



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE PLANTA PILOTO
INDUSTRIAL DE QUATRO TANQUES ACOPLADOS**

Filipe Marinho Barcellos

Brasília, dezembro de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE PLANTA PILOTO
INDUSTRIAL DE QUATRO TANQUES ACOPLADOS**

Filipe Marinho Barcellos

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Eduardo Stockler Tognetti, ENE/UnB
Orientador

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, ENE/UnB
Co-orientador

Prof. Henrique Cezar Ferreira, ENE/UnB
Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

MARINHO BARCELLOS, FILIPE

Instrumentação e controle de planta piloto industrial de quatro tanques acoplados

[Distrito Federal] 2016.

xi, 92p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2016). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Curvas de atuadores

2. Controle de nível

3. Controle de processos

4. Controle descentralizado

5. Sistema de quatro tanques

6. Planta piloto industrial

I. Mecatrônica/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARCELLOS, F. M., (2016). Instrumentação e controle de planta piloto industrial de quatro tanques acoplados. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TG-*n*°25/2016, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Filipe Marinho Barcellos

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Instrumentação e controle de planta piloto industrial de quatro tanques acoplados.

GRAU: Engenheiro de Controle e Automação

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Filipe Marinho Barcellos

AOS 2, Bloco E, Apt. 605 – Octogonal.

70660-025 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

Aos meus amados pais ...

Filipe Marinho Barcellos

Agradecimentos

Agradeço ao professor Eduardo Stockler ...

Filipe Marinho Barcellos

RESUMO

Este texto apresenta...

ABSTRACT

This text presents ...

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO.....	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
2.1	INTRODUÇÃO	3
2.2	CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS	3
3	DESENVOLVIMENTO.....	4
3.1	INTRODUÇÃO	4
3.2	MODELAGEM MATEMÁTICA	4
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	5
4.1	INTRODUÇÃO	5
4.2	DADOS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSMISSORES DE NÍVEL	5
5	CONCLUSÕES.....	7
5.1	TRABALHOS FUTUROS	7
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8
	ANEXOS.....	10
I	DIAGRAMAS SIMULINK	11
I.1	SIMULAÇÃO.....	11
I.2	DIAGRAMA PARA APLICAÇÃO REAL.....	12

LISTA DE FIGURAS

1.1	Modelo controlador + processo	1
1.2	Planta de quatro tanques originalmente proposta por Johansson [2000]	2
4.1	Experimento 2: erro na entrada do $PI-B_2H_3$ - Controlador $PI-H_3H_4$ com novo valor inicial de bombas e anti-windup	6
4.2	Experimento 2: sinal de entrada na bomba 1 - Controlador $PI-H_3H_4$ com novo valor inicial de bombas e anti-windup	6
I.1	Diagrama de simulação para o $PI B_1H_4$	11
I.2	Diagrama para aplicação de controle na bancada e testes em malha aberta	12

LISTA DE TABELAS

1.1	Tipos de controladores para aplicação industrial	1
2.1	Lógica da conversão A/D de uma porta digital.....	3
4.1	Dados para calibração dos transmissores de nível.....	5

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
a	Percentual de abertura de válvula	[%]
B_k	Bomba de número k	
b	Percentual de funcionamento da bomba (comando da bomba)	[%]
E ou e	Erro entre o valor da variável controlada e a referência	
G	Função de transferência	
G_f	Função de transferência de um filtro	
G_{pmn}	Função de transferência entre a saída n e entrada m de um processo	
H_i	Nível da coluna de líquido do tanque i	[%]
K	Ganho proporcional entre duas grandezas	
K_p	Ganho proporcional do controlador PID	
$K_{TVi,j}$	Ganho proporcional do transmissor de vazão i para a vazão medida quando a bomba operava no ponto j - calibração dos transmissores de vazão	[L/(s·UD)]
K_{TVi}	Ganho proporcional médio do transmissor de vazão i - calibração dos transmissores de vazão	[L/(s·UD)]
$M_{sensor,i,j}$	Média dos dados fornecidos pelo transmissor de vazão i quando a bomba operava fixa no ponto j - calibração dos transmissores de vazão	[UD]
$offset_i$	Média dos dados fornecidos pelo transmissor de vazão i quando não havia vazão por ele (bomba em 0%) - calibração dos transmissores de vazão	[UD]
Q	Vazão volumétrica	[L/s]
$Q_{i,j}$	Fluxo através da válvula i com a bomba operando no ponto j	[L/s]
T_B	Tempo de duração de cada ponto de operação da bomba - experimento de obtenção das curvas características dos atuadores	[s]
T_D	Tempo de diferenciação do controlador PID	[s]
T_i	Tempo de integração do controlador PID	[s]
T_V	Tempo de duração de cada abertura da válvula - experimento de obtenção das curvas características dos atuadores	[s]
$\Delta t_{i,j}$	Intervalo de tempo gasto para encher o tanque i quando a bomba operava no ponto j - calibração dos transmissores de vazão	[s]
U ou u	Entrada em um sistema (e.g. saída de um controlador)	
U_m ou u_m	Entrada número m de um processo	
Vtq_i	Volume do tanque i (entre nível 0% e 100%)	[L]
Y ou y	Saída de um sistema	
Y_n ou y_n	Saída número n de um processo	

Símbolos Gregos

Δ	Varição entre duas grandezas similares	
θ	Atraso	[s]
λ	Constante de tempo em malha fechada para sintonia de controlador via modelo interno - IMC	[s]
τ	Constante de tempo de uma função de transferência	[s]

Subscritos

B	Indica que é relativo a uma bomba
f	Indica funções e constantes de filtros de sinais
i	Índice para número de tanque, válvula e transmissor de vazão - $i \in \mathbb{N} 1 \leq i \leq 4$
j	Índice dos pontos de operação de bomba para calibração dos transmissores de vazão, $j \in \mathbb{N} 1 \leq j \leq 5$
k	Índice para número de bomba (vide definição na página 3)
MF	Malha fechada
$modelo$	Indica dados inseridos ou obtidos de um modelo de um sistema real
n_a	Índice dos valores de abertura da válvula para experimento de obtenção de curva característica dos atuadores
o	Indica valor inicial
$real$	Indica dados inseridos ou obtidos de um sistema real
TV	Transmissor de vazão
V	Válvula

Siglas

A/D	Analógico para digital
CHR	CHIEN, HRONES e RESWICK - Sintonia de controlador
CLP	Controlador Lógico Programável
D/A	Digital para analógico
IMC	Controle por Modelo Interno (<i>Internal Model Control</i>) - Sintonia de controlador
MIMO	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
OPC	<i>Open Platform Communications</i> , protocolo de comunicação de CLPs
P	Controlador Proporcional
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
SISO	Uma entrada e uma saída
SP	<i>Set Point</i> (Referência de variável controlada)
UD	Unidade Digital. É a unidade convencionada para os dados dos sensores após conversão A/D pelo controlador e antes da conversão D/A.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1 Motivação

A Figura 1.1 esquematiza a inserção de um controlador em um processo, no qual ocorrem perturbações.

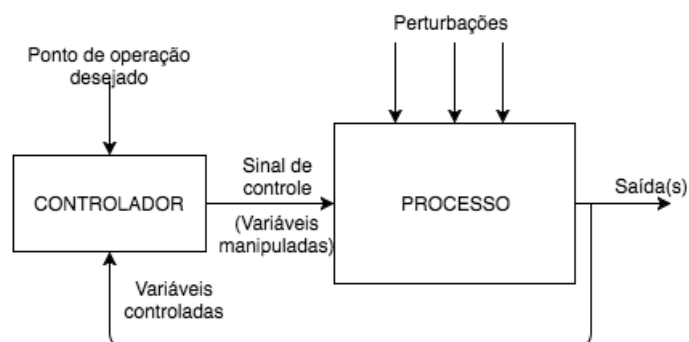


Figura 1.1: Modelo controlador + processo

Há diferentes abordagens para realizar o controle de processos. A Tabela 1.1, tirada de UNBEHAUEN [1994 apud COELHO 2000, pg. 3] compara tipos diferentes de controladores que têm suas aplicações na indústria.

Tabela 1.1: Tipos de controladores para aplicação industrial

Projeto	Tipo de controle
Convencional	PID, cascata e <i>feedforward</i>
Avançado: clássico	Ganho escalonado, compensação do atraso de transporte, desacoplamento
Avançado: com aplicações	Preditivo, modelo interno, adaptativo
Avançado: pouca aplicação	Não linear, ótimo, robusto, inteligente

Os tipos de controle mais comuns na indústria são os que utilizam somente a abordagem de realimentação (*Feedback*), tal como o PID (Proporcional, Integral, Derivativo). A grande vantagem do controle *Feedback* é o fato de ele ser uma técnica de simples implementação que necessita o mínimo conhecimento do processo [SMITH e CORRIPIO 1997, pg. 7].

O sistema de quatro tanques proposto por Johansson [2000], A Figura 1.2 apresenta o esquemático da primeira planta de quatro tanques que foi proposta para ser uma plataforma de aprendizado e pesquisa no meio acadêmico.

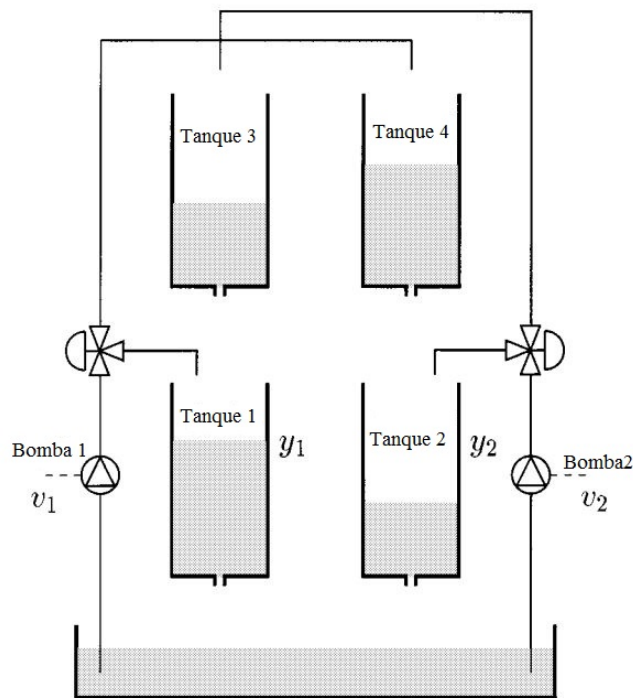


Figura 1.2: Planta de quatro tanques originalmente proposta por Johansson [2000]

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A planta

1.3 OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo geral deste projeto é Este projeto tem como objetivos específicos

- xxx
- yyy

1.4 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO

Uma breve introdução teórica é feita no capítulo 2. O capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do projeto. Resultados experimentais são discutidos no capítulo 4, seguido das conclusões no capítulo 5. Os anexos contêm material complementar, tais como diagramas utilizados para simulação no SimulinkTM e os polinômios que caracterizam o ganho de vazão das bombas instaladas na planta.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUÇÃO

2.2 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS

Os controladores lógicos programáveis (CLPs) são aparelhos que operam uma lógica computacional e controlam máquinas e processos industriais a partir de suas entradas e saídas digitais e analógicas [NEMA 2005]. O CLP centraliza as informações de um processo ou parte dele, sendo capaz de criar diferentes malhas de controle dentro de sua programação e realizar uma automação industrial completa.

De modo a entender como um CLP se encaixa em uma malha de controle de processo, cabe saber como é feita a leitura de uma entrada analógica e digital. Em ambas ocorre uma conversão analógico para digital (A/D). No caso da entrada digital, esta pode receber apenas dois níveis de tensão, um alto e outro baixo. A conversão do sinal é feita para um bit de memória do CLP. A Tabela 2.1 apresenta duas lógicas de uma porta digital de um CLP.

Tabela 2.1: Lógica da conversão A/D de uma porta digital

Escala de tensão	Conversão para um BIT	
	Lógica direta	Lógica reversa
ALTO (e.g. 24V)	1	0
BAIXO (e.g. 0V)	0	1

Definindo

$$\phi \triangleq \frac{a}{1 + b^2} \quad (2.1)$$

Em (2.1) mostra-se que

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia proposta para o trabalho ...

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

O controle de nível de líquido...

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 INTRODUÇÃO

A calibração

4.2 DADOS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSMISSORES DE NÍVEL

Pelo fato de a calibração dos transmissores de nível se dar de modo relativo, a aquisição dos dados e realização do bloco de escala foi imediata, bastando tomar os dados do sensor com o tanque vazio e depois com o nível a 100%. A Tabela 4.1 mostra os dados tomados nessas circunstâncias.

Tabela 4.1: Dados para calibração dos transmissores de nível

	Dado do sensor [UD] (Nível em 0%)	Dado do sensor [UD] (Nível em 100%)
Sensor Nível 1	1072,1541	22820,7862
Sensor Nível 2	879,7134	22467,8037
Sensor Nível 3	886,7177	22461,4197
Sensor Nível 4	-73,0003	21165,1354

Como se vê, a simulação do sinal de erro e de controle está condizente com a aproximação do sistema em um modelo linear, acompanhando a saída real grande parte do tempo.

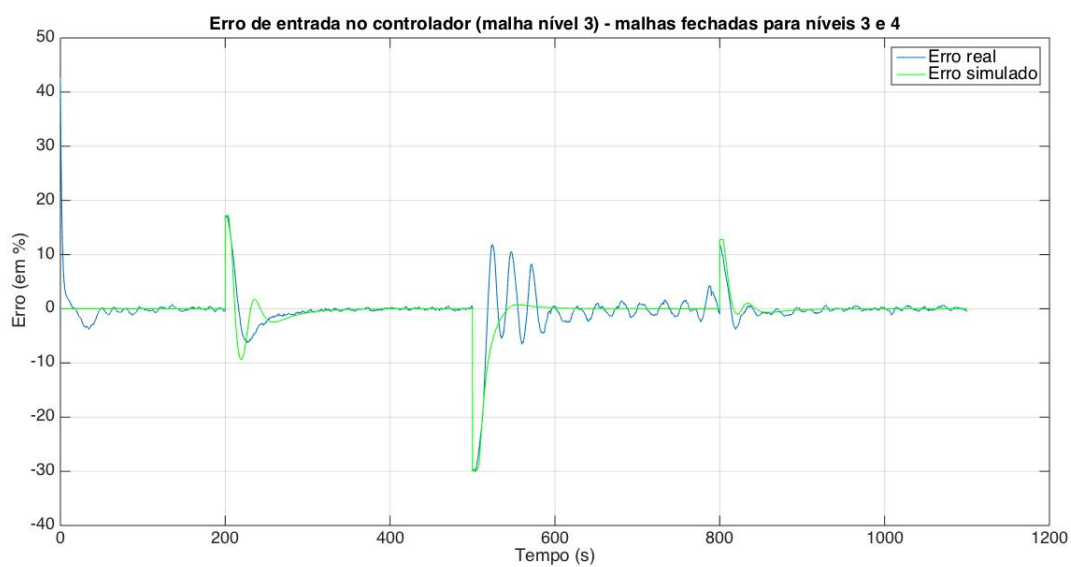


Figura 4.1: Experimento 2: erro na entrada do $PI-B_2H_3$ - Controlador $PI-H_3H_4$ com novo valor inicial de bombas e anti-windup

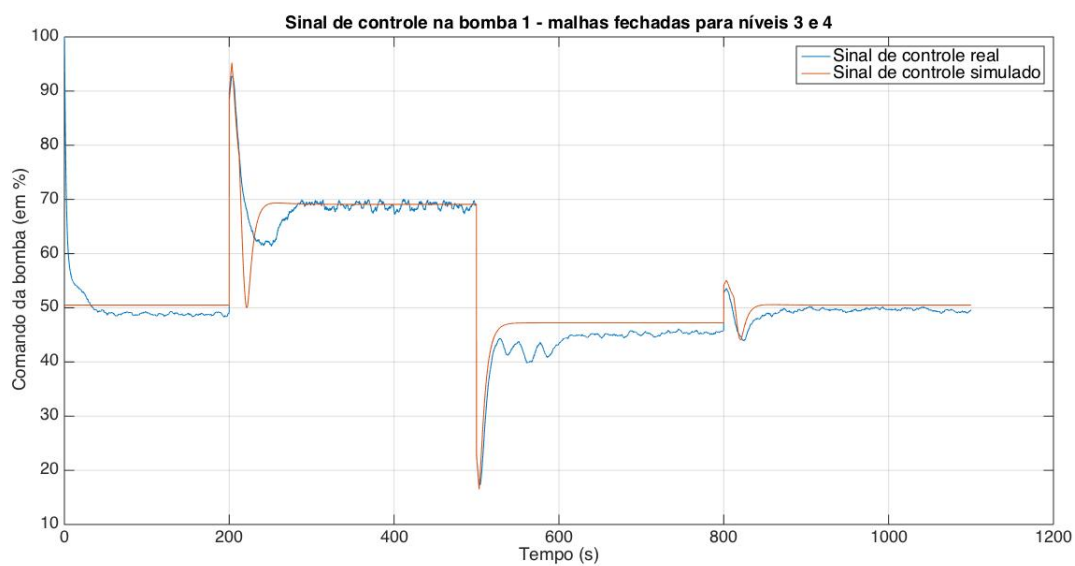


Figura 4.2: Experimento 2: sinal de entrada na bomba 1 - Controlador $PI-H_3H_4$ com novo valor inicial de bombas e anti-windup

5 CONCLUSÕES

De maneira sucinta, percebe-se que o objetivo geral deste projeto foi alcançado,

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A efeito de trabalhos futuros, seria interessante

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [CHIEN, HRONES e RESWICK 1952]CHIEN, K. L.; HRONES, J. A.; RESWICK, J. B. On the automatic control of generalized passive systems. *Transactions of ASME*, v. 74, p. 175–185, 1952.
- [COELHO 2000]COELHO, L. dos S. *Identificação e Controle de Processos Multivariáveis Via Metodologias Avançadas e Inteligência Computacional*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Fevereiro 2000.
- [JOHANSSON 2000]JOHANSSON, K. H. The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 8 (3), p. 456–465, 2000.
- [MARLIN 2014]MARLIN, T. E. *Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. Second edition. New York, NY: McGraw-Hill, 2014.
- [MERCANGÖZ e DOYLE III 2006]MERCANGÖZ, M.; DOYLE III, F. J. Distributed model predictive control of a four-tank system. *IFAC Proceedings*, v. 39 (2), p. 965–970, 2006.
- [NEMA 2005]NEMA. NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Programmable Controllers (PLC)**: ICS 61131-1-2005. Rosslyn, VA, 2005.
- [OGATA 2010]OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Quarta edição. Tradução de Paulo Álvaro Maya. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [OKPANACHI 2010]OKPANACHI, A. V. *Developing Advanced Control strategies for a 4-Tank Laboratory process*. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Technology - Telemark University College, 2010.
- [OLIVEIRA e TAVARES 2015]OLIVEIRA, G. A. D.; TAVARES, A. R. *Automação de Planta Piloto Industrial de Tanques Acoplados Quádruplos*. Trabalho de Graduação, Publicação FT. TG-nº21/2015. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 76p. 2015.
- [RIVERA, SKOGESTAD e MORARI 1986]RIVERA, D. E.; SKOGESTAD, S.; MORARI, M. Internal model control 4: Pid controller design. *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.*, v. 25, p. 252, 1986.
- [SEBORG et al. 2011]SEBORG, D. E. et al. *Process dynamics and control*. Third edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [SKOGESTAD 2003]SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of Process Control*, v. 13, p. 291–309, 2003.
- [SMITH e CORRIPIO 1997]SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. Second edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [ÅSTRÖM e MURRAY 2008]ÅSTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Second edition. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2008.

[THE MATHWORKS 2014]THE MATHWORKS. System identification toolbox. *MATLAB User Guide (R2014b)*, 2014.

[ZIEGLER e NICHOLS 1942]ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of ASME*, Rochester, NY, p. 759–768, November 1942.

I. DIAGRAMAS SIMULINK

I.1 SIMULAÇÃO

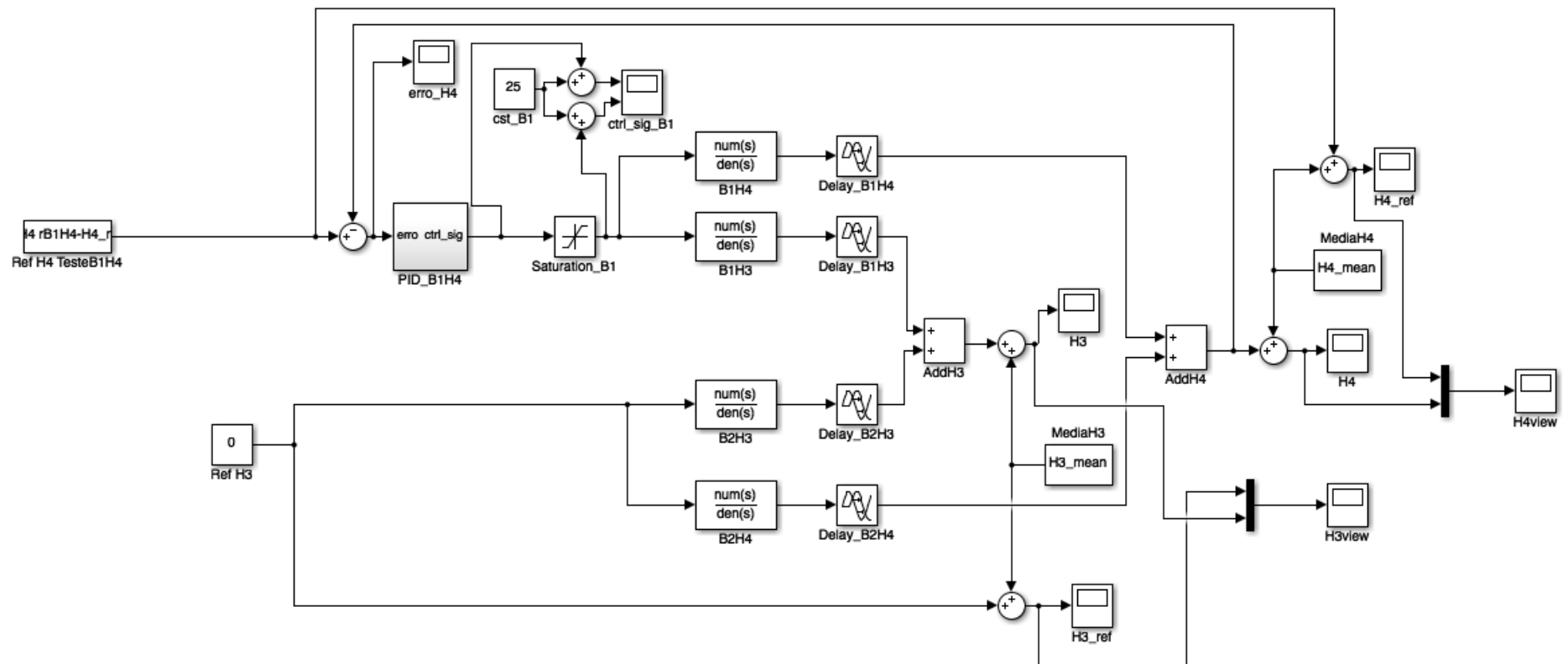


Figura I.1: Diagrama de simulação para o PI B_1H_4

I.2 DIAGRAMA PARA APLICAÇÃO REAL

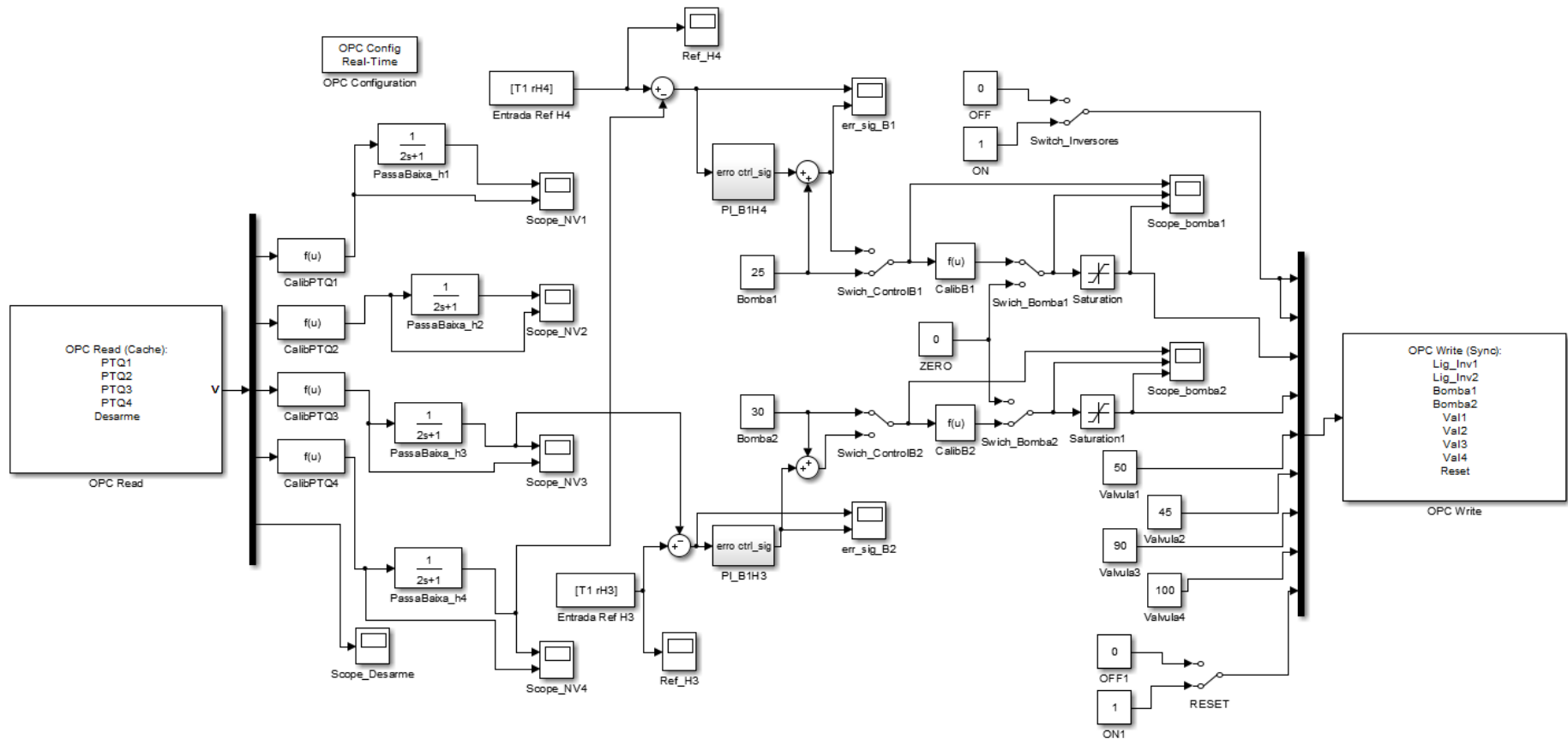


Figura I.2: Diagrama para aplicação de controle na bancada e testes em malha aberta