

## Aula 12

# Controladores baseados em conhecimento

Prof. Dr. Alexandre da Silva Simões

## Organização

- Arquiteturas e configurações
- Estudo de casos
  - Controlador utilizando regras de produção
  - Supervisor inteligente
  - Assistente inteligente

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

2

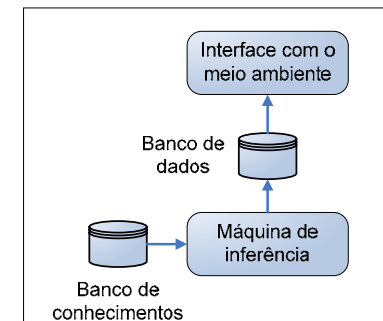
## Introdução

- Muitas vezes mesmo sob a ausência de um modelo matemático preciso ou de algoritmos bem definidos, um operador humano é capaz de agir sobre uma dada planta, utilizando sua experiência
- Regras de produção **SE ... ENTÃO** podem ser usadas para incorporar à máquina a experiência heurística do operador humano

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

3

## Arquitetura de um SBC



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

4

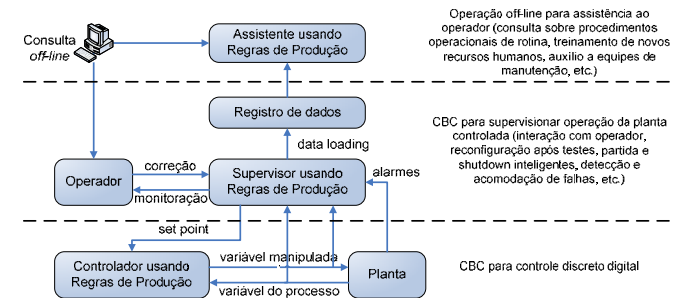
## Máquina de inferência

- Executa usualmente os seguintes passos:
  - **Passo 1:** Busca de regra no BC que tenham as condições (ou antecedentes) satisfeitos baseado no conteúdo do banco de dados
  - **Passo 2:** Se houver uma ou mais regras com as condições satisfeitas, então selecionar uma (resolução de conflito). Senão retornar ao passo 1
  - **Passo 3:** Executar a ação descrita na regra selecionada e retornar ao passo 1

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

5

## Configurações de CBCs

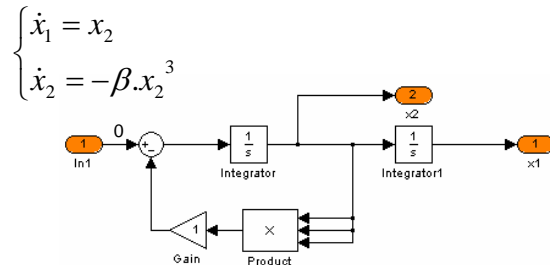


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

6

## I. SBC como controlador

- Seja a planta abaixo, onde deseja-se controlar  $x_1$ :

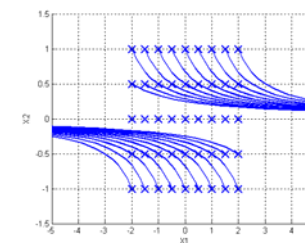


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

7

## Análise da planta

Comportamento para diferentes condições iniciais:

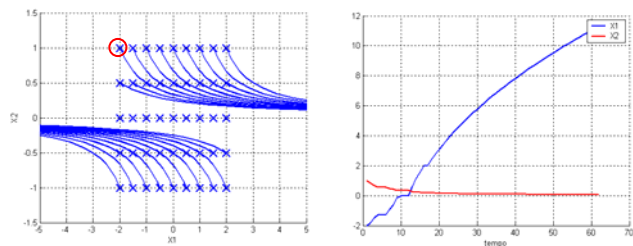


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

8

## Análise da planta

Comportamento para diferentes condições iniciais:

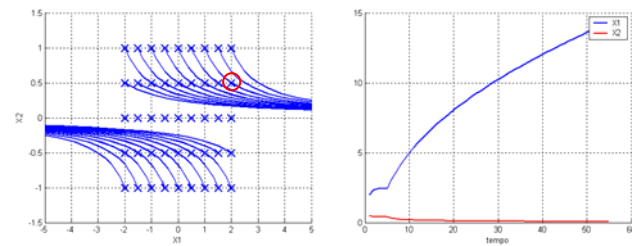


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

9

## Análise da planta

Comportamento para diferentes condições iniciais:

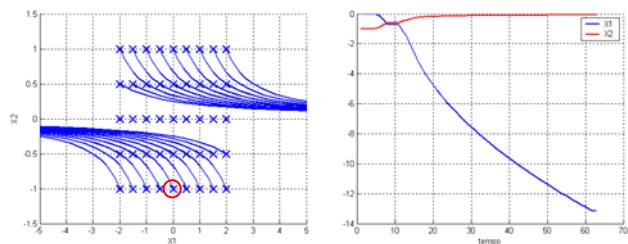


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

10

## Análise da planta

Comportamento para diferentes condições iniciais:

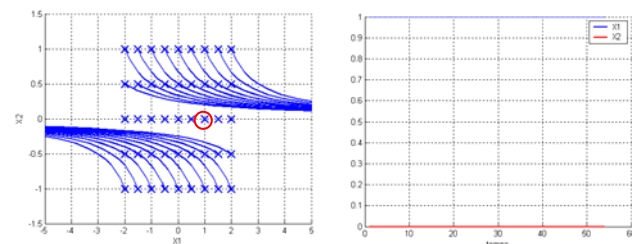


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

11

## Análise da planta

Comportamento para diferentes condições iniciais:



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

12

## Análise da planta

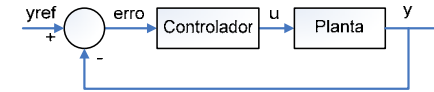
- Sistema instável para  $x_2 \neq 0$
- Sistema não-linear
- Sistema sem uma metodologia estabelecida para projetar um controlador



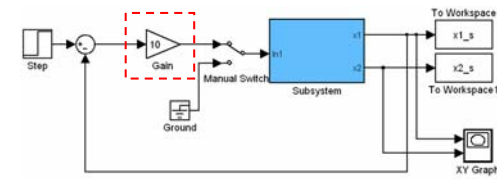
Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

13

## Análise em malha fechada



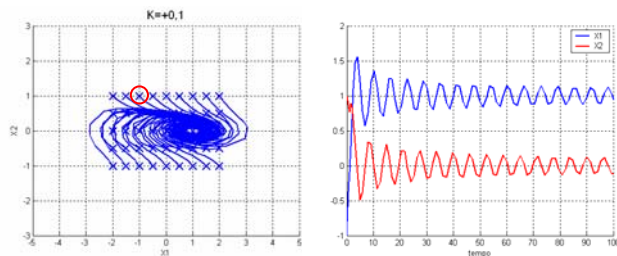
- Seja o controlador proporcional:



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

14

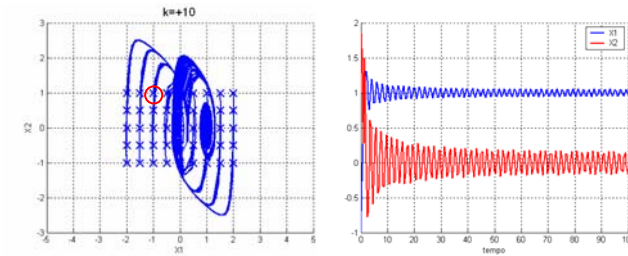
## Sistema com ganho pequeno



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

15

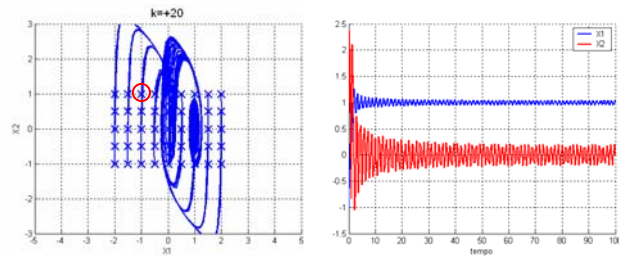
## Sistema com ganho médio



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

16

## Sistema com ganho alto



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

17

## Conhecimento adquirido

- Ganho menor: convergência mais lenta mas sem sobresinal
- Ganho maior: convergência mais rápida, mas com sobresinal
- Desejável: sistema inicialmente com  $k$  pequeno (minimizando o sobresinal) com aumento gradativo de  $k$  para tornar a convergência mais rápida

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

18

## Controlador

- Um controlador que pode ser utilizado nessa planta é um controlador proporcional com alteração dinâmica do ganho  $k$ :

$$u(t) = -k \cdot \text{sat}[K, \underbrace{y(t) - y_r(t)}_{\text{erro}}]$$

↑ ganho do controlador

↑ erro máximo

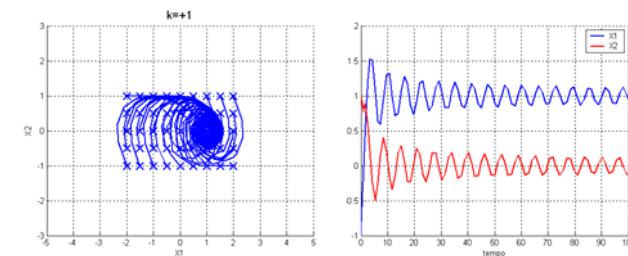
onde:

$$\text{sat}[M, z] = \begin{cases} z, & \text{se } |z| \leq M \\ M \cdot \text{sign}(z) & \text{se } |z| > M \end{cases}$$

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

19

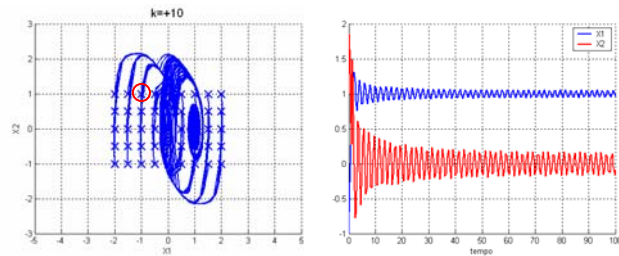
## Sistema com ganho baixo



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

20

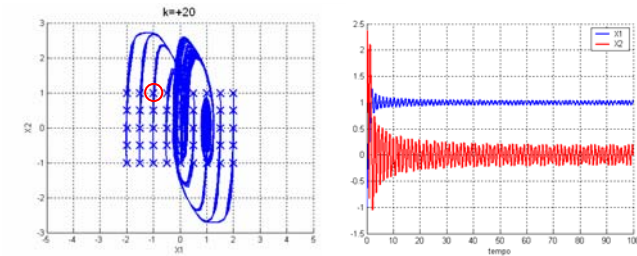
## Sistema com ganho médio



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

21

## Sistema com ganho alto

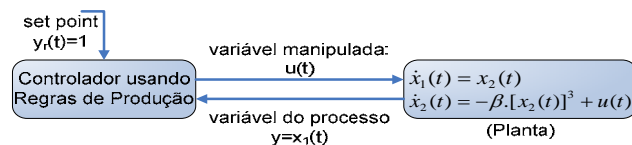


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

22

## Controlador com conhecimento

- Desempenho ainda pode ser melhorado
- Seja o modelo:



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

23

## Regras de inferência

### ■ Condições

- ☐  $e_{\text{small}}$  **IF**  $|y-1| < 0,1$
- ☐  $e_{\text{big}}$  **IF**  $(1-y) > 0,6$
- ☐ **ultrapass** **IF**  $y > 1,0$
- ☐ **velpos** **IF**  $dx_1/dy > 0$

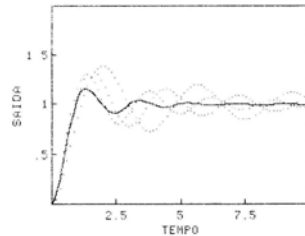
### ■ Regras

- ☐ **IF** ( $e_{\text{small}}$ ) **THEN** ( $k=10$ )
- ☐ **IF** ( $e_{\text{big}}$ ) **THEN** ( $k=5$ )
- ☐ **IF** (**ultrapass**) **AND** (**velpos**) **THEN** ( $k=20$ )

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

24

## Resultado



**Linha cheia:** resposta do controlador proporcional ajustado pelas regras  
**Linhas pontilhadas:** respostas obtidas pelos controladores proporcionais fixos

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
 Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
 Colón

25

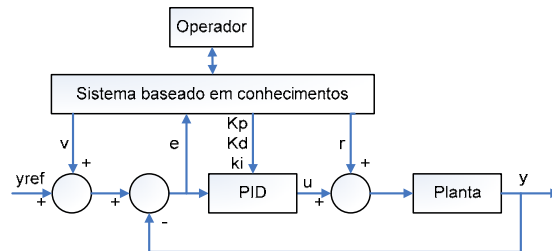
## II. SBC como supervisor

- Um sistema utilizando regras de produção pode ser utilizado para supervisionar operação da planta controlada (interação com operador, reconfiguração após testes, partida e shutdown inteligentes, detecção e acomodação de falhas, etc.)
- Vantagem: possibilidade de realizar processamento simbólico e numérico de forma simultânea, valendo-se da vantagem de ambos

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
 Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
 Colón

26

## Exemplo 1: sintonia fina de PID

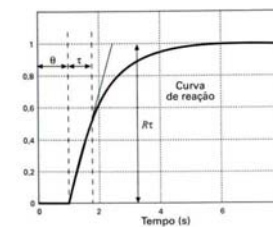


Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
 Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
 Colón

27

## Sintonia inicial das constantes

- O controlador é inicialmente sintonizado utilizando método de Ziegler-Nichols pela resposta ao degrau:



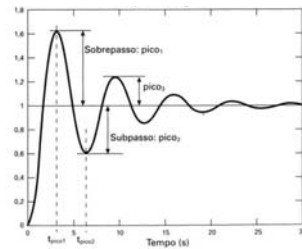
Ganhos	Fórmula
$K_p$	$1.2 / R \cdot \theta$
$K_i$	$0.6 / R \cdot \theta^2$
$K_d$	$0.6 / R$

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
 Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
 Colón

28

## Sintonia fina utilizando heurísticas

1. Aplica-se um sinal  $v(t)$ =degrau e a partir de  $e(t)$  calcula-se  $y(t)$



Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

29

## Sintonia fina utilizando heurísticas

2. Destacam-se os três primeiros picos na saída  $y(t)$  e calculam-se os parâmetros:
  - i. Sobrepasso máximo da variável de saída
  - ii. Subpasso máximo da variável de saída
  - iii. Período de oscilação amortecida

$$T_o = 2.(t_{pico2} - t_{pico1})$$

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

30

## Sintonia fina utilizando heurísticas

- iv. Razão entre os dois primeiros picos:

$$r_{12} = \frac{|pico_2|}{|pico_1|}$$

- v. Índice de convergência:

$$cnv = \frac{|pico_2| + |pico_3|}{|pico_1| + |pico_2|}$$

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

31

## Sintonia fina utilizando heurísticas

3. Verifica-se a adequação da atual resposta do sistema. Em caso afirmativo o supervisor entra em modo *stand by*. Senão, calcula-se a contribuição de fase, na frequência  $2\pi/T_o$ :

$$F_{PID} = \tan^{-1} \left\{ \frac{2.\pi.Kd}{T_o.Kp} - \frac{T_o.Ki}{2.\pi.Di} \right\}$$

e reajustam-se  $K_d$  e  $K_i$  de modo que  $F_{pid}$  seja minimizado.

Inteligência Artificial - Prof. Dr.  
Alexandre Simões e Prof. Dr. Diego  
Colón

32



## Sintonia fina utilizando heurísticas

4.  $K_p$  é multiplicado pela razão entre o sobrepasso desejado e o sobrepasso medido
5. Recalcula-se  $K_i$  e  $K_d$  e retorna-se ao passo 1.

## Exemplo

- Seja o sistema:

$$G(s) = \frac{10 \cdot \exp(-0.5s)}{s + 3}$$

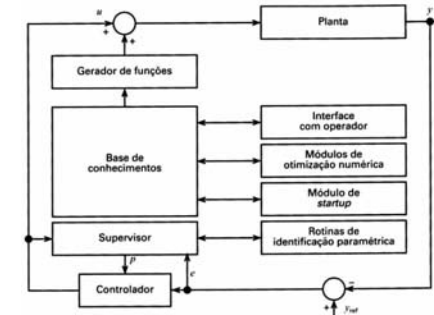
onde se especificou um sobrepasso máximo de 15% e um subpasso máximo de 7.5%, resultou:

Iteração	$K_p$	$K_i$	$K_d$	Sobrepasso	Subpasso
1	0.268	0.417	0.051	23.5%	17.6%
2	0.268	0.625	0.052	55.3%	30.7%
3	0.147	0.342	0.029	6.25%	0.84%

## Considerações

- Necessidade de regras heurísticas de qualidade para que a planta seja operada com segurança, o que não é sempre atendido
- Regras podem ser omissas na ocorrência de imprevistos ou até mesmo existirem regras conflitantes, uma vez que a base de conhecimento pode eventualmente crescer de forma significativa

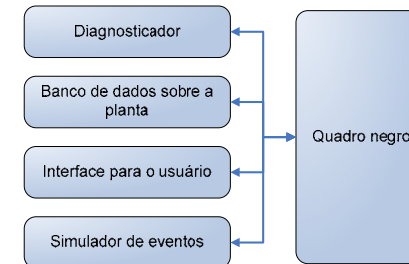
## Exemplo 2



### III. SBC como supervisor

- Objetivo: operação off-line para dar assistência ao operador, quer na forma de consulta sobre procedimentos operacionais de rotina, quer no treinamento de novos recursos humanos

### Arquitetura de um assistente



### Atividades extra-classe

- Leitura e exercícios:  
NASCIMENTO Jr., C.; YONEYAMA, T.  
**Inteligência artificial em controle e automação.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1ª edição, 2000.  
Capítulo 06

### Bibliografia

- NASCIMENTO Jr., C.; YONEYAMA, T.  
**Inteligência artificial em controle e automação.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1ª edição, 2000.
- YONEYAMA, T. **Um controlador inteligente em PROLOG.** VII Congresso Brasileiro de Automática (VII CBA). São José dos Campos, pp. 167 - 172, V. 1, 1988.
- RUSSELL, S. NORVIG, P. **Inteligência Artificial.** 2ª edição. Rio de Janeiro: Campus, 2004