

Sistemas Híbridos Inteligentes

HMLT - Hybrid Machine Learning Tools

Congresso da SBC - ENIA '99

Autores:

Prof. Dr. Fernando Osório

Prof. Dra. Renata Vieira

Rio de Janeiro - Julho 1999



UNISINOS - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Informática

E-mail: osorio@exatas.unisinos.br

renata@exatas.unisinos.br

Web: <http://www.inf.unisinos.br/~osorio/>

Tópicos abordados:

0. Introdução

1. Inteligência Artificial: Métodos Simbólicos

1.1 Conceitos Básicos

1.2 Aquisição e Representação de Conhecimentos

1.3 Aprendizado Simbólico

1.4 Vantagens e Desvantagens

2. Inteligência Artificial: Métodos Conexionistas (*Redes Neurais*)

2.1 Conceitos Básicos

2.2 Representação de Conhecimentos

2.3 Modelos Conexionistas - Classificação

2.4 Aprendizado Neural

2.5 Vantagens e Desvantagens

3. Sistemas Híbridos Inteligentes

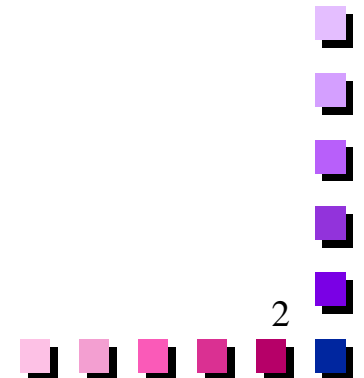
3.1 Conceitos Básicos

3.2 Tipos de Integração

3.3 Sistemas Híbridos Neuro-Simbólicos (SHNS)

3.4 Exemplos de SHNS: SYNHESYS, KBANN, INSS

3.5 Considerações Finais



I.A. - Métodos Simbólicos: Conceitos Básicos



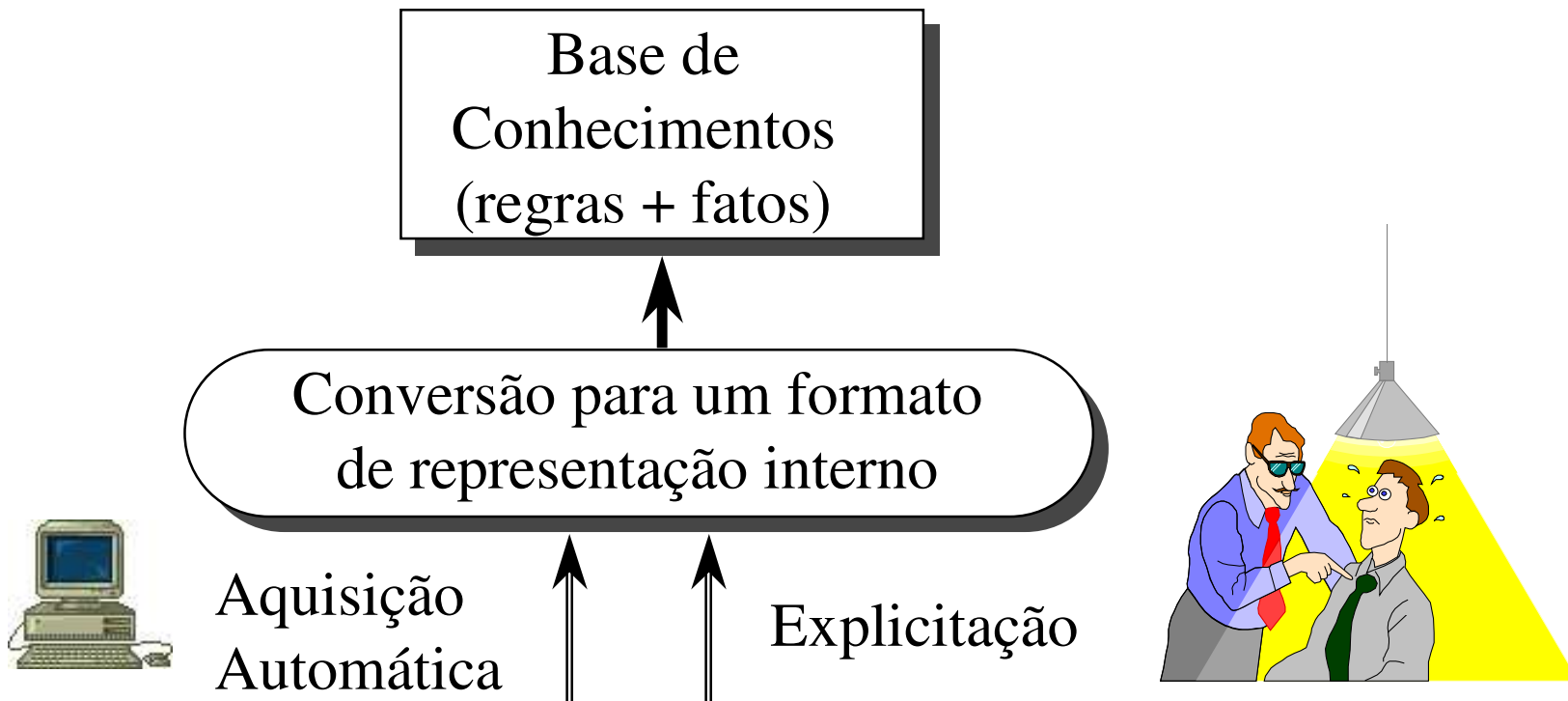
REPRODUZIR A
→
INTELIGÊNCIA HUMANA



- **Conceito de Inteligência**
- **Atividades Inteligentes**
- **Sistemas Inteligentes:**
 - * **Sistemas Especialistas**
 - * **Sistemas de Apoio ao Diagnóstico e a Decisão**
 - * **Reprodução de atividades típicas dos seres humanos:**
Fala, Audição, Visão, Deslocamento, Manipulação de Objetos, etc.

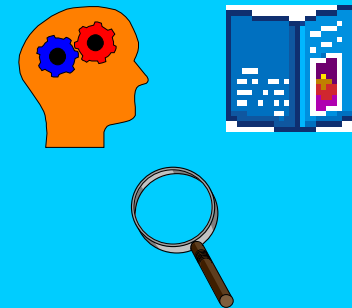


Métodos Simbólicos: Aquisição de Conhecimentos



Conhecimentos sobre uma área de aplicação:

- *Conhecimentos do especialista*
- *Teorias sobre o domínio de aplicação*
- *Resultados de experiências praticas (casos conhecidos)*



Métodos Simbólicos: Representação de Conhecimentos

- * **Sistemas baseados em conhecimentos:**
KBS - Knowledge Base Systems, Expert Systems (Frames e Redes Semânticas)
Rule Based Systems, Production Rule Systems
- * **Sistemas baseados em regras de lógica difusa ou nebulosa**
Fuzzy Expert Systems
- * **Sistemas baseados em probabilidades**
Redes Bayesianas
- * **Sistemas baseados em casos ou exemplos**
CBR - Case Based Reasoning
- * **Árvores de decisão**
IDT - Inductive Decision Trees
- * **Algoritmos Genéticos**
GA - Genetic Algorithms

Sistemas Especialistas baseados em Conhecimento Simbólico
Dado um problema:
Assume-se usualmente \Rightarrow Conhecimento é *Completo e Correto*

Métodos Simbólicos: Representação de Conhecimentos

⇒ Conhecimentos Teóricos

$$\text{XOR} = (A \text{ Or } B) \text{ And Not } (A \text{ And } B)$$

ou

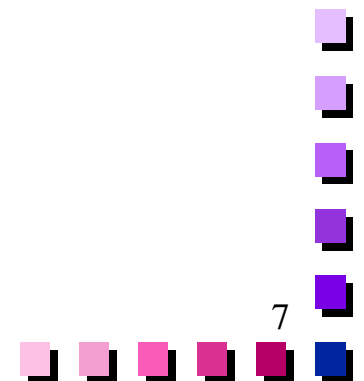
$$\text{XOR} = (A \text{ And Not } (B)) \text{ Or } (\text{Not } (A) \text{ And } B)$$

⇒ Conhecimentos Empíricos

A	B	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Métodos Simbólicos: Aprendizado

- **Aprendizado por analogia**
Sistemas baseados em casos
CBR - Case Based Reasoning
- **Aprendizado por Indução**
Árvores de Decisão
ID3, C4.5, CN2 - Induction of Decision Trees
ILP - Inductive Logic Programming (Prolog)
- **Aprendizado por Explicação**
EBL - Explanation-Based Learning
- **Aprendizado por evolução/seleção**
Algoritmos Genéticos
GA e GP - Genetic Algorithms / Genetic Programming



BASE DE DADOS SOBRE O PROBLEMA

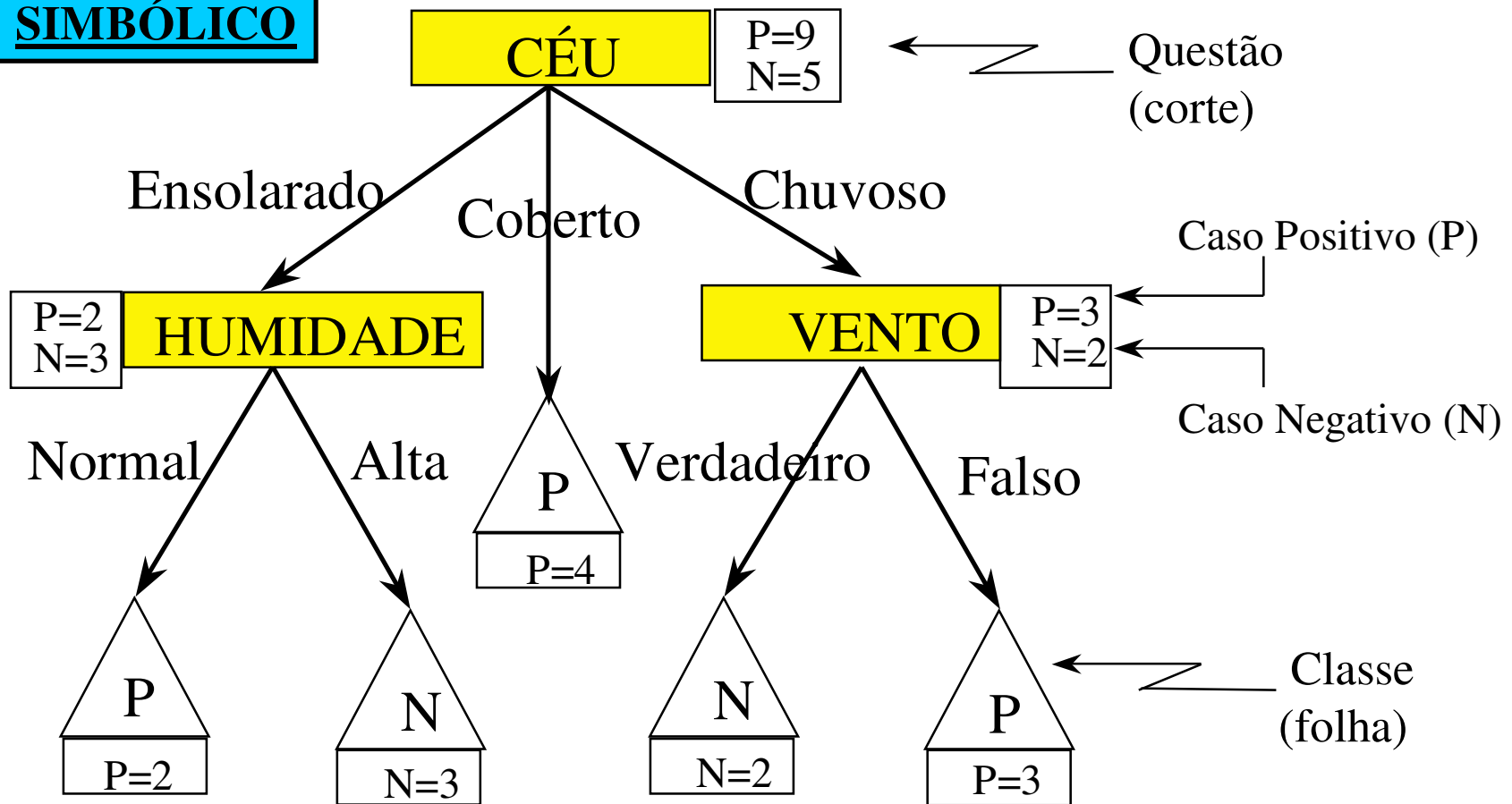
<i>NÚMERO</i>	<i>CÉU</i>	<i>TEMPERATURA</i>	<i>HUMIDADE</i>	<i>VENTO</i>	<i>CLASSE</i>
1	ensolarado	elevada	alta	não	N
2	ensolarado	elevada	alta	sim	N
3	coberto	elevada	alta	não	P
4	chuvoso	média	alta	não	P
5	chuvoso	baixa	normal	não	P
6	chuvoso	baixa	normal	sim	N
7	coberto	baixa	normal	sim	P
8	ensolarado	média	alta	não	N
9	ensolarado	baixa	normal	não	P
10	chuvoso	média	normal	não	P
11	ensolarado	média	normal	sim	P
12	coberto	média	alta	sim	P
13	coberto	elevada	normal	não	P
14	chuvoso	média	alta	sim	N

Tabela – Conjunto de dados de aprendizado : Condições meteorológicas

N = Negativo (tempo ruim)

P = Positivo (tempo bom)

SIMBÓLICO

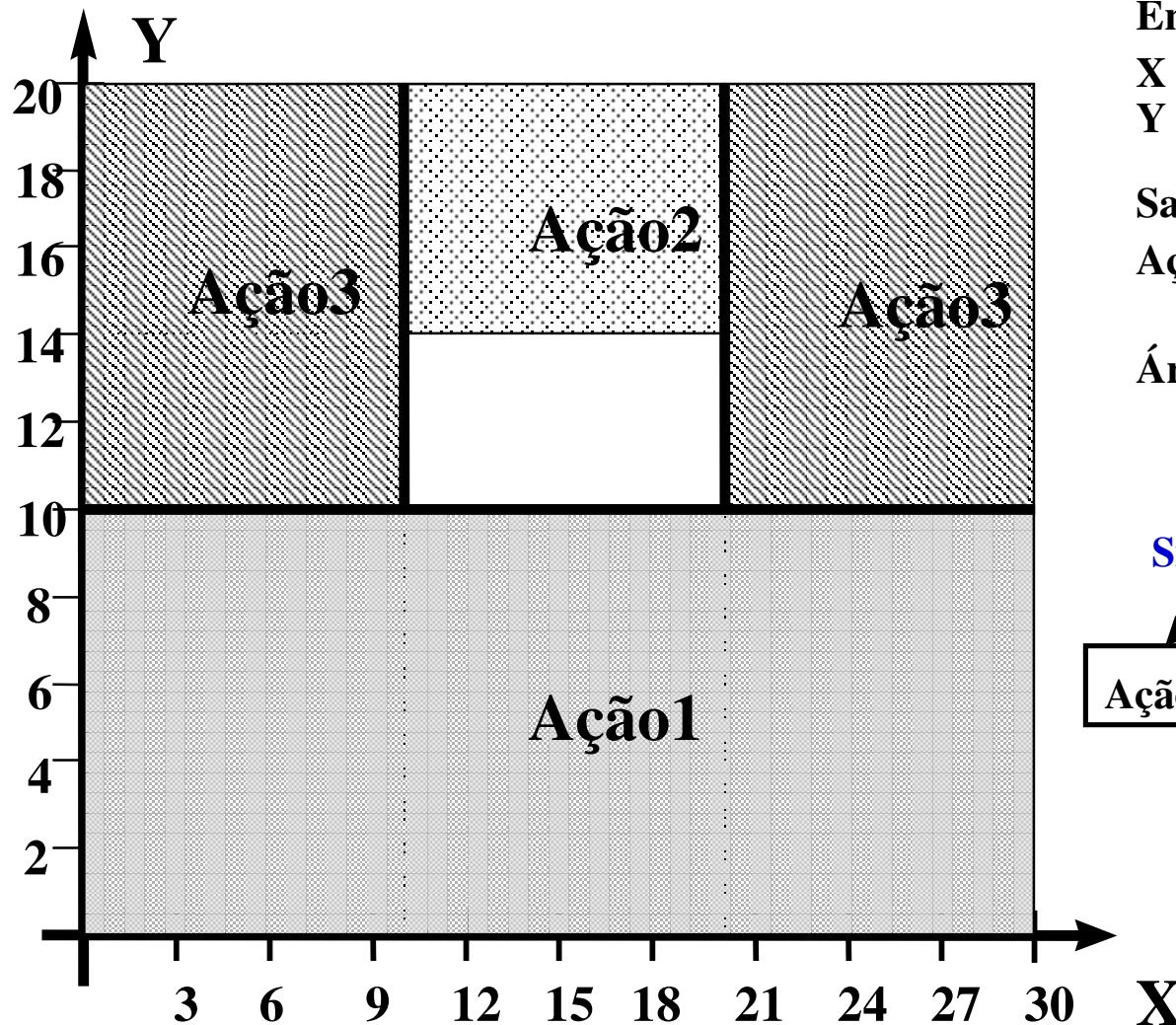


IF ((CÉU=Ensolarado *and* HUMIDADE=Normal) *or*
 (CÉU=Coberto) *or*
 (CÉU=Chuvoso *and* VENTO=Falso))

Then Classe = P

ARVORE DE
DECISÃO

Métodos Simbólicos: Árvores de Decisão



Entradas:

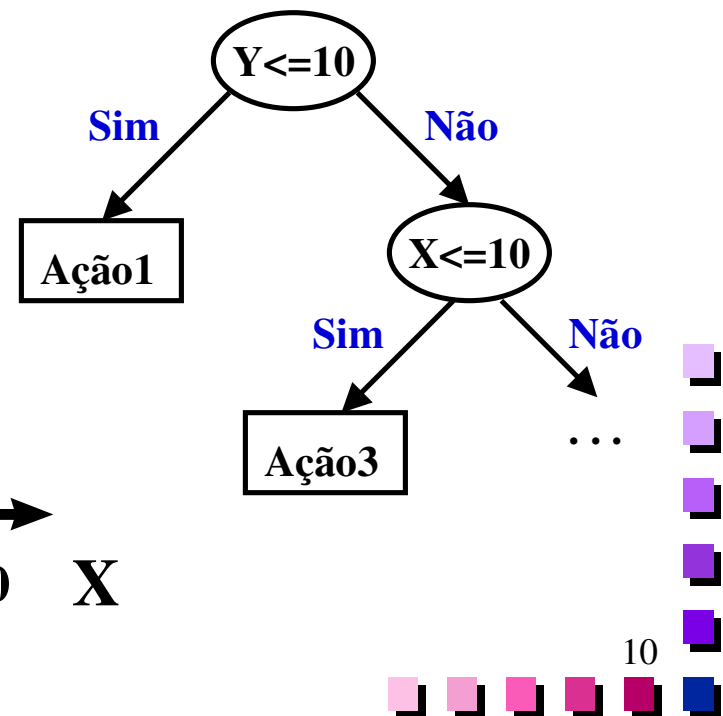
$X = [0..30]$

$Y = [0..20]$

Saídas (Ações):

Ação1  , Ação2  , Ação3 

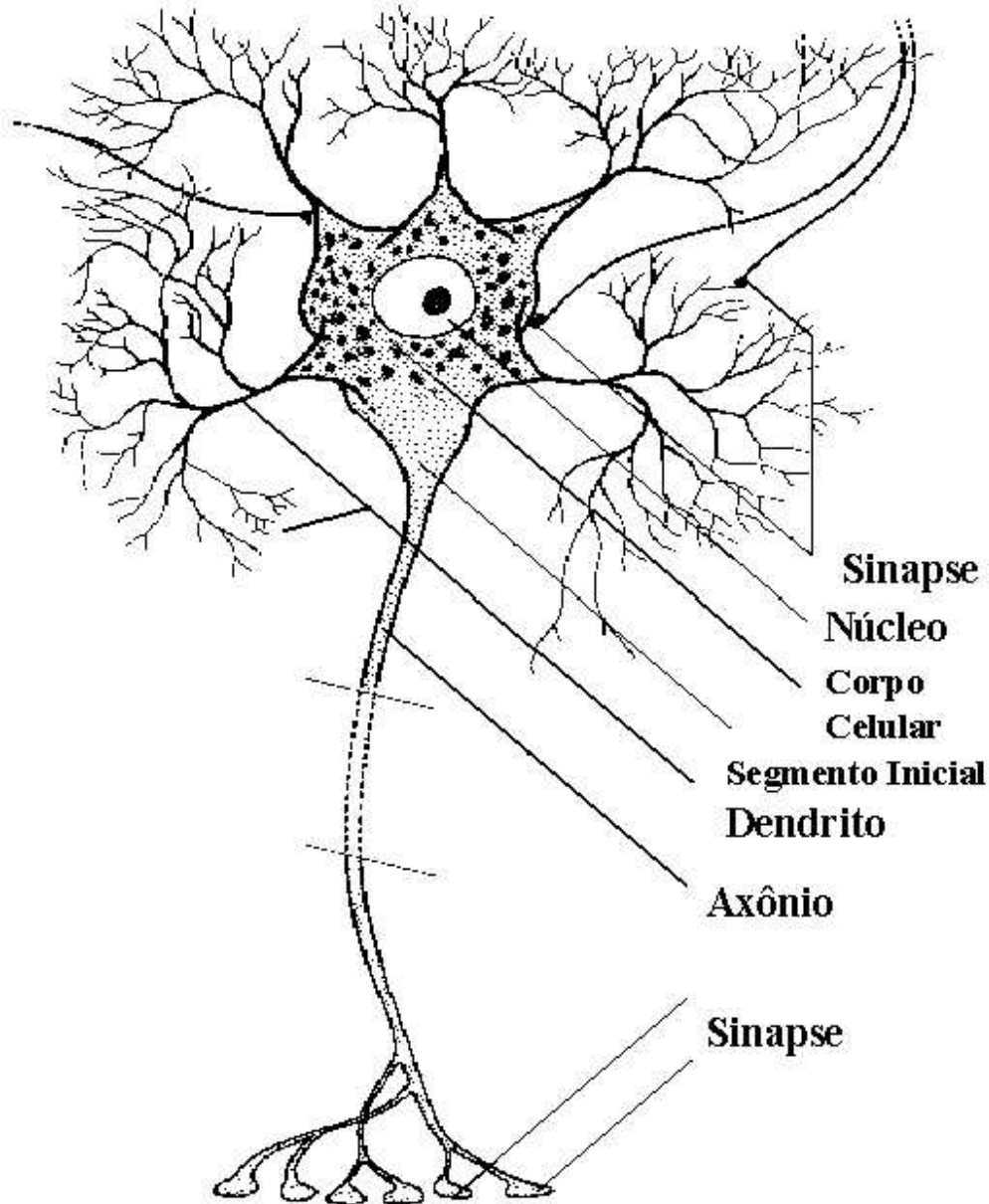
Árvore de Decisão:



Métodos Simbólicos: Vantagens e Desvantagens

- + Conhecimento representado por **regras** (ou outra estrutura similar) que podem ser **facilmente interpretadas e analisadas**;
- + **Permite a explicação** do processo que levou a uma determinada **resposta**;
- + **Fácil inserção de novos conhecimentos** obtidos à partir do especialista ou através de métodos automáticos de aquisição de conhecimentos;
- Necessidade de se trabalhar com **conhecimentos completos e exatos** sobre um determinado problema;
- Dificuldade de **explicitar todos os conhecimentos** relativos ao problema através de regras simbólicas;
- Dificuldade para tratar **informações imprecisas ou aproximadas**, e valores numéricos (**dados quantitativos**).

I.A. - Métodos Conexionistas: Conceitos Básicos



Redes Neurais Artificiais:

Neurônio...

Modelo Simulado

Modelo SIMPLIFICADO

Características Básicas:

Adaptação

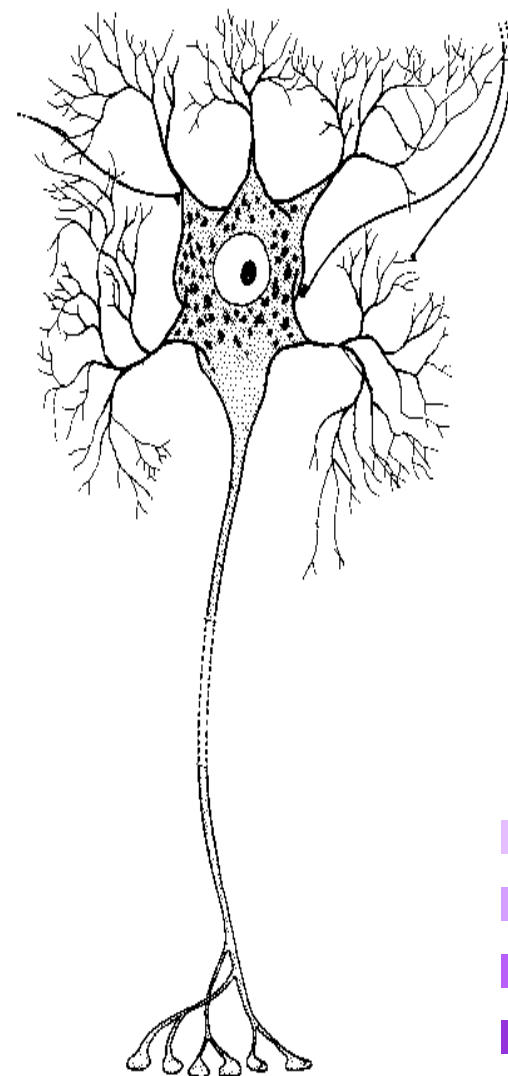
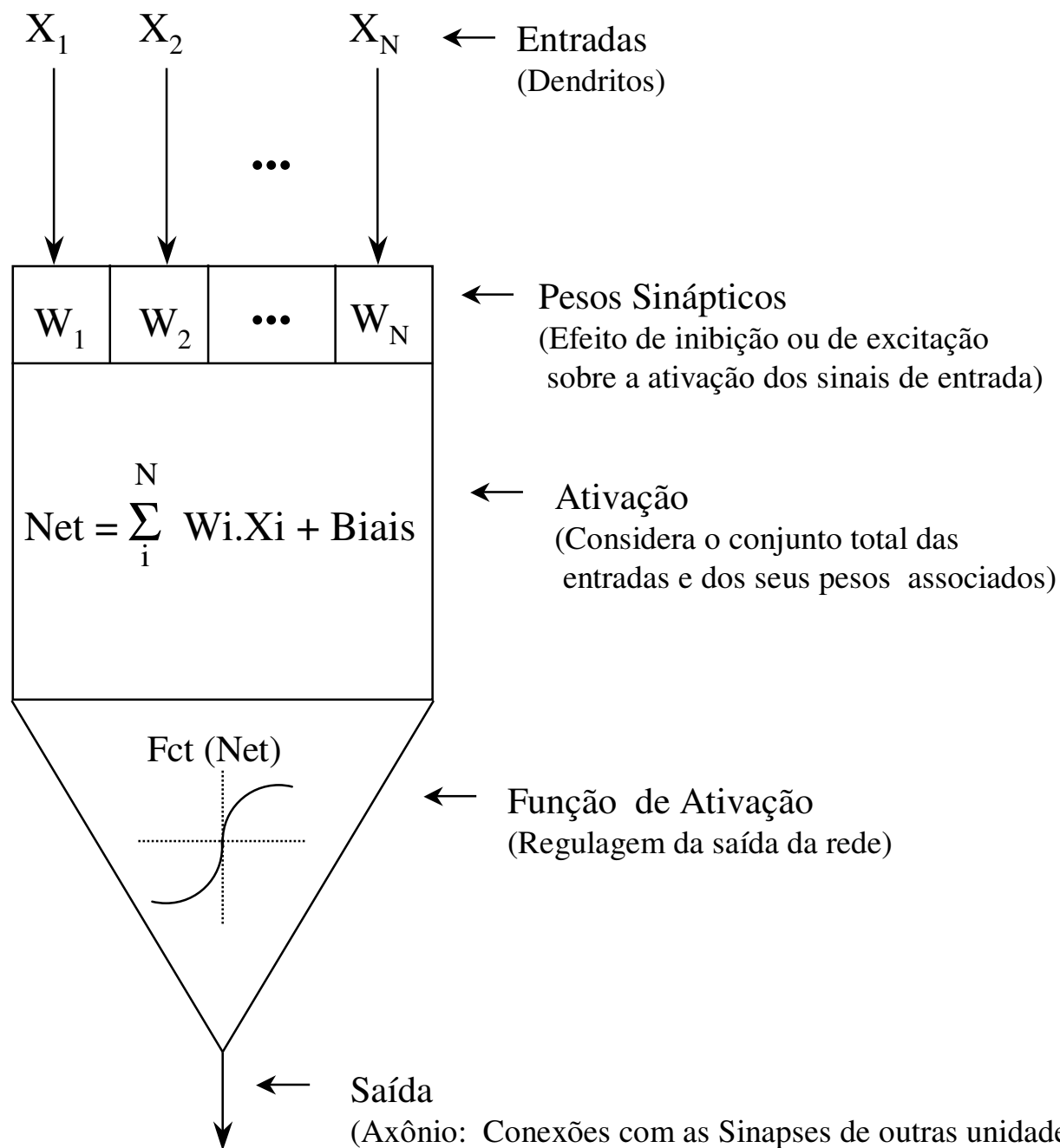
Aprendizado

Autômato

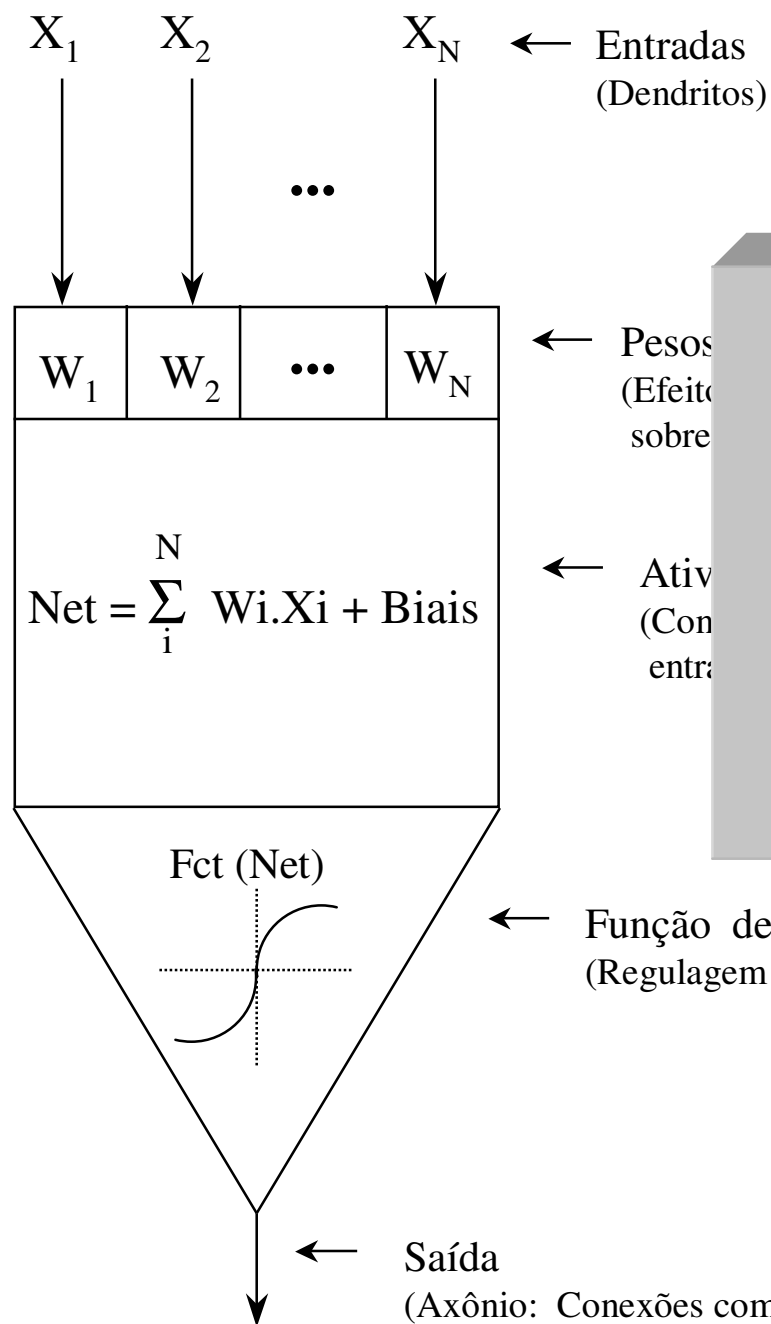
Representação de Conhecimentos:

Baseada em Conexões

NEURAL



NEURAL



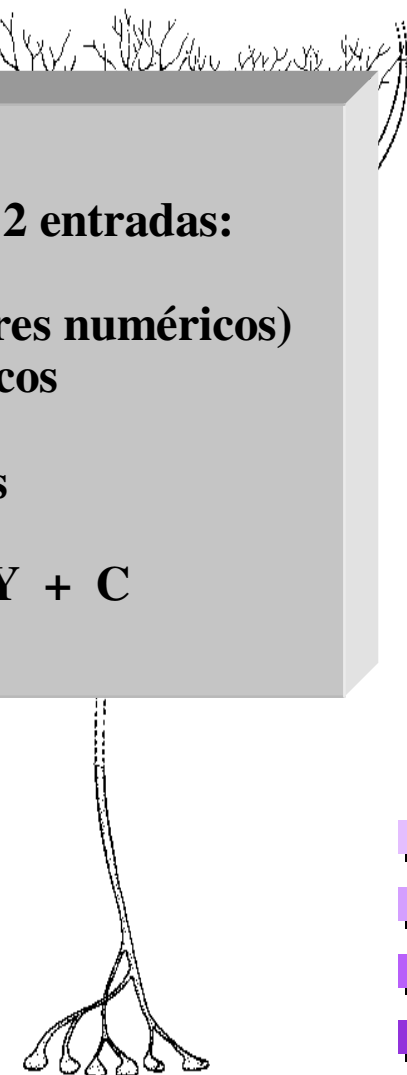
Rede Neural com apenas 2 entradas:

X, Y - Entradas (Valores numéricos)

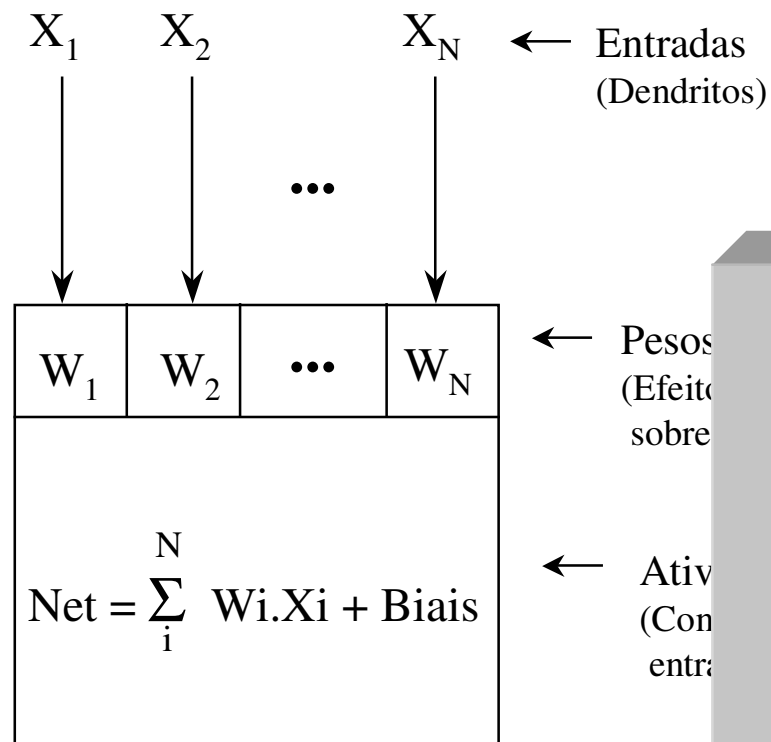
W_1, W_2 - Pesos Sinápticos

$$\text{Saída} = \sum W_i \cdot X_i + \text{Biais}$$

$$= W_1 \cdot X + W_2 \cdot Y + C$$



NEURAL



Rede Neural com apenas 2 entradas:

X, Y - Entradas (Valores numéricos)
 W_1, W_2 - Pesos Sinápticos

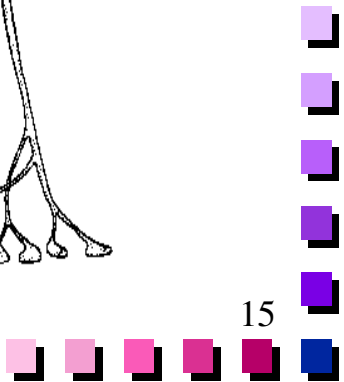
Saída = $\sum W_i.X_i + \text{Biais}$

$= W_1 \cdot X + W_2 \cdot Y + C$

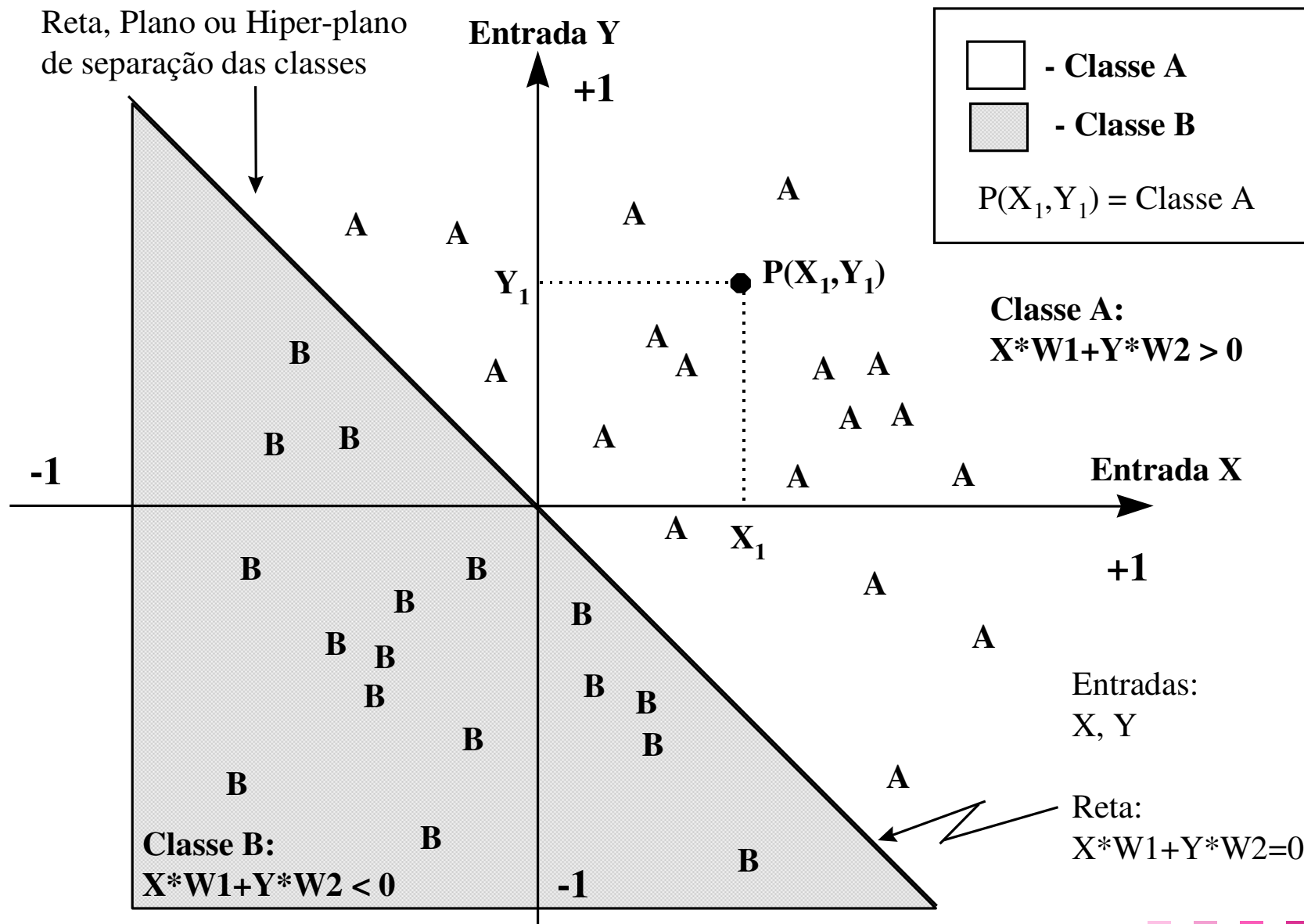
X	Y	AND
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ção
da rede)

apses de outras unidades)



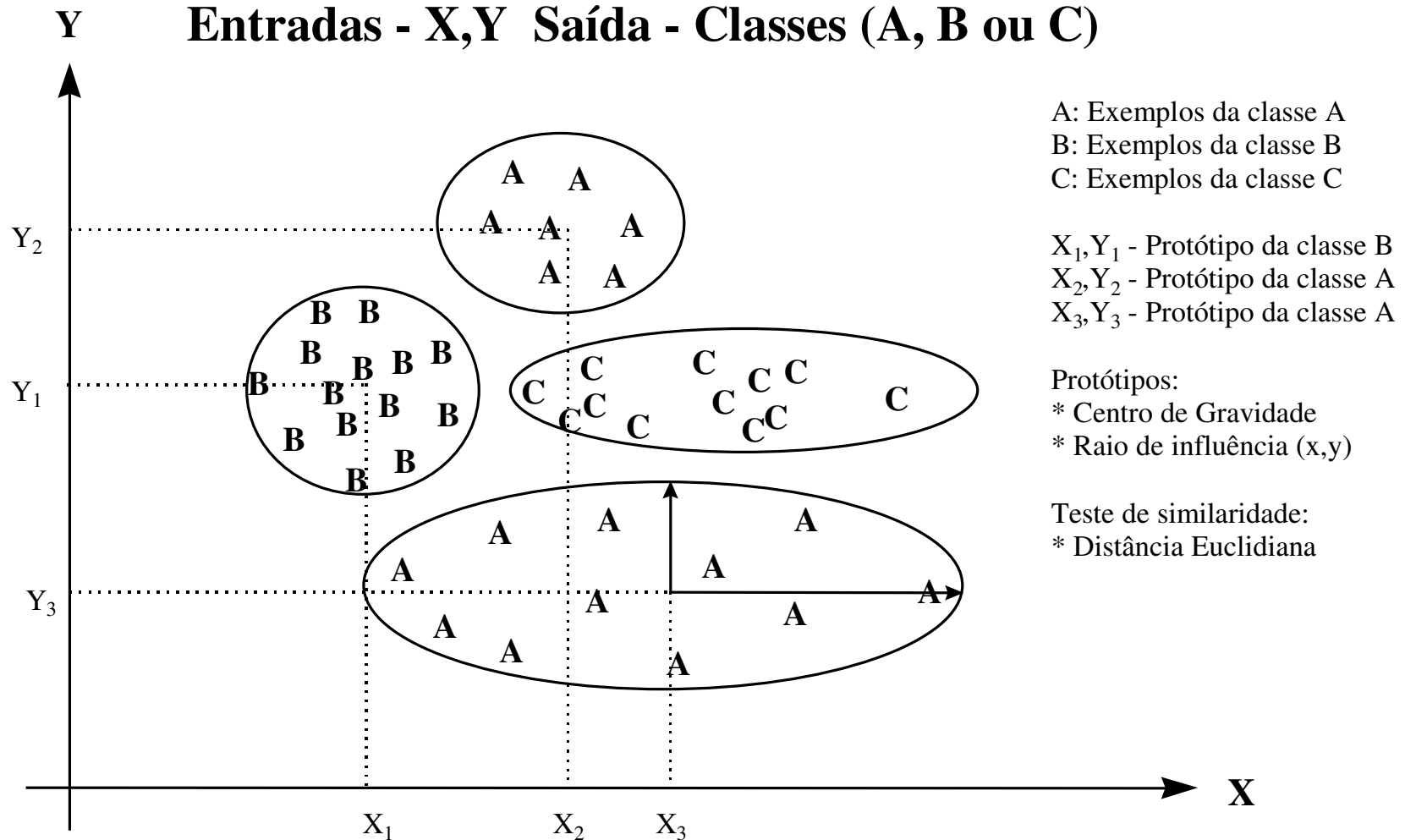
Métodos Conexionistas: Representação de Conhecimentos



Métodos Conexionistas: Representação de Conhecimentos

Redes à base de Protótipos

Entradas - X,Y Saída - Classes (A, B ou C)



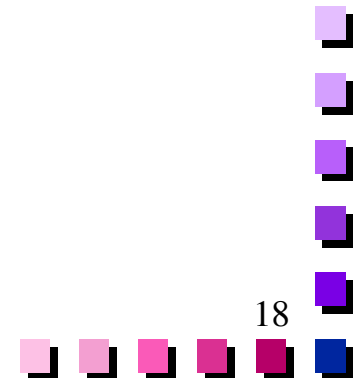
Modelos Conexionistas: Classificação

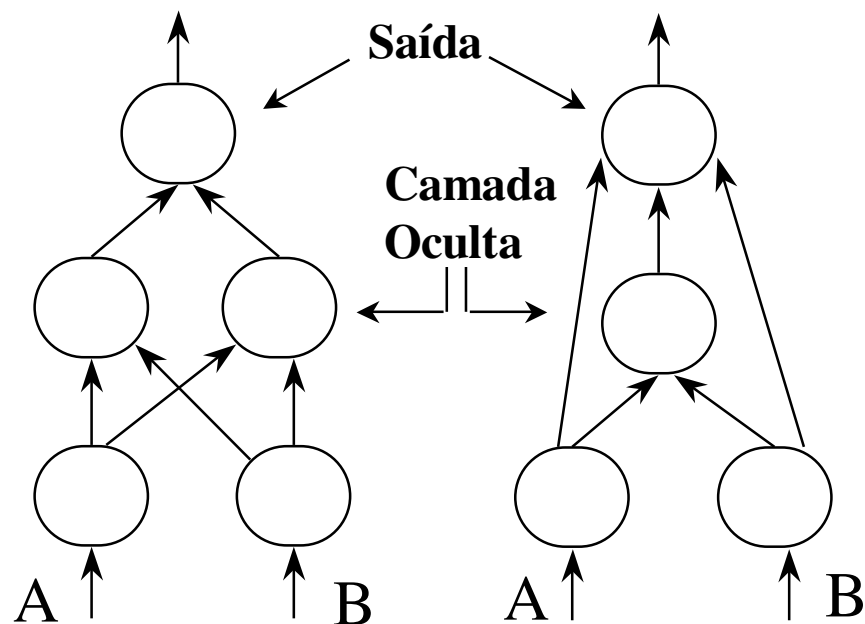
⇒ Em relação as unidades da rede:

- * Redes baseadas em Perceptrons (MLP - *Multi-Layer Perceptron*)
- * Redes baseadas em Protótipos (RBF - *Radial Basis Function*)

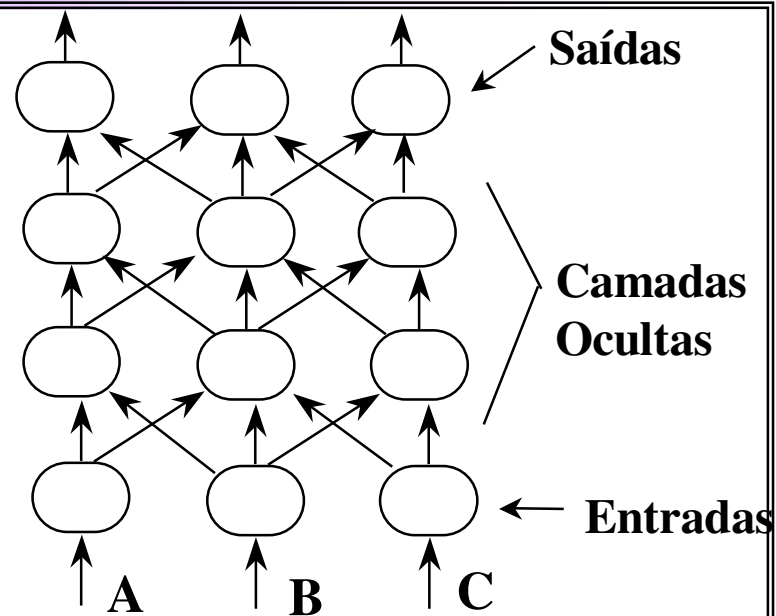
⇒ Em relação a estrutura da rede:

- * Redes de uma única camada
- * Redes de múltiplas camadas
- * Redes do tipo uni-direcional (*Feed-Forward*)
- * Redes do tipo recorrentes (*Feed-Back*)
- * Redes com estrutura estática (não altera sua estrutura)
- * Redes com estrutura dinâmica (altera a estrutura)
- * Redes com conexões de ordem superior

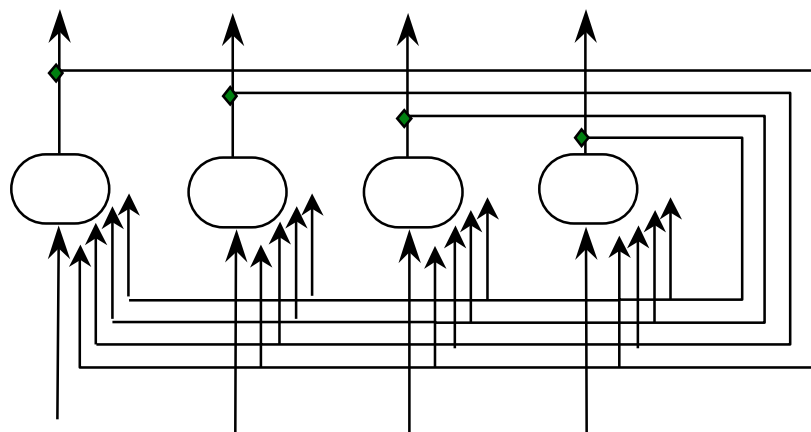




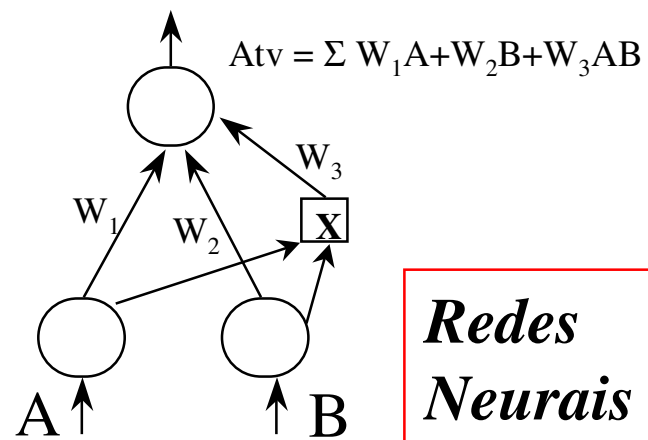
(a) Rede de três camadas (b) Rede com atalhos



(c) Rede com múltiplas camadas



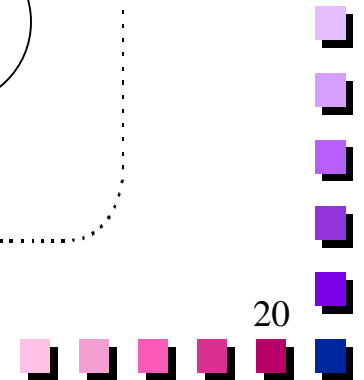
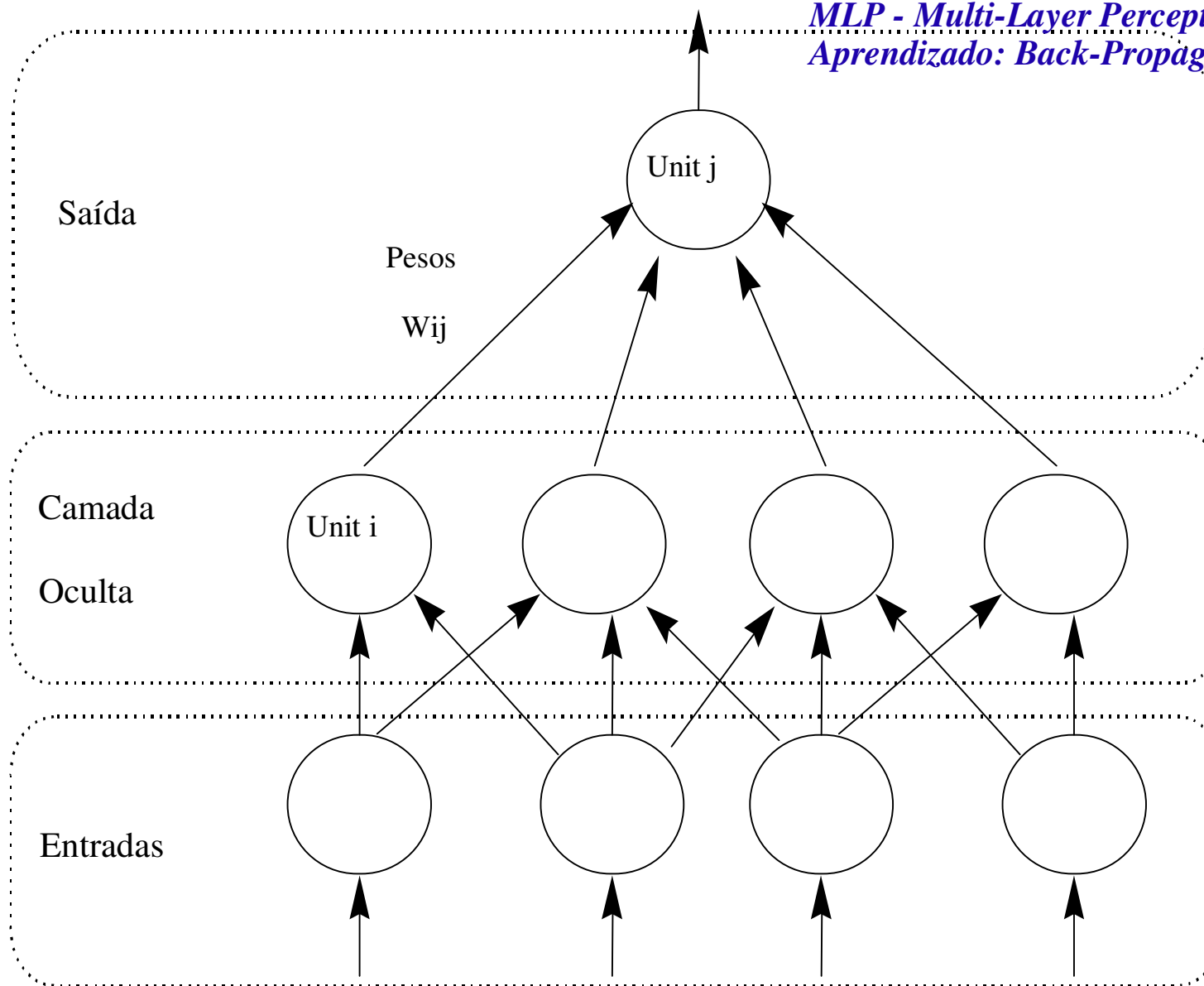
(d) Rede recorrente



(e) Rede de ordem superior

**Redes
Neurais**

MLP - Multi-Layer Perceptron
Aprendizado: Back-Propagation



Modelos Conexionistas: Classificação

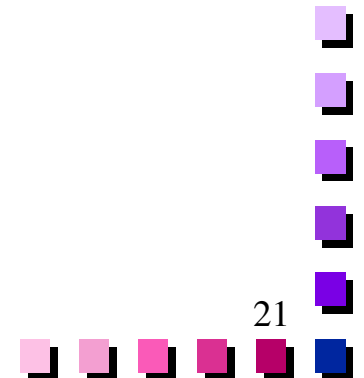
⇒ Em relação ao aprendizado:

- * Aprendizado supervisionado
- * Aprendizado semi-supervisionado (reinforcement learning)
- * Aprendizado não supervisionado (self-organizing, clustering)

- * Aprendizado instantâneo
- * Aprendizado por pacotes
- * Aprendizado contínuo
- * Aprendizado ativo

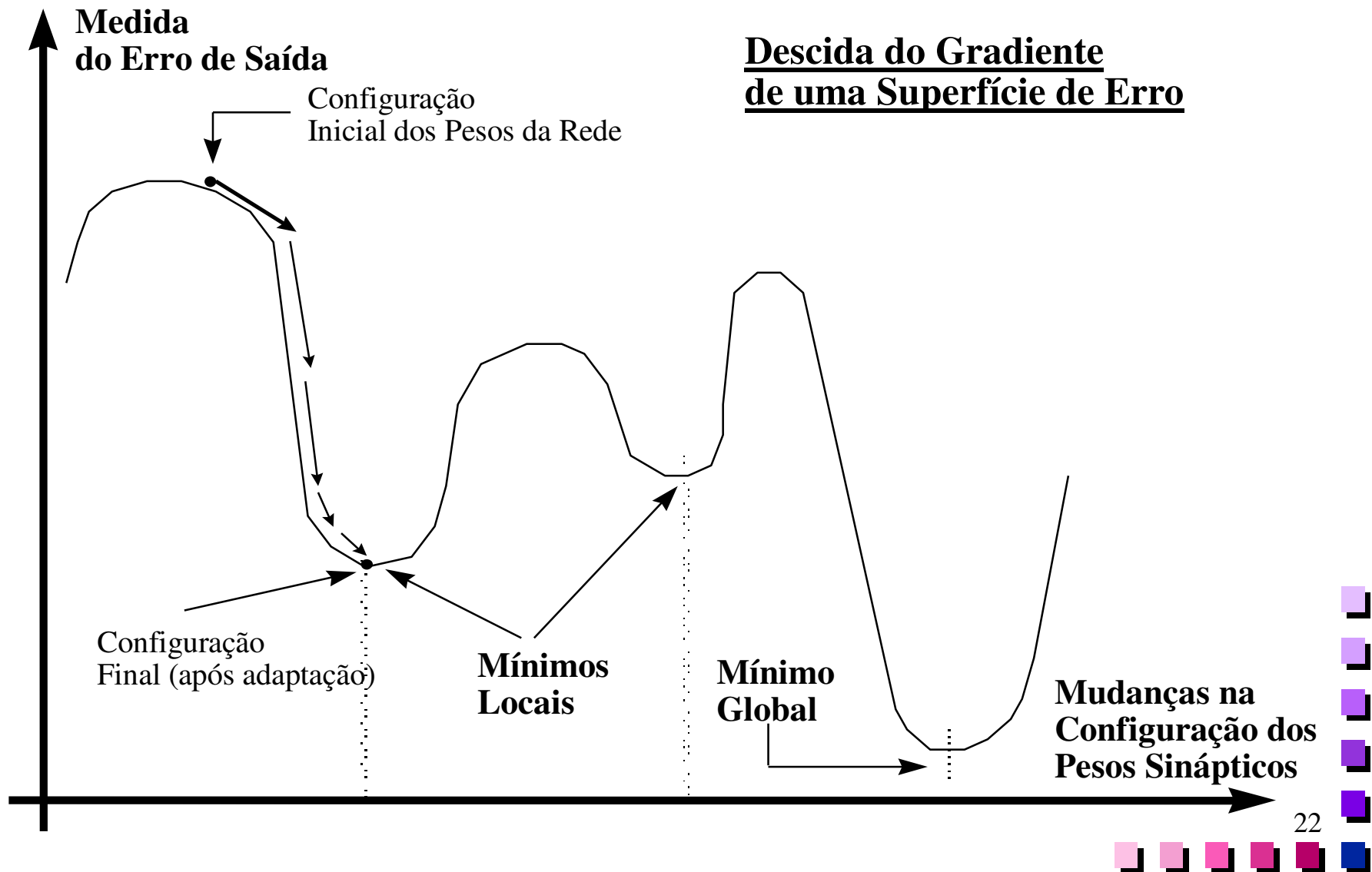
- * Aprendizado: aproximação de funções
- * Aprendizado: classificação

- * Usar apenas uma base de exemplos de aprendizado
- * Usar uma base de aprendizado e uma base de teste de generalização

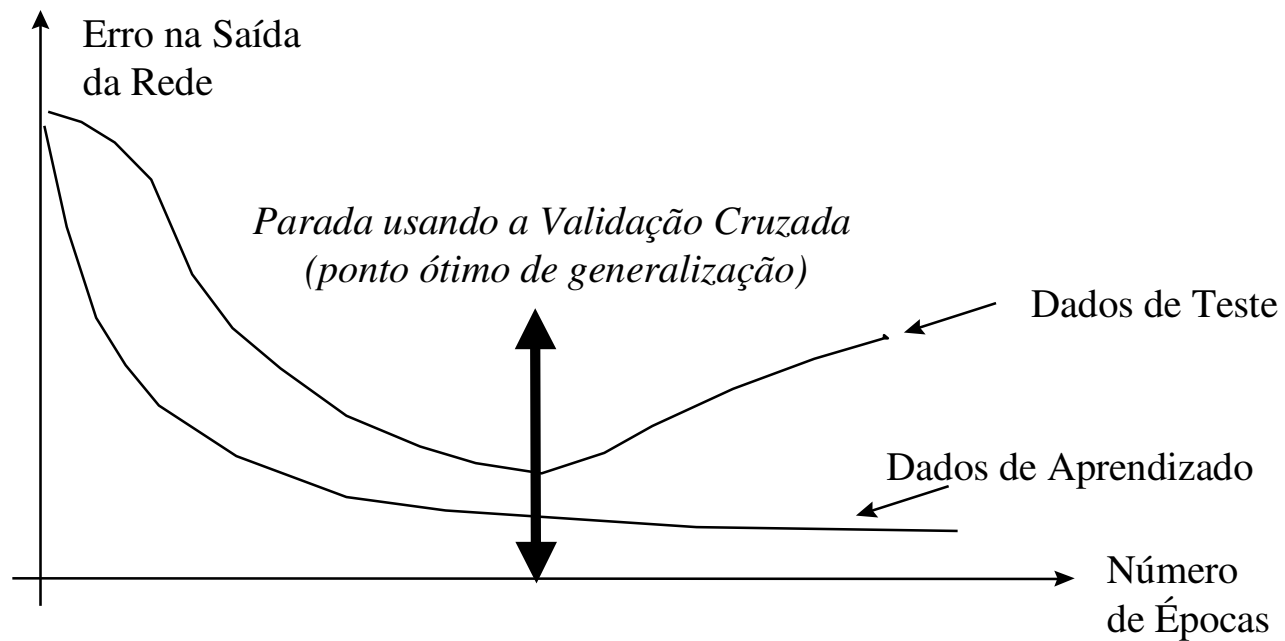
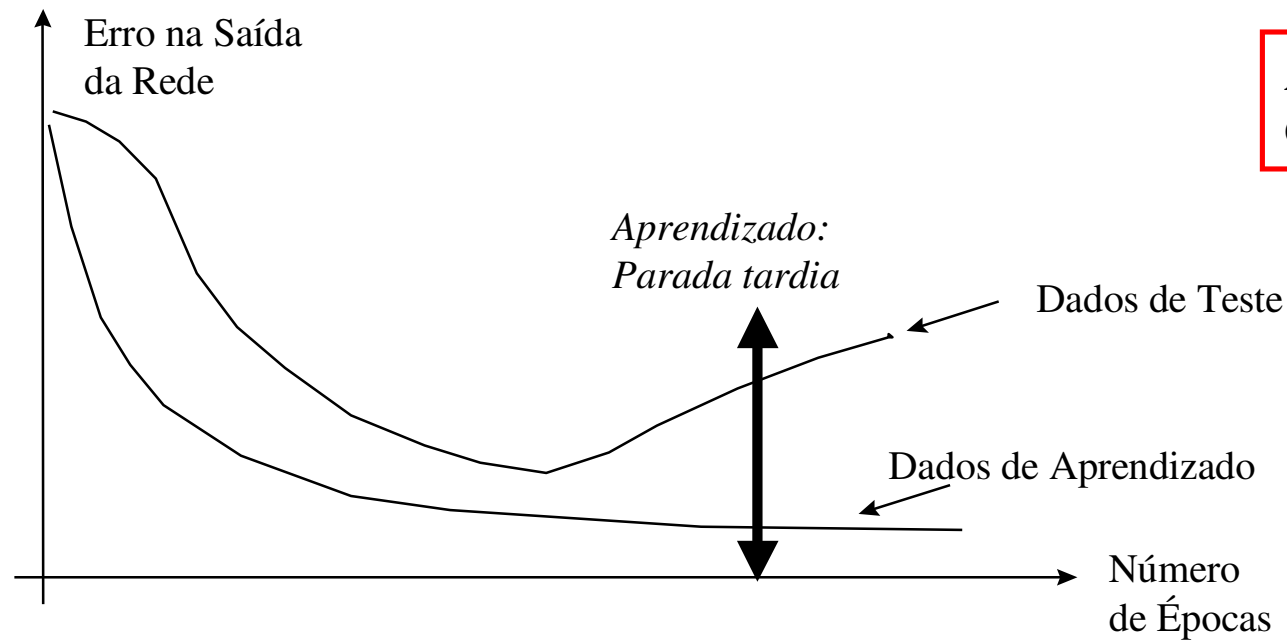


Modelos Conexionistas: Aprendizado Neural

APRENDIZADO = Adaptação das conexões (pesos sinápticos)

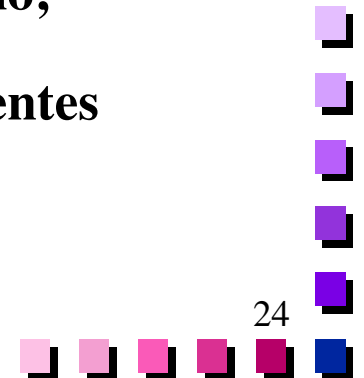


APRENDIZADO: GENERALIZAÇÃO



Métodos Conexionistas: Vantagens e Desvantagens

- + **Aquisição automática de conhecimentos empíricos** à partir de uma base de exemplos de aprendizado referente a um problema;
- + Manipulação de **dados quantitativos, aproximados e mesmo incorretos** com uma degradação gradual das respostas;
- + Grande **poder de representação de conhecimentos** através da criação de relações ponderadas entre as entradas do sistema;
- **Dificuldade de configuração** das redes em relação à sua **estrutura** inicial e também no que se refere aos **parâmetros** dos algoritmos de aprendizado;
- **Dificuldade de explicitar os conhecimentos** adquiridos pela rede através de uma linguagem compreensível para um ser humano;
- **Dificuldade de convergência** (bloqueios) e **instabilidade**, inerentes aos algoritmos de otimização empregados;
- **Lentidão do processo de aprendizado** / adaptação.



Sistemas Híbridos Inteligentes

* Conceitos Básicos:

- Complementaridade
- Divisão de tarefas / Especialização
- Modularidade
- Diversificação:
 - Representação de Conhecimentos
 - Fontes de Aquisição de Conhecimentos

Exemplo: SER HUMANO

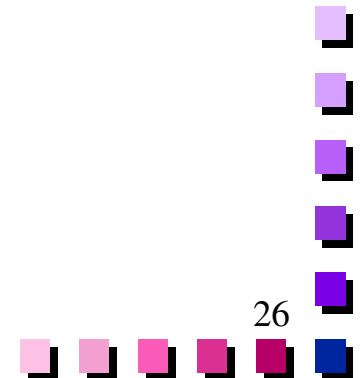
Sistemas Híbridos Inteligentes: Integração

* Módulos Básicos:

- Métodos Simbólicos: CBR, KBS, IDT, GA, Fuzzy, ...
- Métodos Conexionistas: Redes Neurais

* Tipos de Integração:

- Simbólico-Difuso
- Simbólico-Genético
- Neuro-Genético
- Neuro-CBR
- Neuro-Simbólicos
 - Neuro-Fuzzy
 - Neuro- IDT
 - Neuro-KBS

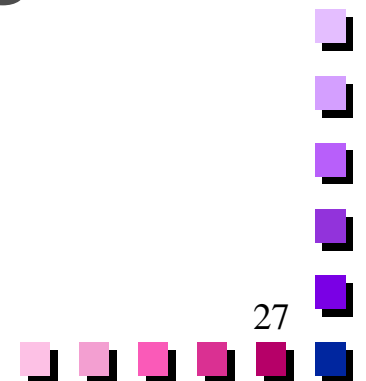


S.H.N.S.

INTEGRAÇÃO:

NÍVEL SIMBÓLICO

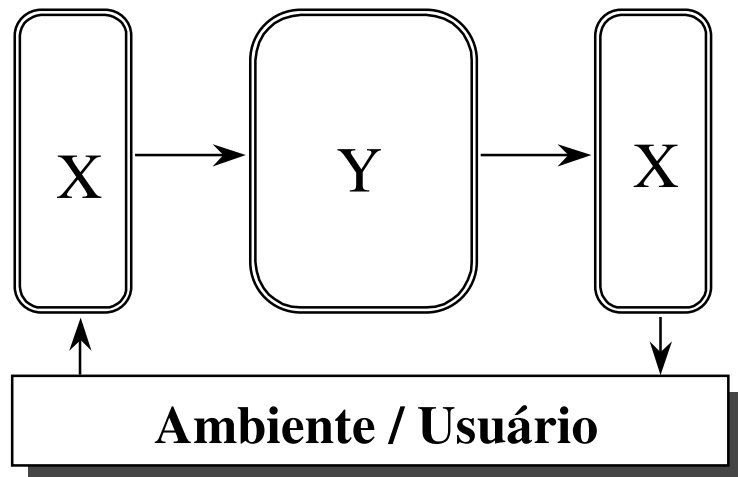
NÍVEL SUB-SIMBÓLICO



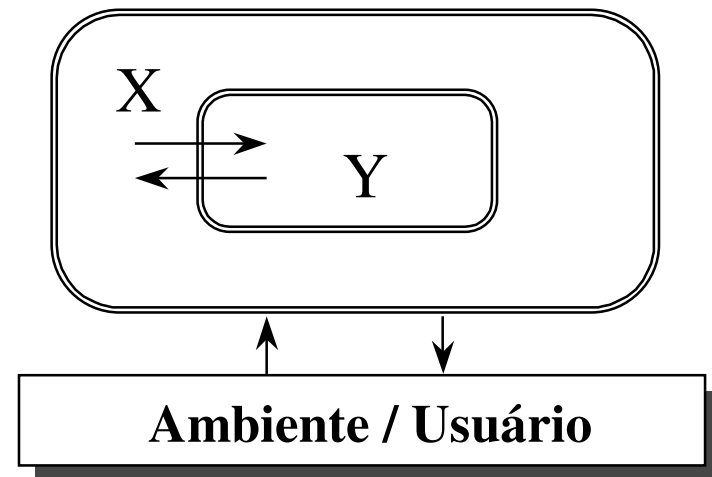
Sistemas Híbridos Neuro-Simbólicos

Conexionista Puro	Puramente Conexionista = Módulo Conexionista «simbólico»	Módulo Simbólico + Módulo Conexionista	Puramente Simbólico = Módulo Simbólico «estendido»	Simbólico Puro
	← Sistemas Híbridos →			
	Método Unificado	Método Híbrido	Método Unificado	
	<i>Híbrido no sentido amplo</i>	<i>Híbrido no sentido restrito</i>	<i>Híbrido no sentido amplo</i>	

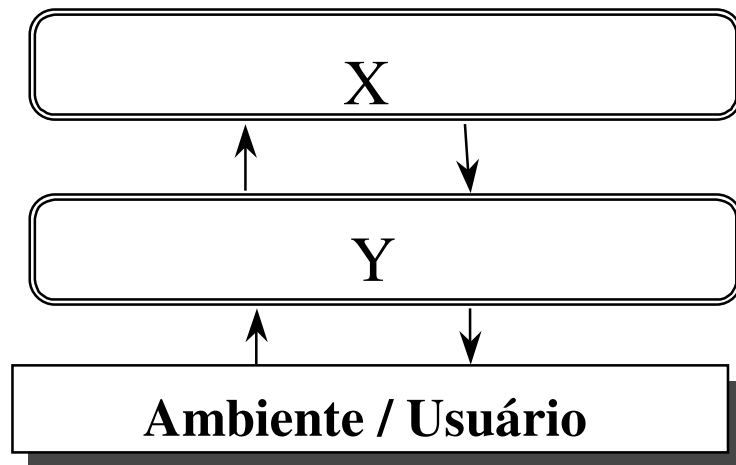




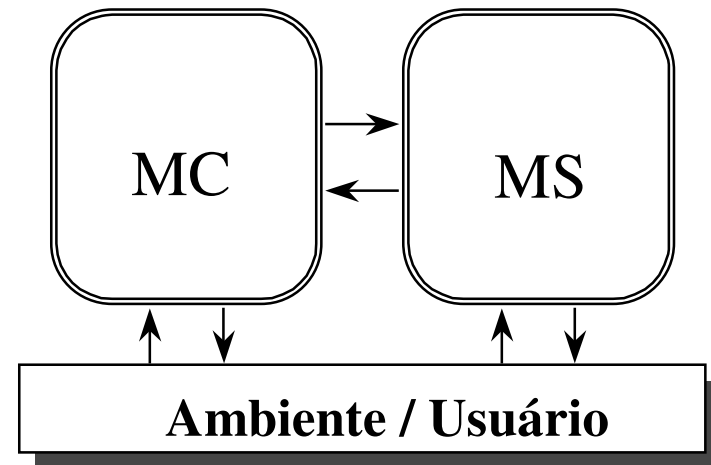
(a) Processamento em Cadeia



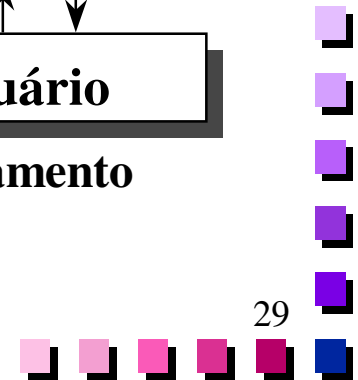
(b) Sub-Processamento



(c) Meta-Processamento

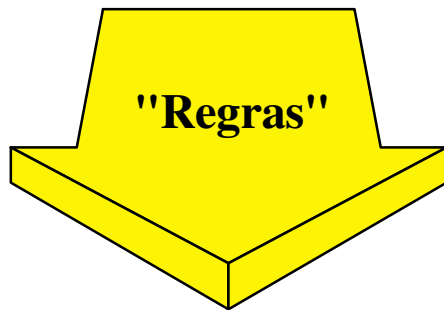


(d) Co-Processamento

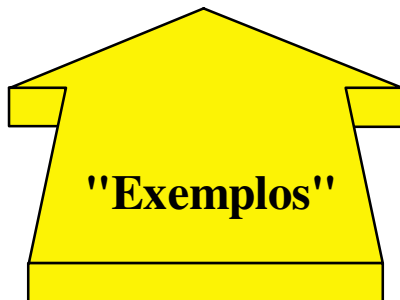


Aquisição de Conhecimentos

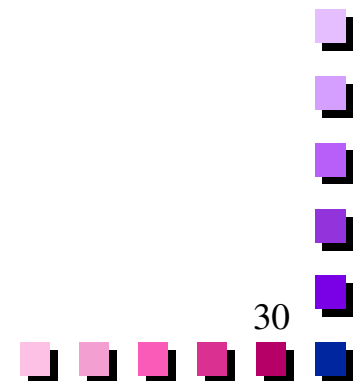
Conhecimentos Teóricos



Aquisição de Conhecimentos

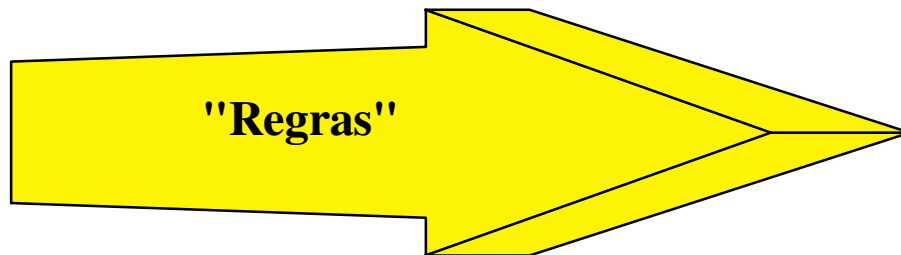


Conhecimentos Empíricos



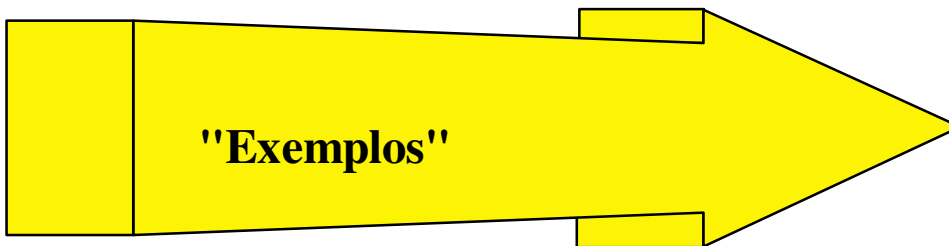
Aquisição de Conhecimentos

Conhecimentos Teóricos



Módulo Simbólico *MS*

Aquisição de Conhecimentos

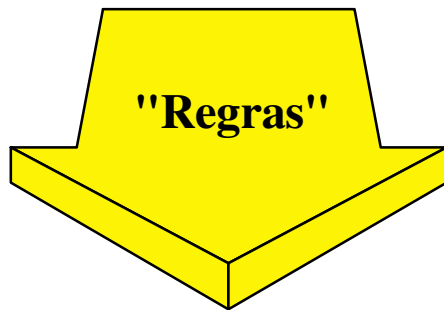


Módulo Conexcionista *MC*

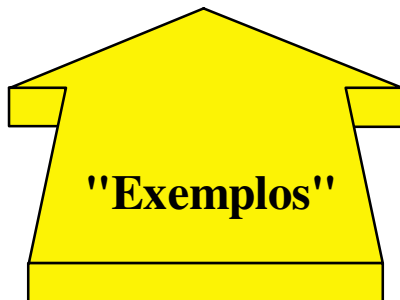
Conhecimentos Empíricos

Aquisição de Conhecimentos

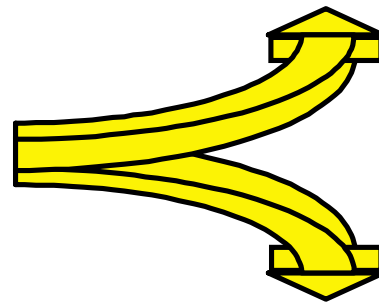
Conhecimentos Teóricos



Aquisição de Conhecimentos



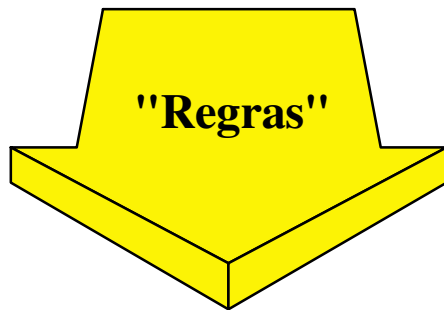
Conhecimentos Empíricos



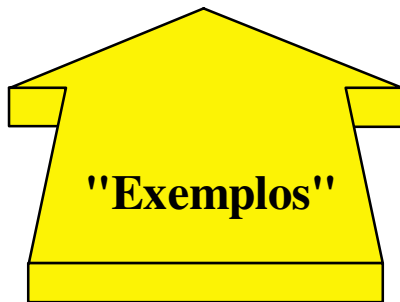
Aquisição de Conhecimentos

Sistema Híbrido Neuro-Simbólico

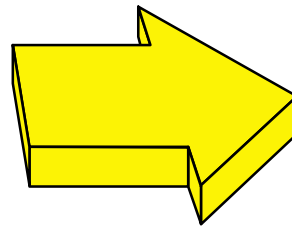
Conhecimentos Teóricos



Aquisição de Conhecimentos



Conhecimentos Empíricos



Módulo Simbólico

MS



Transferência de Conhecimentos

Módulo Conexionista

MC

Sistemas Híbridos Neuro-Simbólicos

1. SYNHESYS - A. Giacometti

Symbolic and NEural Hybrid Expert SYstem Shell

Rede incremental baseada em protótipos - ARN2

Módulo simbólico de inferência com «Forward/Backward Chaining»

2. KBANN - G. Towell

Knowledge Based Artificial Neural Networks

Rede do tipo MLP com uso do algoritmo Back-Propagation

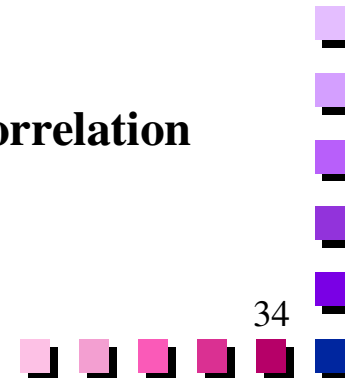
Compilação de regras em uma RNA, aprendizado e extração de regras

3. INSS - F. Osório

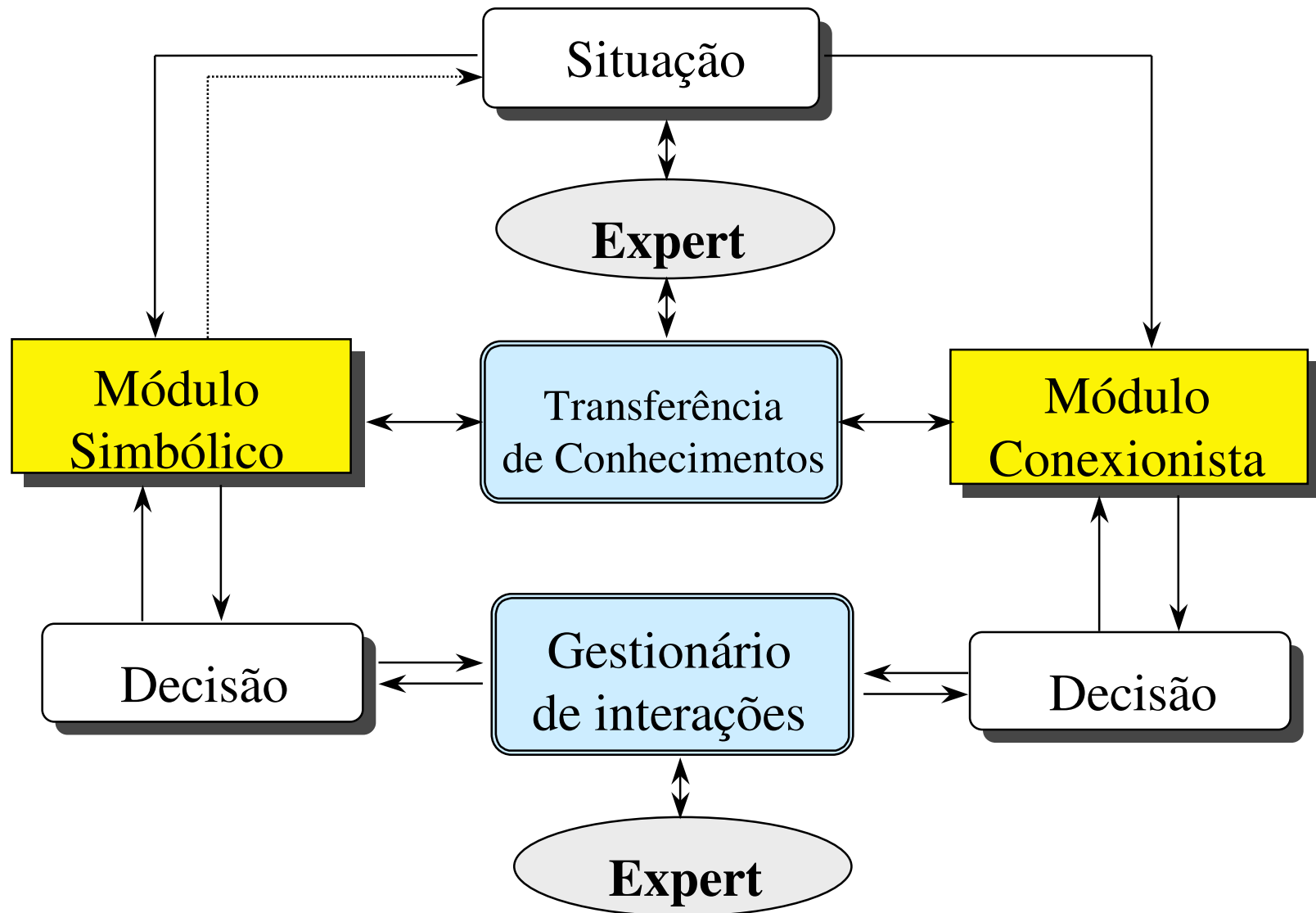
Incremental Neuro-Symbolic System

Rede incremental do tipo MLP com uso do algoritmo Cascade-Correlation

Compilação de regras, aprendizado, extração e validação

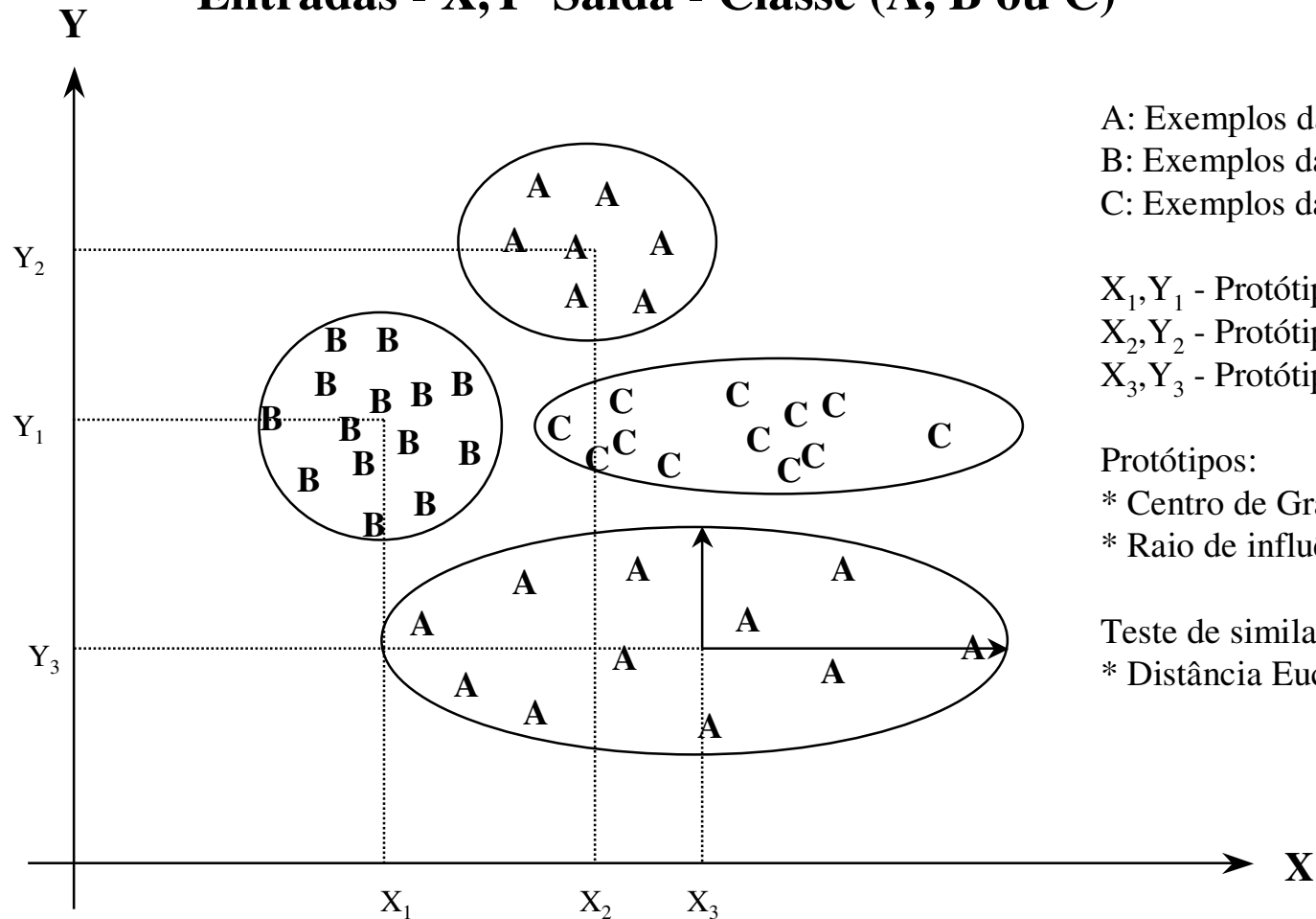


Sistema SYNHESYS



Sistema SYNHESYS

Entradas - X,Y Saída - Classe (A, B ou C)



A: Exemplos da classe A
B: Exemplos da classe B
C: Exemplos da classe C

X_1, Y_1 - Protótipo da classe B
 X_2, Y_2 - Protótipo da classe A
 X_3, Y_3 - Protótipo da classe A

Protótipos:

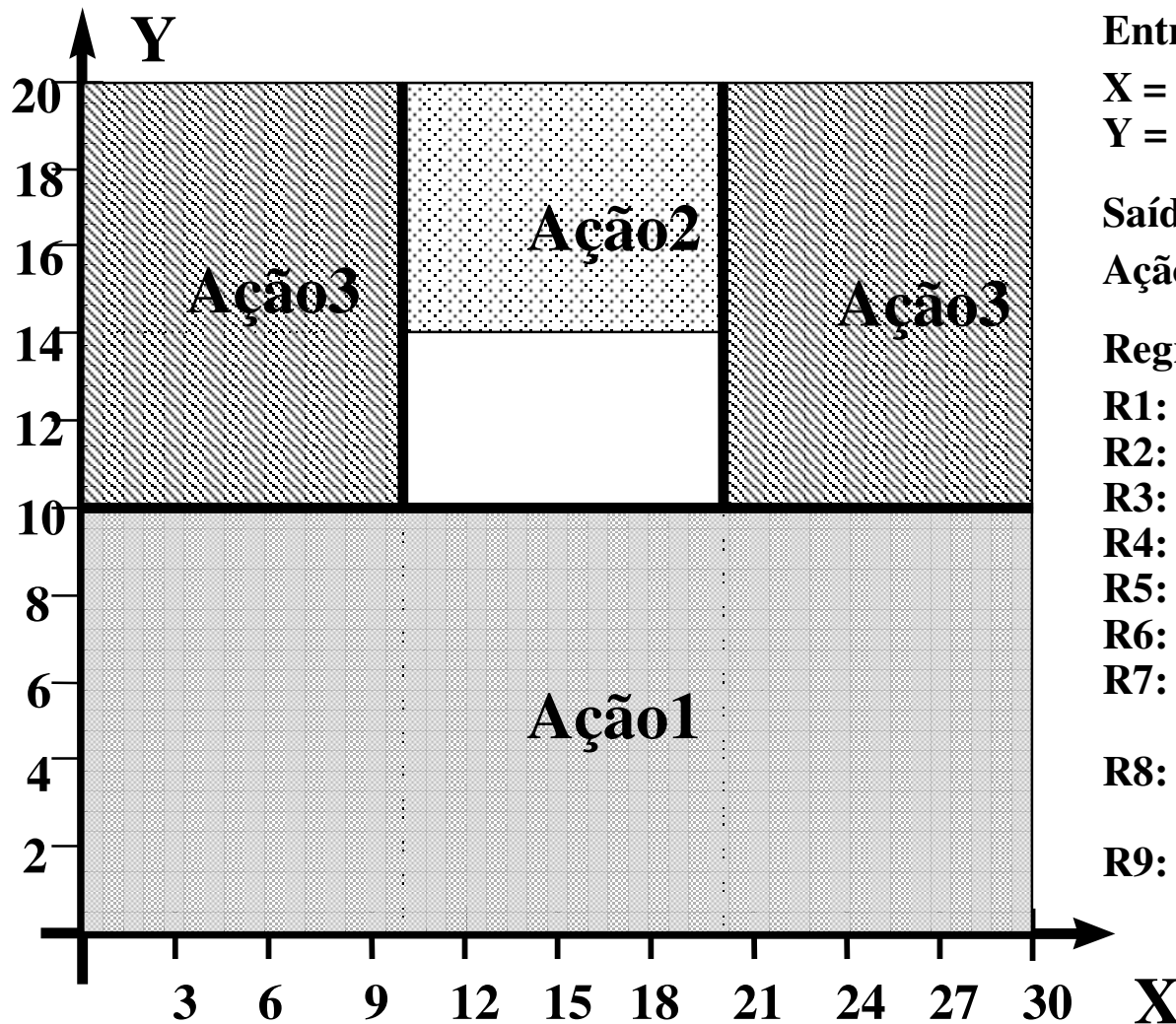
- * Centro de Gravidade (x,y)
- * Raio de influência (rx,ry)

Teste de similaridade:

- * Distância Euclidiana

Protótipos: Hiper-elipsoides / Hiper-Esferas

Sistema SYNHESYS



Entradas:

$X = [0..30]$

$Y = [0..20]$

Saídas (Ações):

Ação1 , Ação2 , Ação3 

Regras:

R1: Se Y in $[0..10]$ então Y_Fraco

R2: Se Y in $[10..20]$ então Y_Forte

R3: Se X in $[0..10]$ então X_Fraco

R4: Se X in $[10..20]$ então $X_Médio$

R5: Se X in $[20..30]$ então X_Forte

R6: Se Y_Fraco então Ação1

R7: Se Y_Forte e X_Fraco
então Ação3

R8: Se Y_Forte e X_Forte
então Ação3

R9: Se Y in $[14..20]$ e $X_Médio$
então Ação2

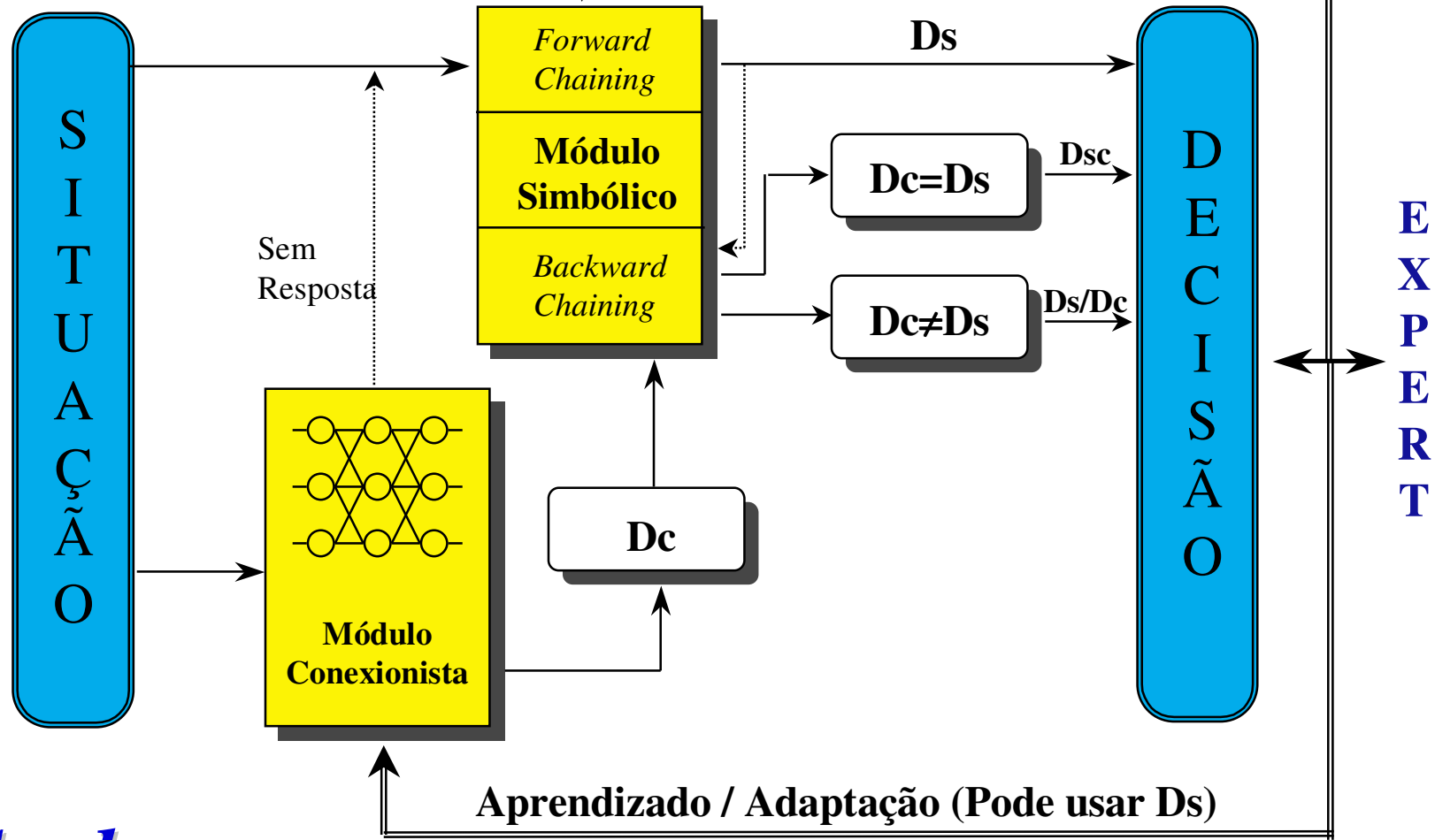
Protótipos: Hiper-retângulos



Ds : Decisão do Módulo Simbólico

Dc : Decisão do Módulo Conexionista

Dsc : Decisão Simboli-Conexionista



Synhesys

Sistemas Híbridos Neuro-Simbólicos



1. SYNHESYS - A. Giacometti

Symbolic and NEural Hybrid Expert SYstem Shell

Rede incremental baseada em protótipos - ARN2

Módulo simbólico de inferência com «Forward/Backward Chaining»



2. KBANN - G. Towell

Knowledge Based Artificial Neural Networks

Rede do tipo MLP com uso do algoritmo Back-Propagation

Compilação de regras em uma RNA, aprendizado e extração de regras

3. INSS - F. Osório

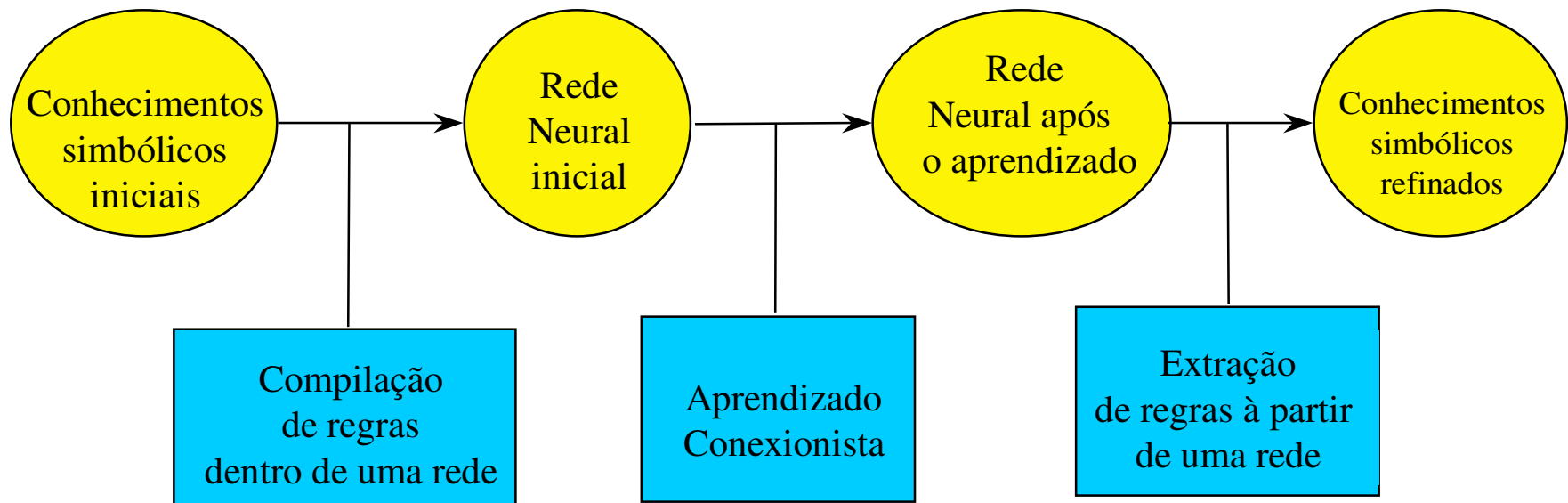
Incremental Neuro-Symbolic System

Rede incremental do tipo MLP com uso do algoritmo Cascade-Correlation

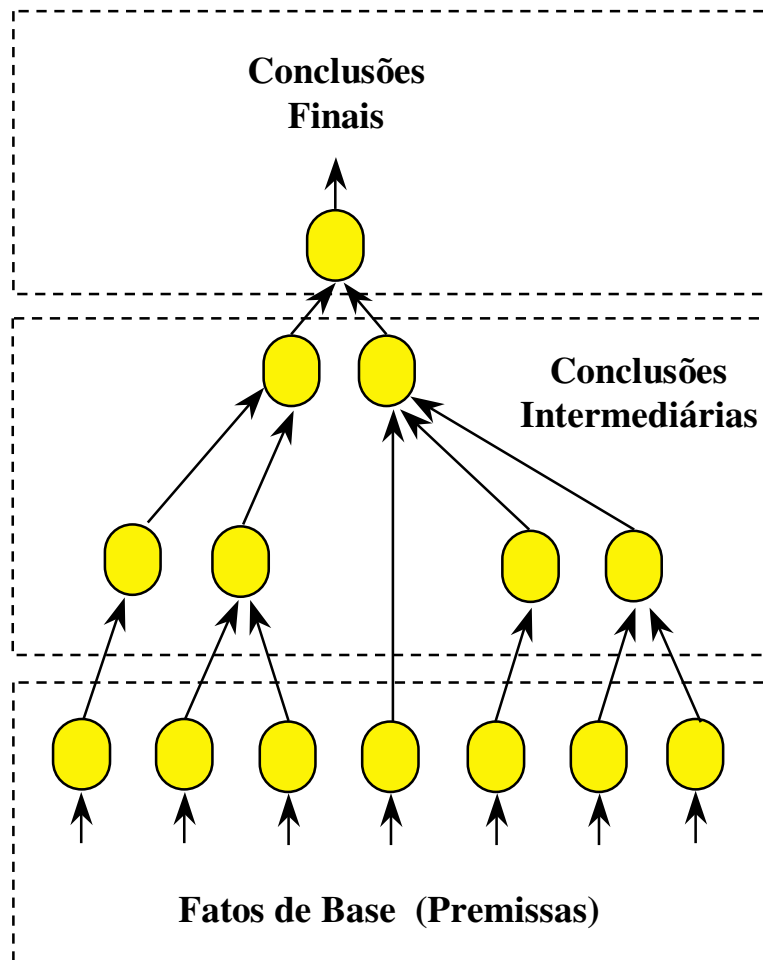
Compilação de regras, aprendizado, extração e validação



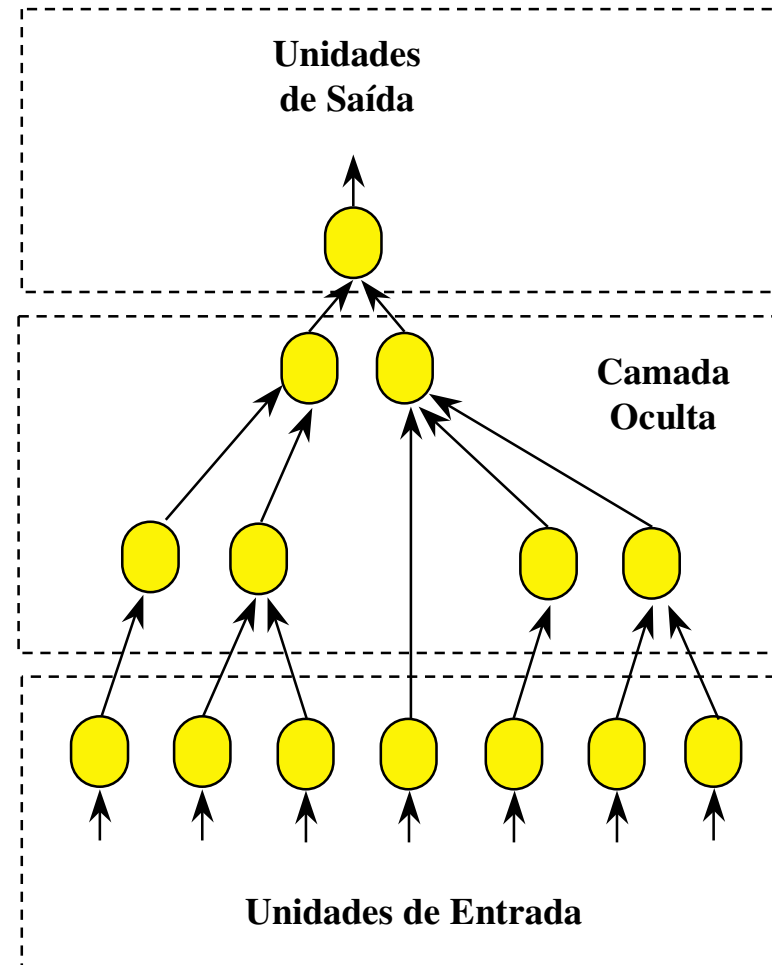
Sistema KBANN



Base de Conhecimentos Simbólicos



Rede Neural Artificial



KBANN - Regras e Redes

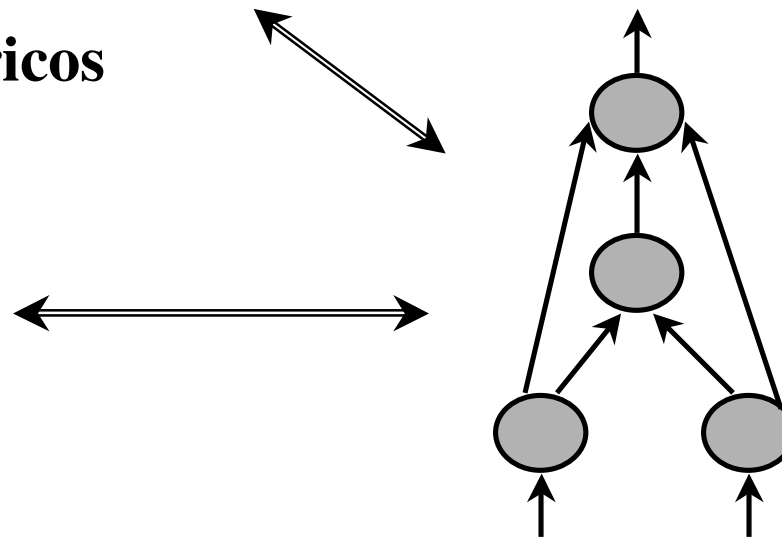
Conhecimentos sobre um domínio de aplicação

Conhecimentos Teóricos

$$\begin{aligned} \text{XOR} &= (A \text{ Or } B) \text{ And Not } (A \text{ And } B) \\ &\text{ou} \\ \text{XOR} &= (A \text{ And Not } (B)) \text{ Or } (\text{Not } (A) \text{ And } B) \end{aligned}$$

Conhecimentos Empíricos

A	B	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



KBANN - Aquisição de Conhecimentos

Operador E - Conjunção:
 $X :- A, B, \text{Not}(C), \text{Not}(D).$

Operador OU - Disjunção:

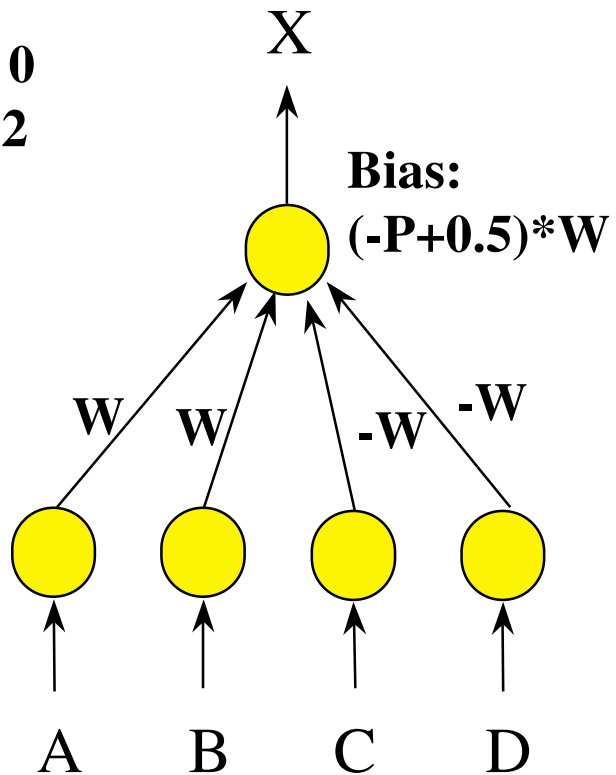
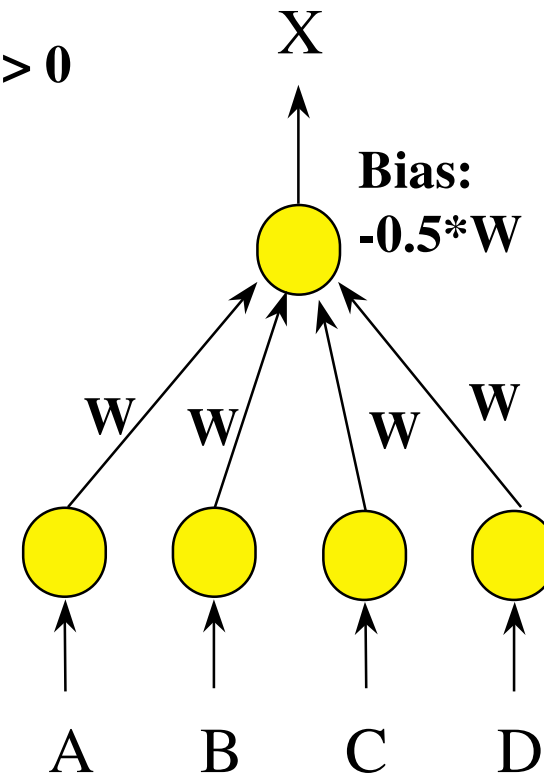
$$X \vdash A.$$
$$X \vdash B.$$

X :- C.

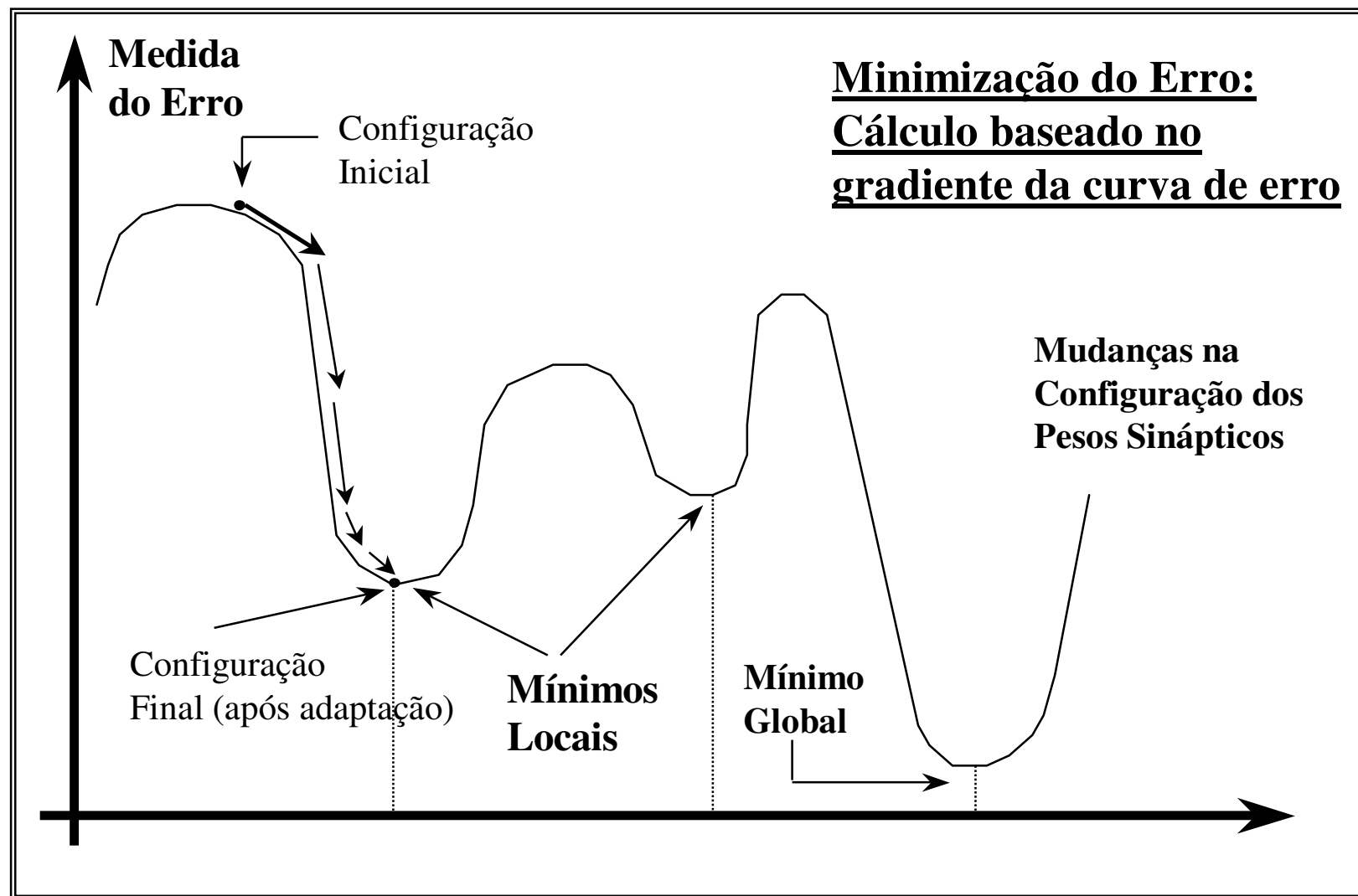
X :- D.

$$\mathbf{W} \geq \mathbf{0}$$

P = 2

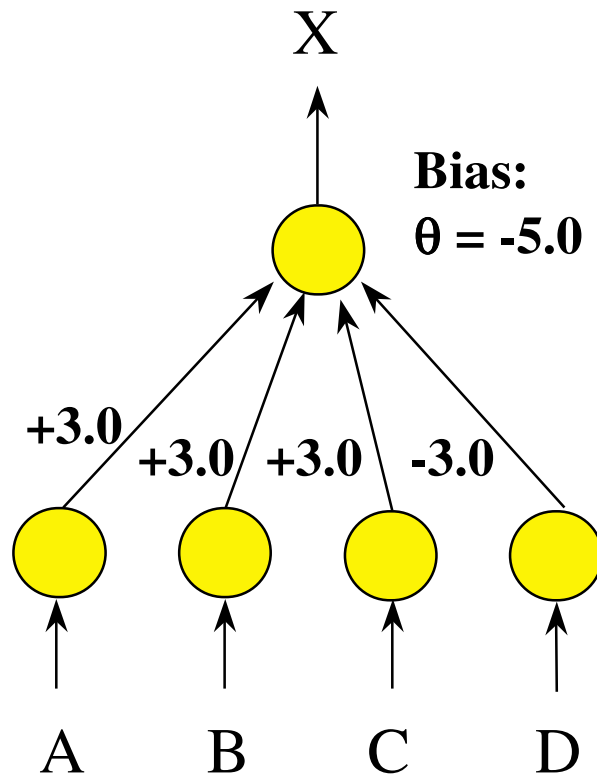

$$\mathbf{W} \geq \mathbf{0}$$


RNA : Multi-Layer Perceptron (MLP) - Algoritmo utilizado : Back-Propagation



KBANN - Aprendizado

Algoritmo SUBSET



$X := A, B, C.$

$X := A, B, \text{not}(D).$

$X := A, C, \text{not}(D).$

$X := B, C, \text{not}(D).$

**IF (A and B and C) or
(A and B and Not(D)) or
(A and C and Not(D)) or
(B and C and Not(D))**

THEN X

KBANN - Extração de Regras

Sistema KBANN

Pontos fracos do Sistema KBANN



- **Algoritmo de aprendizado pouco eficiente (Back-Propagation)**
- **Redes Neurais estáticas**
- **Bases de conhecimentos (regras e exemplos) com problemas significativos de incompletitude ou de incorreção**
- **Mudança do significado das unidades inseridas na rede neural**
- **Processo de extração de regras muito pesado (complexo)**
- **Extração de regras : implica na análise de todas as unidades da rede**
- **Utiliza unicamente regras simbólicas muito simples (compilação e extração)**
Regras de produção IF/THEN - Representação de conhecimentos pobre
- **Dificuldade para trabalhar com atributos quantitativos (variáveis contínuas)**

Sistemas Híbridos Neuro-Simbólicos



1. SYNHESYS - A. Giacometti

Symbolic and NEural Hybrid Expert SYstem Shell

Rede incremental baseada em protótipos - ARN2

Módulo simbólico de inferência com «Forward/Backward Chaining»



2. KBANN - G. Towell

Knowledge Based Artificial Neural Networks

Rede do tipo MLP com uso do algoritmo Back-Propagation

Compilação de regras em uma RNA, aprendizado e extração de regras

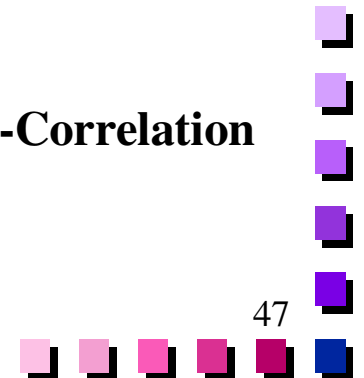


3. INSS - F. Osório

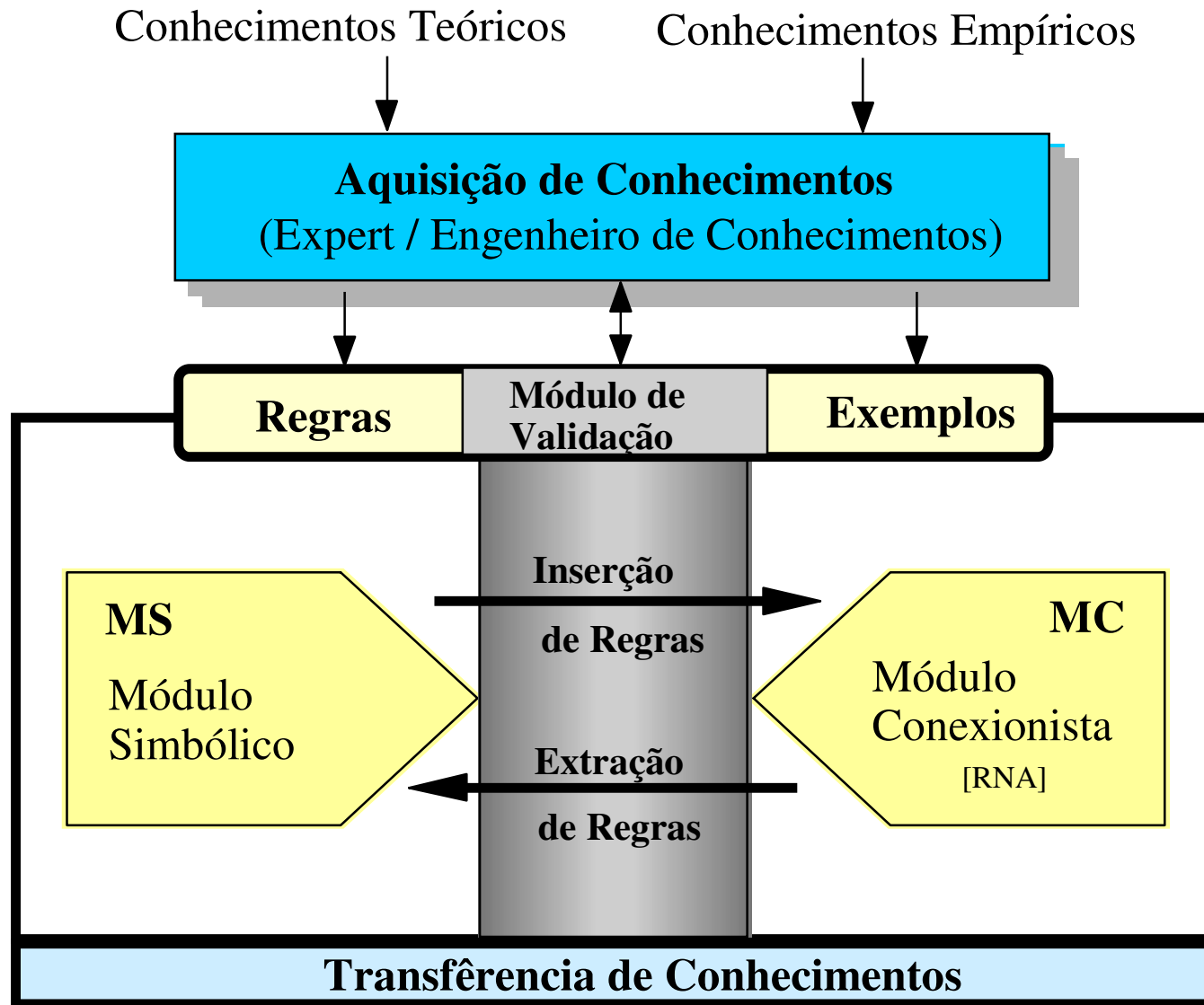
Incremental Neuro-Symbolic System

Rede incremental do tipo MLP com uso do algoritmo Cascade-Correlation

Compilação de regras, aprendizado, extração e validação

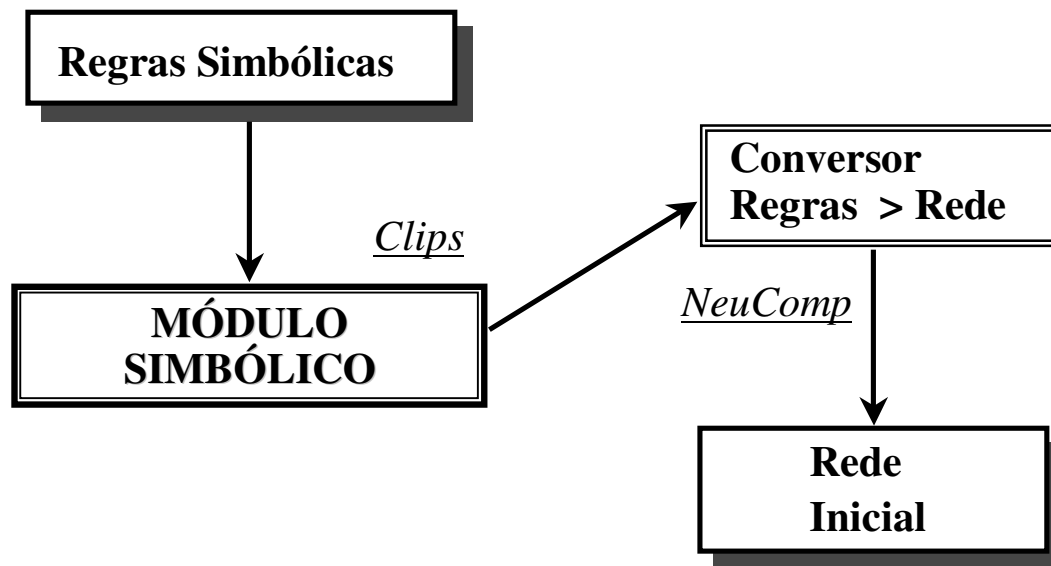


Sistema INSS

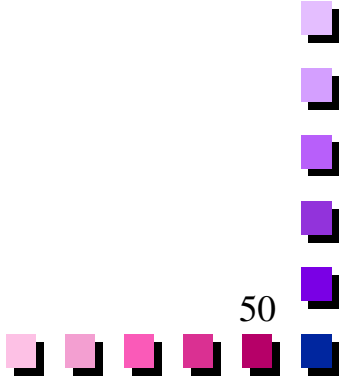


INSS - Incremental Neuro-Symbolic System

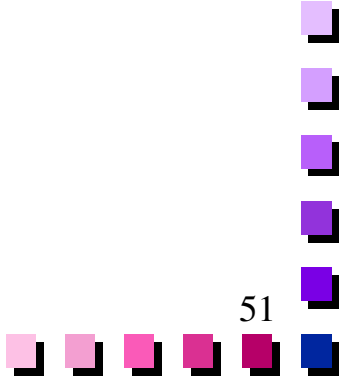
Sistema INSS



© 2007 The Authors
Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd



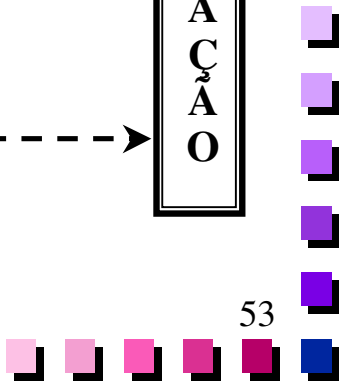
Copyright © 2010 Pearson Education, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America. This publication is protected by copyright. Any unauthorized distribution or reproduction of this work is illegal. All other rights reserved.



© 2010 Pearson Education, Inc. or its affiliate(s). All rights reserved. Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings, 101 Philip Drive, Assinippi Park, New York, NY 10964-2133



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America. This publication is protected by copyright. Any unauthorized distribution or reproduction of this work is illegal. All other rights reserved.



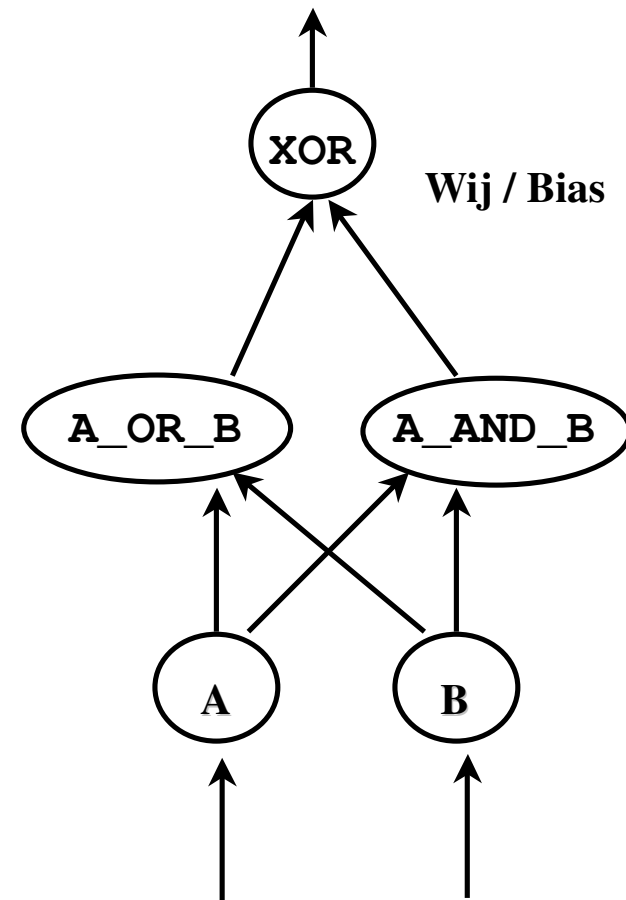
INSS : Compilação de Regras

```
$Features:  
A:binary;  
B:binary.  
$End_Feat.
```

```
$Rules:  
  A_OR_B  <- A;  
  A_OR_B  <- B;  
  A_AND_B <- A,B;  
  XOR <- A_OR_B, A_AND_B(false).  
$End_rules.
```

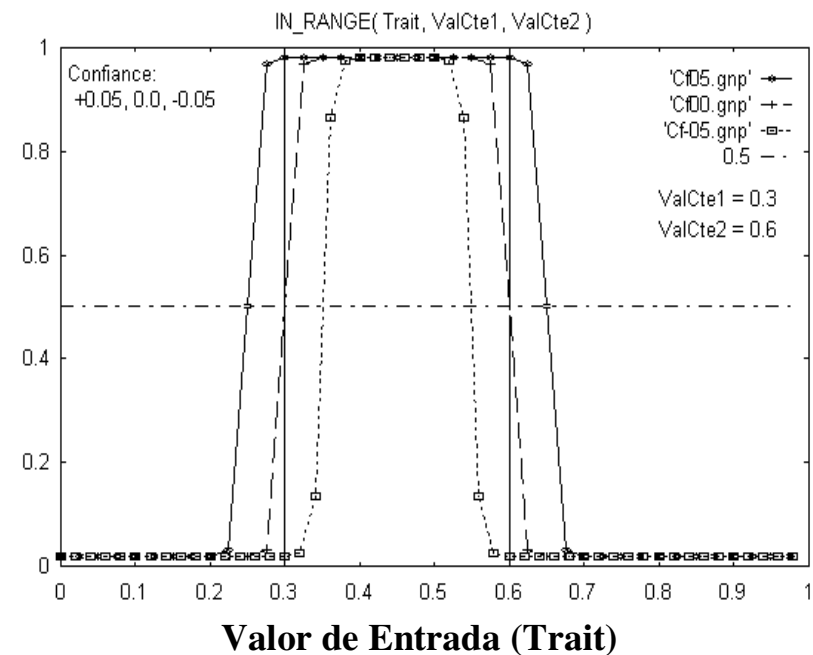
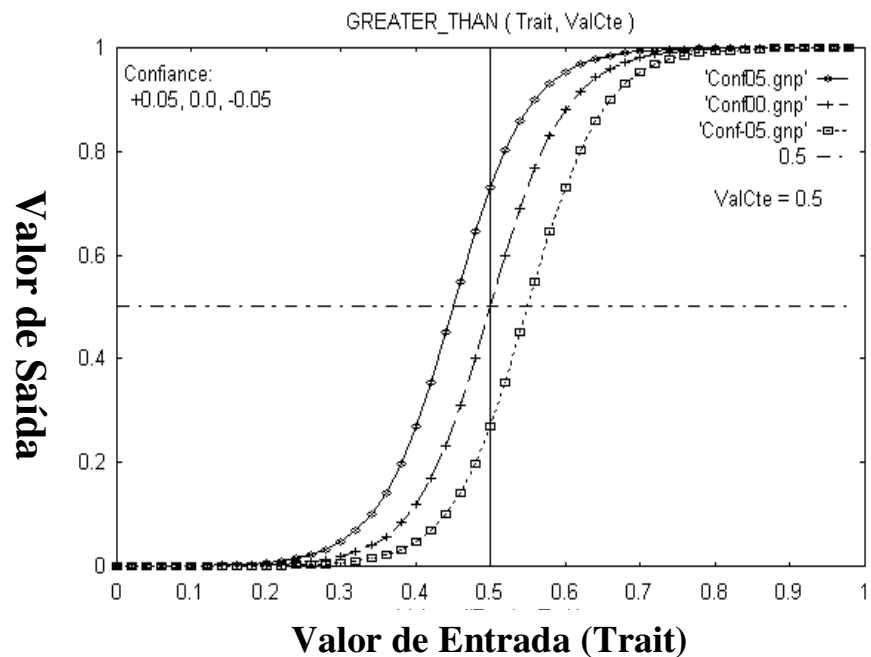
```
$End.
```

```
%%  
%% Exclusive Or - Lógica Booleana  
%% Xor = (A Or B) And Not (A And B)  
%%
```



INSS: Compilação de Regras

Regras de ordem 0⁺

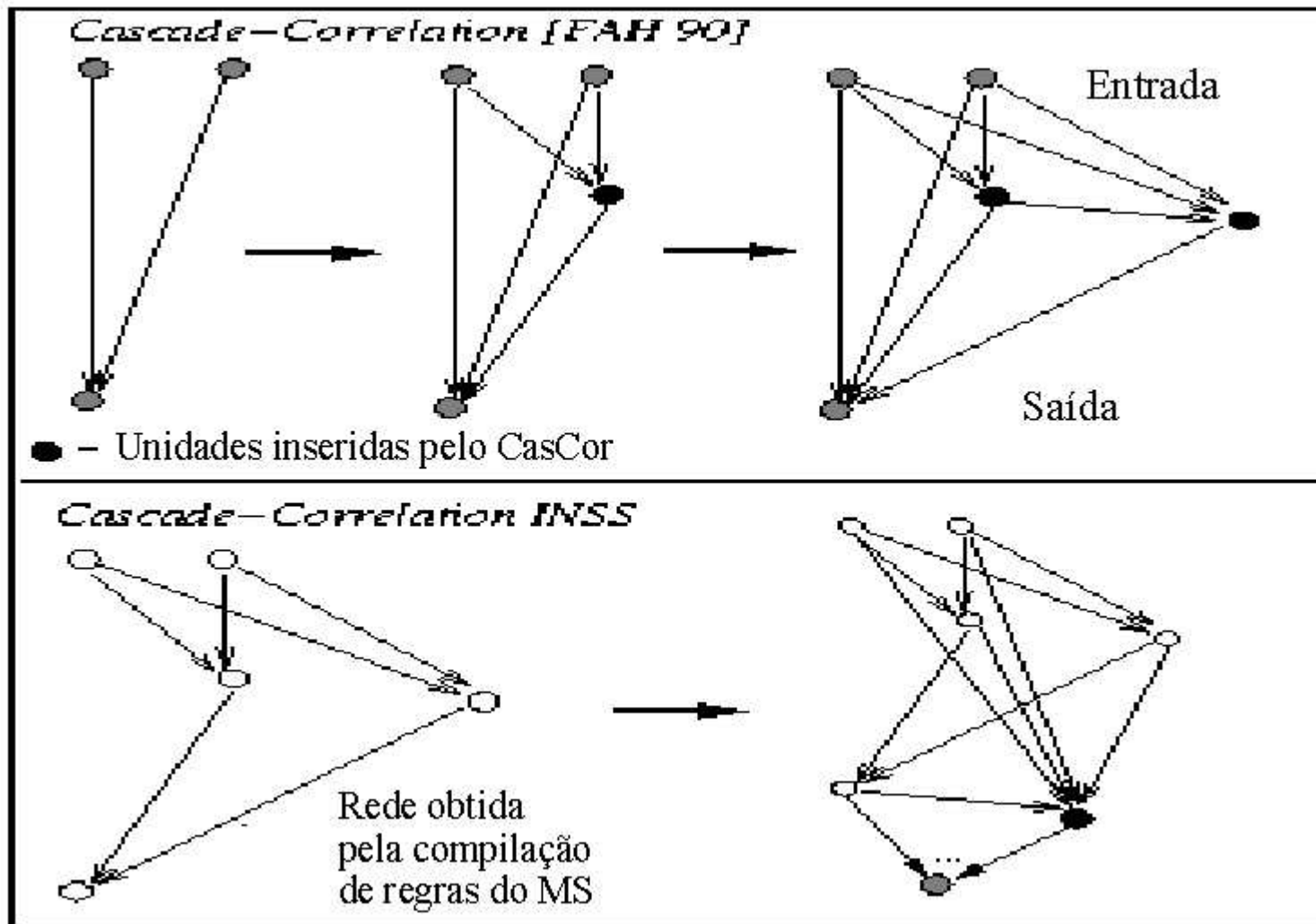


Greater_Than (Variável, Valor)
Greater_Than (Variável, Variável)
Less_Than (Variável, Valor)
Less_Than (Variável, Variável)

In_Range (Variável, Min, Max)
Equal (Variável, Valor)
Equal (Variável, Variável)

INSS : Rede Neural Incremental

Algoritmo Cascade-Correlation (CasCor)



INSS e Rule_Out : Extração de Regras

Algoritmo de extração de regras : SUBSET [Towell]

RULE_OUT:

- * Extrair os novos conhecimentos adquiridos
- * Extrair as regras mais importantes
 - Seleção das unidades (neurônios) para a extração
 - Seleção das conexões para a extração
- * Em estudo : regras de ordem 0⁺



Vantagens:

- * Extração incremental de conhecimentos
- * Validação dos conhecimentos adquiridos

INSS : Validação dos Conhecimentos

Conhecimentos Teóricos

R1 : If (A Or B) Then XOR=1
R2 : If Not (A And B) Then XOR=1
R3 : If (A And B) Then XOR=0
R4 : If Not (A) And Not (B) Then XOR=0

Conhecimentos Empíricos

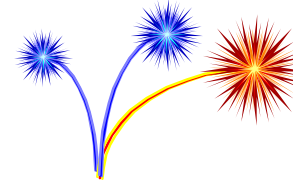
Ex.	A	B	XOR
E1	0	0	0
E2	0	1	1
E3	1	0	1
<i>E4</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>

Validação

- Incoerência entre R3 (Saída=0) e E4 (Saída=1)
- Não existem regras que satisfaçam E4

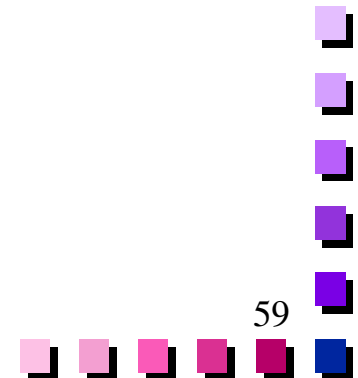
Sistema INSS

Pontos fortes do Sistema INSS



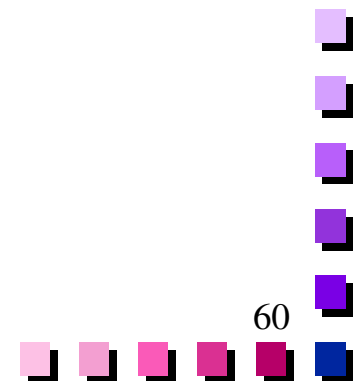
- Algoritmo de aprendizado com um ótimo desempenho (Cascade-Correlation)
- Rede Neural do tipo incremental
- Permite o uso de conhecimentos (*regras e exemplos*) incompletos ou incoerentes
- Não modifica o significado das unidades inseridas na rede
- Processo incremental de extração de regras
- Extração de regras: análise parcial da rede (+ eficaz)
- Utiliza regras simbólicas de ordem 0 e 0+ (compilação)
- Trabalha com atributos quantitativos (variáveis contínuas) e qualitativos (variáveis discretas)

Aprendizado de Máquinas Construtivo



Sistema INSS : Aplicações

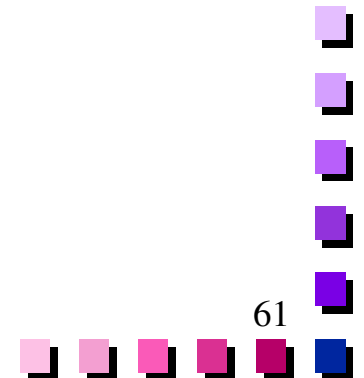
- *Problemas Artificiais de Classificação* (Monk's Problems - S. Thrun)
- *Ajuda ao Diagnóstico Médico - Comas Tóxicas* (Projeto Esprit MIX)
- *Robótica Autônoma* (Robô móvel Khepera)
- *Problema da Balança* (Balance Scale Problem - T. Shultz)



Considerações Finais

- **Conhecimentos : regras / exemplos - incompletos / incoerentes**
- **Algoritmos de aprendizado eficientes**
- **Redes Neurais do tipo incremental / Redes Recorrentes**
- **Compilação e extração de regras de alto nível**
- **Atributos quantitativos e qualitativos**
- **Validação dos conhecimentos adquiridos**
- **Evolução dos conhecimentos de forma continuada**
- **Aumento do poder de representação de conhecimentos**
- **Integração de múltiplos módulos: CBR, Fuzzy, GA, ...**

Sistema Híbrido Neuro-Simbólicos
Hybrid Machine Learning Tools



Futuro

