

# Implementação de controle Fuzzy Em CLP Industrial

Aluno: Jhonantans Moraes Rocha

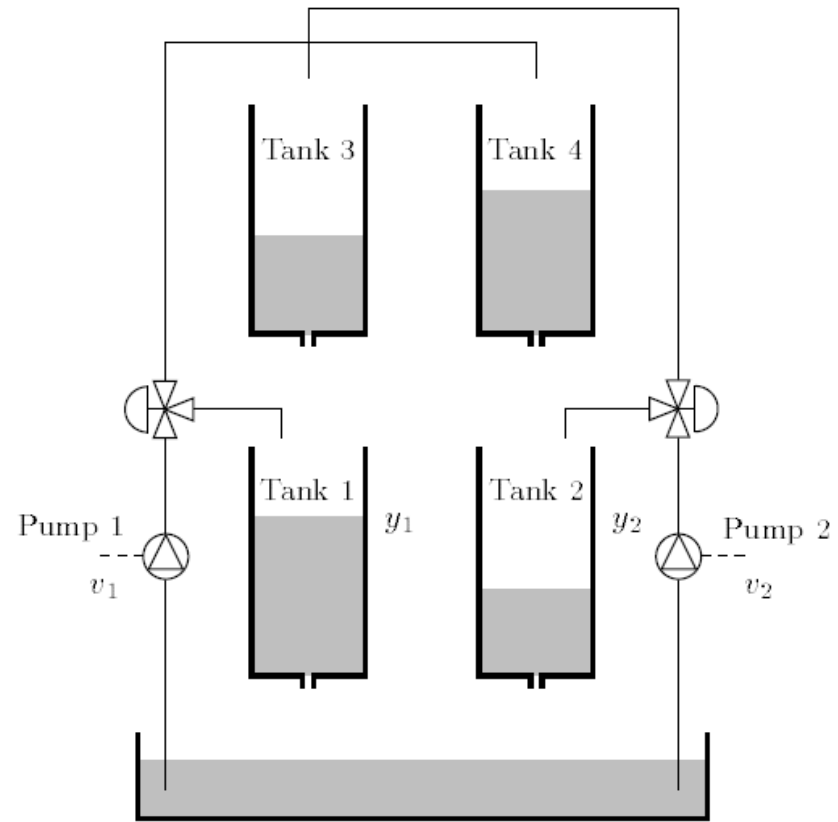
Orientador: Eduardo Stockler Tognetti



# Motivação

- Implementação em CLP de um controlador fuzzy para a planta.
- Por quê Fuzzy?
  - Sistemas não-lineares
  - Plantas de difícil identificação
- Modelo Takagi-Sugeno

# Planta de Quatro-Tanques

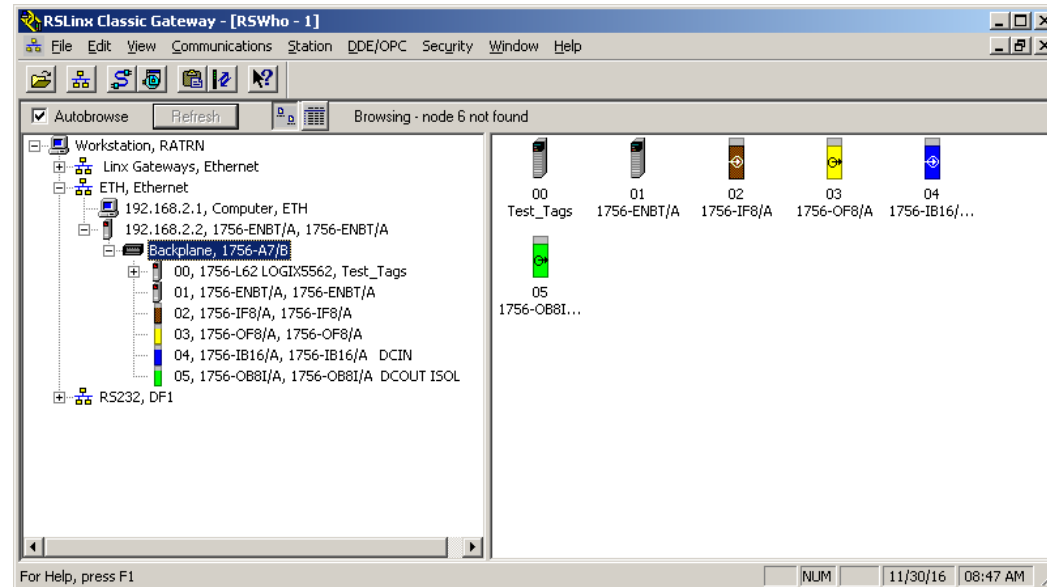


# Introdução – CLP Rockwell



Especificação	Descrição	Posição no chassi
1756-A7/B	Chassi	.
1756-L62	Controlador	0
1756-ENBT/A	EtherNetIp	1
1756-IF8/A	Entradas Analógicas	2
1756-OF8/A	Saídas Analógicas	3
1756-IB16/A	Entradas DC	4
1756-OB8I/A	Saídas DC	5

# Comunicação



Dispositivo	Endereço
PC (RSLinx)	192.168.2.1
1756-ENBT/A (CLP)	192.168.2.22
Geral	192.168.2.xxx

# Teoria Fuzzy

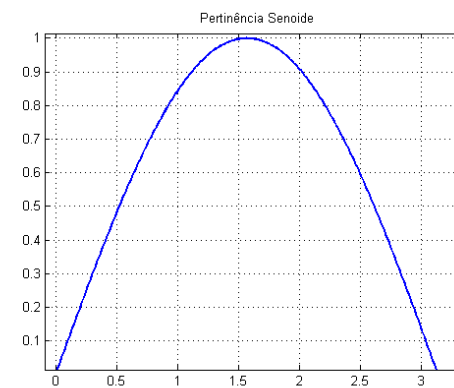
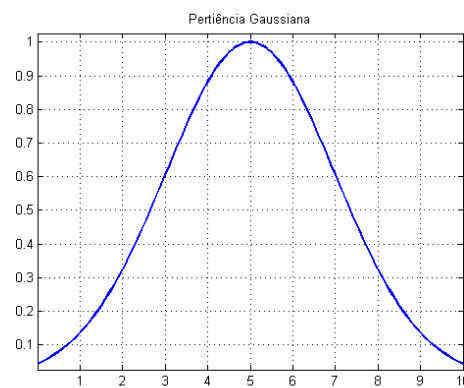
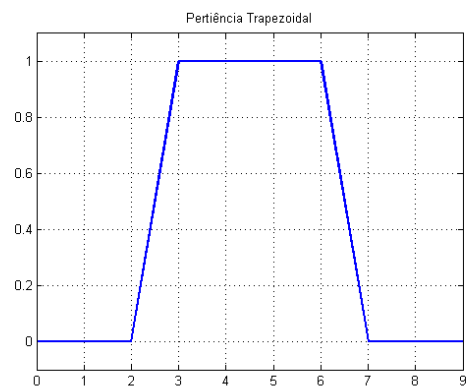
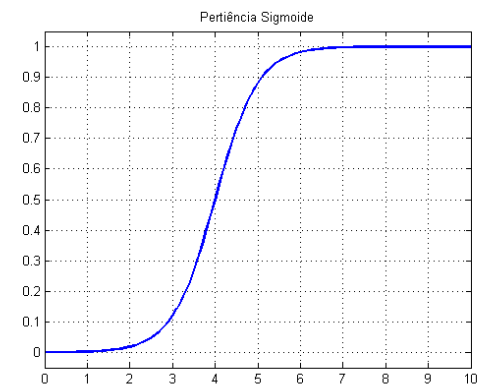
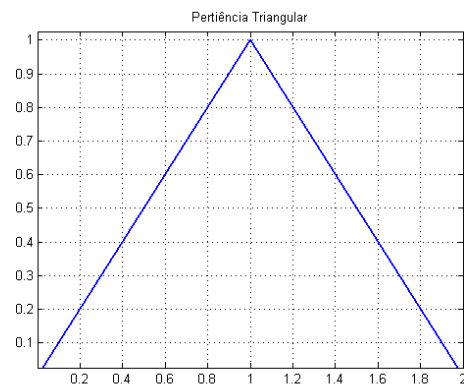
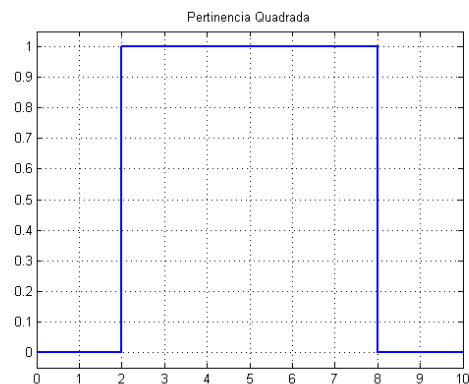
- Pertinência Clássica

$$f_u(x) : U \rightarrow \{0, 1\} \quad f_u(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in U \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- Pertinência Fuzzy

$$f_i(x) : i \rightarrow [0, 1]$$

# Funções de Pertinência

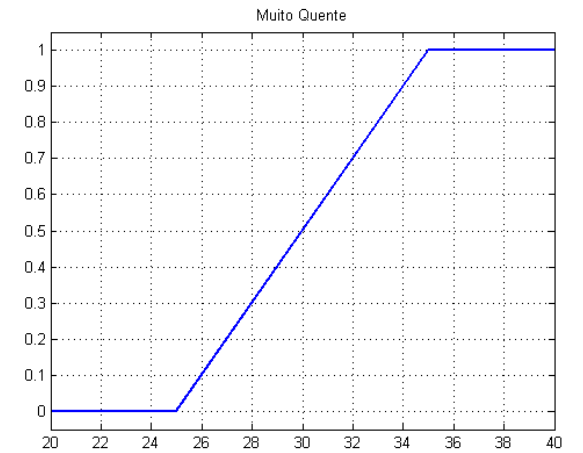
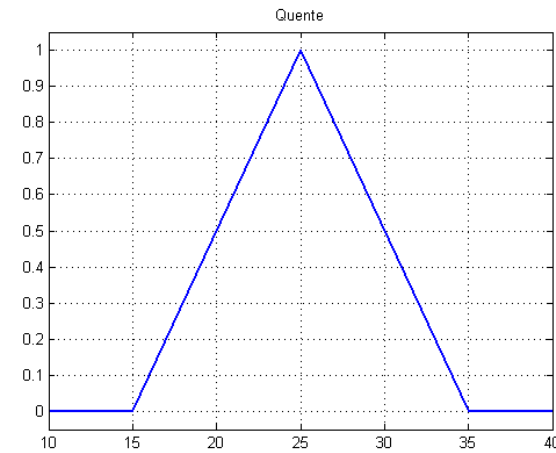
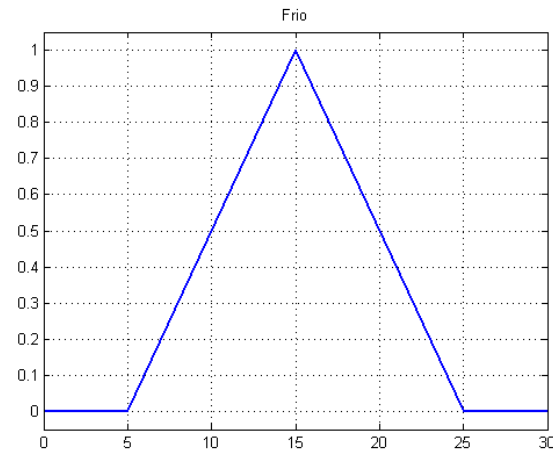
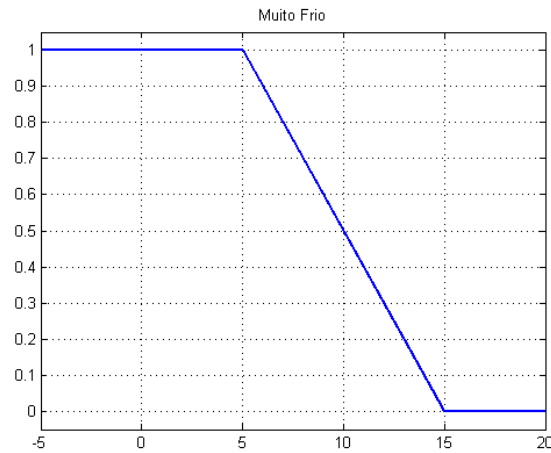


# Aplicação

- Definição das variáveis linguísticas – termos que compõem o conjunto universo de discurso
  - “Temperatura”
- Definição dos valores linguísticos
  - “Frio”, “Muito Frio”
  - “Quente”, “Muito Quente”
- Definir os limites de cada conjunto
  - $[-\infty, 10C], [5C, 25C], [15C, 35C], [25C, \infty]$
- Definir as funções de pertinência de cada conjunto



# Exemplo - Temperatura



Temperatura (°C)	Muito Frio	Frio	Quente	Muito Quente
0	1	0	0	0
5	1	0	0	0
10	0.5	0.5	0	0
15	0	1	0	0
20	0	0.5	0.5	0
25	0	0	1	0
30	0	0	0.5	0.5
35	0	0	0	1
40	0	0	0	1

# Regras Se-Então

$$\text{Regra: } \begin{cases} \text{SE: } X \text{ pertence a } A \\ \text{ENTÃO: } Y \text{ pertence a } B \end{cases}$$

- Definem o comportamento de um conseqüente dado um antecedente
- Em lógica fuzzy definem o peso do conseqüente dado o “grau” do antecedente

# Modelagem Takagi-Sugeno

- Dado um sistema qualquer:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(u(t))$$

$$y(t) = h(x(t))$$

- Linearização:

$$\Delta \dot{x}(t) = A \Delta x(t) + B \Delta u(t)$$

$$y(t) = C \Delta x(t)$$

- “n” variáveis premissas:

$$c(t) = [c_1(t) \ c_2(t) \ c_3(t) \ \dots \ c_n(t)]$$

- “r” regras

$$\text{Regra } i: \left\{ \begin{array}{l} \text{SE: } c_1(t) \text{ é } M_{1i} \text{ e } c_2(t) \text{ é } M_{2i} \text{ e } \dots \text{ e } c_n(t) \text{ é } M_{ni}, \\ \text{ENTÃO : } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i \Delta x(t) + B_i \Delta u(t), \\ y(t) = C_i \Delta x(t) \end{cases} \end{array} \right.$$

# Modelagem Takagi-Sugeno

- Grau de ativação de cada regra:

$$w_i(c(t)) = \prod_{j=1}^n f_{ij}(c_j(t))$$

- Peso de cada regra no modelo final:

$$\alpha_i(h(t)) := \frac{w_i(h(t))}{\sum_{j=1}^r w_j(h(t))}$$

- Modelo Final:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \alpha_i(c(t)) (A_i x(t) + B_i u(t))$$

# Modelagem TS da Planta

- Variáveis aferidas: níveis

- Variáveis premissas: Nível 1 e Nível 2

- Valores Linguísticos Propostos: “Baixo” e “Alto”



# Modelagem TS da Planta

- Modelo não-linear da planta:

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A_1} (a_3 \sqrt{2gh_3} + \gamma_1 k_1 v_1 - a_1 \sqrt{2gh_1}) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A_2} (a_4 \sqrt{2gh_4} + \gamma_2 k_2 v_2 - a_2 \sqrt{2gh_2}) \\ \dot{h}_3 = \frac{1}{A_3} ((1 - \gamma_2) k_2 v_2 - a_3 \sqrt{2gh_3}) \\ \dot{h}_4 = \frac{1}{A_4} ((1 - \gamma_1) k_1 v_1 - a_4 \sqrt{2gh_4}) \end{cases}$$

# Modelagem TS da Planta

- Linearização:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{h}_1 \\ \Delta \dot{h}_2 \\ \Delta \dot{h}_3 \\ \Delta \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1 \sqrt{2g}}{2A_1 \sqrt{h_1}} & 0 & \frac{a_3 \sqrt{2g}}{2A_1 \sqrt{h_3}} & 0 \\ 0 & \frac{-a_2 \sqrt{2g}}{2A_2 \sqrt{h_2}} & 0 & \frac{a_4 \sqrt{2g}}{2A_2 \sqrt{h_4}} \\ 0 & 0 & \frac{-a_3 \sqrt{2g}}{2A_3 \sqrt{h_3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-a_4 \sqrt{2g}}{2A_4 \sqrt{h_4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix}$$

# Modelagem TS da Planta

## Fase Mínima

Especificações Iniciais da Planta	
A1, A3 ( $cm^2$ )	28
A2, A4 ( $cm^2$ )	32
a1, a3 ( $cm^2$ )	0.071
a2, a4 ( $cm^2$ )	0.057
$g$ $cm/s$	981
k1	$3,15\ cm^3/Vs$
k2	$3.29\ cm^3/Vs$
$\gamma_1$	0.43
$\gamma_2$	0.34

## Fase Não-Mínima

Especificações Iniciais da Planta	
A1, A3 ( $cm^2$ )	28
A2, A4 ( $cm^2$ )	32
a1, a3 ( $cm^2$ )	0.071
a2, a4 ( $cm^2$ )	0.057
$g$ $cm/s$	981
k1	$3,33\ cm^3/Vs$
k2	$3.35\ cm^3/Vs$
$\gamma_1$	0.60
$\gamma_2$	0.70



# Modelagem TS da Planta

- Fase Mínima

Sistema	$\bar{h}_1$ (cm)	$\bar{h}_2$ (cm)	$\bar{h}_3$ (cm)	$\bar{h}_4$ (cm)	$\bar{v}_1$ (v)	$\bar{v}_2$ (v)
1	5	5	0.0334	2.9076	3.2321	0.5716
2	5	15	0.9431	1.1033	1.9910	3.0390
3	15	5	0.2229	13.0191	6.8393	-1.4773
4	15	15	0.1001	8.7228	5.5982	0.9900

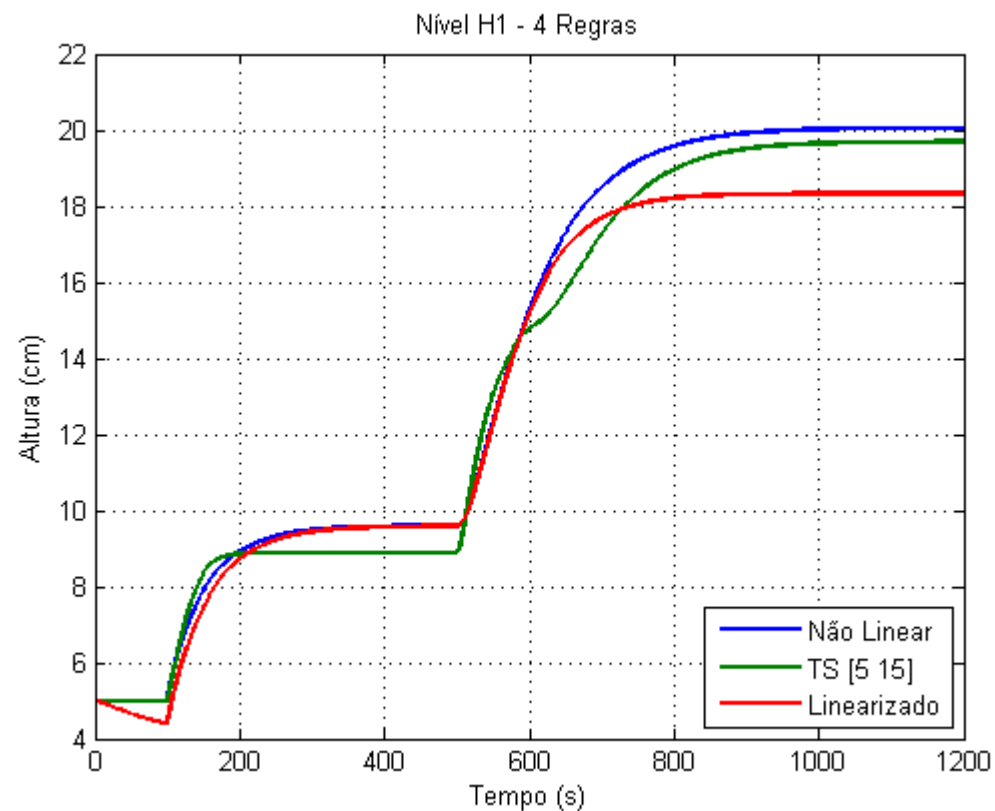
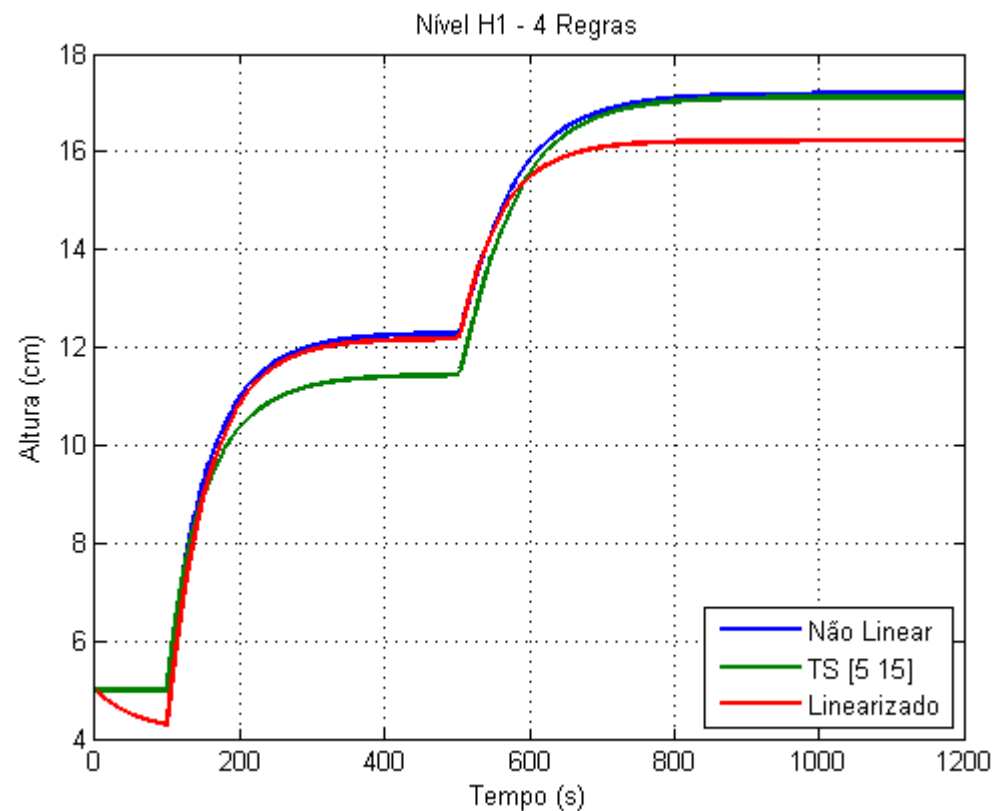
- Fase Não-Mínima

Sistema	$\bar{h}_1$ (cm)	$\bar{h}_2$ (cm)	$\bar{h}_3$ (cm)	$\bar{h}_4$ (cm)	$\bar{v}_1$ (v)	$\bar{v}_2$ (v)
1	5	5	2.0804	1.7175	1.8428	2.0890
2	5	15	0.0321	15.9038	5.6078	-0.2595
3	15	5	16.9727	0.1661	-0.5730	5.9668
4	15	15	6.2413	5.1525	3.1919	3.6183

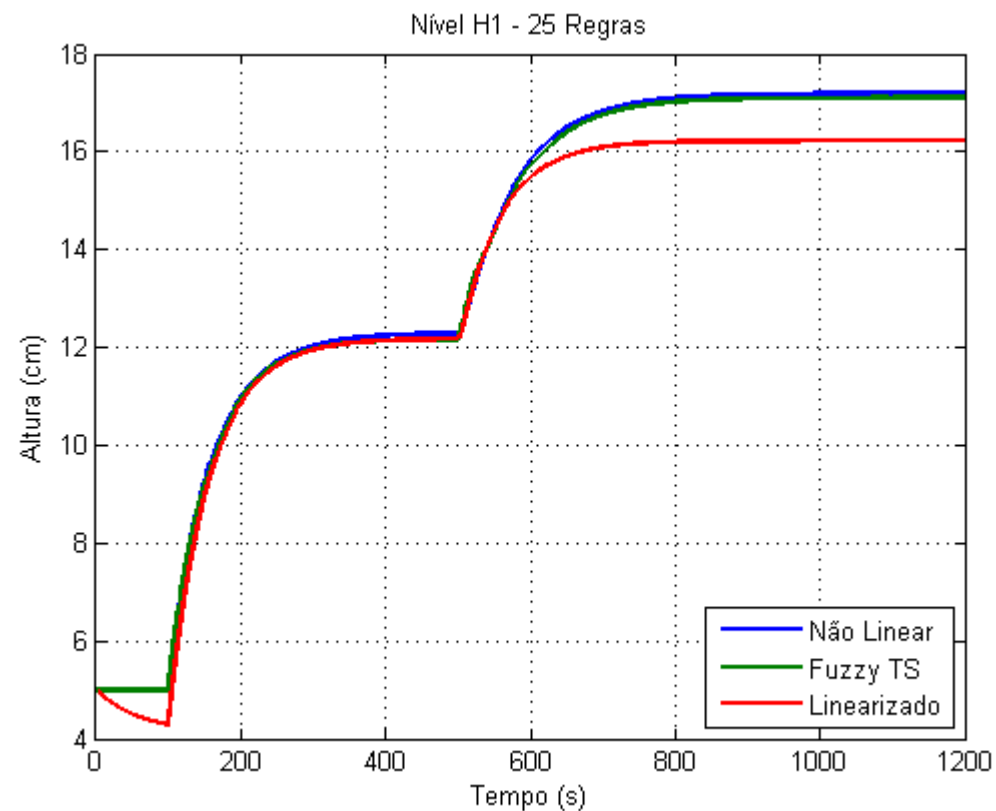
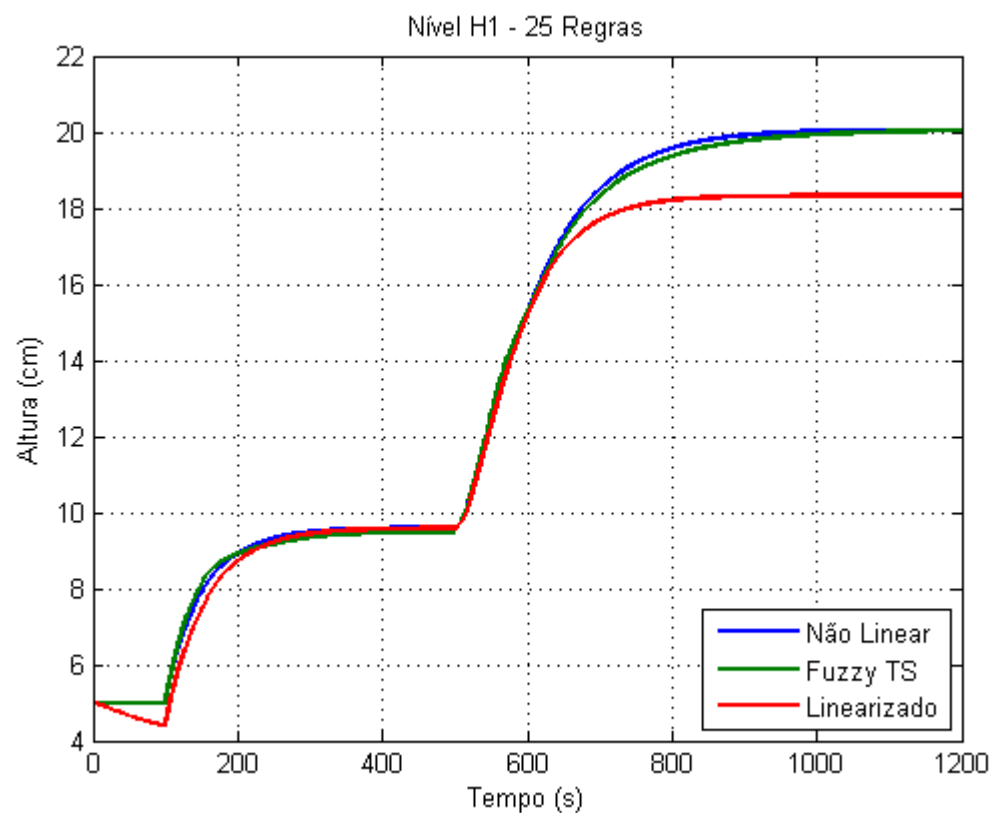
# Regras

- Regra 1: 
$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é baixo e } h_2 \text{ é baixo} \\ \text{ENTÃO} & \Delta \dot{h}(t) = A_1 \Delta h(t) + B_1 \Delta u(t) \end{cases}$$
- Regra 2: 
$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é baixo e } h_2 \text{ é alto} \\ \text{ENTÃO} & \Delta \dot{h}(t) = A_2 \Delta h(t) + B_2 \Delta u(t) \end{cases}$$
- Regra 3: 
$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é alto e } h_2 \text{ é baixo} \\ \text{ENTÃO} & \Delta \dot{h}(t) = A_3 \Delta h(t) + B_3 \Delta u(t) \end{cases}$$
- Regra 4: 
$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é alto e } h_2 \text{ é alto} \\ \text{ENTÃO} & \Delta \dot{h}(t) = A_4 \Delta h(t) + B_4 \Delta u(t) \end{cases}$$

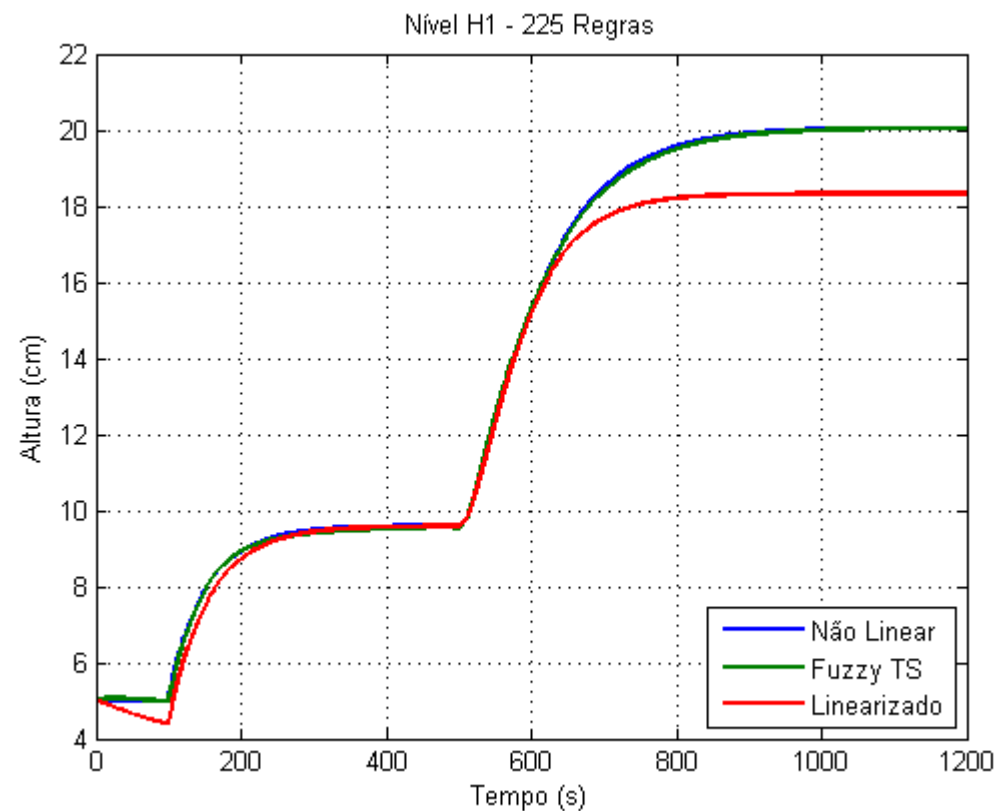
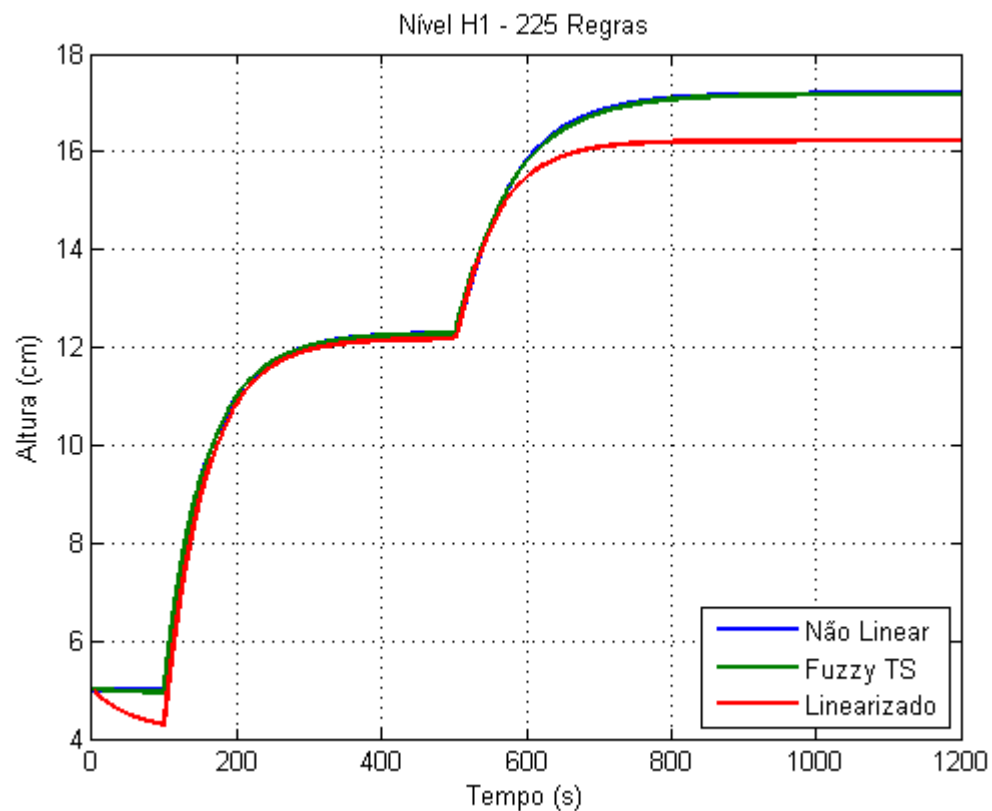
# Simulações



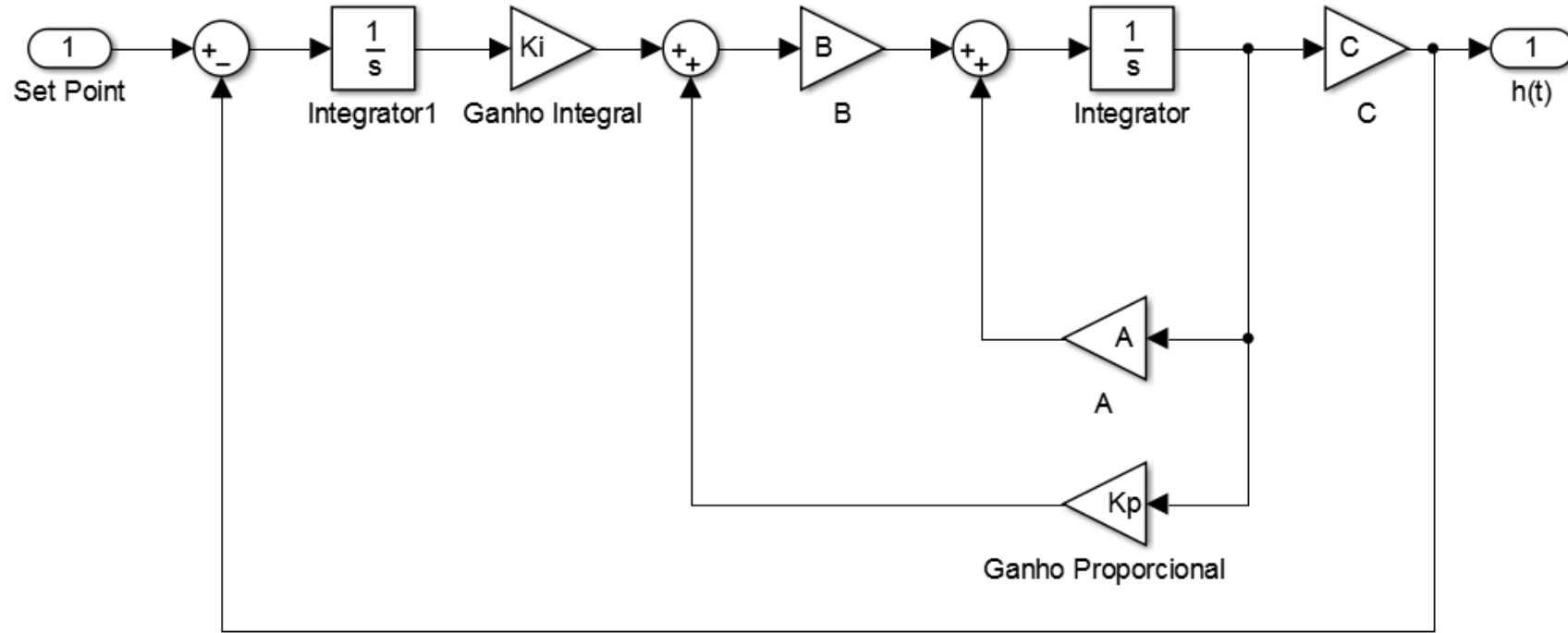
# Simulações



# Simulações



# Sistema em Malha Fechada



# Controle via LMIs

- Para as “r” regras:

$$\textit{encontre } X = X', \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$X \succ 0$$

$$\textit{s.a} \quad \begin{bmatrix} X & XA'_i - M'_iB'_i \\ A_iX - B_iM_i & X \end{bmatrix} \succ 0$$

$$K_i = M_iX^{-1}$$

# Ganhos

- Ganho Final – Segue as mesmas regras de ativação do modelo simulado

$$K = \sum_{i=1}^4 \alpha_i(h(t)) K_i$$



# Simulações - Malha Fechada

## Fase Mínima

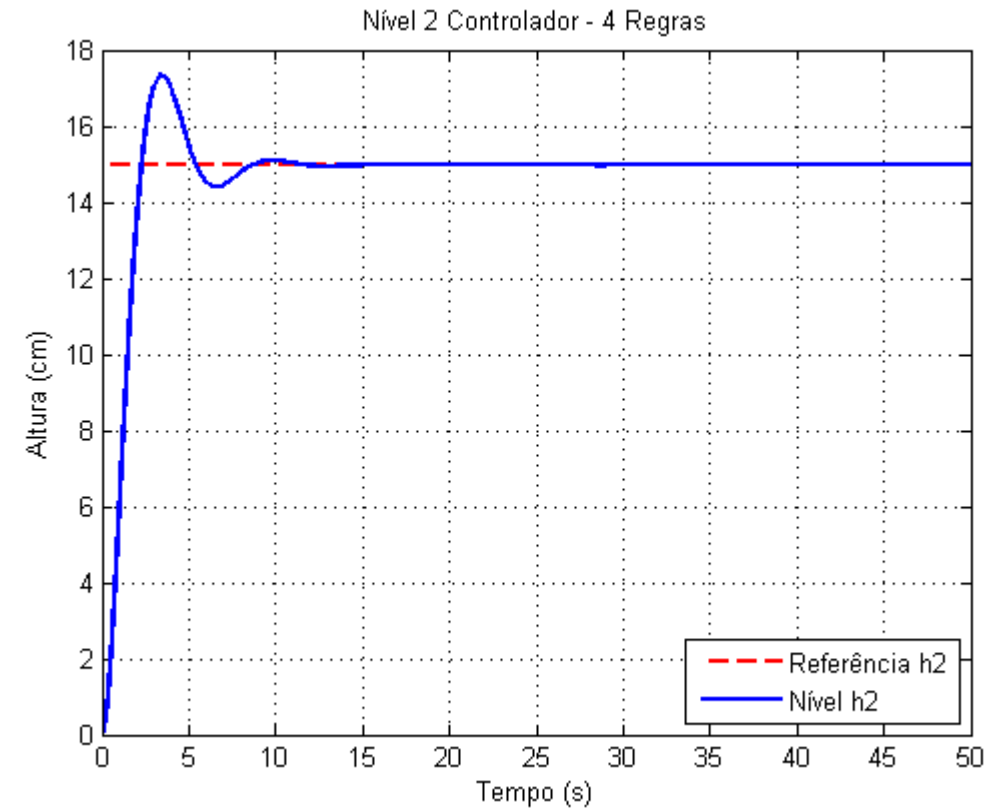
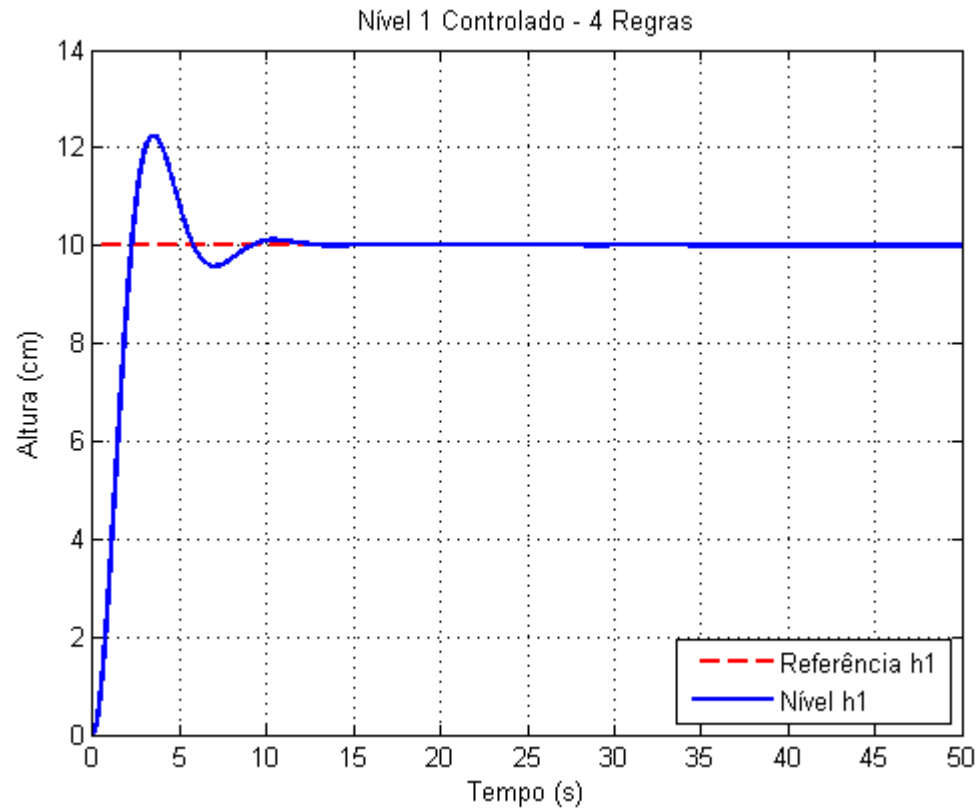
Regra	Ganho
1	$K = \begin{bmatrix} -13.1962 & 3.0637 & -3.0992 & 0.1430 & 15.0539 & -1.3580 \\ -5.4607 & -15.2912 & 3.4223 & 0.0239 & 1.6964 & 15.9282 \end{bmatrix}$
2	$K = \begin{bmatrix} -12.8885 & 1.0745 & -1.5395 & -0.0323 & 14.9563 & -0.5608 \\ -1.7706 & -13.2431 & 1.0214 & -0.0123 & 0.4755 & 15.4671 \end{bmatrix}$
3	$K = \begin{bmatrix} -13.1962 & 3.0637 & -3.0992 & 0.1430 & 15.0539 & -1.3580 \\ -5.4607 & -15.2912 & 3.4223 & 0.0239 & 1.6964 & 15.9282 \end{bmatrix}$
4	$K = \begin{bmatrix} -12.8885 & 1.0745 & -1.5395 & -0.0323 & 14.9563 & -0.5608 \\ -1.7706 & -13.2431 & 1.0214 & -0.0123 & 0.4755 & 15.4671 \end{bmatrix}$

# Simulações - Malha Fechada

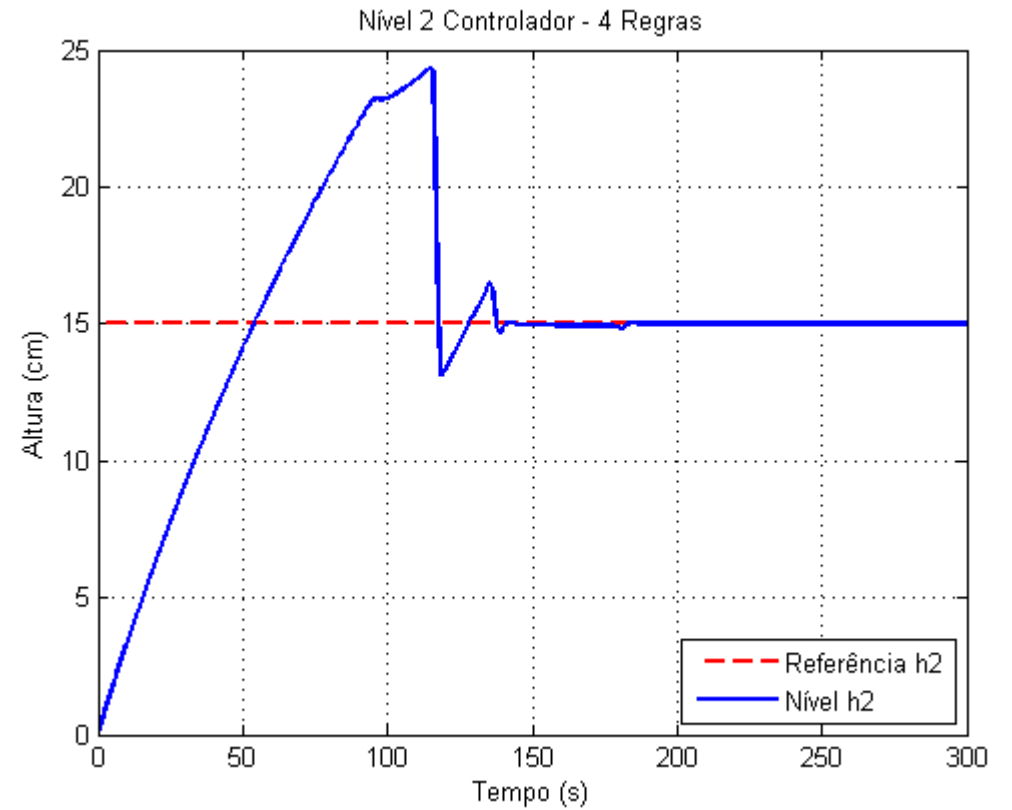
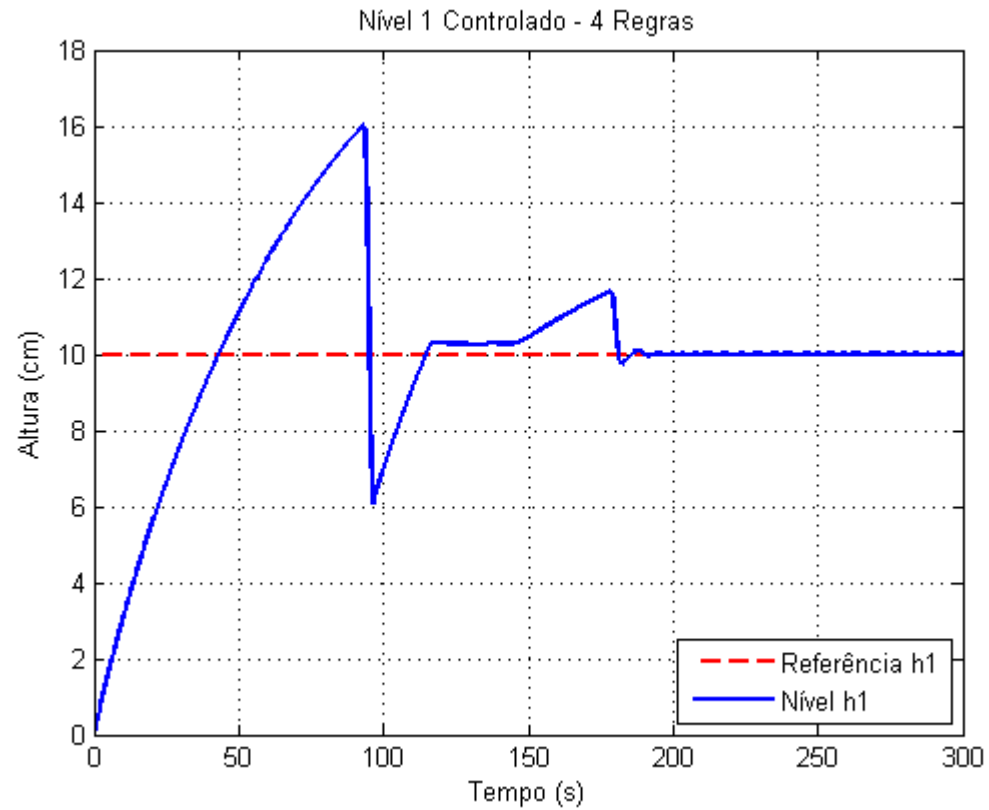
## Fase Não-Mínima

Regra	Ganho
1	$K = \begin{bmatrix} 490.5249 & -805.4358 & 366.4860 & -439.5865 & 0.3923 & 19.9419 \\ -385.9505 & 484.5975 & -230.7682 & 333.2462 & 10.4116 & -4.9420 \end{bmatrix}$
2	$K = \begin{bmatrix} 0.9652 & -1.5850 & 0.7224 & -0.8567 & -0.0047 & 0.0357 \\ -0.2384 & 0.3018 & -0.1458 & 0.2055 & 0.0069 & -0.0025 \end{bmatrix}$
3	$K = \begin{bmatrix} 490.5249 & -805.4358 & 366.4860 & -439.5865 & 0.3923 & 19.9419 \\ -385.9505 & 484.5975 & -230.7682 & 333.2462 & 10.4116 & -4.9420 \end{bmatrix}$
4	$K = \begin{bmatrix} 0.9652 & -1.5850 & 0.7224 & -0.8567 & -0.0047 & 0.0357 \\ -0.2384 & 0.3018 & -0.1458 & 0.2055 & 0.0069 & -0.0025 \end{bmatrix}$

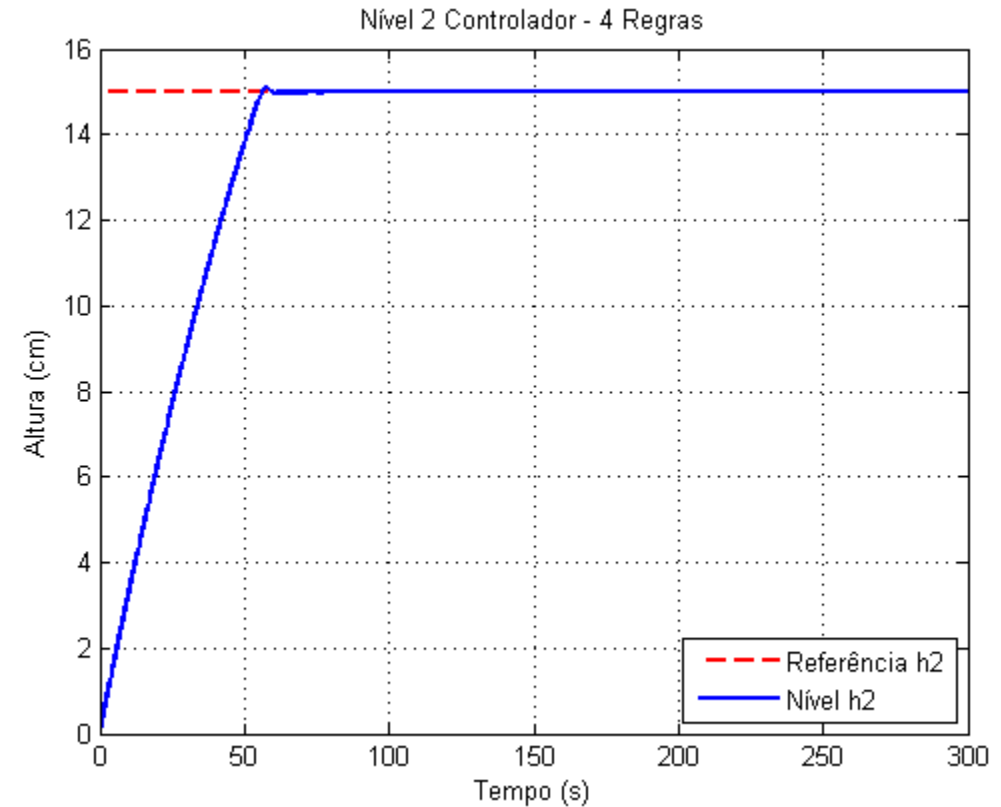
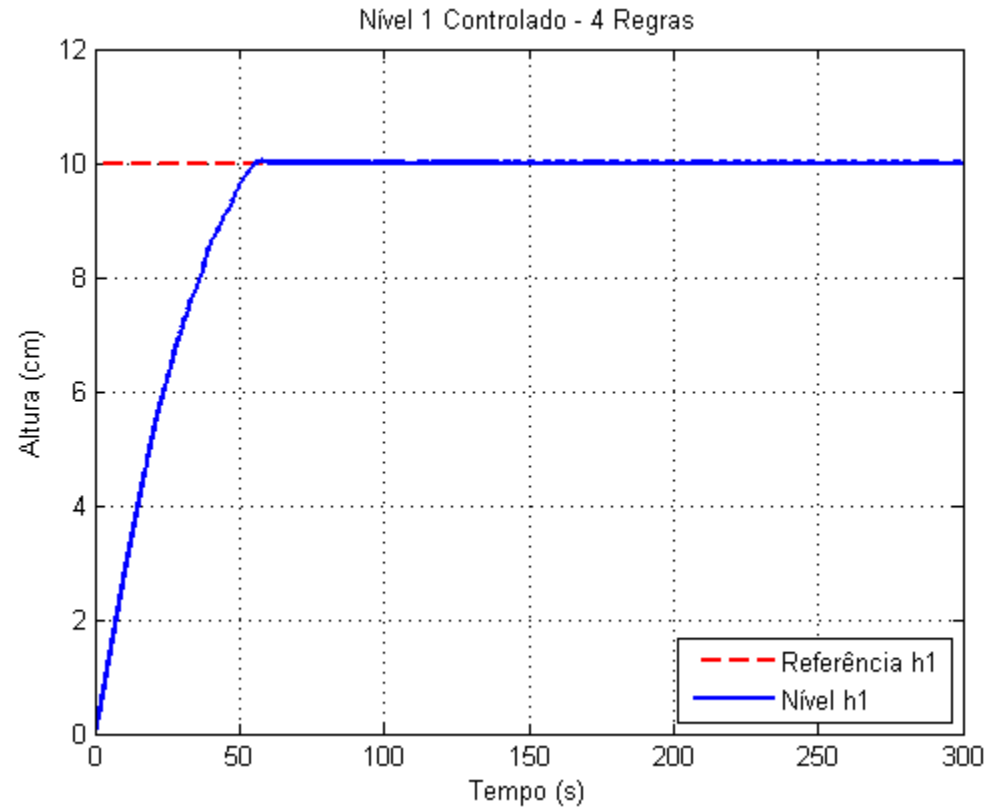
# Controle sem restrições



# Com restrições de entrada



# Com saturação do integrador



# Identificação

- Identificação Manual

Identificação	Tensão ( $v_i$ )	$\gamma_1$	$\gamma_2$	Ganho 1 ( $k_1$ )	Ganho 2 ( $k_2$ )
1	42%	0.8980	0.6810	$7.4044 \text{ cm}^3/Vs$	$7.1022 \text{ cm}^3/Vs$
2	45%	0.8276	0.6827	$8.1801 \text{ cm}^3/Vs$	$7.3339 \text{ cm}^3/Vs$

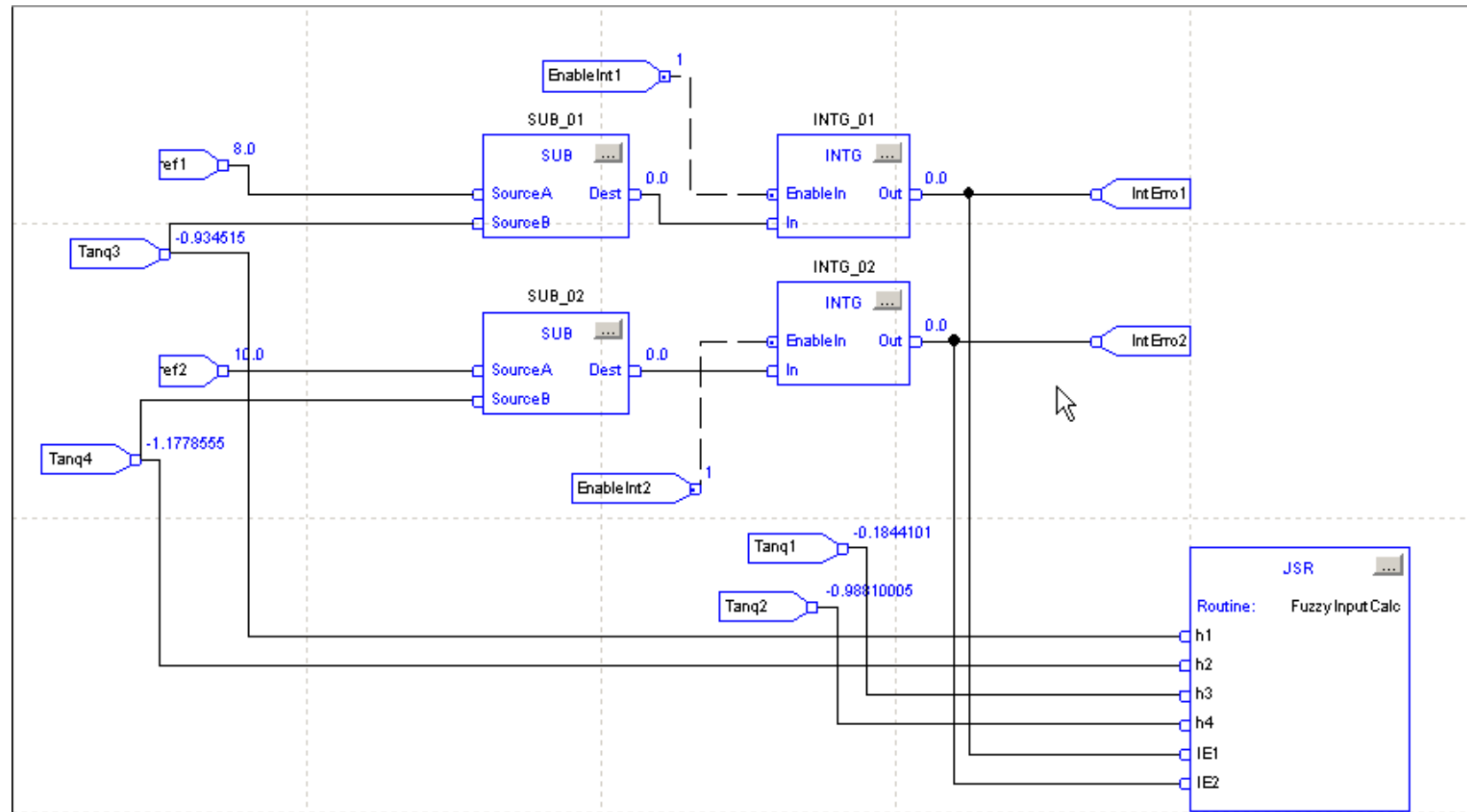
- Para as “r” regras:

Sistema	Bomba 1 ( $\bar{v}_1$ )	Bomba 2 ( $\bar{v}_1$ )	Nível 1 ( $\bar{h}_1$ )	Nível 2 ( $\bar{h}_2$ )	Nível 3 ( $\bar{h}_3$ )	Nível 4 ( $\bar{h}_4$ )
1	42%	42%	11.1024 cm	9.4410 cm	8.7849 cm	17.4466 cm
2	42%	45%	16.3767 cm	16.1350 cm	11.4907 cm	20.5671 cm
3	45%	42%	15.0037 cm	13.9138 cm	20.7899 cm	19.5759 cm
4	45%	45%	18.0278 cm	18.8761 cm	18.3048 cm	19.6136 cm

# Ganhos Implementados

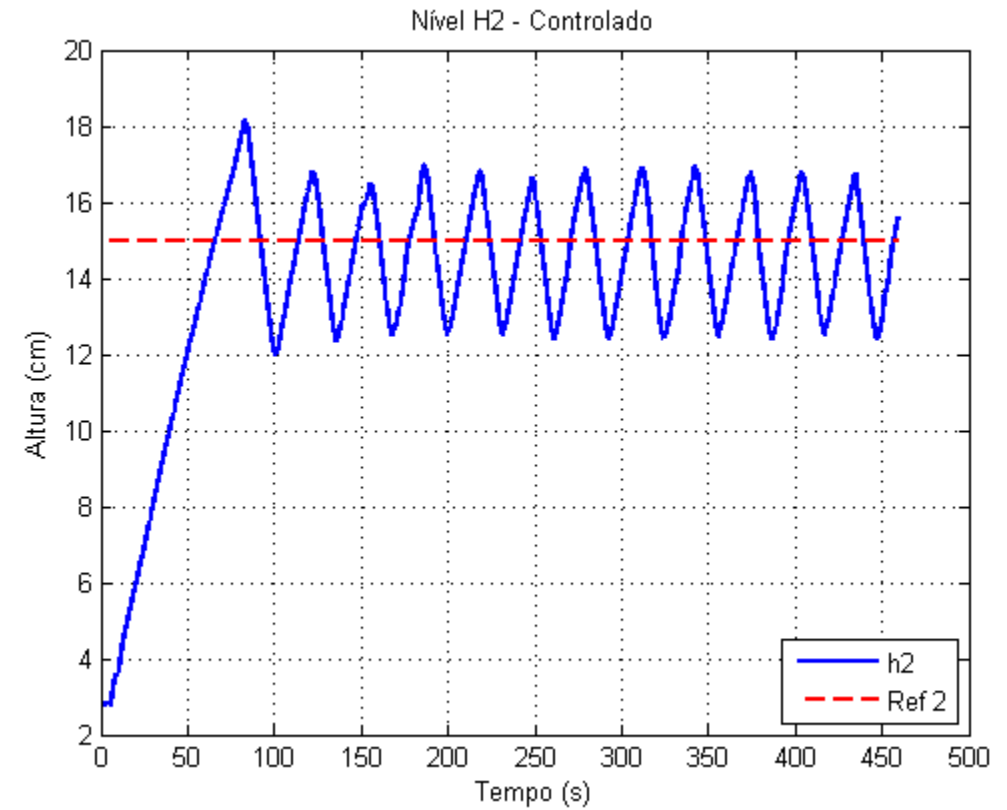
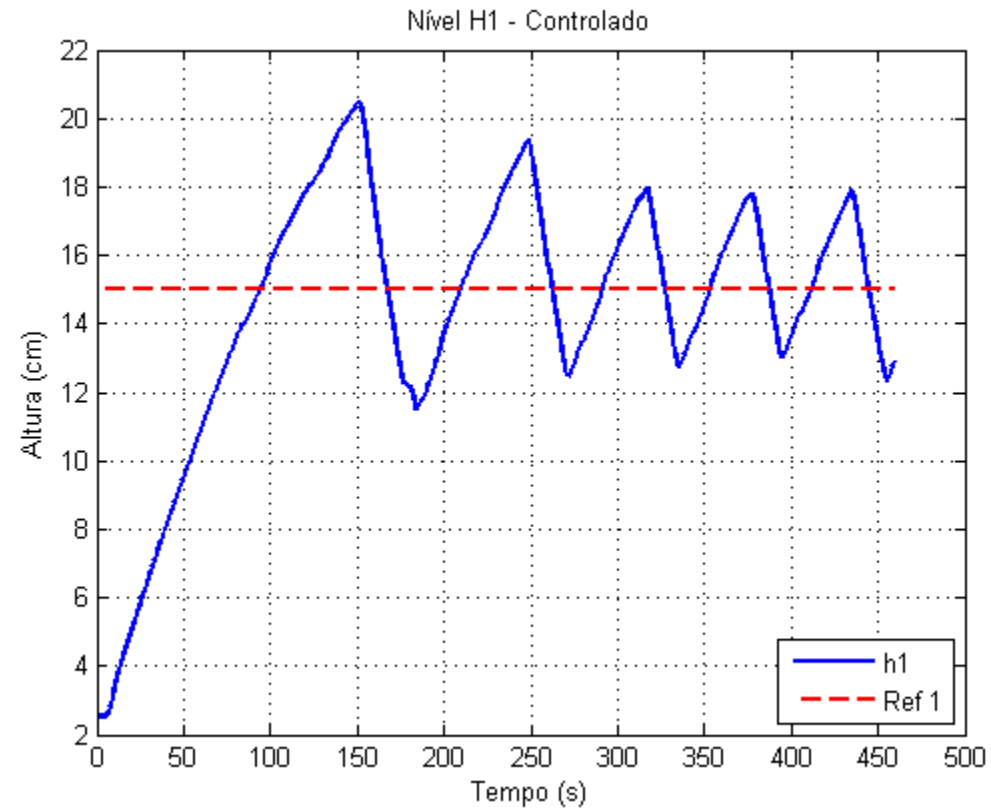
Regra	Ganho					
1	$K =$	$\begin{bmatrix} -10.1267 & -0.1726 & -0.0693 & -0.0304 & 7.4632 & 0.0782 \\ 0.4704 & -8.9962 & 0.0234 & -0.0081 & -0.1735 & 11.3821 \end{bmatrix}$				
2	$K =$	$\begin{bmatrix} -10.1655 & -0.1445 & -0.0628 & -0.0301 & 7.4634 & 0.0680 \\ 0.3944 & -8.7470 & 0.0221 & -0.0071 & -0.1460 & 11.0130 \end{bmatrix}$				
3	$K =$	$\begin{bmatrix} -9.7178 & -0.2288 & -0.0433 & -0.0878 & 7.1828 & 0.0979 \\ 0.5970 & -8.9866 & -0.0014 & -0.0096 & -0.2192 & 11.3719 \end{bmatrix}$				
4	$K =$	$\begin{bmatrix} -9.7327 & -0.2180 & -0.0472 & -0.0874 & 7.1831 & 0.0939 \\ 0.5519 & -8.7291 & 0.0082 & -0.0090 & -0.2028 & 11.0068 \end{bmatrix}$				

# Rotina Principal





# Resultados



# Análise

- Resposta satisfatória, porém longe da esperada
- Possíveis causas:
  - Zona de Atuação da Bomba
  - Método de Saturação do Integrador

# Considerações Finais

- Objetivos
- Trabalhos Futuros
  - Identificação em mais pontos
  - Sintonia de controladores com restrições
  - Inclusão da zona de atuação da bomba no modelo

Obrigado a todos!