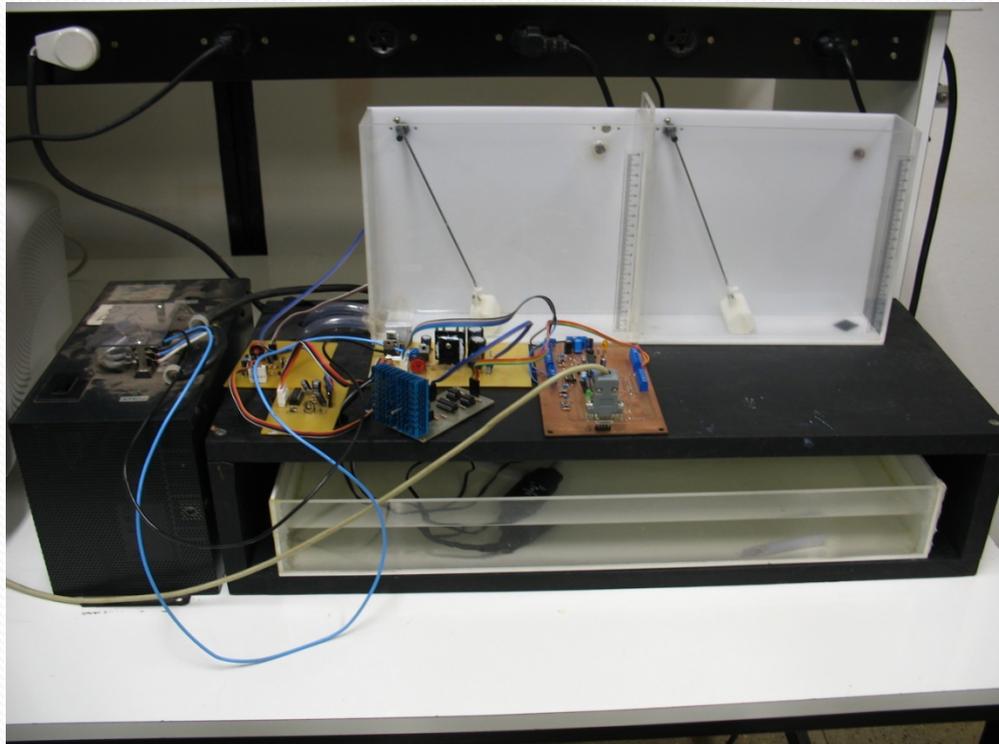


Sistema Didático de Nível de Líquidos



Adaptado de:

TG Mecatrônica 2008 – LARA/ENE/FT/UnB

- Adriano Peixoto Ramos

- Gabriel Lula Barros Wense

ROTEIRO

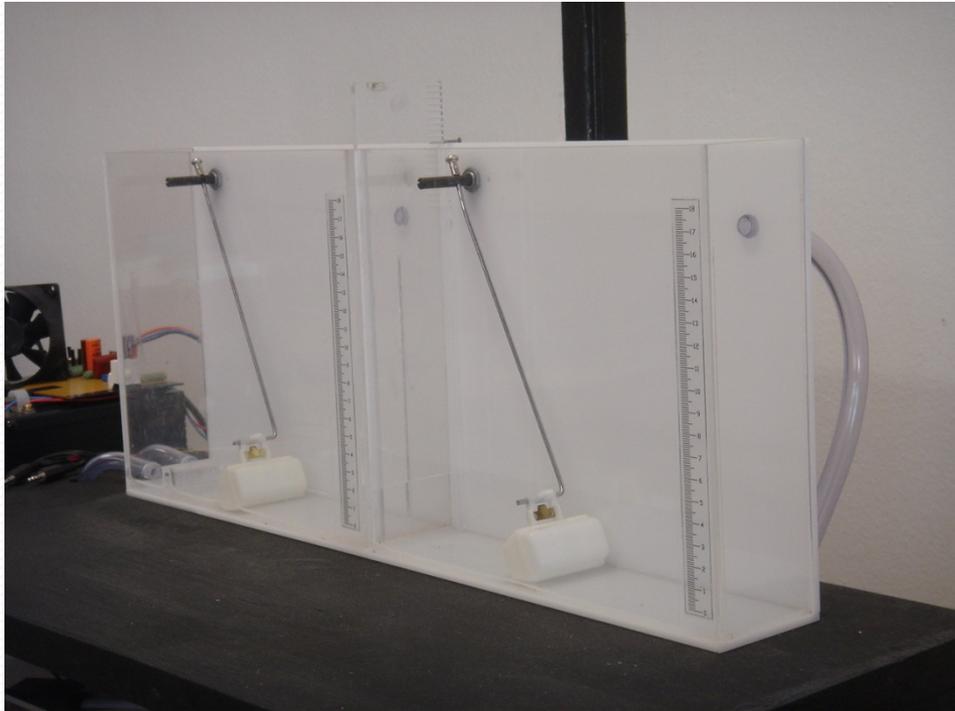
- OBJETIVOS
- SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS
- MODELAGEM MATEMÁTICA
- MÓDULOS ELETRÔNICOS
- CALIBRAÇÃO
- PROJETO DE CONTROLE NO EE
- RESULTADOS
- CONCLUSÃO

OBJETIVOS

- Continuar Projeto (Sandro e Rafael – 2004);
- Implementar módulos eletrônicos flexíveis;
- Calibração dos sensores e atuadores;
- Controle no espaço-de-estados;
- Experimento didático Controle Dinâmico;

SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

Descrição dos tanques acoplados

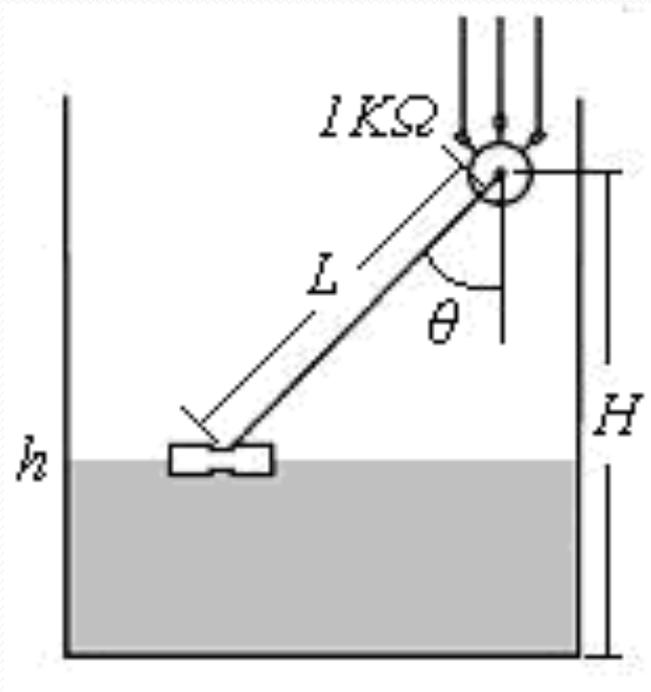


Características:

- Dimensões 6,0 x 25,4 x 22,0 cm;
- Chapa vertical deslizante ~ válvula entre os tanques;
- Tanque 1 vazão de entrada;
- Tanque 2 vazão de saída;
- Escala graduada em centímetros;
- Dutos para limitação dos níveis.

SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

Sensores



Boia como Sensor de Nível

- Potenciômetro, haste metálica e bóia.

$$R = A \cos^{-1} \left(\frac{H - h}{L} \right)$$

SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

Sensores

Potenciômetro Linear Rotativo



Características:

- Solução simples e barata;
- Efeito *stick-slip* → Ruído.

SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

Atuadores

Moto-Bomba DC

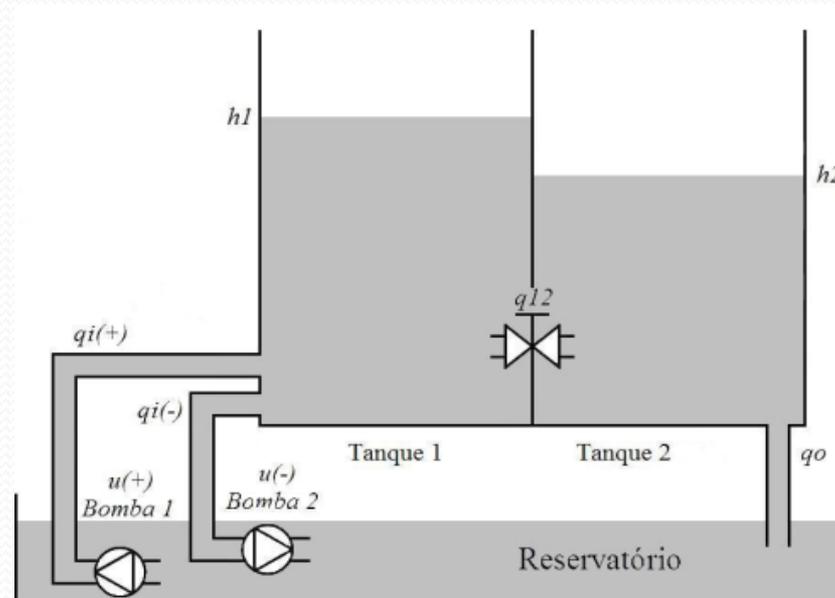


Características:

- Baixo custo;
- 12 V;
- Acionamento por PWM;
- Desconforto devido ao barulho.

MODELAGEM MATEMÁTICA

Representação do sistema de nível



	O que a variável representa	Unidade
q_i	Vazão de entrada do sistema, no tanque 1	cm^3/s
q_o	Vazão de saída do sistema, no tanque 2	cm^3/s
q_{12}	Vazão entre tanque 1 e tanque 2	cm^3/s
h_1	Altura do tanque 1	cm
h_2	Altura do tanque 2	cm
A_v	Área da seção transversal dos tanques (têm mesma área)	cm

MODELAGEM MATEMÁTICA

Hipóteses simplificadoras

1. O fluido (água) é incompressível e homogêneo;
2. A perda de carga nos dutos é desprezível;
3. A área da secção transversal dos tanques não se altera;
4. Atuadores e sensores comportam-se como sistemas de ordem zero.

MODELAGEM MATEMÁTICA

Balanço de massa

$$\frac{dV}{dt} = A_r \frac{dh}{dt} = \sum q_i - \sum q_o$$

Relação entre q e h

➤ Considerando fluxo turbulento:

$$q = k\sqrt{h}$$

MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelo não-linear do sistema de nível

$$A_r \frac{dh_1}{dt} = q_i - \text{sign}(h_1 - h_2) k_{12} \sqrt{|h_1 - h_2|}$$

$$A_r \frac{dh_2}{dt} = \text{sign}(h_1 - h_2) k_{12} \sqrt{|h_1 - h_2|} - k_2 \sqrt{h_2}$$

MODELAGEM MATEMÁTICA

Linearização em torno do ponto de operação

➤ série de Taylor em torno do ponto de equilíbrio (\bar{h}_1, \bar{h}_2) , obtém-se:

$$\frac{d(\delta h_1)}{dt} = -a\delta h_1 + a\delta h_2 + \frac{\delta q_i}{A_r}$$

$$\frac{d(\delta h_2)}{dt} = a\delta h_1 - (a + b)\delta h_2$$

MODELAGEM MATEMÁTICA

Representação no espaço-de-estados

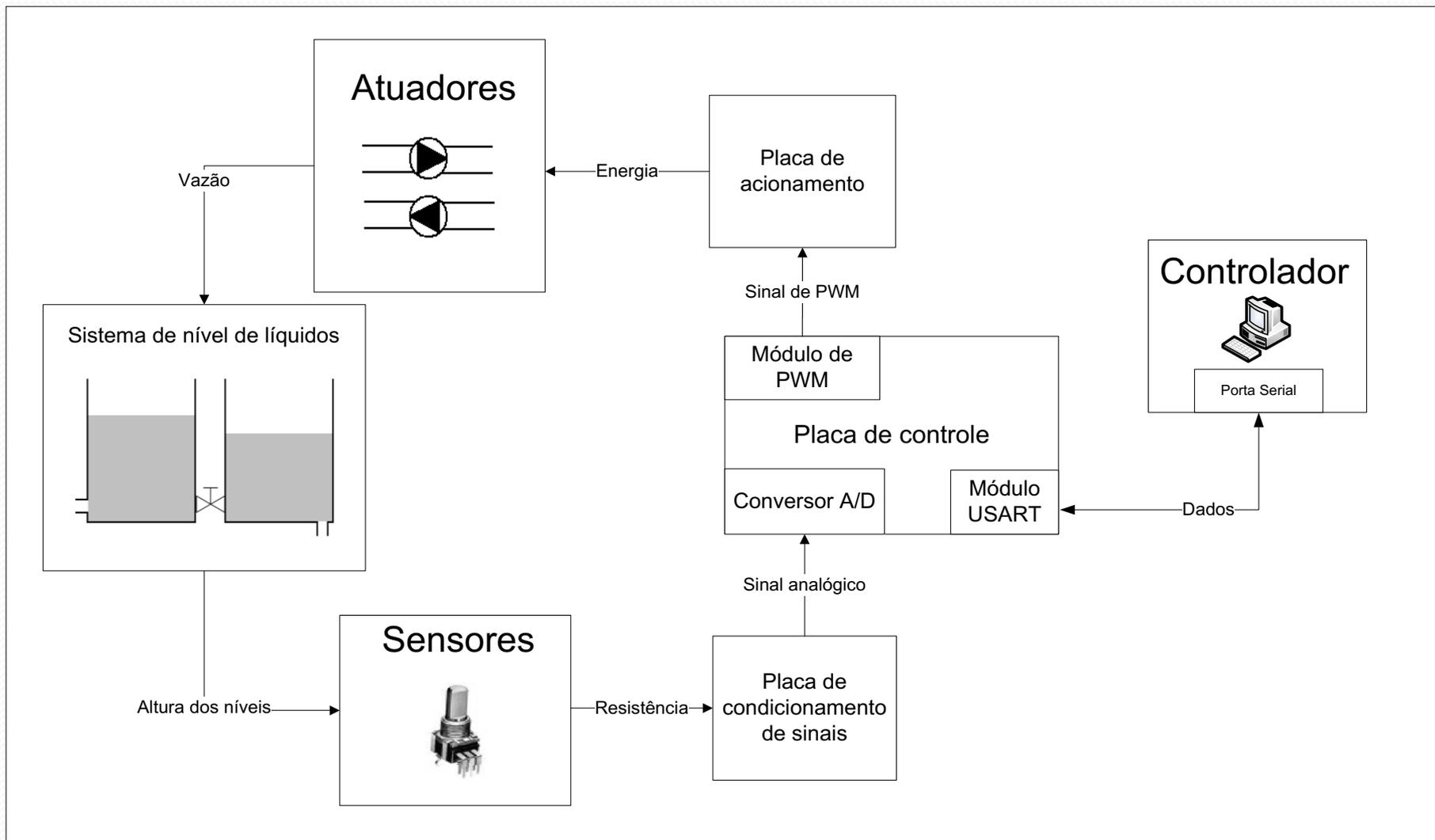
$$\begin{bmatrix} \dot{\delta h}_1 \\ \dot{\delta h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a \\ a & -(a+b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta h_1 \\ \delta h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/A_r \\ 0 \end{bmatrix} \delta q_i$$

Altura do tanque 1: $y_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta h_1 \\ \delta h_2 \end{bmatrix}$

Altura do tanque 2: $y_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta h_1 \\ \delta h_2 \end{bmatrix}$

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Arquitetura do sistema



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Benefícios adquiridos com a modularização:

1. Flexibilização do sistema desenvolvido;
2. Confiabilidade associada ao projeto de placas de circuito impresso;
3. Facilidade na etapa de soldagem dos componentes utilizados;
4. Melhor visualização das funções desempenhadas pelo circuito.

MÓDULOS ELETRÔNICOS

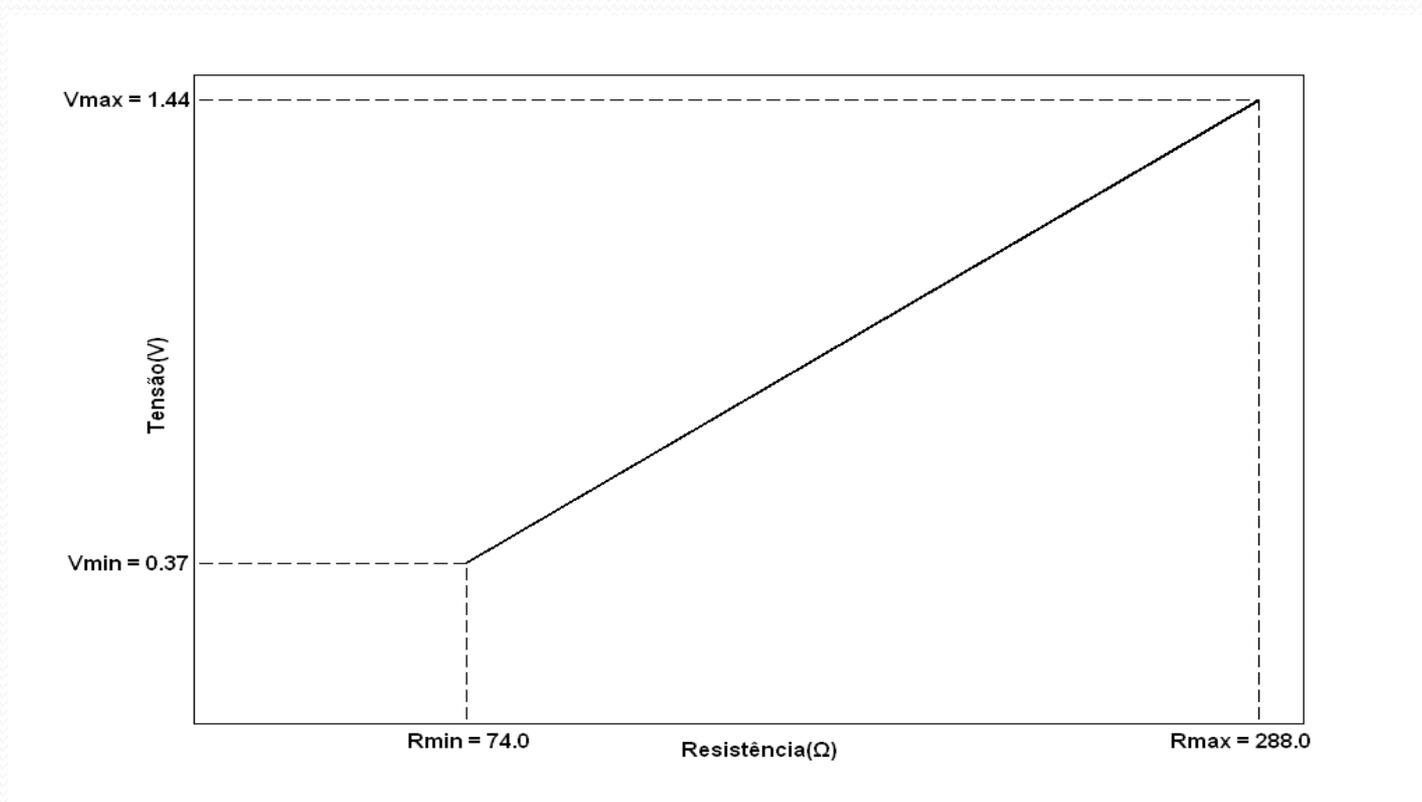
Faixa de atuação dos Potenciômetros

	Potenciômetro 1	Potenciômetro 2
$R_{\min} (\Omega)$	74,0	35,0
$R_{\max} (\Omega)$	288,0	262,0

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Faixa de atuação dos Potenciômetros

Níveis de tensão obtidos com a simples alimentação do Potenciômetro 1 com 5 V



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Circuito de condicionamento de sinais

Intuito do circuito de condicionamento:

➤ Obter sinais com excursão na faixa de 0 a 5 V para serem aplicados na entrada do conversor A/D.

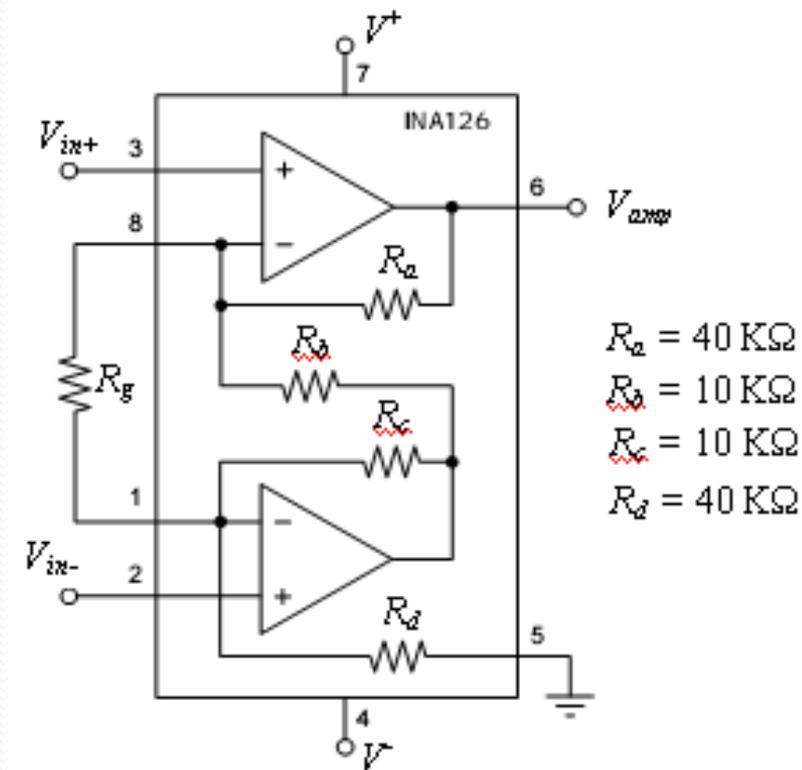
Operações requisitadas:

1. Subtração do sinal de tensão adquirido com o sensor por um valor específico;
2. Aplicação de um ganho para estender a faixa de operação.

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Circuito de condicionamento de sinais

CI INA126 → Capaz de realizar as operações 1 e 2



$$V_{amp} = G(V_{in+} - V_{in-})$$

$$G = 5 + \frac{80000}{R_g}$$

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Circuito de condicionamento de sinais

- Entretanto, devido ao alto preço do INA126, desenvolveu-se o circuito do amplificador de instrumentação com materiais disponíveis no LAVSI.

Consequência → Mais imperfeições às características do amplificador

Análises necessárias:

- Influência das limitações DC do amp-op (V_{os} e I_{bias});
- Influência da tolerância dos resistores.

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Influência da corrente de polarização e da tensão de *off-set*

➤ Aplicando o princípio da superposição, é possível determinar a influência de cada limitação DC:

$$V_{amp} = G(V_{os1} - V_{os2})$$

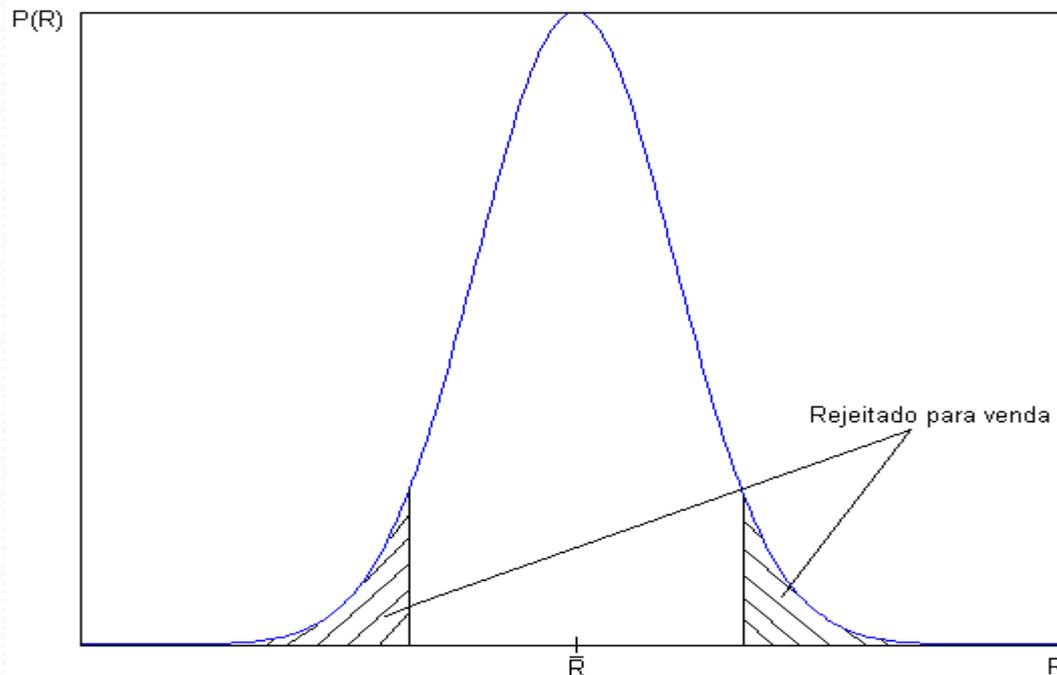
$$V_{amp} = -\left(R_a I_{bias1} + \frac{R_a R_c}{R_b} I_{bias2}\right) = -40000(I_{bias1} + I_{bias2})$$

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Influência da tolerância dos resistores

- Por causa de imperfeições relacionadas ao processo de fabricação, não há como garantir que os resistores possuam exatamente seu valor nominal.

Alternativa → Adoção de limites de tolerância



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Influência da tolerância dos resistores

Fórmula generalizada para a tensão do amplificador de instrumentação desenvolvido:

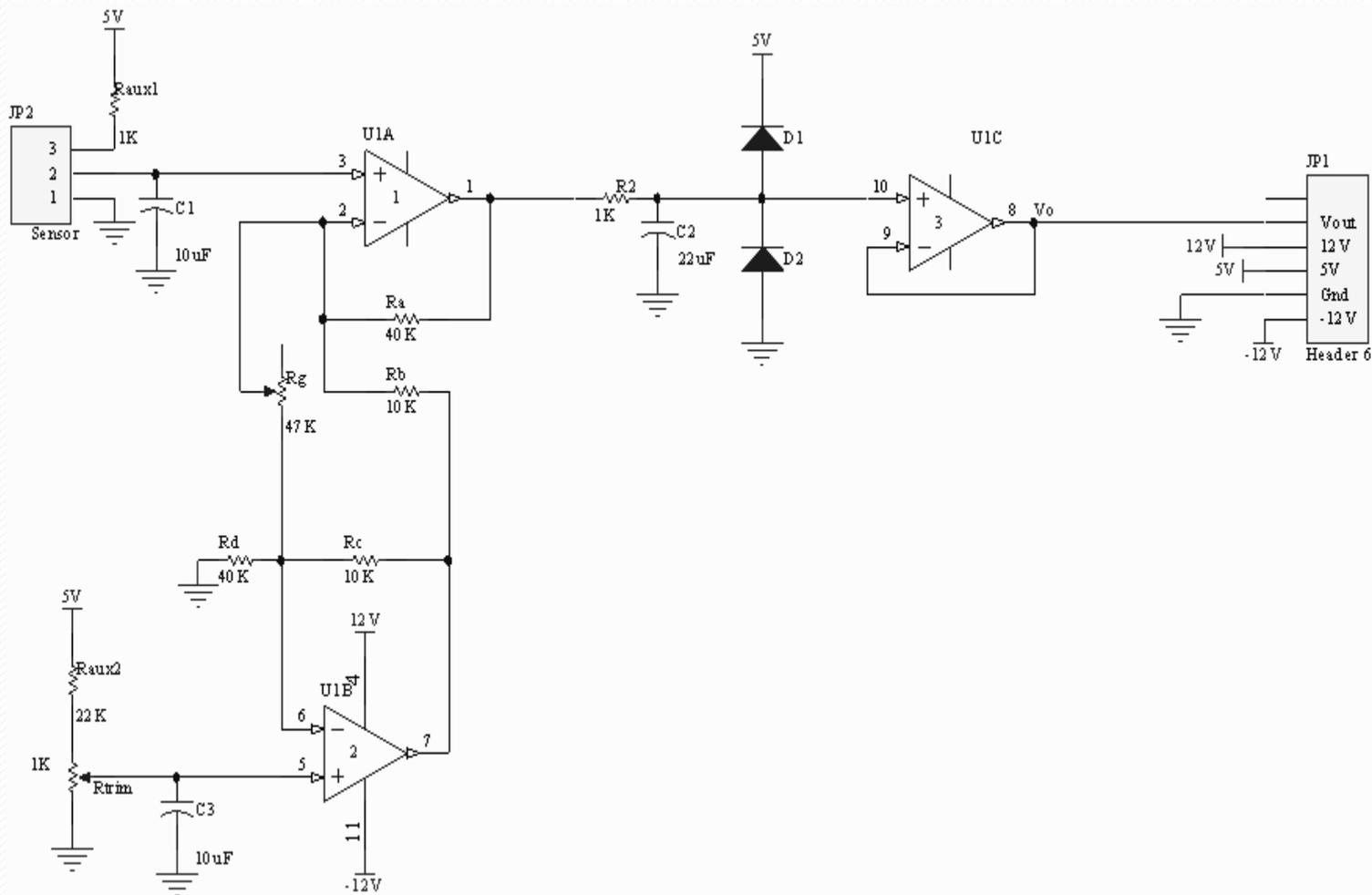
$$V_{amp} = \left(c_1 + \frac{c_2}{R_g}\right)(V_{in+} - V_{in-}) + (V_{in+} - c_3 V_{in-})$$

➤ Os resistores utilizados possuem tolerância de 5 % do valor nominal. Considere este valor como uma incerteza associada à resistência.

	<u>Nível mínimo</u>	<u>Nível máximo</u>
Propagação de erros →	$\Delta V_{amp1} = 22,3 \text{ mV}$	$\Delta V_{amp1} = 0,38 \text{ V}$
	$\Delta V_{amp2} = 8,9 \text{ mV}$	$\Delta V_{amp2} = 0,41 \text{ V}$

MÓDULOS ELETRÔNICOS

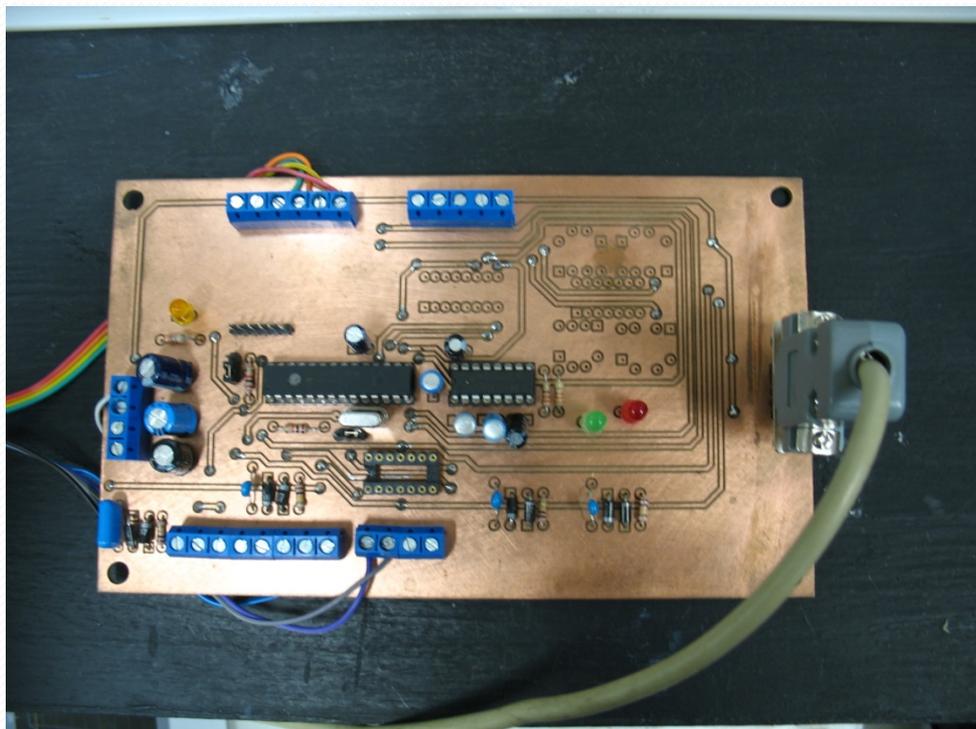
Circuito projetado para o condicionamento dos sinais



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Módulo de controle

- Função: Promover a comunicação entre o sistema de nível e o controlador.



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Módulo de controle - Microcontrolador

➤ Microcontrolador utilizado – PIC 18F252

1) Timer

➤ Define a taxa de amostragem do sistema.

2) Conversor A/D.

➤ Leitura dos circuitos de condicionamento dos sensores.

3) Módulo de PWM

➤ Controla o acionamento das moto-bombas.

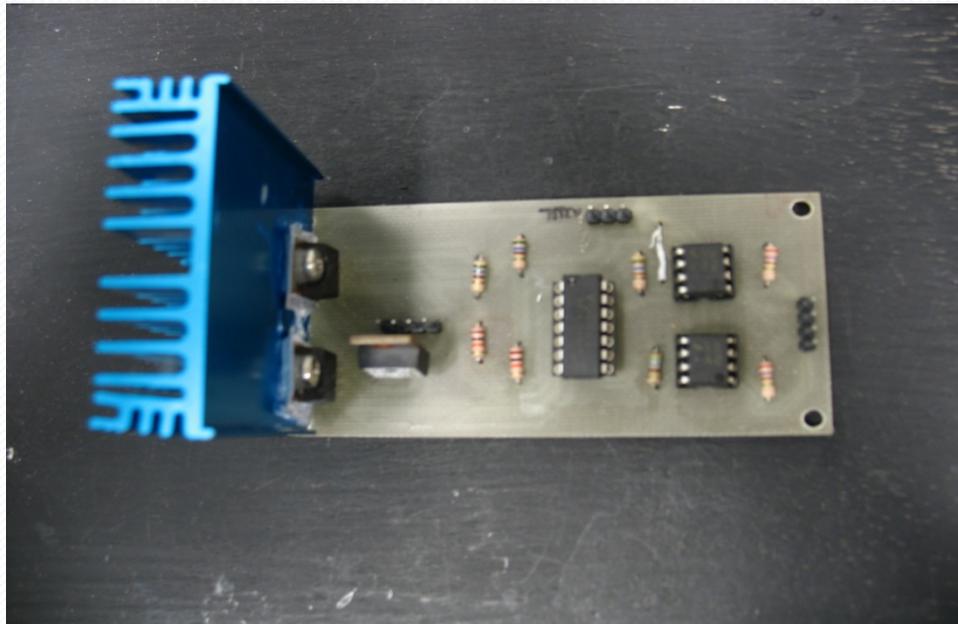
4) Módulo USART

➤ Realiza a comunicação assíncrona com o controlador (PC).

MÓDULOS ELETRÔNICOS

Módulo de acionamento

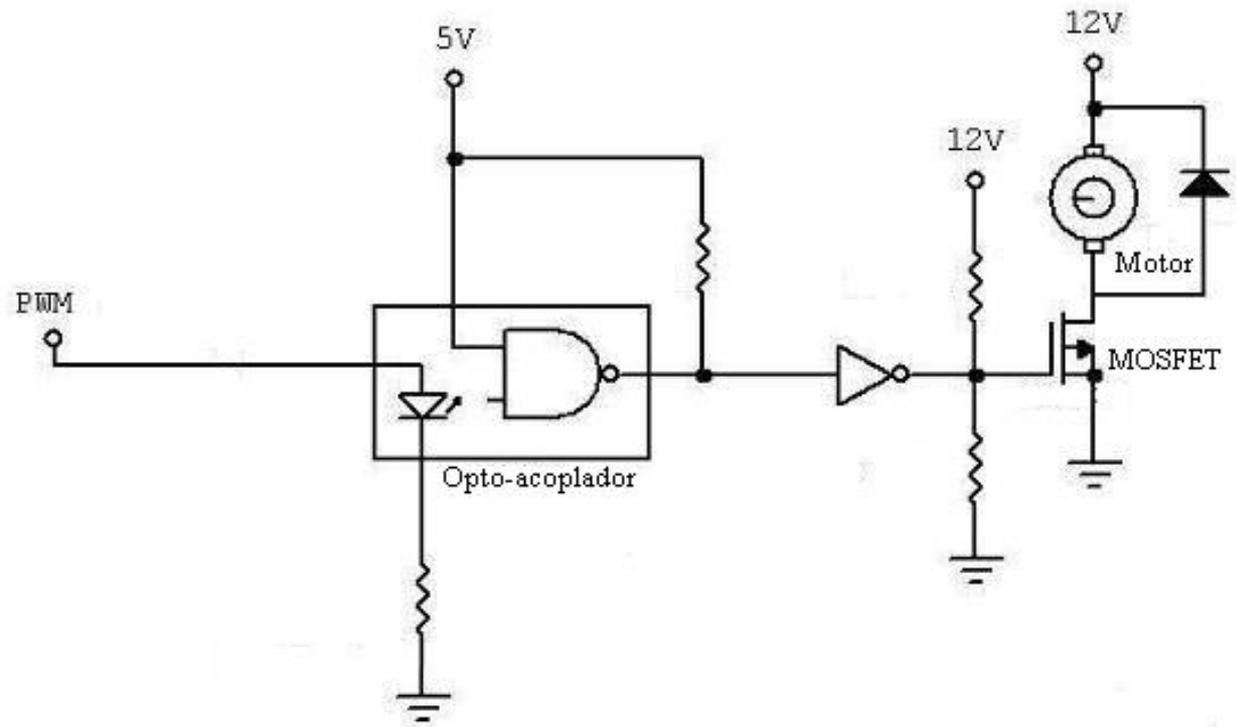
- O microcontrolador não é capaz de fornecer a tensão e corrente que os atuadores necessitam.
- Função: Servir como etapa de potência entre microcontrolador e atuadores.



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Módulo de acionamento - componentes

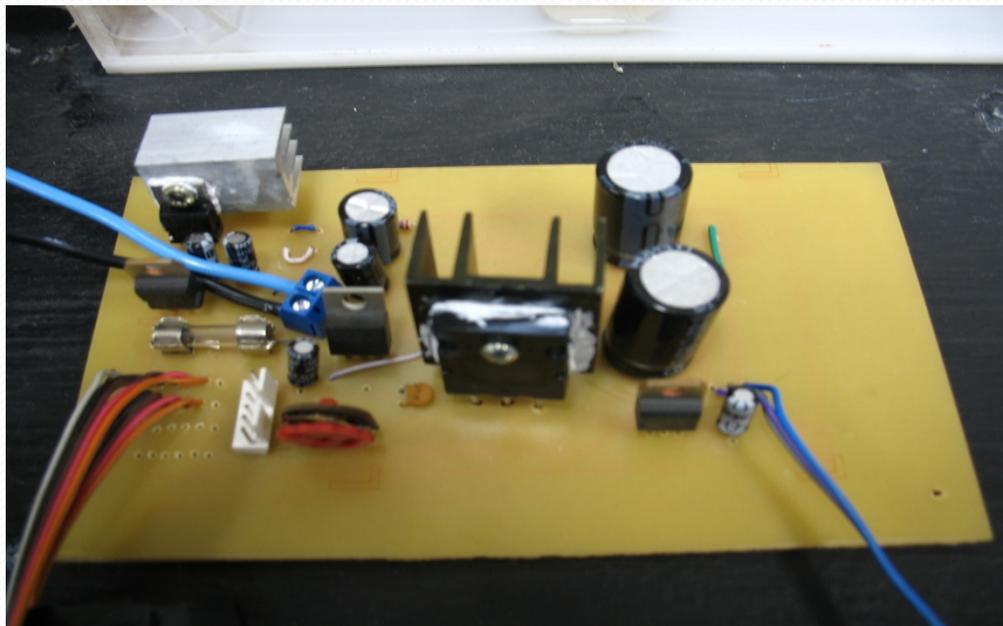
- 1) Transistor de efeito de campo (MOSFET)
- 2) Opto-acoplador
- 3) Buffer inversor
- 4) Diodo



MÓDULOS ELETRÔNICOS

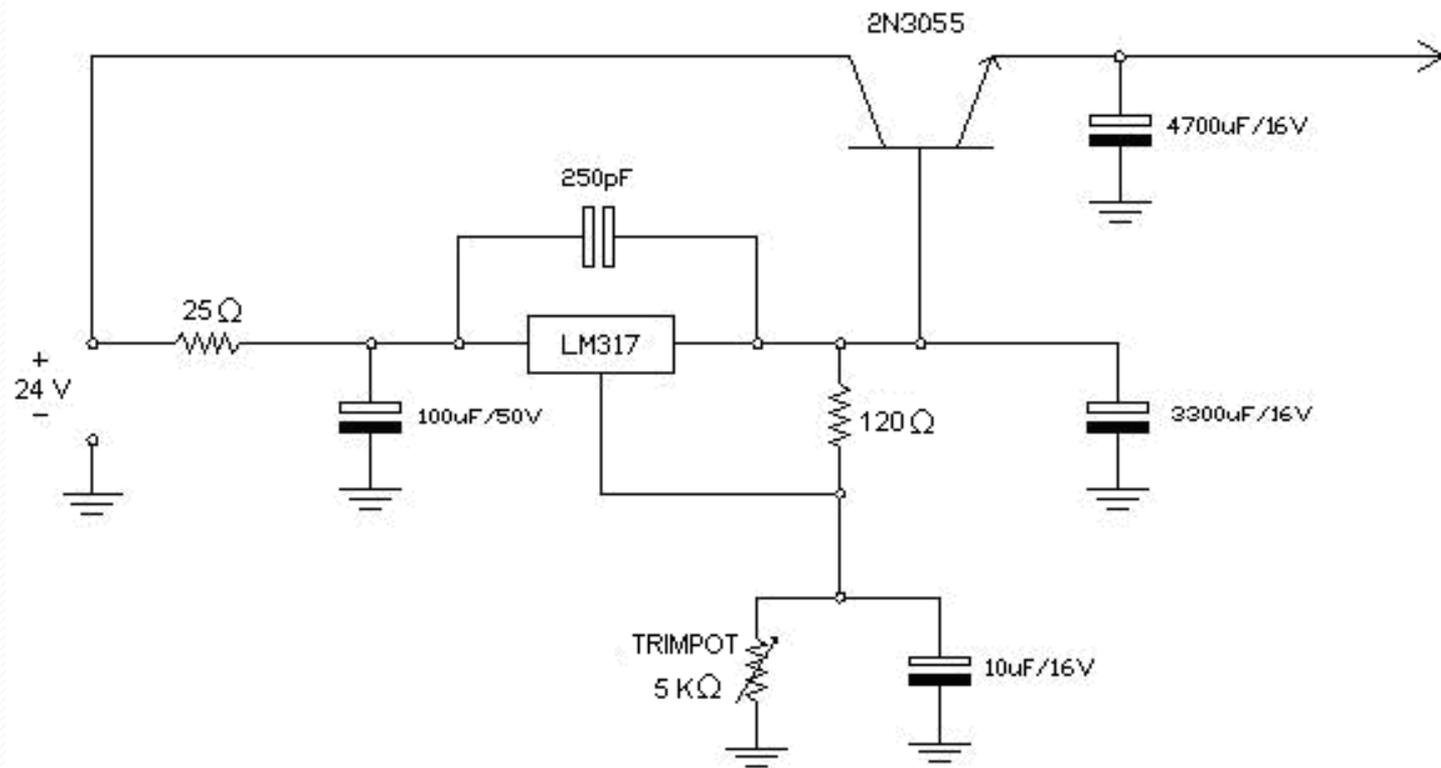
Módulo de alimentação

- Função: Fornecer os diversos níveis de tensão requisitados pelos outros módulos, a partir de um fonte de DC 24V.
- Baseado em circuitos reguladores de tensão.



MÓDULOS ELETRÔNICOS

Módulo de alimentação - Regulador de tensão de alta corrente.



CALIBRAÇÃO

Conceito

➤ “conjunto de operações que estabelecem, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões”

PASSOS PARA CALIBRAR

- 1) Definição do sistema de medição.
- 2) Definição do procedimento de calibração.
- 3) Processamento dos dados obtidos.

CALIBRAÇÃO

Regressão

- Relação entre o sistema de medição e a grandeza a ser medida através de uma equação. Pode ser dividido em:
 - Regressão linear.
 - Regressão não-linear.

CALIBRAÇÃO

Regressão Linear

➤ Forma da equação:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \dots + \beta_{p-1} X_i^{p-1} + \varepsilon_i$$

➤ Método dos mínimos quadrados: consiste em encontrar os parâmetros β que minimizem Q .

$$Q = \sum_{i=1}^n (Y_i - f(\mathbf{X}_i, \beta))^2$$

➤ Forma matricial:

$$\boldsymbol{\beta} = \left[\sum_{k=1}^n (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}) \right]^{-1} \left[\sum_{k=1}^n (\mathbf{Z}^T \mathbf{Y}_k) \right]$$

CALIBRAÇÃO

Regressão Não-Linear

- Contexto - Forma generalizada da equação de saída dos módulos de condicionamento dos sensores é não-linear:

$$V = A_1 + A_2 * \cos^{-1}(A_3 * h + A_4)$$

- Utilizar regressão linear para calibrá-lo gera parâmetros não representativos do sistema medido.
- Métodos de regressão não-linear se propõem a representar o sistema de maneira mais aproximada.

CALIBRAÇÃO

Método de Gauss-Newton ou Regressão Linearizada

- Método computacional de regressão não-linear.
- Modelo de regressão não-linear:

$$Y_i = f(X_i, \boldsymbol{\beta}) + \varepsilon_i$$

- A regressão linearizada consiste nos seguintes passos:

CALIBRAÇÃO

Regressão Linearizada - Passos

1. Suposição de $\mathbf{g}^{(n)}$ (vetor de estimação dos parâmetros no n-ésimo passo).
2. Linearização da função em torno de $\mathbf{g}^{(n)}$ através de séries de Taylor:

$$f(X_i, \boldsymbol{\beta}) \cong f(X_i, \mathbf{g}^{(n)}) + \sum_{k=0}^{p-1} \left[\frac{\partial f(X_i, \boldsymbol{\beta})}{\partial \beta_k} \right]_{\boldsymbol{\gamma}=\mathbf{g}^{(n)}} (\beta_k - g_k^{(n)})$$

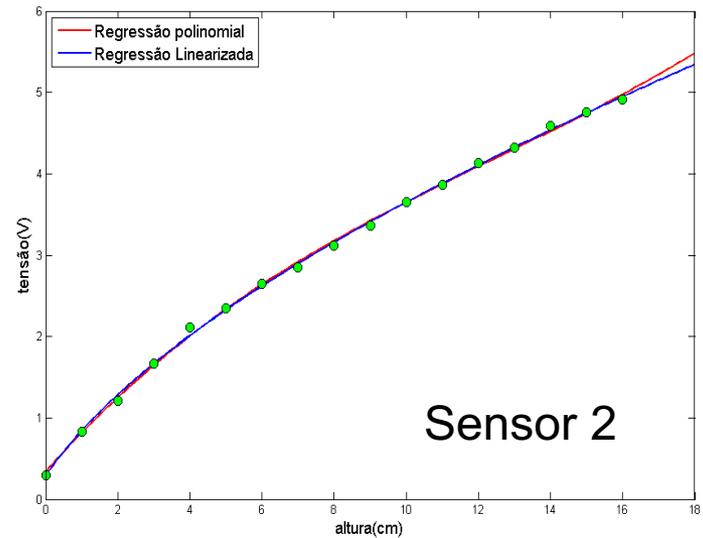
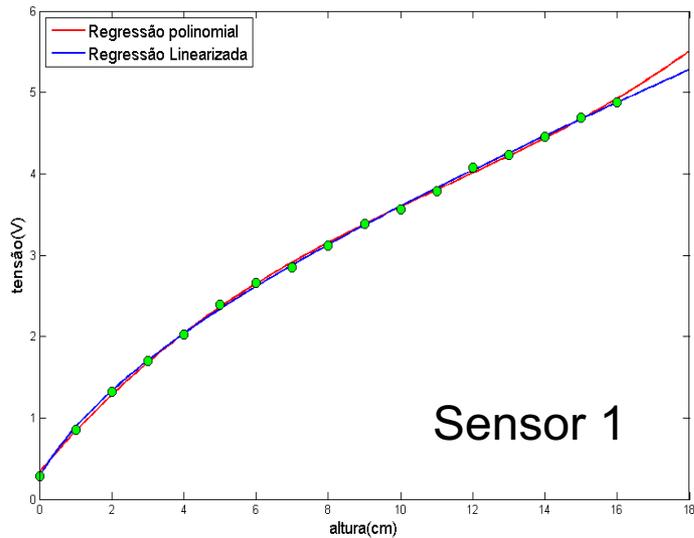
$$Y^{(n)} \cong \sum_{k=0}^{p-1} \left[\frac{\partial f(X_i, \boldsymbol{\beta})}{\partial \beta_k} \right]_{\boldsymbol{\gamma}=\mathbf{g}^{(n)}} b^{(n)}$$

3. Aplicar o método dos mínimos quadrados para obter os parâmetros $b^{(n)}$.
4. Utilizar $b^{(n)}$ como fator de correção para o próximo $\mathbf{g}^{(n)}$.
5. Repetir procedimento até encontrar uma faixa de erro aceitável.

CALIBRAÇÃO

Calibração dos Sensores

- Comparação entre métodos de regressão polinomial e linearizada.

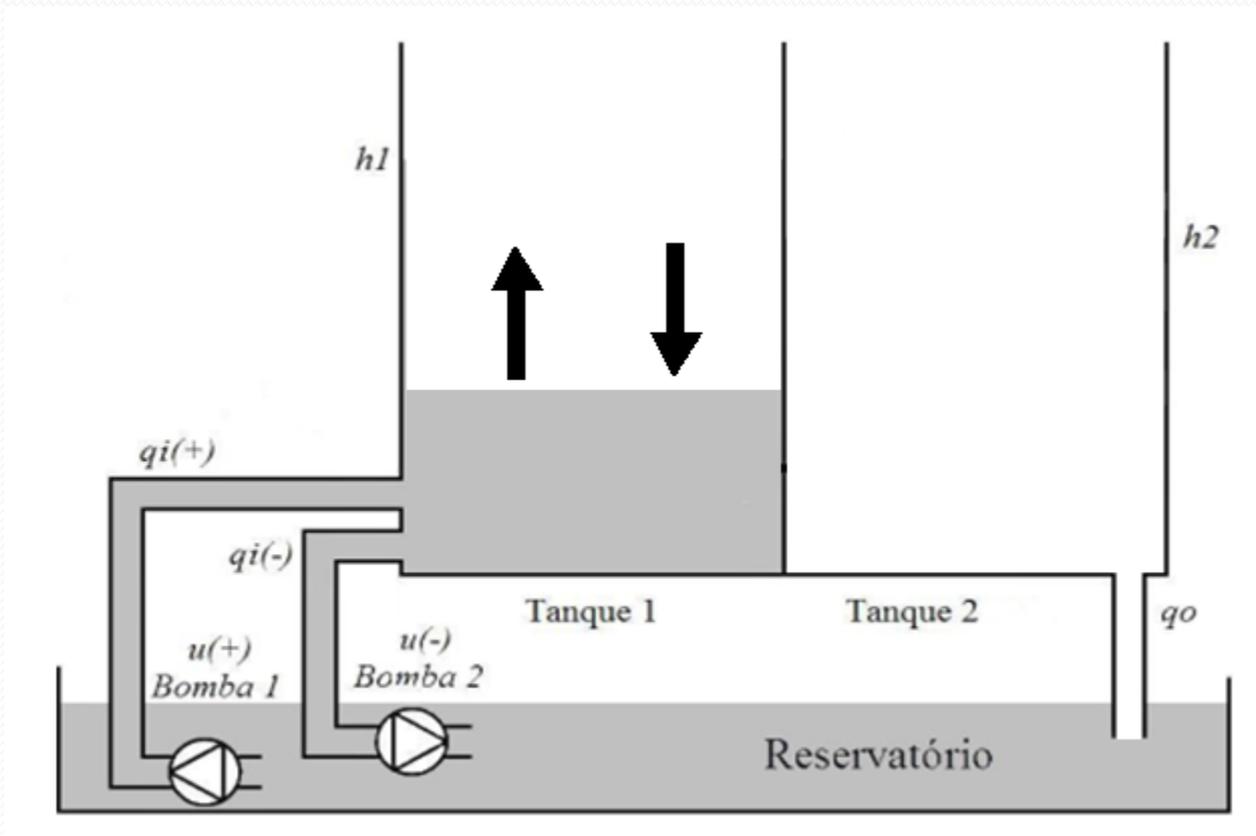


	Sensor 1	Sensor 2
Regressão Polinomial	$S_{y/x} = 0,04086$	$S_{y/x} = 0,07215$
Regressão Linearizada	$S_{y/x} = 0,03259$	$S_{y/x} = 0,06656$

CALIBRAÇÃO

Calibração dos Atuadores

➤ Procedimento inicial:

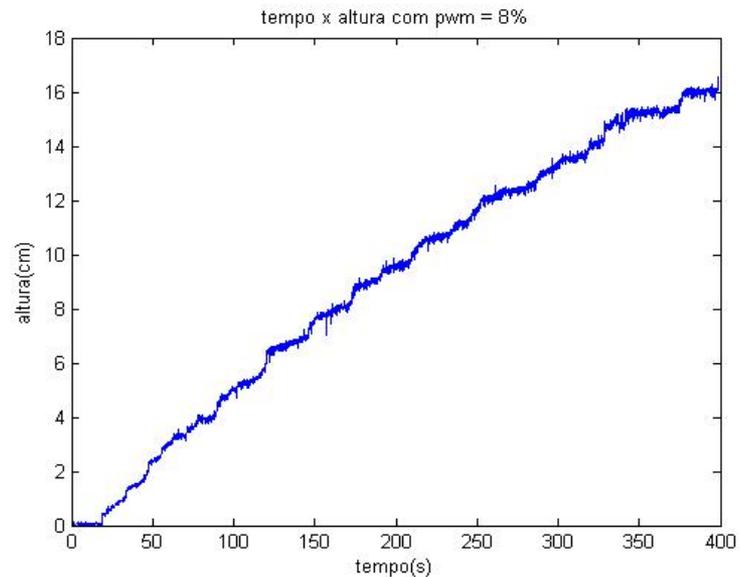
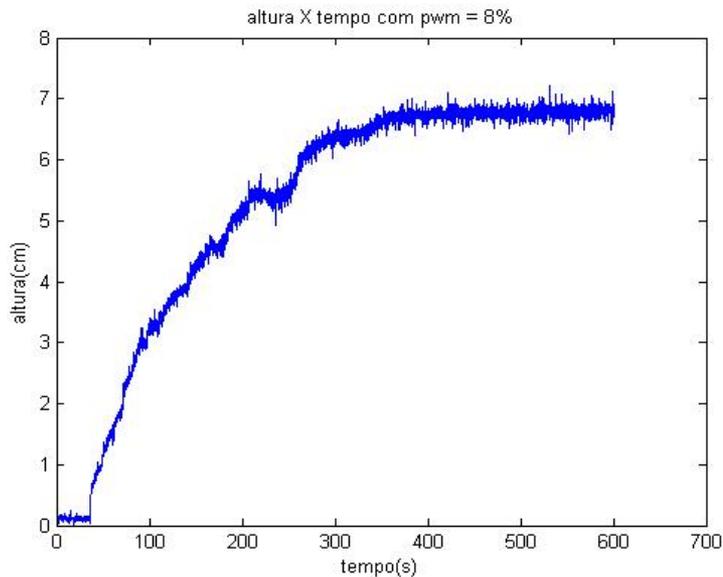


CALIBRAÇÃO

Calibração dos Atuadores

➤ Características observadas:

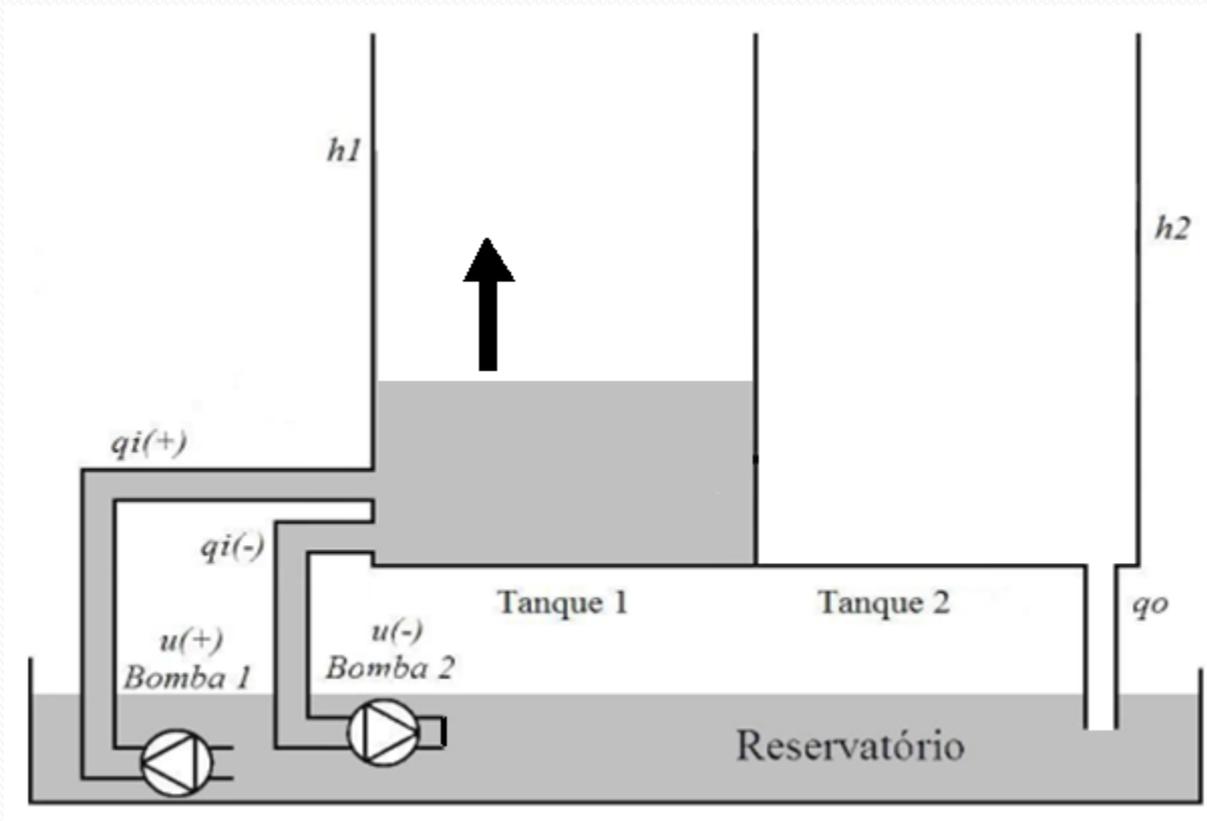
1. Saturação negativa e positiva.
2. Influência do atuador desligado no sistema.



CALIBRAÇÃO

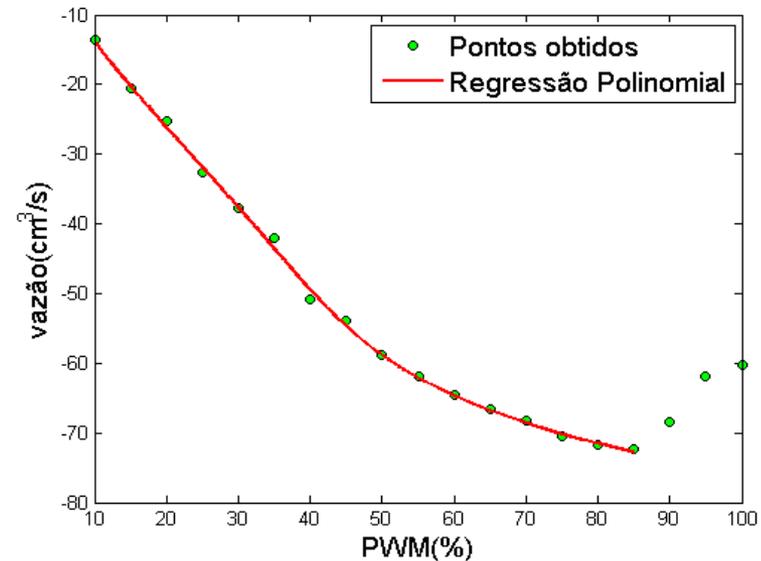
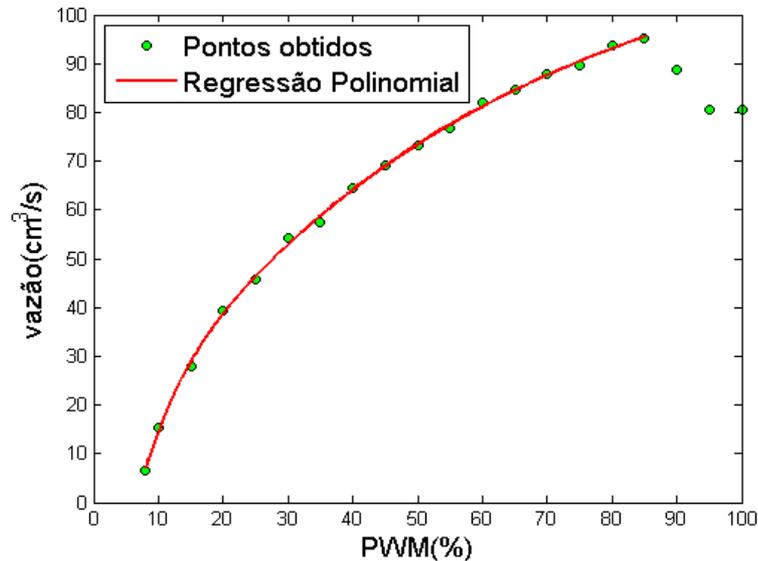
Calibração dos Atuadores

➤ Procedimento alterado.



CALIBRAÇÃO

Calibração dos atuadores



➤ Motor desligado modelado como um furo.

$$k = \frac{q_i}{\sqrt{h_1}}$$

➤ Vazão resultante = vazão atuador 1 + vazão do atuador 2

CALIBRAÇÃO

Cálculo dos parâmetros do Sistema

- Procedimento.
- Dependente da calibração dos sensores e atuadores.

$$k_2 = \frac{q_0}{\sqrt{h_2}}$$

$$k_{12} = \frac{q_{12}}{\sqrt{|h_1 - h_2|}}$$

PROJETO DE CONTROLE NO EE

Controlabilidade

- “Um sistema é dito completamente controlável se for possível obter uma entrada capaz de transferir todas as variáveis de estado de um valor inicial desejado para um estado final.”

Condição para a controlabilidade

$$\text{posto} [\mathbf{C}_M] = \text{posto} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} = n$$

$$\text{posto} [\mathbf{C}_{M1}] = \text{posto} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -(2a+b) \end{bmatrix} = 2$$

$$\text{posto} [\mathbf{C}_{M2}] = \text{posto} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -(2a+b) \end{bmatrix} = 2$$

Os dois níveis podem ser controlados separadamente

PROJETO DE CONTROLE NO EE

Observabilidade

- “Um sistema é dito completamente observável se for possível obter um vetor de estado inicial, $\mathbf{x}(t_0)$, a partir da medida de $u(t)$ e $y(t)$.”

Condição para a observabilidade

$$\text{posto} [\mathbf{O}_M] = \text{posto} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{n-1} \end{bmatrix} = n$$

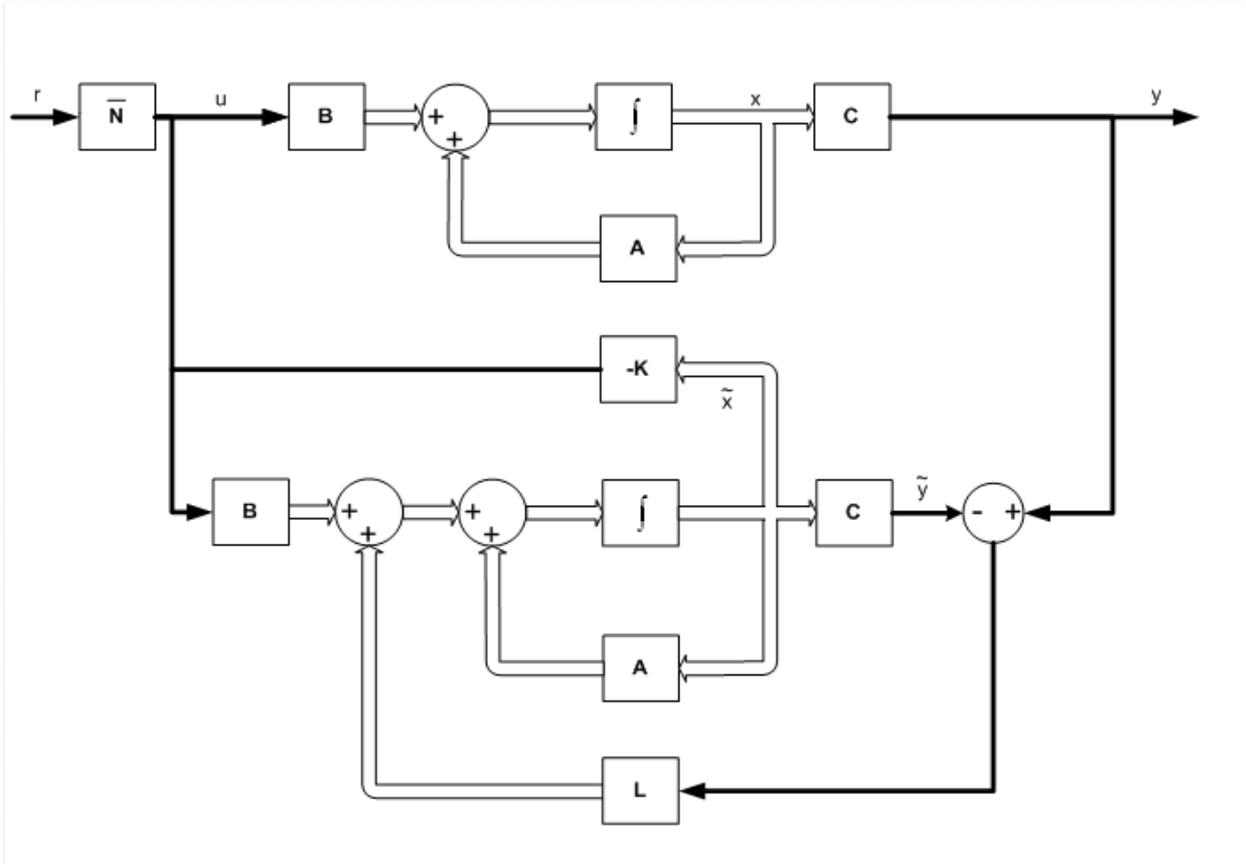
$$\text{posto} [\mathbf{O}_{M1}] = \text{posto} \begin{bmatrix} (a+b)/Ar & 1/Ar \\ (-ab)/Ar & (-a)/Ar \end{bmatrix} = 2$$

$$\text{posto} [\mathbf{O}_{M2}] = \text{posto} \begin{bmatrix} a/Ar & 0 \\ 0 & a/Ar \end{bmatrix} = 2$$

Os dois níveis podem ser observados separadamente

PROJETO DE CONTROLE NO EE

Sistema de controle realimentado por estado observado



K → Vetor que define onde estão alocados os pólos desejados

L → Vetor que define a dinâmica dos pólos do observador

\bar{N} → Ganho para ajustar o erro de estado estacionário

PROJETO DE CONTROLE NO EE

Projeto do controlador e do observador

- O princípio da separabilidade nos permite conduzir o projetor do controlador e do observador separadamente, para depois combiná-los.

Fórmula de Ackermann → Projeto de **K** e **L**

$$\mathbf{K} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1] [\mathbf{C}_M]^{-1} \phi[\mathbf{A}]$$

$$\mathbf{L} = \phi[\mathbf{A}] [\mathbf{O}_M]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

MatLab → Função *acker*

PROJETO DE CONTROLE NO EE

Etapas de projeto

1. Especificar quais os valores dos parâmetros do sistema;
2. Definir o ponto de operação;
3. Cálculo das variáveis auxiliares;
4. Definir onde serão alocados os pólos e determinar a dinâmica do observador;
5. Ajustar o erro de estado estacionário através de \bar{N} ;
6. Calcular as matrizes de ganho **K** e **L**.

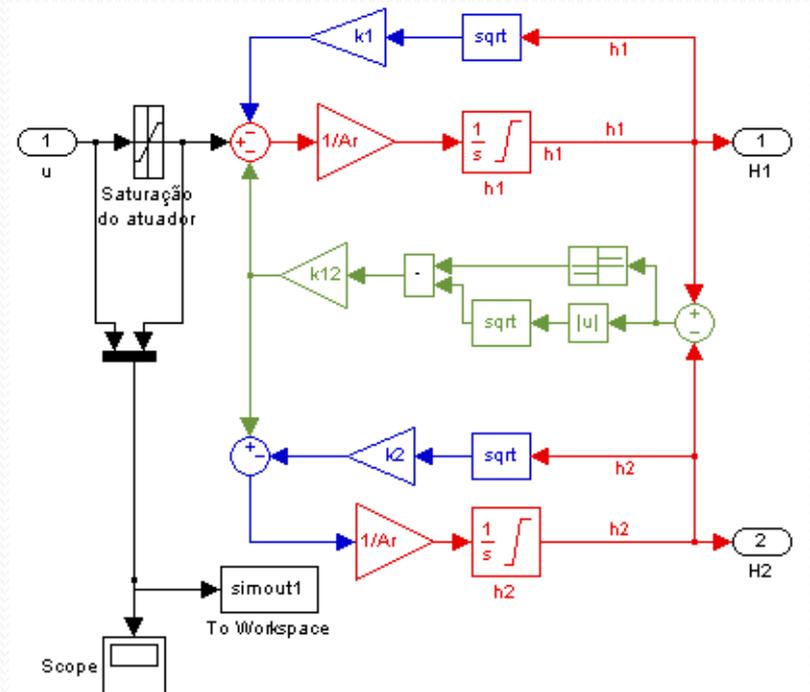
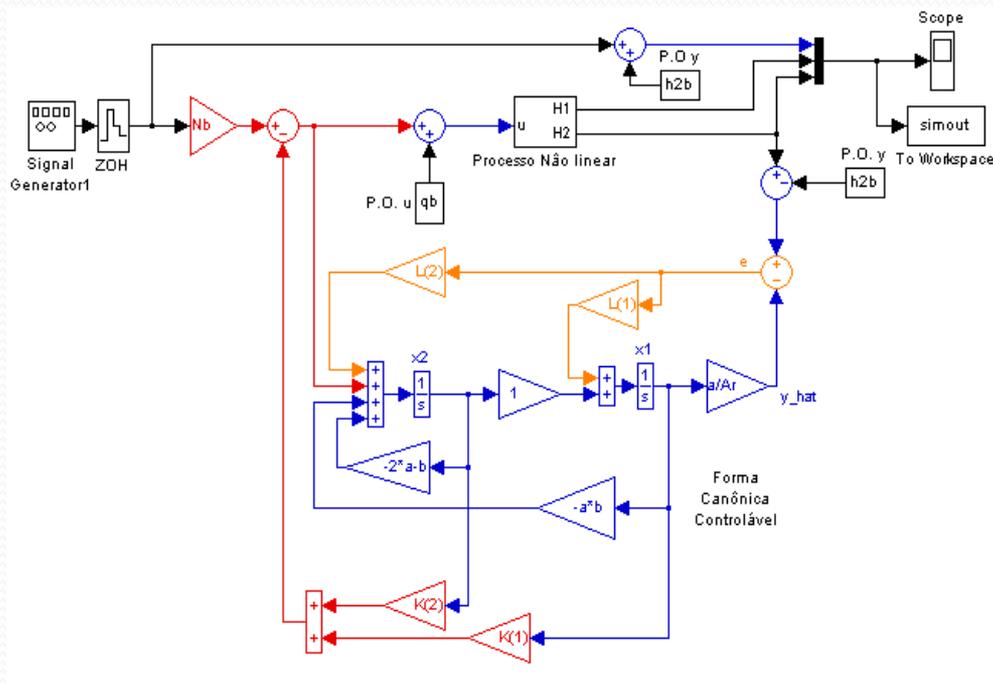
RESULTADOS

Experimentos didáticos

- Realização de experimentos de controle no EE em Controle Dinâmico.
- Experimentos consistiram em aplicar as técnicas de controle no EE em um simulador do processo de nível de líquidos e alimentar os mesmos parâmetros no sistema didático.

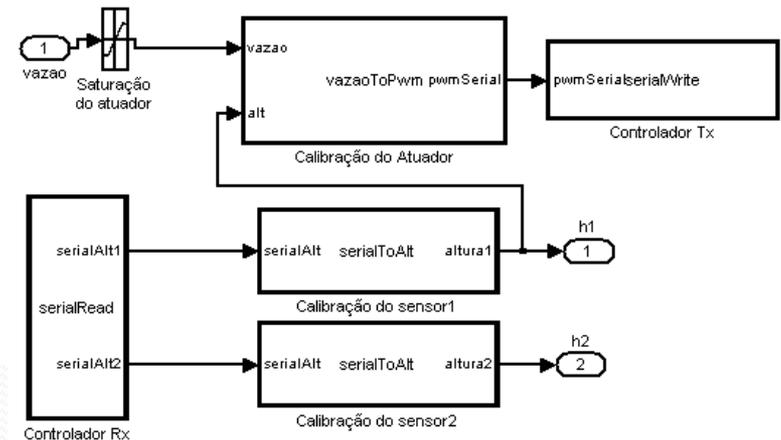
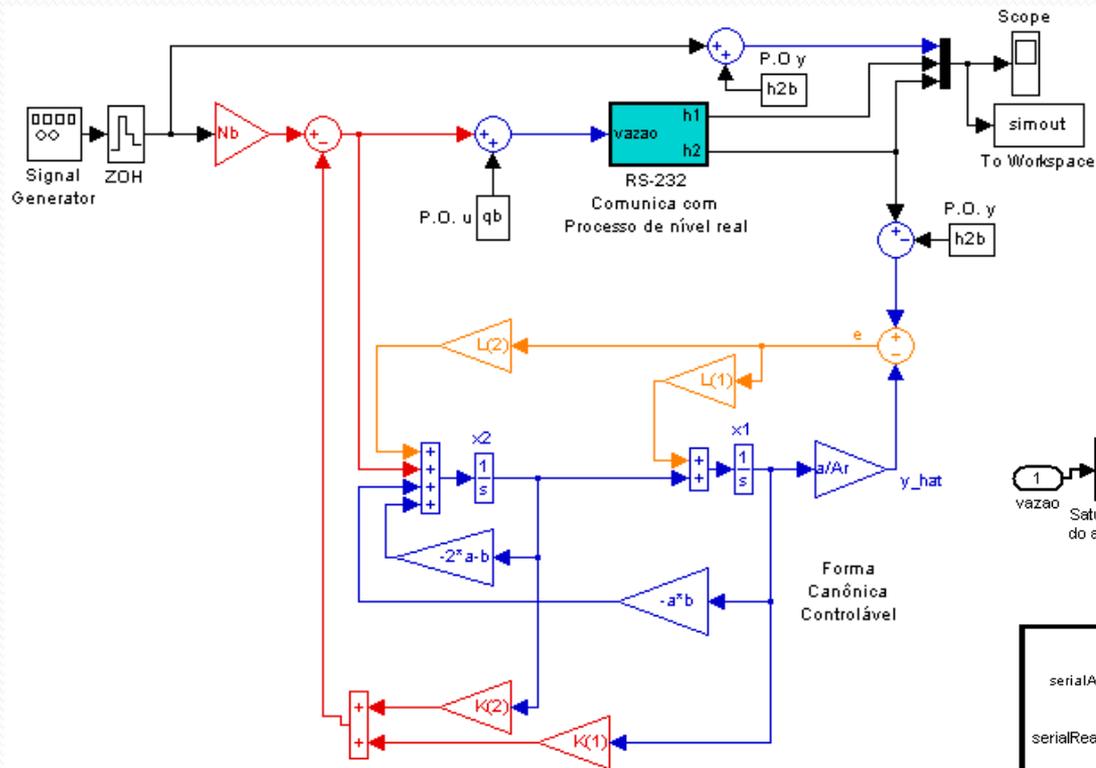
RESULTADOS

Experimentos Didáticos – Controlador + Simulador



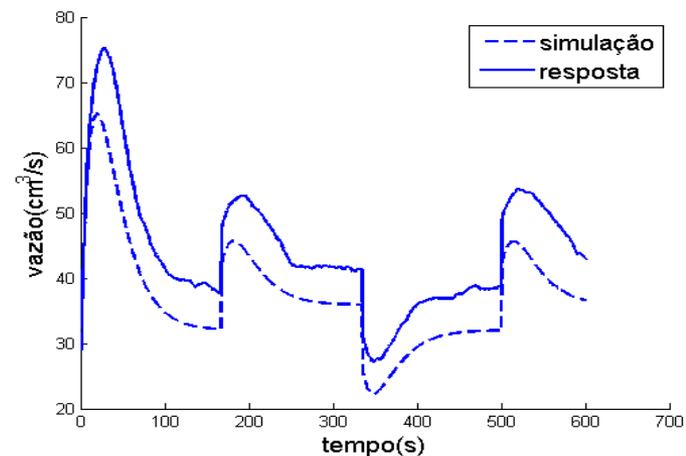
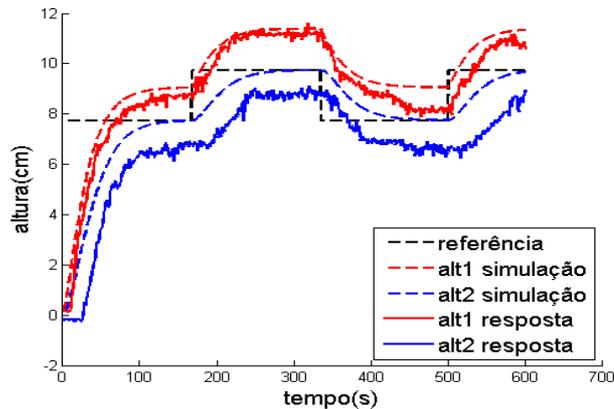
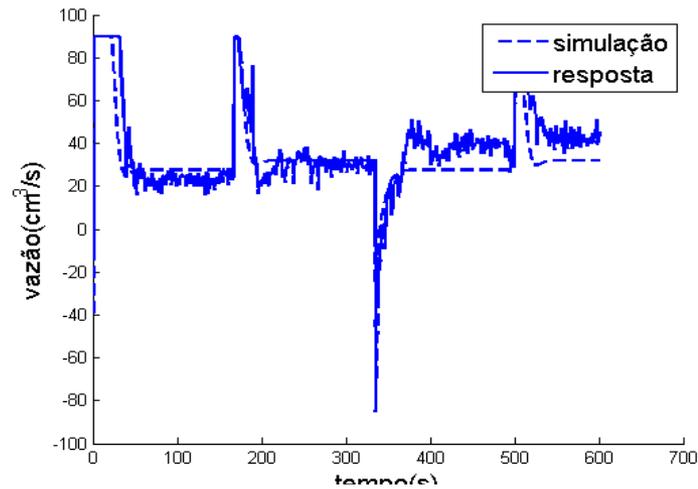
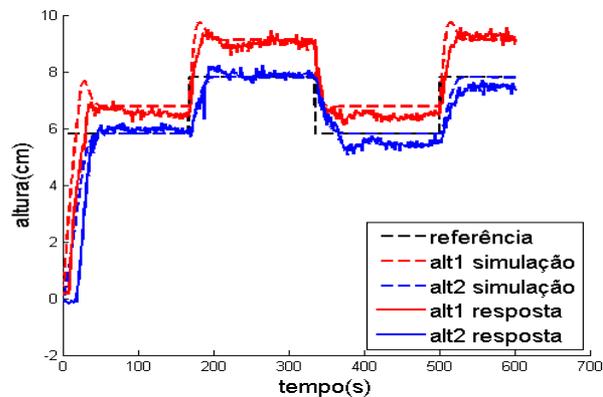
RESULTADOS

Experimentos Didáticos – Controlador + Comunicação com o Sistema Didático



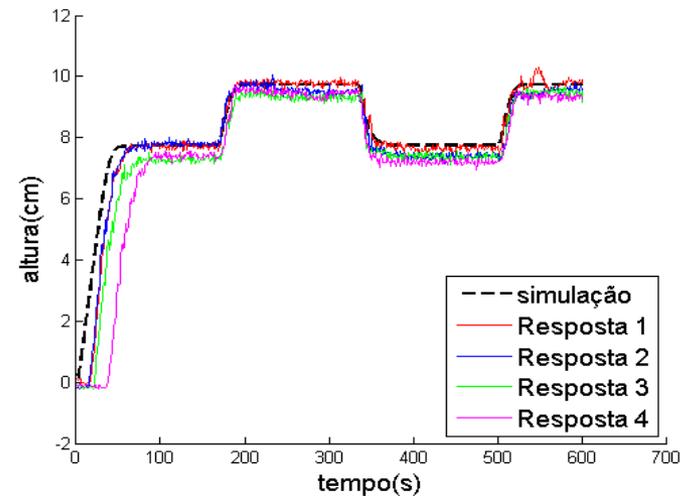
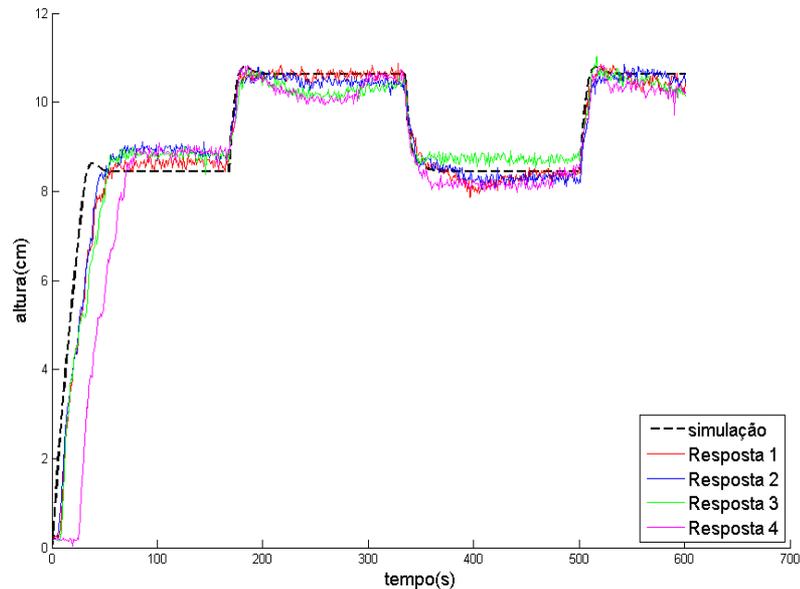
RESULTADOS

Análise dos Resultados – Comparação entre Simulação e a Resposta do Sistema Didático



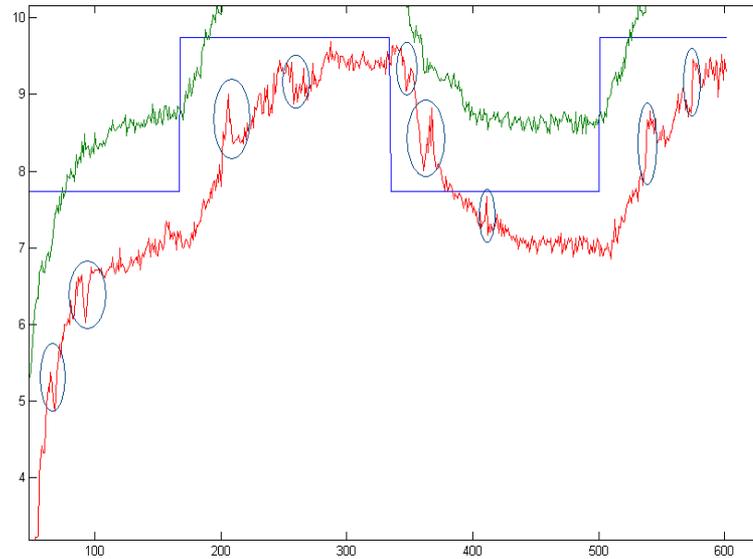
RESULTADOS

Análise dos Resultados – Teste de Repetitividade



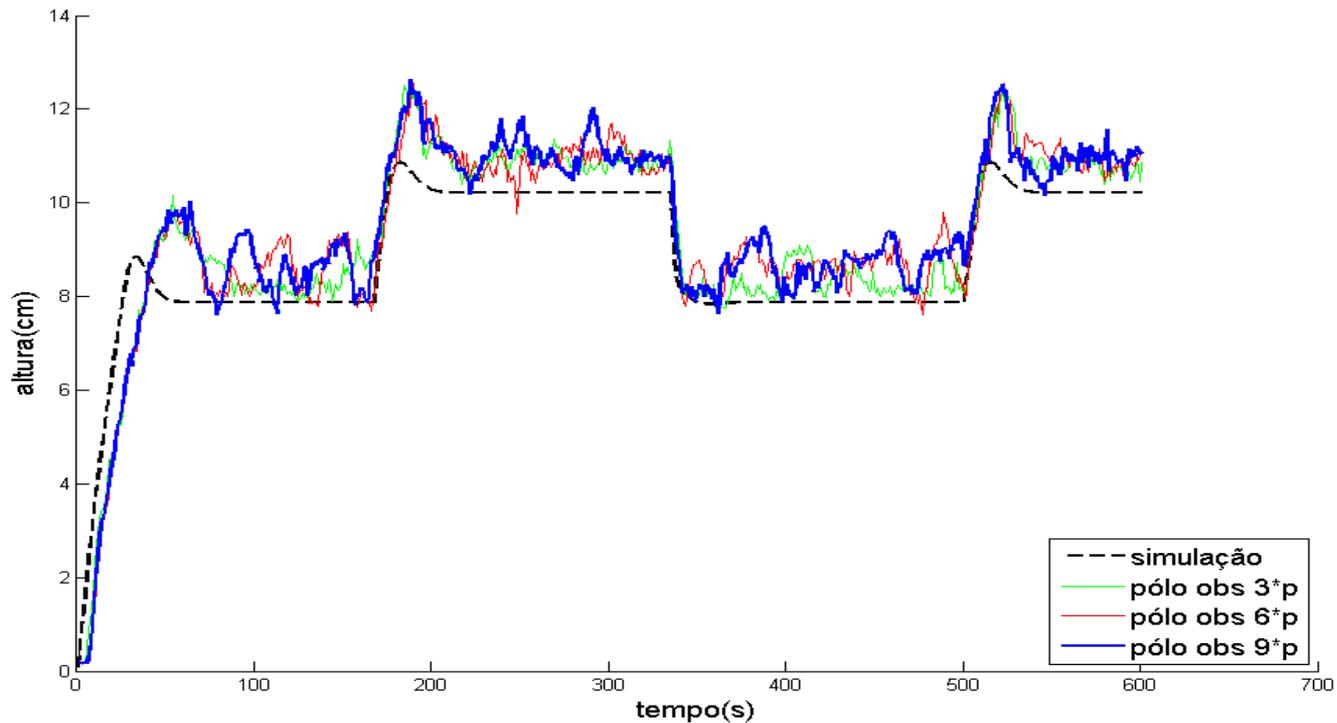
RESULTADOS

Análise dos Resultados – Influência do Efeito Stick-Slip



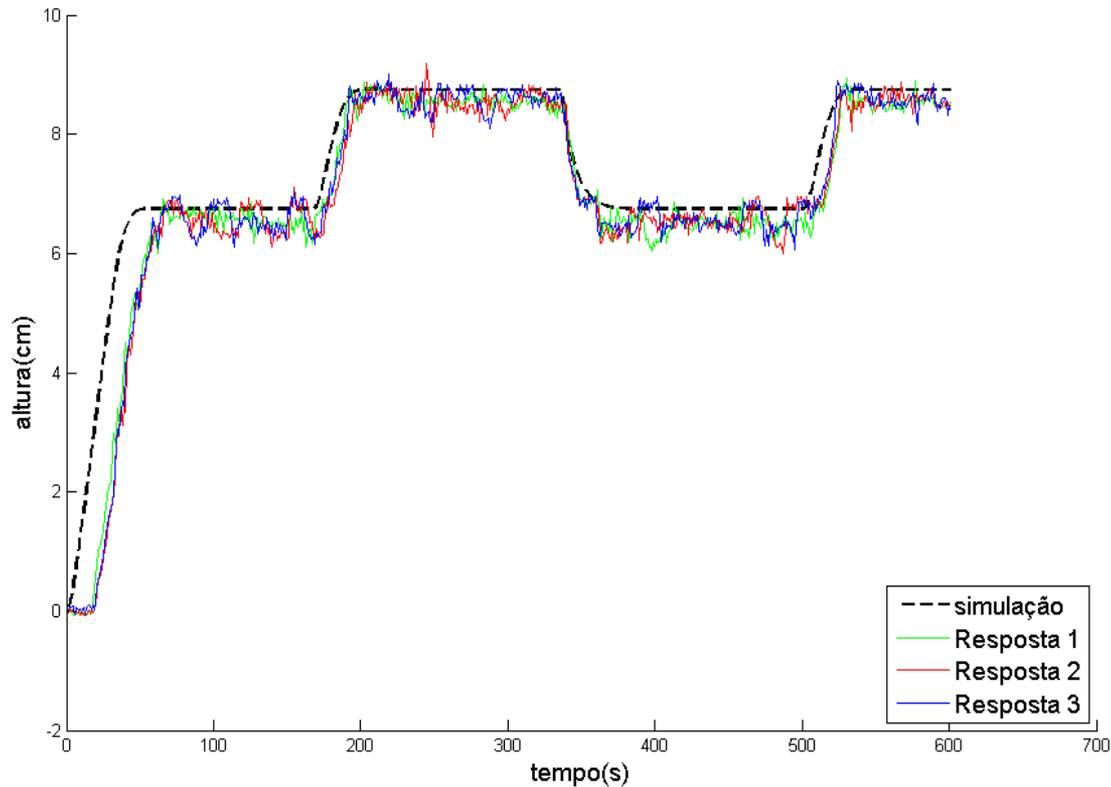
RESULTADOS

Análise dos Resultados – Influência de pólos rápidos do Observador (Tanque 1)



RESULTADOS

Análise dos Resultados – Influência de pólos rápidos do Observador (Tanque 2)



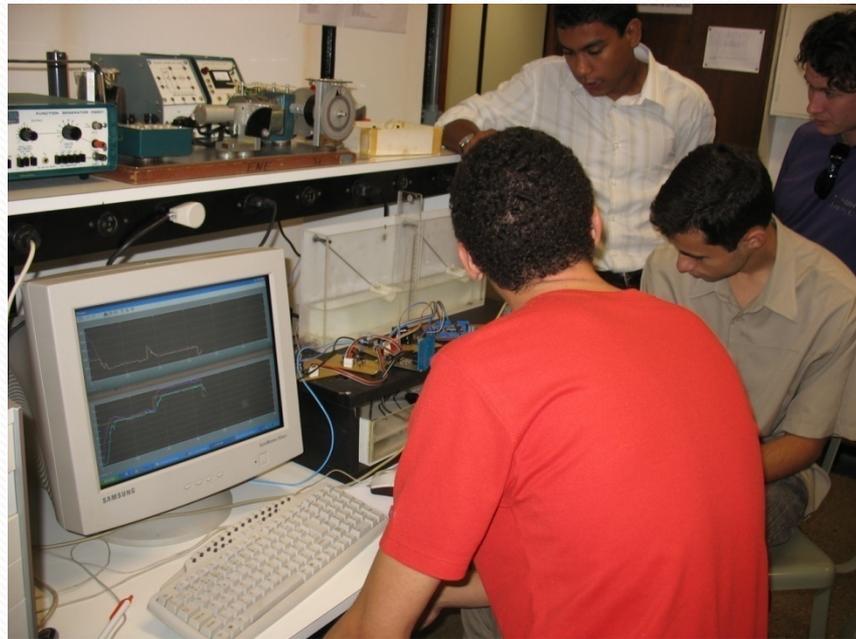
CONCLUSÕES

- Validação do sistema
- Observação da influência das perturbações
- Calibração dos sensores e atuadores
- Controle no Espaço-de-Estados

CONCLUSÕES

Experimentos Realizados

- Cerca de 100 alunos utilizaram o sistema didático de nível de líquidos, divididos em mais de 30 grupos.



CONCLUSÕES

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Controle de vazão dos atuadores como forma de calibração.
- Filtragem digital na leitura dos sensores.
- Controle com canal integral.
- Adaptar para realizar experimentos remotos.



OBRIGADO!