicos Artificiais

Tese de Doutorado

DCA/FEEC - UNICAMP

Candidato: Leandro Nunes de Castro

Orientador: Prof. Dr. Fernando J. Von Zuben

Maio de 2001

FAPESP: 98/11333-9

Sumário

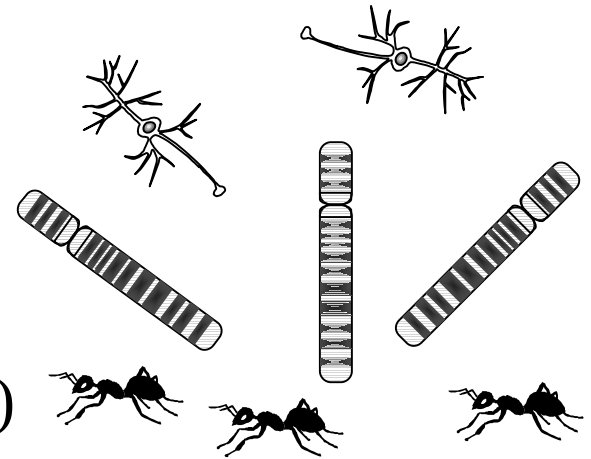
- **Parte I**
 - Introdução, Motivação e Contribuições
 - Introdução ao Sistema Imunológico
- **Parte II**
 - Engenharia Imunológica
 - Sistemas Inteligentes e o Sistema Imunológico
- **Parte III**
 - Ferramentas de Engenharia Imunológica e Aplicações
 - Discussão e Perspectivas Futuras

PARTE I

Introdução, Motivação e Contribuições

Introdução e Motivação (I)

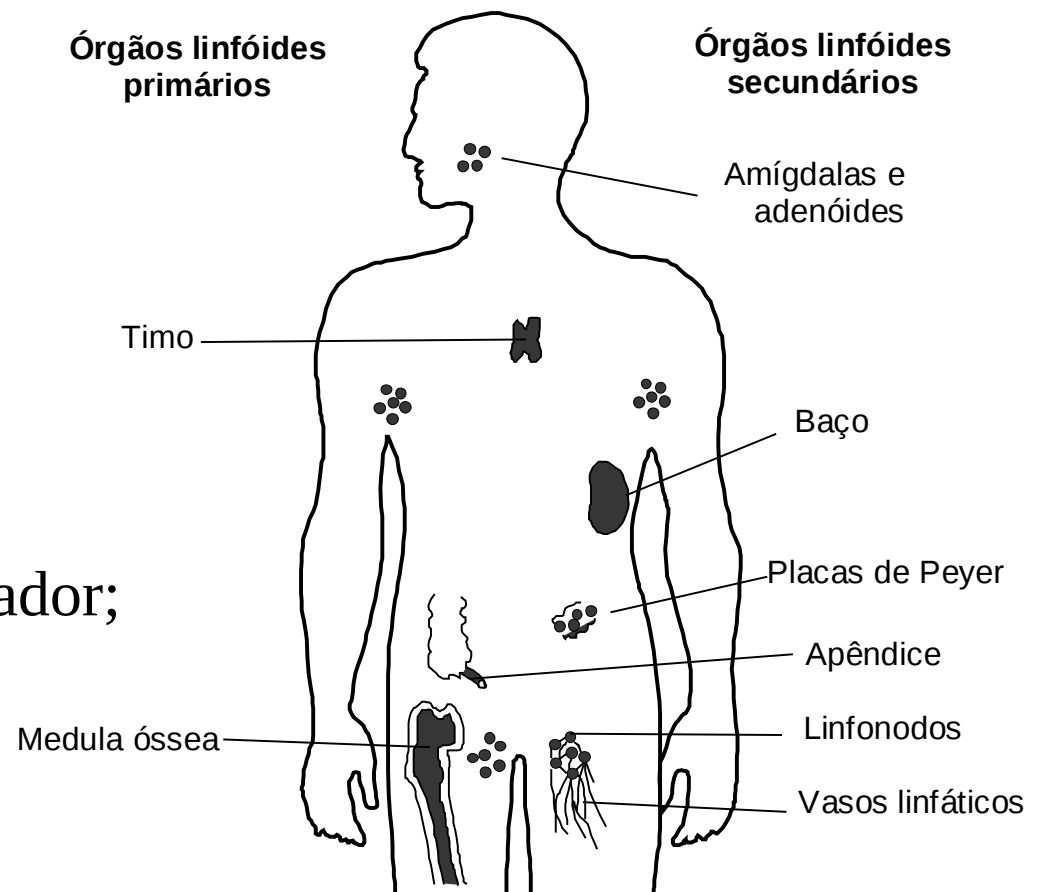
- **Interesse crescente pelos sistemas de computação inteligente inspirados em mecanismos biológicos:**
 - Redes Neurais Artificiais (RNAs)
 - Computação Evolutiva (CE)
 - Computação de DNA ou Molecular
 - Colônias de Formigas (Ant Colonies)
- **A engenharia como fonte de técnicas para projeto de sistemas voltados à solução de tarefas específicas**
- **Os sistemas inteligentes oferecem abordagens alternativas de engenharia**



Introdução e Motivação (II)

- **Porque o Sistema Imunológico?**

- Capacidade de reconhecimento e eliminação de padrões;
- Unicidade;
- Robustez;
- Diversidade;
- Aprendizagem;
- Memória;
- Modelo presa-predador;
- Distributividade.



Contribuições (I)

- **Proposição de uma nova concepção de técnicas de solução de problemas: Engenharia Imunológica**
- **Estudo histórico dos SIA e estabelecimento do estado da arte**
- **Apresentação de uma estrutura formal e genérica para SIA**
- **Iniciativa de correlacionar SIA com outras abordagens de sistemas inteligentes, sem estar restrito a uma aplicação específica**

Contribuições (II)

- **Discussão sobre os aspectos evolutivos e cognitivos do sistema imunológico**
- **Proposição de quatro ferramentas de engenharia imunológica com aplicações a áreas como: reconhecimento e classificação de padrões, análise de dados, extração de conhecimento e otimização multimodal**
- **Apresentação de soluções alternativas para problemas de engenharia através das ferramentas propostas, incluindo estimativas de custo computacional e sensibilidade paramétrica**

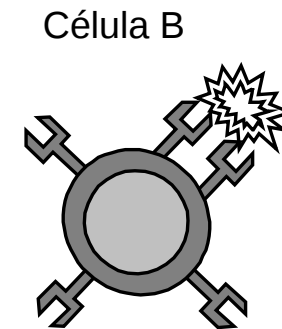
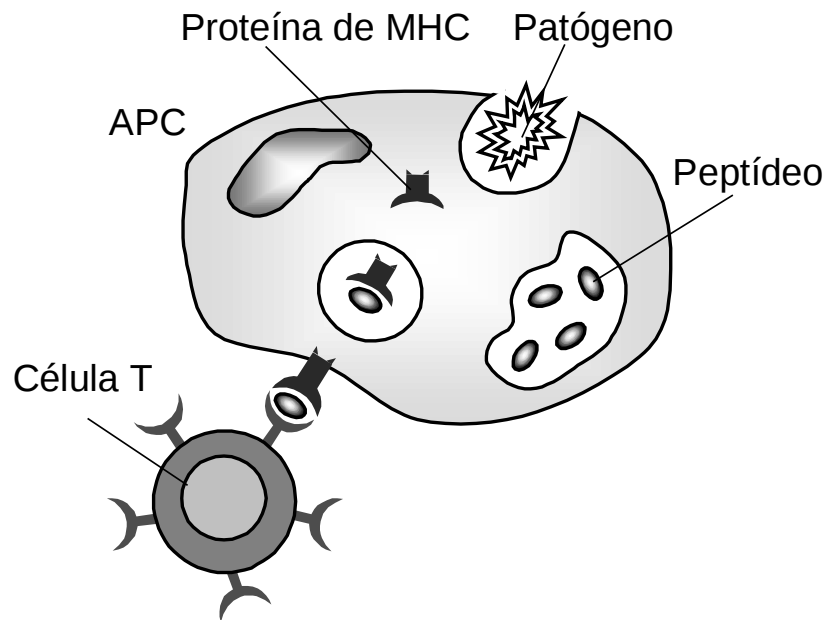
Introdução ao Sistema Imunológico (I)

- **Conceitos básicos:**

- *Imunologia* é o ramo da biologia responsável pelo estudo das reações de defesa que conferem resistência às doenças (Klein, 1990)
- O sistema que defende o animal contra o ataque constante de microorganismos é chamado de *sistema imunológico* (Tizard, 1995)
- *Patógenos*: agentes causadores de patologia ou enfermidade. Ex. vírus, bactérias, fungos e parasitas
- *Antígenos* (Ag): moléculas capazes de serem reconhecidas pelo sistema imunológico
- *Anticorpos* (Ab): moléculas receptoras de antígeno expressas nas superfícies de algumas células do sistema imune

Introdução ao Sistema Imunológico (II)

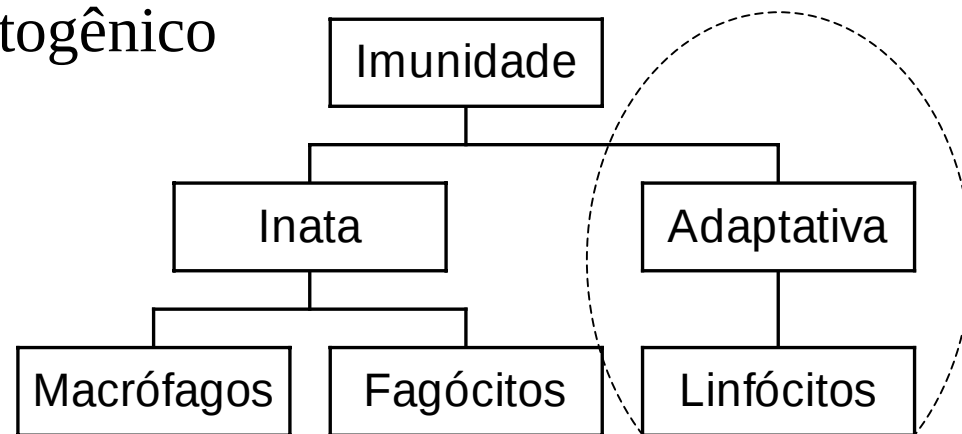
- Patógeno, Antígeno
- Receptores: Anticorpo



Introdução ao Sistema Imunológico (III)

- **Conceitos básicos (cont.)**

- *Clone*: conjunto de células filhas da mesma progenitora
- *Afinidade*: força de ligação entre moléculas
- *Sistema imune inato*: primeira linha de defesa contra microorganismos comuns. É importante para o início e regulação de uma *resposta imune adaptativa*
- *Sistema imune adaptativo*: resulta na imunidade duradoura contra a reinfecção por um determinado agente patogênico

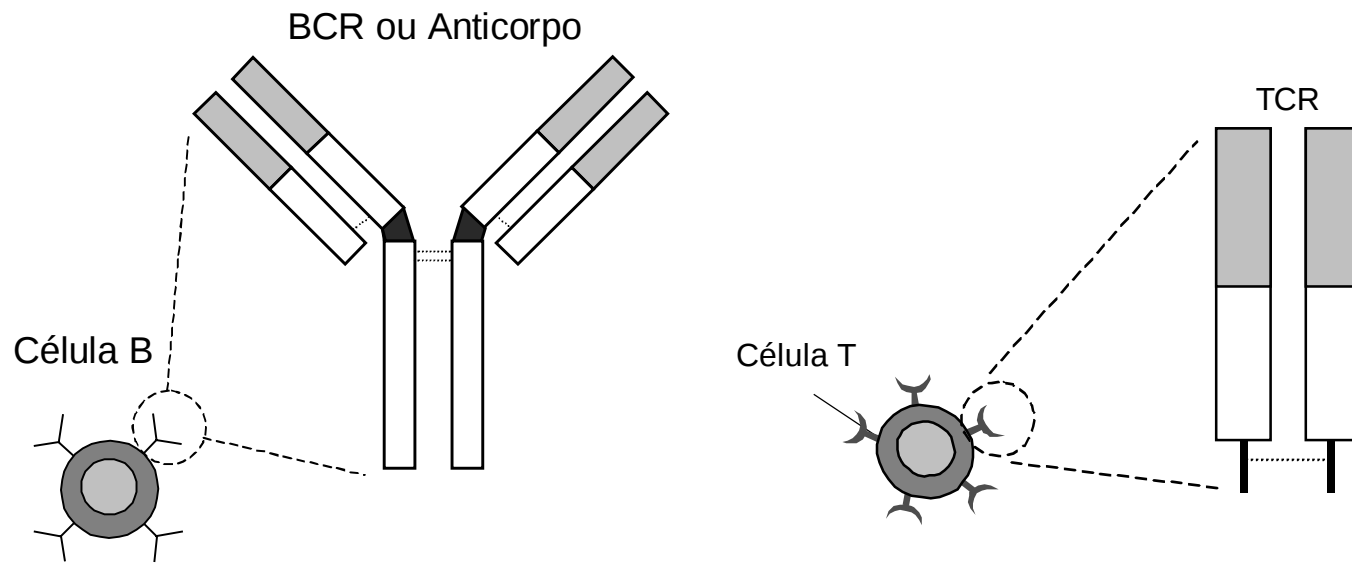


Introdução ao Sistema Imunológico (IV)

- **Sistema Imune Adaptativo**
 - Atua através do reconhecimento e posterior eliminação dos antígenos
 - Antecipatório: “Como, partindo de um genoma finito, é possível sintetizar uma quantidade quase infinita de diferentes receptores de antígeno?”
 - O princípio utilizado para explicar parte do funcionamento do sistema imune adaptativo é denominado de *teoria da seleção* (ou *expansão*) *clonal*

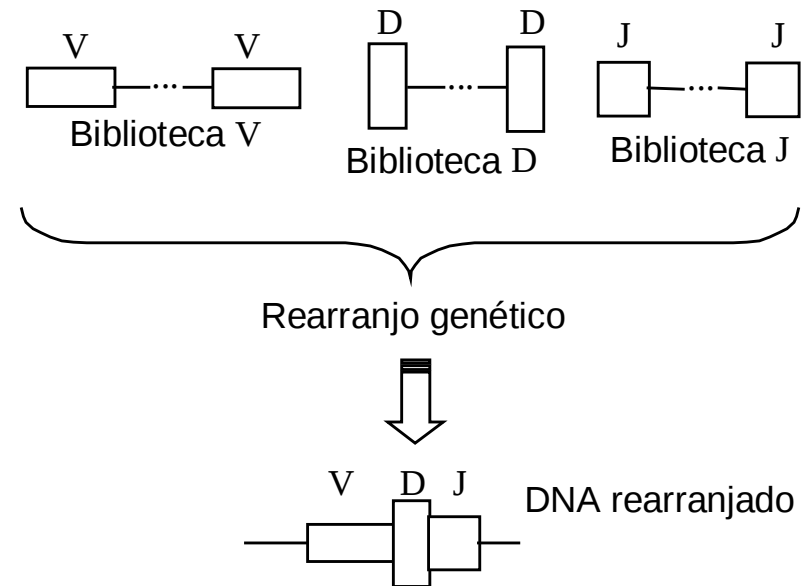
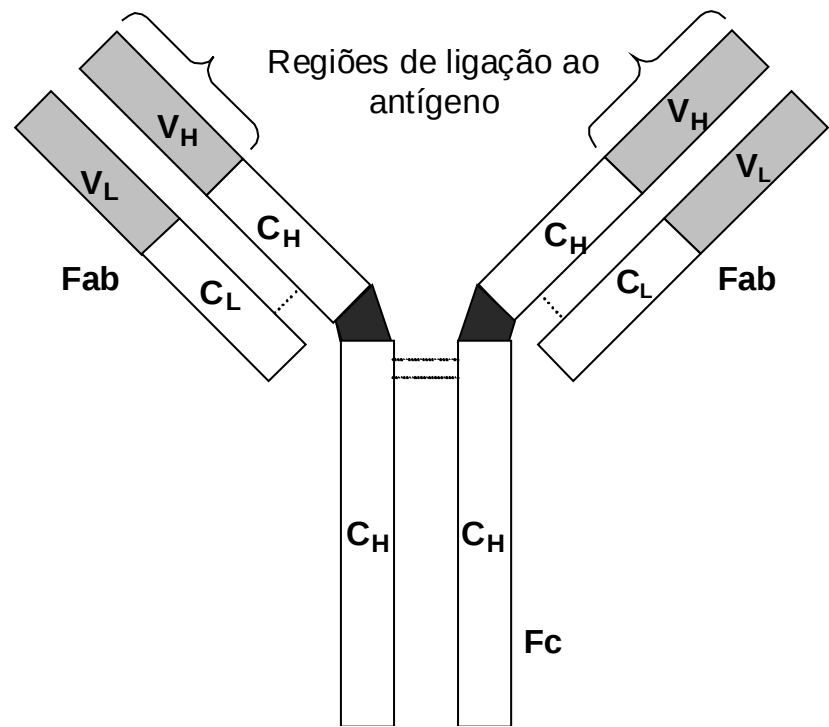
Introdução ao Sistema Imunológico (V)

- **Reconhecimento de Padrões**
 - As células B e T possuem receptores de antígeno em suas superfícies



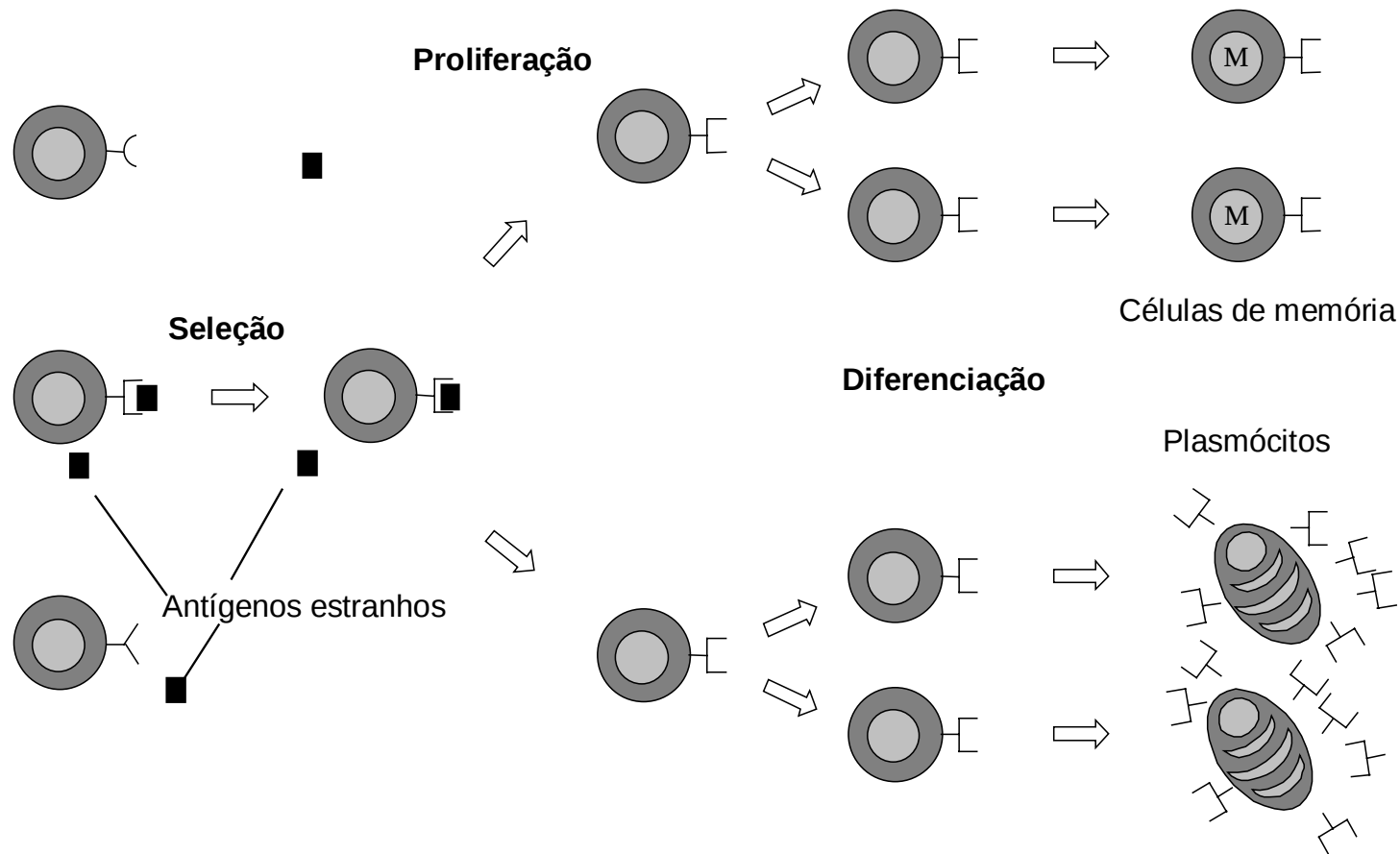
Introdução ao Sistema Imunológico (VI)

- A Molécula de Anticorpo e a Diversidade Imunológica



Introdução ao Sistema Imunológico (VII)

- Princípio da Seleção Clonal

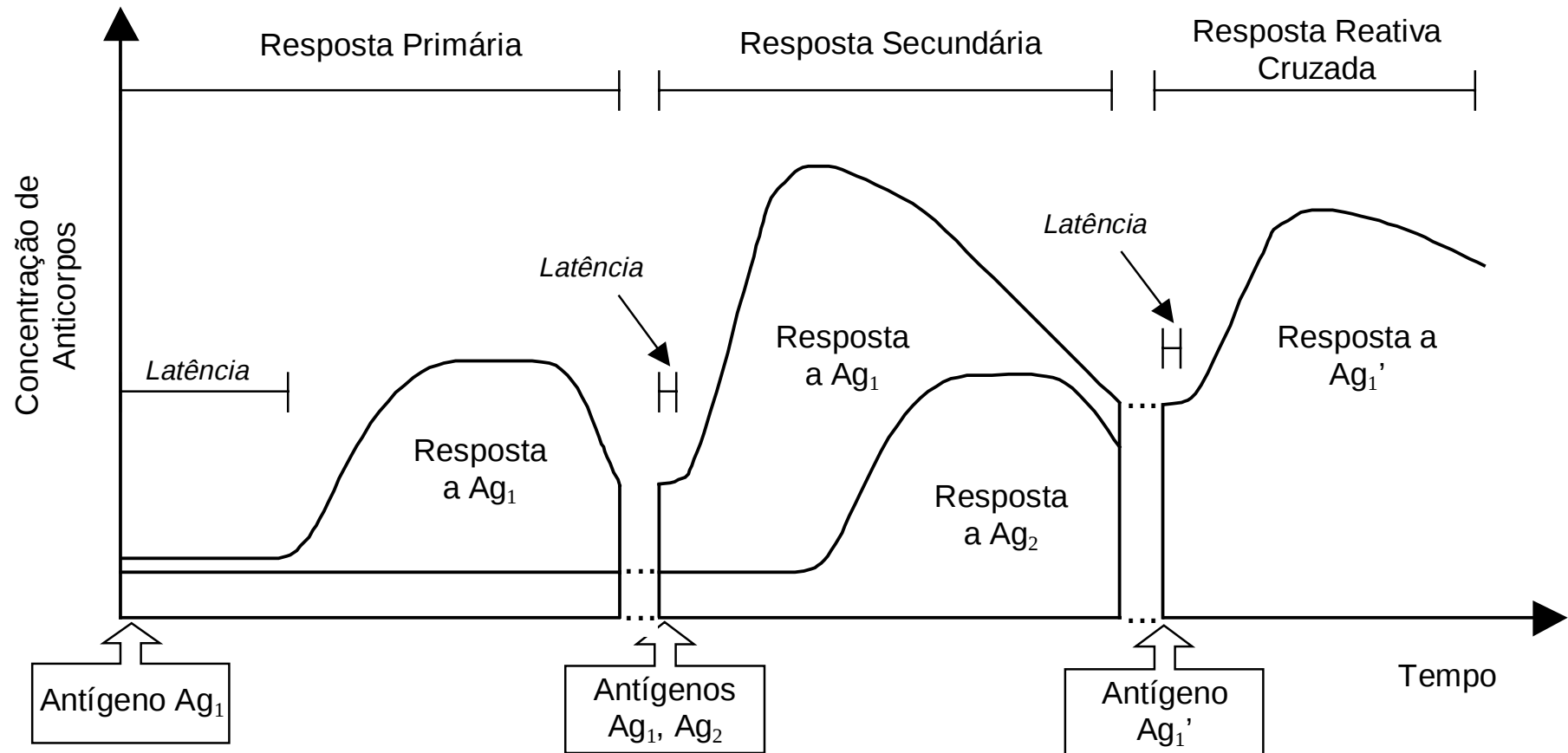


Introdução ao Sistema Imunológico (VIII)

- **Aprendizagem**
 - Exposição repetida aos antígenos
 - Aumento do tamanho de clones específicos
 - Maturação de afinidade do receptor
- **Memória**
 - Existência de células imunológicas com períodos prolongados de vida
 - Exposição repetida ao antígeno mesmo na ausência de sintomas específicos
 - Reatividade cruzada

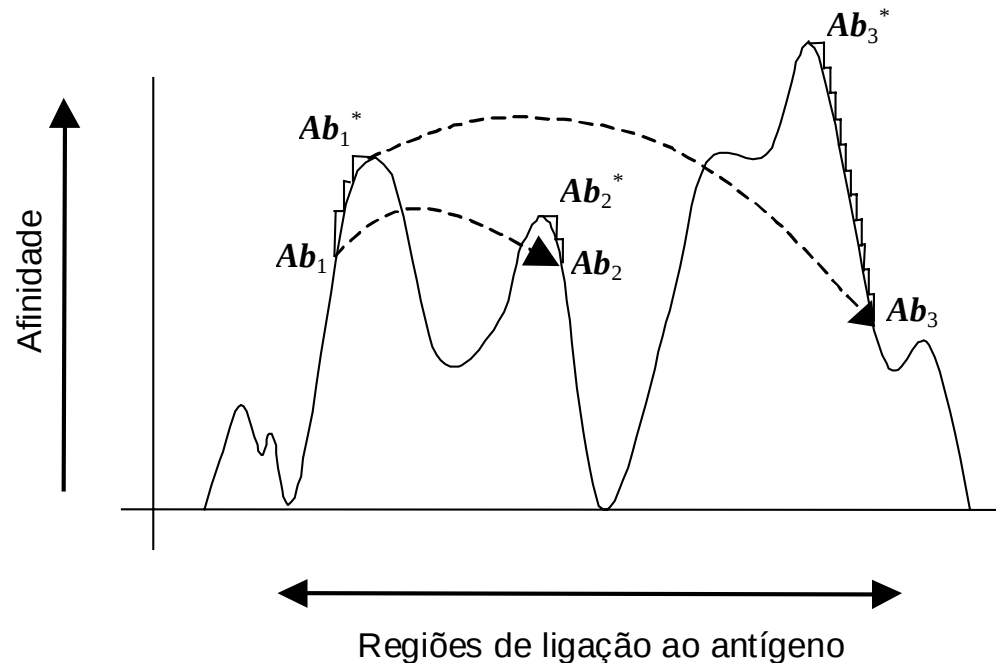
Introdução ao Sistema Imunológico (IX)

- **Aprendizagem e Memória Imunológica**



Introdução ao Sistema Imunológico (X)

- **Maturação de afinidade**
 - hipermutação somática
 - edição de receptores
- **Regulação do mecanismo de hipermutação**



Introdução ao Sistema Imunológico (XI)

- **Distinção Próprio/Não-Próprio**
 - axioma da completude imunológica
 - antígenos próprios e não-próprios
 - tolerância
 - seleção positiva e negativa
- **Seleção Positiva**
 - tem como objetivo selecionar os linfócitos capazes de atuar em uma resposta imune adaptativa
- **Seleção Negativa**
 - descreve o processo no qual a interação Ag-Ab resulta na morte ou anergia do linfócito. Permite o controle dos linfócitos que possuem receptores anti-próprio.

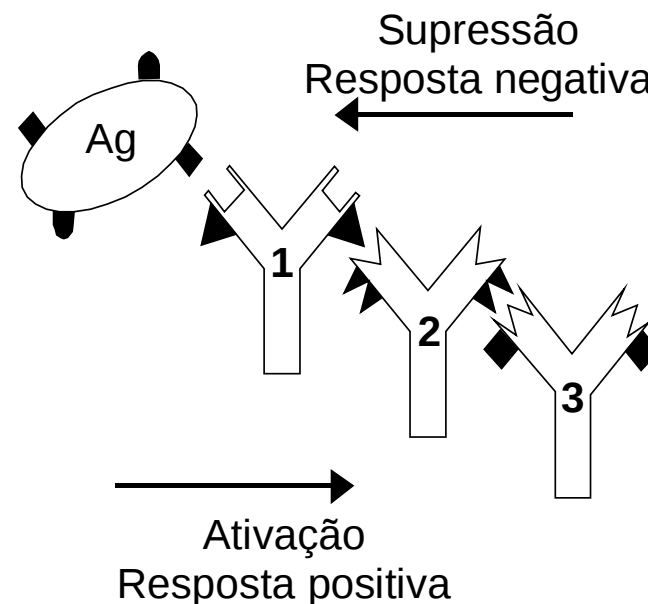
Introdução ao Sistema Imunológico (XII)

- **Teoria da Rede Imunológica**

- O sistema imunológico é constituído por uma rede enorme de células e moléculas que interagem entre si mesmo na ausência de estímulos externos
- Imagem interna

- **Características**

- Estrutura
- Dinâmica
- Metadinâmica



Introdução ao Sistema Imunológico

- Sumário -

- **Anticorpo, antígeno**
- **Afinidade**
- **Respostas primária, secundária e reativa cruzada**
- **Seleção clonal**
- **Aprendizagem e memória**
- **Distinção próprio/não-próprio**
- **Teoria da rede imunológica**

PARTE II

Engenharia Imunológica, Sistemas Inteligentes e o Sistema Imunológico

Sistemas Imunológicos Artificiais (I)

- **Conceitos**

- Os *sistemas imunológicos artificiais* (SIA) são compostos por metodologias inspiradas no sistema imunológico biológico, para a solução de problemas do mundo real (Dasgupta, 1998)
- Um *sistema imunológico artificial* é um sistema computacional baseado em metáforas do sistema imunológico biológico (Timmis, 2000)
- Os *sistemas imunológicos artificiais* são metodologias de manipulação de dados, classificação e raciocínio que seguem um paradigma biológico plausível: o sistema imunológico humano (Starlab)

Sistemas Imunológicos Artificiais (II)

- **Aplicações**

- Reconhecimento de padrões
- Aproximação de funções
- Otimização de processos
- Análise de dados e clusterização
- Memórias associativas
- Geração e manutenção de diversidade populacional
- Programação e computação evolutiva
- Detecção de falhas e anomalias
- Controle e scheduling
- Segurança computacional e de rede
- Robótica

Sistemas Imunológicos Artificiais (III)

Ano	Evento	Atividade	Org./Palestrante
1996	IMBS	Workshop	Y. Ishida
1997	SMC	Special Track / Tutorial	D. Dasgupta
1998	Livro	Primeiro livro editado	D. Dasgupta (ed.)
	SMC	Special Track	D. Dasgupta
1999	SMC	Special Track	D. Dasgupta
2000	GECCO	Workshop	D. Dasgupta
		Palestra: “Por que um Computador Precisa de um Sistema Imunológico”	S. Forrest
	SMC	Tutorial: “Computação Imunológica”	D. Dasgupta
		Special Track	
	SBRN	Tutorial: “Sistemas Imunológicos Artificiais e Suas Aplicações”	L. N. de Castro
2001	ICANNGA	Tutorial: “Uma Introdução aos Sistemas Imunológicos Artificiais”	L. N. de Castro
	CEC	Tutorial: “Sistemas Imunológicos Artificiais: Uma Tecnologia Emergente”	J. Timmis
	GECCO	Palestra: “Computação Baseada no Sistema Imunológico”	S. Forrest
	Revista	Primeiro Special Issue sobre SIA na revista IEEE TEC	D. Dasgupta (ed.)

Engenharia Imunológica (I)

- **Conceito**

- A *engenharia imunológica* (EI) é um processo de meta-síntese o qual vai definir a ferramenta de solução de um determinado problema baseado nas características do próprio problema, e depois aplicá-la na obtenção da solução. A EI procura sintetizar modelos inspirados no sistema imunológico que preservem algumas de suas propriedades essenciais.

- **A EI no Contexto dos SIA**

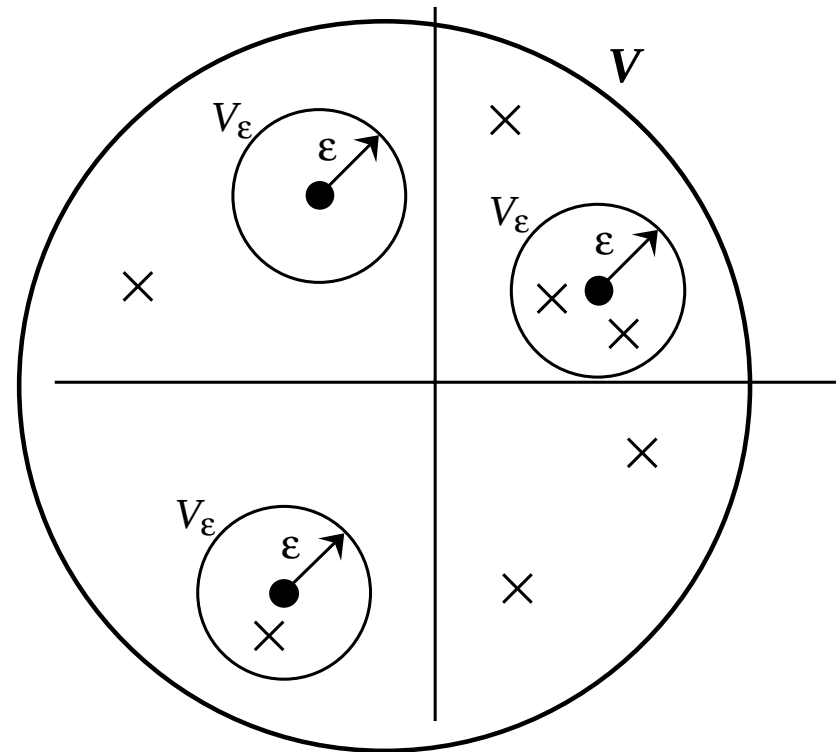
- A EI se caracteriza como uma sub-área dos SIA voltada especificamente para o desenvolvimento de técnicas de solução de problemas de engenharia

Engenharia Imunológica (II)

- **Linguagem Formal Para a EI:**
Representações e Afinidades
 - Espaço de formas S (Perelson & Oster, 1979)
 - Medidas de afinidade
- **Linguagem Formal Para a EI:**
Algoritmos e Processos
 - Modelos de Medula Óssea
 - Algoritmos de Seleção Negativa
 - **Algoritmos de Seleção Clonal**
 - Algoritmos de Hipermutação Somática
 - Modelos Contínuos de Rede Imunológica
 - **Modelos Discretos de Rede Imunológica**

Engenharia Imunológica (III)

- **O Espaço de Formas S (*shape-space*)**
 - Região de reconhecimento
 - Representações
 - Complementaridade
 - Medidas de afinidade
 - Limiar de afinidade



Engenharia Imunológica (IV)

- **Representações**

- Cadeia de atributos: $m = \langle m_1, m_2, \dots, m_L \rangle$, $m \in S^L \subseteq \Re^L$
- $\mathbf{Ab} = \langle Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_L \rangle$, $\mathbf{Ag} = \langle Ag_1, Ag_2, \dots, Ag_L \rangle$

- **Medidas de Afinidade**

- Euclidiana $D = \sqrt{\sum_{i=1}^L (Ab_i - Ag_i)^2}$
- Manhattan $D = \sum_{i=1}^L |Ab_i - Ag_i|$
- Hamming $D = \sum_{i=1}^L \delta_i$, onde $\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathbf{Ab}_i \neq \mathbf{Ag}_i \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases}$

PARTE III

Ferramentas de Engenharia Imunológica e Aplicações

Ferramentas Propostas

- **SAND**
 - algoritmo baseado na técnica de Simulated Annealing com o objetivo de aumentar a diversidade populacional de um conjunto de cadeias binárias ou vetores
- **CLONALG**
 - implementação computacional do algoritmo de seleção clonal
- **ABNET**
 - rede neural Booleana com processos de crescimento, poda e atualização de pesos inspirados no princípio da seleção clonal e maturação de afinidade
- **aiNet**
 - modelo discreto de rede imunológica

Ferramentas Propostas

- **Características em Comum**
 - São baseadas em um repertório (população) de anticorpos
 - Foram inicialmente desenvolvidas para resolver problemas de aprendizagem de máquina e reconhecimento de padrões
 - Anticorpos individuais podem sofrer variações genéticas através de um mecanismo de mutação proporcional à afinidade Ag-Ab
 - Todas as células apresentam o mesmo limiar de afinidade (quando ele é considerado)

SAND (I)

- **Objetivo**
 - Gerar um conjunto (população) de candidatos à solução capazes de cobrir bem o espaço de soluções
- **Aplicações**
 - Inicialização de populações de candidatos à solução
- **Características**
 - Nenhum conhecimento sobre o problema é assumido
 - Indução de diversidade através da maximização de uma função de distância entre os indivíduos da população
 - Evolução baseada em cooperação e competição
 - Busca multimodal baseada no algoritmo clássico de Simulated Annealing

SAND (II)

- **Simulated Annealing:**
 - Conexão entre mecânica estatística e otimização multivariada ou combinatorial
 - O comportamento do sistema em equilíbrio térmico, a uma dada temperatura, pode ser caracterizado por pequenas flutuações em torno do comportamento médio
 - Fator de Probabilidade (FP): $P(\Delta E) = \exp(-\Delta E / T)$
 - Algoritmo básico (minimização):
 - Perturbe aleatoriamente cada átomo do sistema
 - Avalie a variação de energia ΔE
 - Caso $\Delta E \leq 0$, aceite a perturbação
 - Caso contrário, trate probabilisticamente de acordo com FP
 - T (parâmetro de controle): inicialmente elevada e decrescente

SAND (III)

- **Medidas de Energia (Custo) Propostas:
Espaço de Formas de Hamming**

$$s(i) = \begin{cases} 1, & x_i \neq x_j, \forall j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad - \text{ Identifica anticorpos similares}$$

$$D(\%) = 100 \cdot \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N s(i) \quad - \text{ Percentual de anticorpos distintos}$$

$$F(\%) = 100 \cdot \frac{4}{L \cdot N^2} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N HD(i, j) \quad - \text{ Afinidade HD percentual}$$

$$E(\%) = \frac{F(\%) + D(\%)}{2} \quad - \text{ Energia percentual}$$

SAND (IV)

- **Medidas de Energia (Custo) Propostas:
Espaço de Formas Euclidianos**

$$ED = \sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - y_i)^2} \quad - \text{ Medida de afinidade}$$

$$\bar{\mathbf{I}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{I}_i \quad - \text{ Vetor unitário médio}$$

$$\bar{R} = \left(\bar{\mathbf{I}}^T \bar{\mathbf{I}} \right)^{1/2} \quad - \text{ Vetor resultante (distância à origem do sistema de coordenadas)}$$

$$E(\%) = 100 \times (1 - \bar{R}) \quad - \text{ Energia percentual}$$

SAND (V)

```
function [Ab] = sand(N,L,gen, $\beta$ , $\delta$ ,mE);
t := 0; ct := 0; T := 1;  $\alpha_0$  := 1;
Ab := gera(N,L); % Passo 1
% A cada iteração, faça
while t < gen & E < mE,
    E := energy(Ab); % Passo 2
    AbT := hypermut(Ab, $\alpha$ ); % Passo 3
    ET := energy(AbT); % Passo 4
    dE := E - ET; % Passo 5
    if dE < 0, % Passo 6
        Ab := AbT; E := ET; ct := 0;
    elseif dE > 0, % Passo 7
        if rand < exp(-dE/T),
            Ab := AbT; E := ET; ct := 0;
        end,
    else,
        ct := ct + 1; % Passo 8
        if ct mod  $\delta$  = 0,
            T :=  $\beta$  * T; ct := 0;  $\alpha$  :=  $\alpha_0$ ;
        end;
         $\alpha$  :=  $\beta$  *  $\alpha$ ;
    end;
end;
```

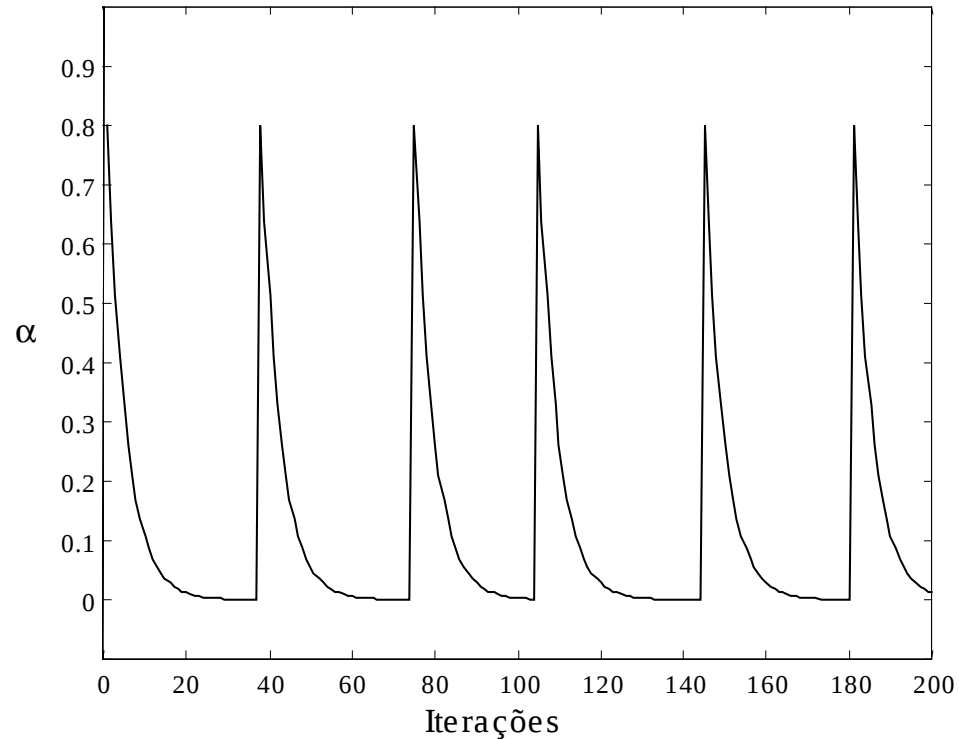
DEMO . . .

SAND

SAND

- **Discussão**

- Geração de populações diversas em espaços binários de Hamming e Euclidianos
- Inicialização de outras estratégias como RNAs
- O controle da taxa de mutação segue o modelo proposto por Kepler & Perelson (1993)



CLONALG (I)

- **Objetivos**

- Implementação computacional do algoritmo de seleção clonal e maturação de afinidade

- **Aplicações**

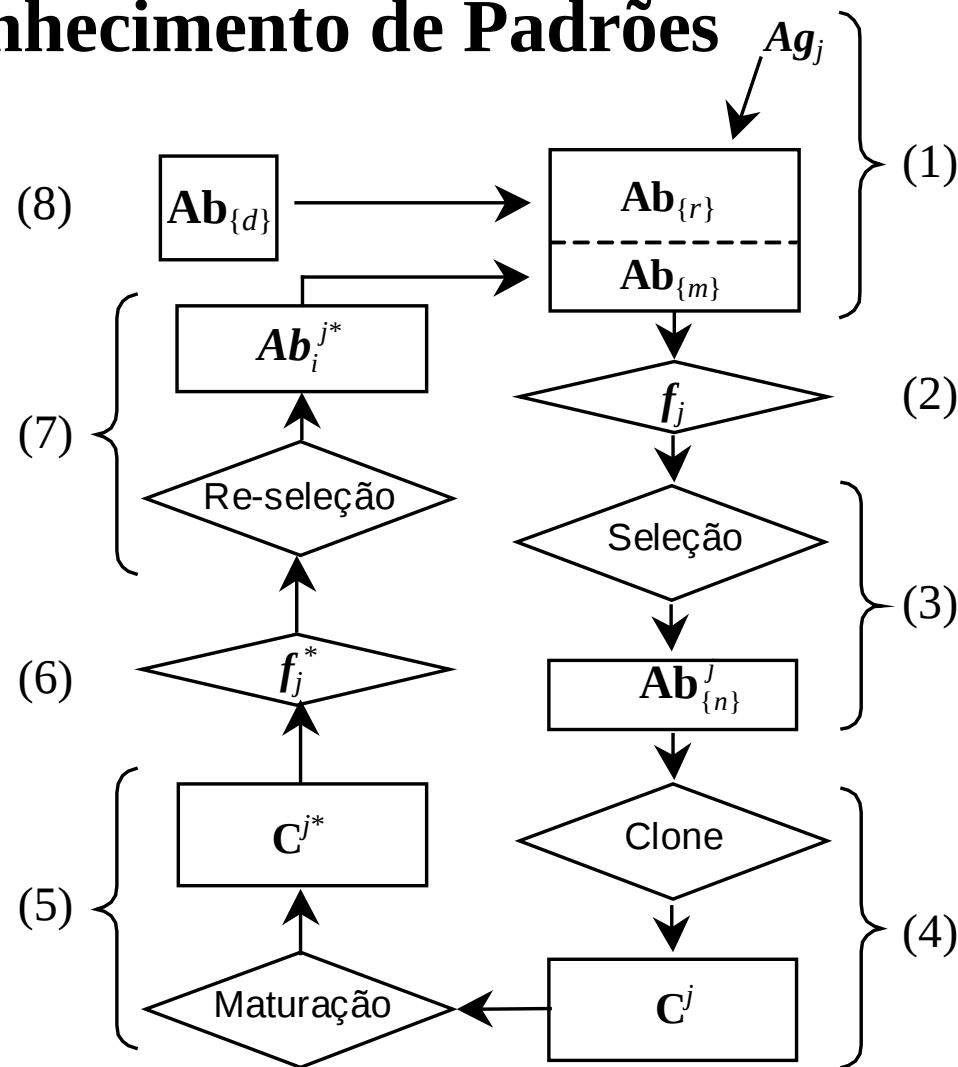
- Aprendizagem de máquina, reconhecimento de padrões, otimização multimodal e combinatorial, aproximação de funções

- **Características**

- Geração de variações genéticas através de um processo de hipermutação
- Proliferação e diferenciação celular após o reconhecimento antigênico seguindo o princípio da seleção clonal

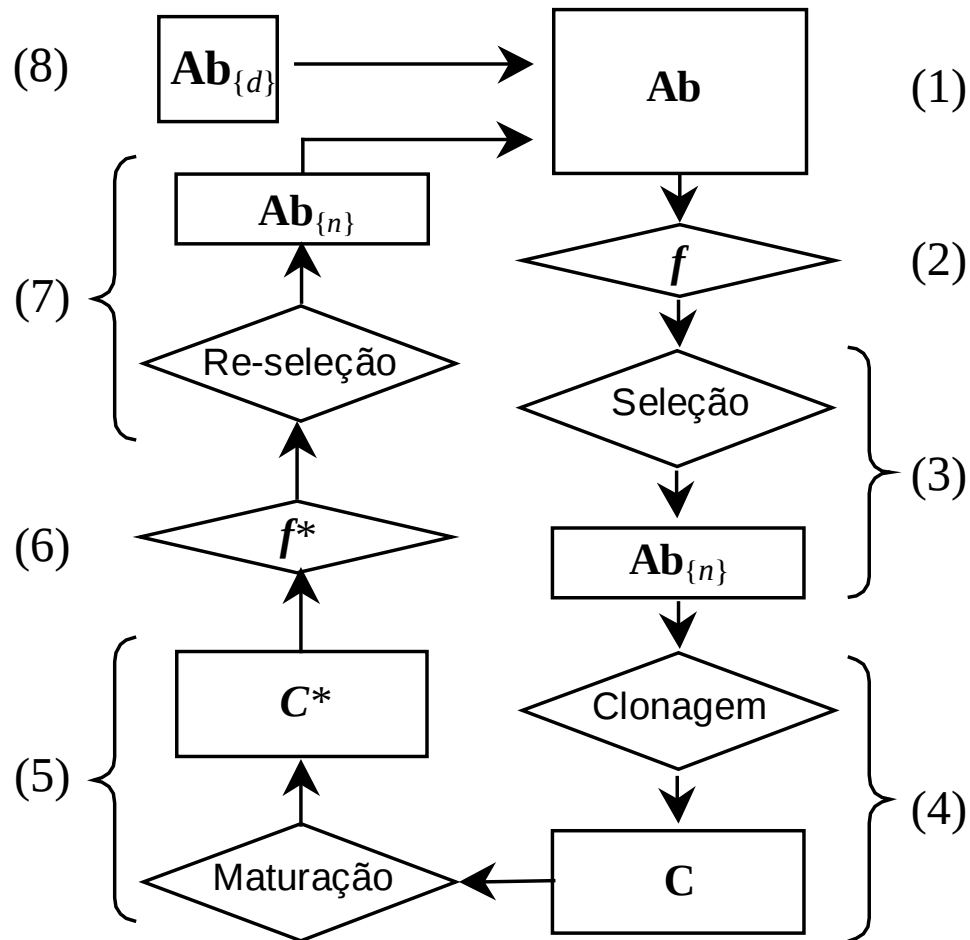
CLONALG (II)

- Reconhecimento de Padrões



CLONALG (III)

- Otimização



DEMO . . .

CLONALG

CLONALG

- **Discussão**

- Pode ser caracterizado como uma estratégia evolutiva
- Apresenta um alto grau de paralelismo
- O controle da taxa de mutação permite uma busca inicial por características mais gerais, e progressivamente aborda detalhes em escalas inferiores
- Os indivíduos da população são analisados localmente
- Utilização de heurísticas para obtenção de ótimos globais para problemas específicos

ABNET (I)

- **Objetivos**

- Utilizar princípios imunológicos no desenvolvimento de novos algoritmos de treinamento para RNAs

- **Aplicações**

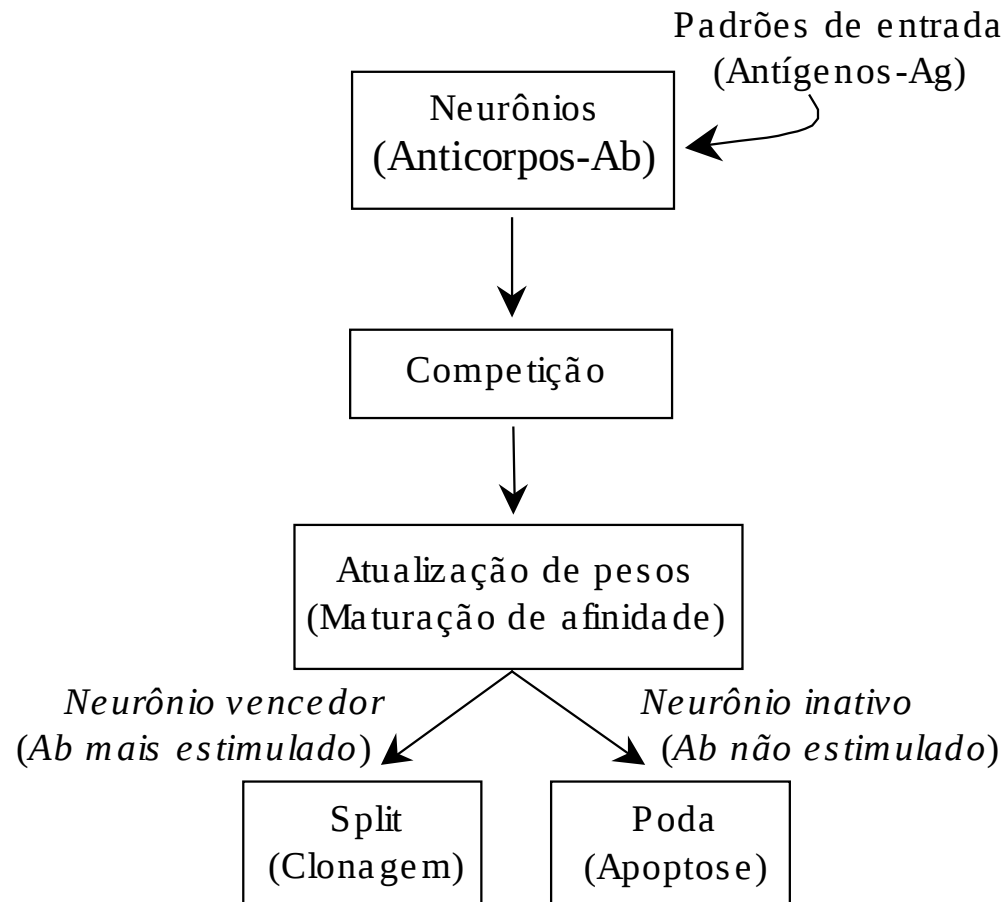
- Reconhecimento de padrões e clusterização

- **Características**

- Treinamento auto-organizado (não-supervisionado)
- Os vetores de pesos representam as células
- Conexões Booleanas
- Rede construtiva inspirada no princípio da seleção clonal
- Aprendizagem por maturação de afinidade (hipermutação)
- Etapas de poda baseadas no estímulo de cada célula

ABNET (II)

- **Algoritmo básico**



ABNET (III)

- **Medida de afinidade (distância Hamming):**

$$k = \arg \max_k \| \mathbf{A}g - \mathbf{A}b_k \|$$

- **Laço principal do algoritmo**

- Escolha um antígeno (padrão) aleatoriamente
- Determine a célula Ab_k com maior afinidade
- Atualize o vetor de pesos desta célula
- Incremente o nível de concentração (τ_j) desta célula
- Atribua $v_a = k$

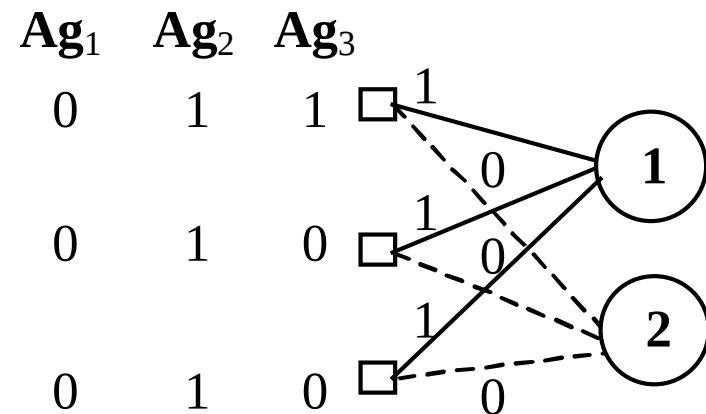
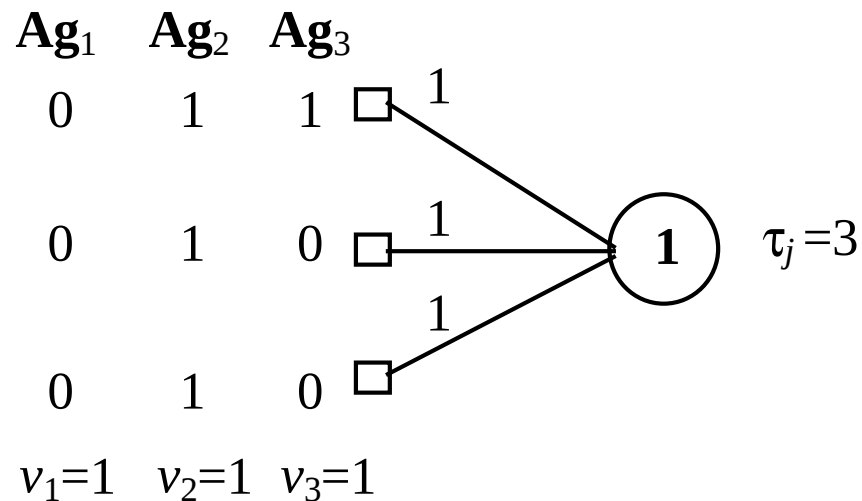
- **Cobertura:** $C = \sum_{i=0}^{\varepsilon} \binom{L}{i} = \sum_{i=0}^{\varepsilon} \frac{L!}{i!(L-i)!}$

- **As novas unidades são vizinhas das vencedoras**

ABNET (IV)

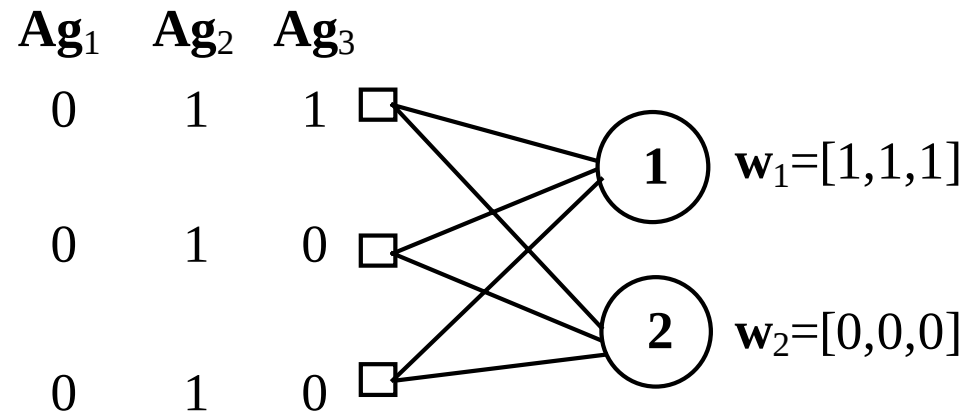
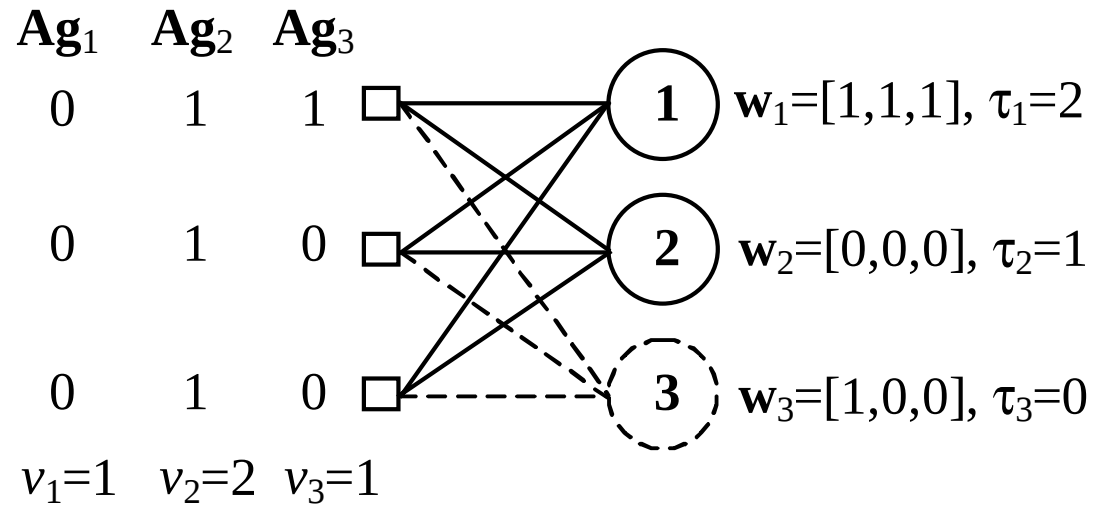
- **Construção**

$s = \arg \max_{j \in O} \mathbf{Ab}_j$, onde $O = \{\mathbf{Ab}_j \mid \tau_j > 1\}$



ABNET (V)

- Poda



ABNET (VI)

- **Maturação de Afinidade**

1	0	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Ag

0	0	1	1	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Ab_k (Afinidade: 5)

Atualização ($\alpha = 1$)

1	0	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Ag

0	1	1	1	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Ab_k (Afinidade: 6)

1	0	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Ag

0	0	1	1	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Ab_k (Afinidade: 5)

Atualização ($\alpha = 2$)

1	0	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Ag

0	1	1	1	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Ab_k (Afinidade: 7)

ABNET (VII)

```

function [Ab, F] = abnet(Ag, L, gen,  $\varepsilon$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta$ );
Ab := gera(1, L); % Gera Ab inicial
% A cada geração, faça:
for t = 1 to gen,
    for j = 1 to M, % Passo 1
        f(j, :) := afinidade(Ab, Ag(j, :)); % Passo 2
        Abk := select(Ab, f, 1); % Passo 3
        Abk* := dmut(Abk, Ag(j, :),  $\alpha$ ); % Passo 4
         $\tau_k$  :=  $\tau_k + 1$ ; % Passo 5
         $v_j$  := k; % Passo 6
    end;
    if (t mod  $\beta$ ) = 0,
        [Ab,  $\alpha$ ] := split(Ab, v,  $\tau$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha_0$ ); % Passo 7
         $\alpha$  :=  $\alpha - 1$ ;
    end;
    [Ab,  $\alpha$ ] := poda(Ab,  $\tau$ , t,  $\beta$ ,  $\alpha_0$ ); % Passo 7
    F := afinidade(Ab, Ag);
end;

```

DEMO...

ABNET

ABNET

- **Discussão**

- Utilização do algoritmo de seleção clonal para definição da arquitetura da rede
- Aprendizagem simulando a maturação de afinidade
- O emprego de um limiar de afinidade ϵ permite o controle da especificidade dos anticorpos
- Clusterização, ou agrupamento de padrões semelhantes
- As operações intrinsecamente binárias tornam esta arquitetura interessante para a implementação em hardware
- Solução de problemas de telecomunicações

aiNet (I)

- **Objetivos**

- Propor um modelo discreto de rede imunológica artificial

- **Aplicações**

- Análise de dados e clusterização (com o auxílio de ferramentas estatísticas e de teoria de grafos)

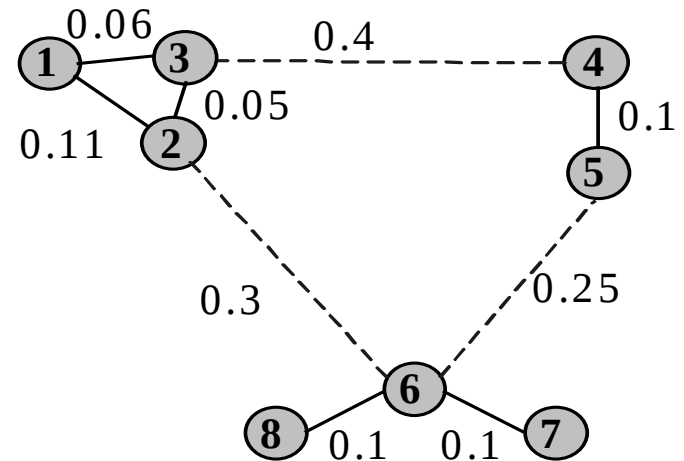
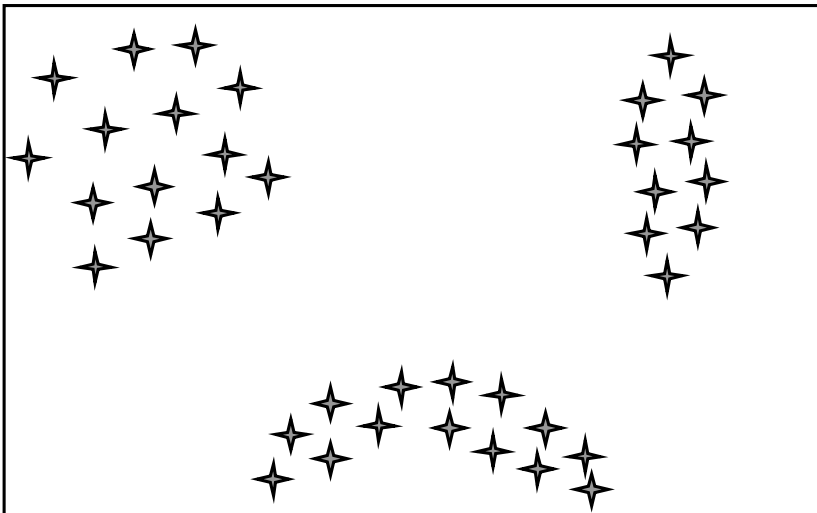
- **Características**

- Processo construtivo e de aprendizagem baseados no algoritmo CLONALG
- Conhecimento distribuído entre as células
- Conexões representando afinidade (distância) entre células da rede
- Capacidade de extração de relações entre as amostras de treinamento

aiNet (II)

- **Conceito**

- A *rede imunológica artificial*, denominada aiNet, é um grafo com conexões ponderadas, não necessariamente totalmente interconectado, composto por um conjunto de nós, denominados anticorpos, e conjuntos de pares de nós, denominados conexões, com uma valor característico associado, chamado de peso da conexão



aiNet (III)

- **Características:**
 - conhecimento distribuído entre as células
 - aprendizagem competitiva (não-supervisionada)
 - modelo construtivo com etapas de poda
 - geração e manutenção de diversidade
- **Construção:**
 - princípio da seleção clonal (algoritmo CLONALG)
- **Aprendizagem:**
 - maturação *direcionada* de afinidade
- **Poda:**
 - taxa de mortalidade natural (células pouco estimuladas)

aiNet (IV)

```

function [Ab{m}, S] = aiNet(Ag, L, gen, n,  $\zeta$ ,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_s$ , d);
Ab := gera(N0, L); % Gera Ab inicial
% A cada iteração, faça:
for t = 1 to gen, % Passo 1
    for j = 1 to M, % Passo 1.1
        {
            f(j, :) := afinidade(Ab, Ag(j, :)); % Passo 1.1.1
            Ab{n}(j, :) := select(Ab, f(j, :), n); % Passo 1.1.2
            C := clona(Ab{n}, 1, f(j, :)); % Passo 1.1.3
            C* := dmut(C, Ag(j, :), f(j, :)); % Passo 1.1.4
            f(j, :) := afinidade(C*, Ag(j, :)); % Passo 1.1.5
            M := select(C*, f(j, :),  $\zeta$ ); % Passo 1.1.6
            [M, f(j, :)] := suppress(M, f(j, :),  $\sigma_d$ ); % Passo 1.1.7
            S := afinidade(M, M); % Passo 1.1.8
            [M, S] := suppress(M, S,  $\sigma_s$ ); % Passo 1.1.9
            Ab{m} := insere(Ab{m}, M); % Passo 1.1.8
        }
    end;
    S := afinidade(Ab{m}, Ab{m}); % Passo 1.2
    [Ab{m}, S] := suppress(Ab{m}, S,  $\sigma_s$ ); % Passo 1.3
    Ab{d} := gera(d, L); % Gera Abd
    Ab := insere(Ab{m}, Ab{d}); % Passo 1.4
end;

```

aiNet (V)

$$1.1.1. \quad A = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\mathbf{A}b_i - \mathbf{A}g_i)^2} \quad (\text{afinidade})$$

$$1.1.2. \quad k = \arg \min_k \|\mathbf{A}g - \mathbf{A}b_k\|, k = 1, \dots, n \quad (\text{seleção clonal})$$

$$1.1.4. \quad \mathbf{A}b_k = \mathbf{A}b_k + \mu_k (\mathbf{A}b_k - \mathbf{A}g), \forall k \quad (\text{mutação direcionada})$$

$$1.1.5. \quad k = \arg \min_k \|\mathbf{A}g - \mathbf{A}b_k\|, k = 1, \dots, \zeta\% \quad (\text{re-seleção/afinidade})$$

$$1.1.7. \quad D = \sqrt{\sum_{i=1}^L (\mathbf{A}b_i - \mathbf{A}b_i)^2} \quad (\text{supressão clonal})$$

Critério de parada: no. fixo de gerações

DEMO. . .

aiNet

aiNet

- **Discussão**

- Automação do processo de descoberta de conhecimento (*knowledge discovery*)
- Compactação de dados
- Definição automática de clusters
- Os anticorpos da rede possuem a mesma dimensão dos dados de entrada (antígenos)
- Mantém a topologia original dos dados de entrada
- Junção de duas teorias originalmente contraditórias: seleção clonal e teoria da rede imunológica
- Criação de vizinhança a posteriori

Discussão

- **Importância da biologia (sistemas naturais) para a engenharia e vice-versa**
- **Crescente interesse pelos SIA**
- **Proposta de soluções alternativas para problemas de engenharia de complexidade elevada**
- **Característica de sistemas inteligentes**
- **Similaridades e diferenças com outras abordagens de sistemas inteligentes, como RNA, CE, SF, etc.**

Contribuições

- **Proposição de uma nova linha de pesquisa: EI**
- **Estudo histórico sobre os SIAs**
- **Apresentação de um modelo formal para o desenvolvimento da EI**
- **Concatenação da grande maioria das referências sobre SIAs até o momento**
- **Correlação entre SIA, RNA, CE, SF, etc.**
- **Discussões sobre aspectos cognitivos e evolutivos dos sistemas imunológicos**
- **Proposição de 4 ferramentas de EI**
- **Sugestão de diversas extensões para a tese**

Perspectivas

- **Propostas de novos algoritmos de SIAs**
 - Algoritmos que tratam mecanismos ainda não modelados, p. ex. o sistema complemento
- **Propostas de variações a aperfeiçoamento dos algoritmos desenvolvidos na tese**
 - Definição automática de parâmetros
 - Utilização de outros operadores de seleção, mutação, etc.
- **Especulações sobre o futuro da área**
 - Novos sistemas híbridos
 - Maior proximidade de geração de comportamentos emergentes, p.ex. em vida artificial

De tudo, ficaram três coisas:

A certeza de que estava sempre começando;

A certeza de que era preciso continuar;

A certeza de que enfrentaríamos obstáculos pela frente.

Fernando Sabino

Maiores Informações

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

ou

lnunes@dca.fee.unicamp.br