

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**AUTOMAÇÃO DE BANCADA DIDÁTICA
DE TANQUES ACOPLADOS
COM CLP INDUSTRIAL**

Luan Rafael Pimenta Medeiros

Brasília, janeiro de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO
AUTOMAÇÃO DE BANCADA DIDÁTICA
DE TANQUES ACOPLADOS
COM CLP INDUSTRIAL

Luan Rafael Pimenta Medeiros

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

Banca Examinadora

Prof. Eduardo Stockler Tognetti, ENE/UnB _____
Orientador

Prof. Eugênio Libório Feitosa Fortaleza, _____
ENM/UnB
Examinador interno

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, _____
ENM/UnB
Examinador interno

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou.

Luan Rafael Pimenta Medeiros

Agradecimentos

Ao meu pai Airton, pelo incentivo e apoio que recebi durante toda a minha vida, sei que estaria muito orgulhoso neste momento. À minha mãe Claudia, pelo carinho e suporte. Aos meus irmãos Paloma e Luca, por me acompanharem nos desafios e vitórias. Agradeço ao corpo docente e funcionários da UnB, que trabalham para que os alunos tenham a melhor formação possível. Agradeço em especial ao Dr. Eduardo Stockler Tognetti, pela orientação, paciência e disponibilidade. Agradeço aos meus colegas da engenharia elétrica, pelo ambiente de cooperação e amizade. Agradeço ao Jhonantans Moraes Rocha, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Luan Rafael Pimenta Medeiros

RESUMO

O controle de nível de água em um sistema de quatro tanques é implementado por meio de um controlador lógico programável (CLP). Este sistema tem sido utilizado academicamente para ensino e exemplificação de algoritmos de controle em todo o mundo, pois é um processo multivariável cuja dinâmica pode ser de fase mínima ou não-mínima dependendo do ajuste das válvulas. Somente o problema de fase mínima é analisado neste trabalho. São apresentadas duas estratégias de controle, uma descentralizada e outra desacopladora, ambas com controlador proporcional integrador (PI). O CLP é um equipamento consolidado na indústria, é uma ótima ferramenta para os alunos aplicarem técnicas de controle. Foi instalado e configurado para este sistema, e as estratégias de controle foram implementadas. As técnicas de controle são comparadas por meio de respostas ao degrau, avaliando o sobrevalor, distúrbio causado e tempo de assentamento.

Palavras-chave: Controle de processos, Sistema de quatro tanques, Controle de nível, Processo multivariável

ABSTRACT

The water level control in a four tank system is implemented through a programmable logic controller (PLC). This system has been used for teaching and academically exemplification control algorithms in the world, the multivariable zero dynamics of the system can be made both minimum phase and nonminimum phase by changing the valves. Only the minimum phase problem is analyzed in this study. Two control strategies are presented, a decentralized and other decoupling, both with proportional integrator (PI) controller. PLC is a consolidated equipment in the industry, is a great tool for students to apply control techniques. It has been installed and configured for this system, and the control strategies were implemented. Control techniques are compared by the step responses, evaluating the overshoot, disturbance value and settling time.

Keywords: Process control, Quadruple-tank process, Level control, Multivariable process

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS DO PROJETO	2
1.3	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	3
2	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E DO PROCESSO	4
2.1	BANCADA DIDÁTICA DE QUATRO TANQUES	4
2.1.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	5
2.1.2	TANQUES	5
2.1.3	ATUADORES	6
2.1.4	SENSORES	7
2.2	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL	8
2.2.1	MÓDULOS	9
2.3	SOFTWARES	10
2.4	CONEXÕES ENTRE SISTEMAS	11
2.4.1	COMUNICAÇÃO ENTRE A BANCADA E O CLP	11
2.4.2	COMUNICAÇÃO ENTRE O CLP E O COMPUTADOR	13
3	MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE	14
3.1	INTRODUÇÃO	14
3.2	SISTEMA DE QUATRO TANQUES	14
3.2.1	MODELAGEM CAIXA BRANCA	14
3.2.2	MODELAGEM CAIXA PRETA	17
3.3	CONTROLE	25
3.3.1	CONTROLADOR PI	25
3.3.2	ESTRATÉGIA DE CONTROLE DESCENTRALIZADO	27
3.3.3	ESTRATÉGIA DE CONTROLE DESACOPLADOR	28
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	31
4.1	INTRODUÇÃO	31
4.2	CONFIGURAÇÕES DOS SOFTWARES	31
4.2.1	VMWARE WORKSTATION	31
4.2.2	RSLINUX	31

4.2.3	RSLOGIX 5000	32
4.3	CONTROLE DESCENTRALIZADO.....	34
4.4	CONTROLE DESACOPLADOR	35
4.5	RESULTADOS OBTIDOS	37
4.6	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	38
5	CONCLUSÕES	39
5.1	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	ANEXOS.....	43
I	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS	44
II	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	46

LISTA DE FIGURAS

1.1	Representação do sistema de 4 tanques	2
2.1	Diagrama P&ID da bancada em malha aberta	4
2.2	Bancada de quatro tanques	4
2.3	Tanque de acrílico	6
2.4	CLP no painel elétrico.....	8
2.5	Software RSLinx mostrando os cartões do CLP	9
2.6	Conector de comunicação DB15 presente na bancada.....	11
2.7	<i>Bournes</i> de conexão do cabo DB15 ao CLP	12
2.8	Circuito de alimentação dos sensores	12
2.9	Dispositivo <i>ethernet hub</i>	13
3.1	Diagrama de blocos do sistema em malha aberta	17
3.2	Resposta de uma função de primeira ordem ao degrau	18
3.3	Resposta do nível do tanque 4 ao degrau de excitação na bomba 1	20
3.4	Resposta do nível do tanque 4 valor estacionário - sinal medido	20
3.5	Logaritmo e regressão linear dos dados da Figura 3.4.....	20
3.6	Resposta do nível do tanque 4 a um degrau no sinal da bomba 1 e modelo obtido	21
3.7	Resposta do nível do tanque 4 a um degrau no nível do tanque 2 e modelo obtido	21
3.8	Resposta do nível do tanque 1 ao degrau de excitação na bomba 1 e modelo obtido ..	22
3.9	Resposta do nível do tanque 2 ao degrau de excitação na bomba 2 e modelo obtido ..	22
3.10	Resposta do nível do tanque 3 ao degrau de excitação na bomba 2 e modelo obtido ..	23
3.11	Resposta do nível do tanque 3 a um degrau no nível do tanque 1 e modelo obtido	23
3.12	Diagrama de blocos da estratégia de controle descentralizado	27
3.13	Diagrama de blocos da estratégia de controle desacoplador	28
3.14	Resposta ao degrau unitário do bloco desacoplador D_{13} e aproximação.....	29
3.15	Resposta ao degrau unitário do bloco desacoplador D_{24} e aproximação.....	30
4.1	Configuração de rede do software VMware Workstation	32
4.2	Estratégia de controle descentralizado no RSLogix 5000	34
4.3	Estratégia de controle desacoplador no RSLogix 5000, funções de blocos.....	35
4.4	Estratégia de controle desacoplador no RSLogix 5000, lógica ladder.....	36
4.5	Respostas dos níveis dos tanques inferiores, controle descentralizado	37
4.6	Respostas dos níveis dos tanques inferiores, controle desacoplador	37

I.1	Estratégia de controle descentralizado no software RSLogix 5000 - lógica <i>ladder</i>	44
I.2	Estratégia de controle desacoplador no software RSLogix 5000, página 2 - lógica <i>ladder</i>	44
I.3	Estratégia de controle desacoplador no software RSLogix 5000, página 1 - lógica de diagramas de funções de blocos	45

LISTA DE TABELAS

2.1	Calibração dos sensores, dezembro de 2015	7
2.2	Esquema de ligação do cabo DB15 que conecta a bancada ao CLP	13
3.1	Parâmetros das funções de transferência	24
3.2	Sintonia do controlador PI pelo método SIMC (com τ_c como um parâmetro de sintonia)	26
3.3	Controladores PI pelo método SIMC, $\tau_c = 2$ segundos, controle descentralizado	27
3.4	Blocos desacopladores, controle desacoplador	29
3.5	Controladores PI pelo método SIMC, $\tau_c = 2$ segundos, controle desacoplador	29
4.1	Propriedades dos canais do cartão de entrada do CLP	32
4.2	Configurações dos blocos PID	33
4.3	Métricas de desempenho das estratégias de controle	38

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Área da seção transversal do tanque i	$[cm^2]$
A	Área da seção transversal média dos tanques	$[cm^2]$
h_i	Altura de líquido no tanque i	$[cm]$
V_i	Volume de líquido no tanque i	$[cm^3]$
k_i	Ganho máximo da bomba i	$[cm^3/s \cdot \%$
v_i	Tensão percentual de controle da bomba i	$]\%$
$q_{bomba,i}$	Fluxo da bomba i	$[cm^3/s]$
$q_{out,i}$	Fluxo de saída do tanque i	$[cm^3/s]$
$q_{in,i}$	Fluxo de entrada no tanque i	$[cm^3/s]$
g	Aceleração da gravidade	$[cm/s^2]$
ρ	Massa específica da água	$[g/cm^3]$
P	Pressão estática no líquido	$[g/cm \cdot s^2]$
v_m	Velocidade média de escoamento de líquido	$[cm/s]$
o_i	Área da seção transversal de saída do tanque i	$[cm^2]$
\bar{h}_i	Altura nominal de líquido no estado estacionário no tanque i	$[cm]$
\bar{v}_i	Tensão percentual nominal no estado estacionário de controle da bomba i	$[cm]$
Δh_i	Varição da altura de líquido no tanque i em relação ao valor nominal	$[cm]$
Δv_i	Varição da tensão percentual de controle da bomba i em relação ao valor nominal	$[cm]$
u_i	Sinal de controle do controlador i, estratégia desacopladora	$[\%]$
τ	Constante de tempo da função de transferência	$[s]$
τ_i	Constante de tempo da função de transferência do controlador PI	$[s]$
τ_c	Constante de tempo desejado para a resposta controlada	$[s]$
θ	Tempo morto do processo	$[s]$
w_{lead}	Frequência de avanço	$[rad/s]$
w_{lag}	Frequência de atraso	$[rad/s]$

Grupos Adimensionais

γ_i	Porcentagem do fluxo da bomba que flui para o tanque i
$G(s)$	Função de transferência
$G(s)$	Função de transferência
$G_f(s)$	Função de transferência do filtro
$G_i(s)$	Função de transferência relacionando o nível do tanque i com o sinal de controle da bomba
$G_{ij}(s)$	Função de transferência relacionando o nível do tanque i com o nível do tanque j
$C_i(s)$	Controlador da bomba i
D	Função de transferência do desacoplador
K	Ganho da função de transferência
K_c	Ganho do controlador PI
K_p	Ganho proporcional do controlador PI
K_i	Ganho integral do controlador PI

Siglas

CLP	Controlador Lógico Programável
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
PI	Controlador Proporcional Integrador
PID	Controlador Proporcional Integrador e Derivador
SIMC	<i>Skogestad Internal Model Controller</i>
IMC	<i>Internal Model Controller</i>
RTS	<i>Real Time Sample</i>
RPI	<i>Requested Package Interval</i>
PV	<i>Process Variable</i>
CV	<i>Controlled Variable</i>
SP	<i>Set Point</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Este trabalho lida com a automação e controle de nível de tanques de água em um sistema didático de quatro tanques por meio de um controlador lógico programável (CLP). O controle de nível de tanques é usual no meio acadêmico e na indústria. Embora tenha uma conceituação simples, o problema pode ser complexo e requerer técnicas apuradas, principalmente quando há um forte acoplamento das variáveis internas. O controle de processos multivariáveis é comum na indústria, e poucos experimentos didáticos demonstram as propriedades e desafios deste tipo de controle. A bancada de quatro tanques foi desenvolvida e construída em 1996 pelo *Lund Institute of Technology*, na Suécia. Este sistema se tornou um *benchmark* na literatura, com muitos artigos sobre ele, [1], [2], [3]. É um processo multivariável de fácil compreensão, muito utilizado para o ensino [4], [5].

O sistema didático de quatro tanques foi desenvolvido para mostrar as propriedades de um sistema MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) e também permite modificar a localização de zeros, que podem estar no semiplano esquerdo (zeros de fase mínima) ou no semiplano direito (zeros de fase não-mínima), dependendo da configuração das válvulas que compõem o processo. A representação da bancada é mostrada na Figura 1.1. O trabalho de Johansson [1] mostra que o sistema na configuração de fase mínima apresenta bons resultados de controle com controladores PI (Proporcional Integral) que são muito utilizados para controle de nível. Entretanto, em fase não-mínima, o acoplamento das variáveis do sistema é mais acentuado, e o controle descentralizado tradicional não apresenta bons resultados. Este trabalho só analisa o problema de fase mínima.

Um CLP industrial é utilizado para implementar as técnicas de controle neste sistema. CLPs são amplamente utilizados na indústria de controle de processos. São versáteis e robustos, permitindo diversos arranjos de entradas e saídas digitais ou analógicas e garantindo o funcionamento de sistemas de controle até em ambientes adversos. O uso do CLP no ambiente educacional proporciona aos estudantes a possibilidade de conhecer e operar esta ferramenta, aproximando-os do ambiente profissional.

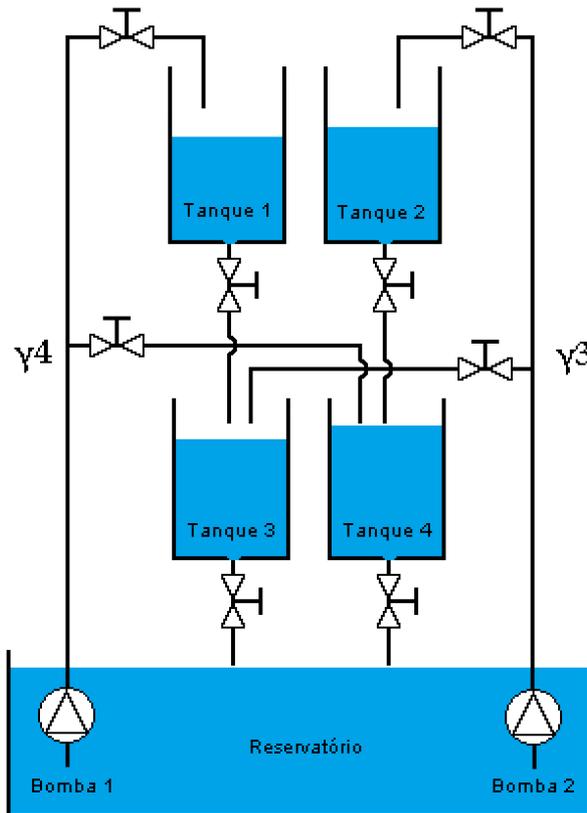


Figura 1.1: Representação do sistema de 4 tanques

1.2 Objetivos do projeto

O objetivo deste trabalho é realizar a automação e controle de uma bancada didática instalada no Laboratório de Automação e Robótica (LARA) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. A automação se dará por meio da integração (hardware e software) do CLP industrial ControlLogix da Allen-Bradley com a planta. Estratégias de controle serão projetadas para o controle de nível do processo e implementadas no CLP.

Mais especificamente, objetiva-se controlar os níveis dos tanques inferiores da bancada mostrada na Figura 1.1, ou seja, tanques 3 e 4 (h_3 e h_4), por meio da manipulação dos sinais de tensão das bombas e da leitura do sinal de nível dos tanques controlados.

Para tal, serão realizadas as seguintes atividades:

- Instalação do painel e configuração dos cartões eletrônicos do CLP;
- Configuração da rede de comunicação com a estação de engenharia;
- Passagem da fiação dos sensores e atuadores aos cartões de entrada e saída analógica, respectivamente;
- Configuração da lógica para permitir ensaios e implementação das leis de controle;

- Ensaios para identificação do processo;
- Operação do sistema em malha fechada em torno de um ponto de operação;
- Coleta de dados.

1.3 Apresentação do manuscrito

No capítulo 2 é feita uma apresentação dos equipamentos, softwares e conexões utilizadas no projeto. Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia empregada na modelagem, identificação e elaboração das técnicas de controle. Resultados experimentais são discutidos no capítulo 4, seguido das conclusões no capítulo 5. Os anexos contém material complementar.

Capítulo 2

Descrição dos Equipamentos e do Processo

2.1 Bancada Didática de Quatro Tanques

O objeto de estudo deste trabalho é um sistema didático de quatro tanques, produzido pela empresa DIDATICONTROL. A Figura 2.1 mostra o diagrama P&ID da bancada, e a Figura 2.2 apresenta a bancada física utilizada neste projeto.

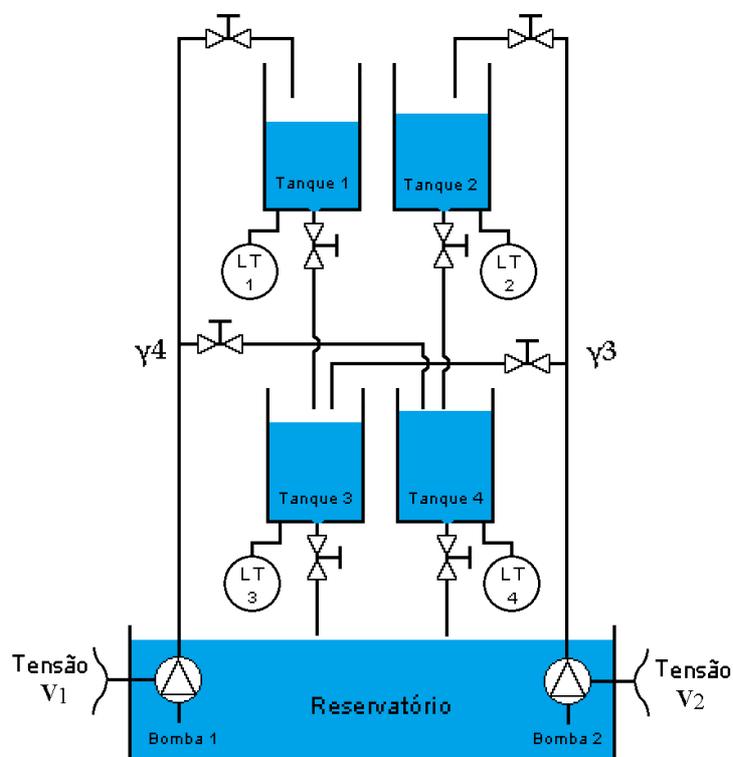


Figura 2.1: Diagrama P&ID da bancada em malha aberta

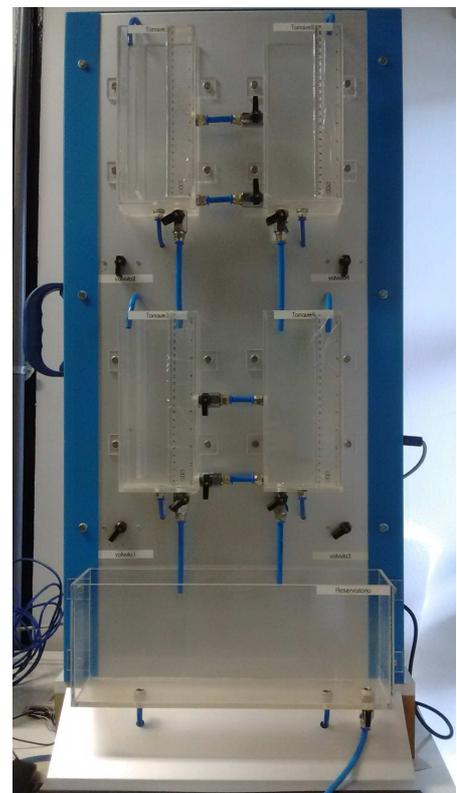


Figura 2.2: Bancada de quatro tanques

A estrutura do equipamento é em chapas de alumínio, com tubulações em plástico flexível e tanques em acrílico transparente. As válvulas permitem o ajuste do fluxo de entrada e saída dos tanques. Em cada um destes há um sensor de nível localizado na base. Como atuadores, a bancada possui duas bombas centrífugas de 12 Volts com rotação variável, tipicamente utilizadas em tanques de gasolina.

2.1.1 Descrição do Processo

Como mostrado nas Figuras 1.1 e 2.1, o sistema de quatro tanques tem dois atuadores, bomba 1 e bomba 2, que geram um fluxo de entrada de água nos tanques. A bomba 1 alimenta o tanque 1 e o tanque 4 diretamente, e γ_4 é a proporção do fluxo da bomba 1 que entra no tanque 4. De modo semelhante, a bomba 2 alimenta o tanque 2 e o tanque 3, e γ_3 é a proporção do fluxo da bomba 2 que vai para o tanque 3. São quatro sensores de nível no total, localizados na base de cada tanque.

O controle dos níveis dos tanques inferiores é dependente das proporções γ_3 e γ_4 . Se forem maiores que 0.5, as bombas injetam mais água nos tanques inferiores que superiores, e o distúrbio causado nos tanques inferiores pelo fluxo de saída dos tanques superiores pode não ser tão significativo. Esta é a configuração de fase mínima. No outro caso, se γ_3 e γ_4 forem menores que 0.5, maior proporção do fluxo das bombas vai para os tanques superiores, tornando o sistema mais acoplado e suscetível a distúrbio entre as malhas. Configuração de fase não-mínima.

O CLP é responsável por fazer a leitura dos níveis dos tanques, comparar com o valor de referência e atuar sobre as bombas para controlar o fluxo de água que alimenta o sistema. Ou seja, o CLP é responsável pelo controle em tempo real. Os objetivos de controle do projeto são os níveis dos tanques inferiores: tanque 3 e tanque 4 (h_3 e h_4). As entradas do processo são os sinais de tensão enviados para os atuadores, bomba 1 e bomba 2, que geram fluxos de entrada de água para os quatro tanques do sistema.

2.1.2 Tanques

Os tanques são retangulares. Assume-se que a área de seção transversal de cada tanque é constante, logo, o volume de água em cada tanque pode ser calculado como: $V_i = A_i h_i$, no qual A_i é a área de seção transversal e h_i o nível de água. O nível máximo de água em cada tanque é 23 cm, porém não há nenhuma proteção contra transbordamento. Sendo assim, a região de operação é restringida até 20 cm.

Com o uso de um paquímetro, mediram-se as dimensões internas de cada tanque, e suas áreas de seções transversais foram calculadas. Outra maneira de estimar a área da seção transversal seria injetar um volume pré-conhecido de água e medir o nível correspondente. Mas, devido à dificuldade de medir o nível com precisão e de obter este volume de água exato, foram usadas as medidas internas para estimar a área de seção transversal. Dado que os valores são próximos, por



Figura 2.3: Tanque de acrílico

simplificação, assume-se que todos os tanques têm mesma área de seção transversal A , definida como a média das áreas dos tanques.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 46.24 \text{ cm}^2 \\
 A_2 &= 46.80 \text{ cm}^2 \\
 A_3 &= 47.70 \text{ cm}^2 \\
 A_4 &= 47.65 \text{ cm}^2 \\
 A &= \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} \approx 47.01 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

As válvulas permitem o ajuste da área de saída de cada tanque. Nestes, a proporção de água das bombas também é ajustada por meio de válvulas.

2.1.3 Atuadores

As bombas centrífugas utilizadas são tipicamente usadas em tanques de gasolina automotivos. Têm a seguinte especificação: Moto Bombas - bomba de gasolina 12 Volts universal; código TSA: 820001G e código original: 500.14.364. As bombas geram um fluxo de água diretamente proporcional à tensão aplicada. A faixa de operação escolhida para o funcionamento das bombas é de 0 a 5 Volts, para evitar que superaqueçam.

Com as válvulas de saída dos tanques fechadas, calcula-se o ganho máximo de cada bomba, k_i , aplicando a tensão máxima de 5 Volts por determinado intervalo de tempo. Em seguida, mede-se

o volume de água nos tanques (Ah_i). Este teste foi realizado com as bombas quentes, após um longo período de tempo em funcionamento, pois o ganho das bombas é maior quando estão frias.

$$k_1 = 60.7 \frac{cm^3}{s \cdot \%}$$

$$k_2 = 44.2 \frac{cm^3}{s \cdot \%}$$

Embora as bombas apresentem uma zona morta, ou seja, não geram fluxo da água para tensão inferior a 1.2 Volts, assume-se, por simplificação, que o fluxo de água produzido é linear com a tensão aplicada. Como mostrado na equação 2.1, onde $q_{bomba,i}$ é o fluxo de saída da bomba i em $\frac{cm^3}{s}$, k_i é o ganho da bomba em $\frac{cm^3}{s \cdot \%}$ e v_i é a tensão percentual aplicada à bomba. Desse modo, v_i é uma variável adimensional que representa a relação entre tensão de entrada e a tensão máxima (5 Volts), variando de 0 a 1, ou 0% a 100%. Esta equação é uma aproximação para tensões de entrada fora da zona morta.

$$q_{bomba,i} = k_i v_i \quad , \quad i = 1, 2 \quad (2.1)$$

Foi verificado um ponto no meio da escala $v_1 = 2.5$ Volts e $v_2 = 2.5$ Volts. As vazões medidas foram $27.4 \frac{cm^3}{s}$ para a bomba 1 e $20.2 \frac{cm^3}{s}$ para a bomba 2, corroborando com a suposição do comportamento das bombas mostrada na equação 2.1.

2.1.4 Sensores

Há um sensor de pressão localizado na base de cada um dos quatro tanques. O código de referência é MPVZ5004GW7U. Estes sensores são utilizados para medir o nível de água nesta aplicação, visto que a pressão exercida pelo fluido na base varia linearmente com o nível. Os sensores são alimentados por uma fonte externa com uma tensão constante de 5 Volts. O sinal de tensão resultante tem um *offset* de aproximadamente 1.8 Volts. A calibração foi realizada visualmente, com o auxílio de uma régua fixada nos tanques. Foi medida a tensão de cada sensor para o nível mínimo, 0 cm, e para o nível máximo, 20 cm, como mostra a tabela 2.1. A calibração é realizada na configuração do software de programação do CLP, RSLogix 5000.

Recomenda-se recalibrar todos os sensores periodicamente para a obtenção de uma medida acurada. Esta tabela apresenta os valores de uma calibração realizada em dezembro de 2015.

Tabela 2.1: Calibração dos sensores, dezembro de 2015

	Tensão em Volts nível = 0 cm	Tensão em Volts nível = 20 cm
Tanque 1	1.98	3.85
Tanque 2	1.88	3.69
Tanque 3	1.86	3.85
Tanque 4	1.76	3.65

Os sensores apresentam um sinal com bastante ruído. Para contornar este problema, o cartão de entrada analógica do CLP foi configurado com dois filtros: um filtro passa-baixas analógico de 60 Hz (filtro *anti-aliasing*), aplicado antes da amostragem do sinal para evitar distorção causada por componentes de alta frequência, e um filtro digital $G_f(s) = \frac{1}{\tau_f s + 1}$ com constante de tempo igual a 1 segundo. O filtro digital faz com que o sinal varie mais suavemente. Por ter uma constante de tempo menor, o filtro digital tem uma dinâmica dominante sobre o sinal, ou seja, o filtro *anti-aliasing* não é tão perceptível.

2.2 Controlador Lógico Programável

O controlador utilizado é da marca Allen-Bradley, que pertence à Rockwell Automation. O modelo é da série 1756 ControlLogix. É composto por um chassi e cartões encaixáveis. Essa modularidade permite a instalação de múltiplos arranjos de entradas e saídas. São apresentados os módulos do CLP utilizados neste projeto e as especificações de acordo com o fabricante ([6], [7], [8]).



Figura 2.4: CLP no painel elétrico

O CLP foi instalado dentro de um painel elétrico, fixado em uma placa de aço. A Figura 2.4 mostra o interior deste painel, ainda sem nenhuma conexão ligada aos cartões. Além do CLP, há três trilhos para alocação de *bournes* para conexões elétricas. O disjuntor de 2 Ampères é o dispositivo de proteção de entrada do CLP. Há outros cartões não listados acima conectados no chassi do CLP, no entanto não serão utilizados neste projeto.

2.2.1 Módulos

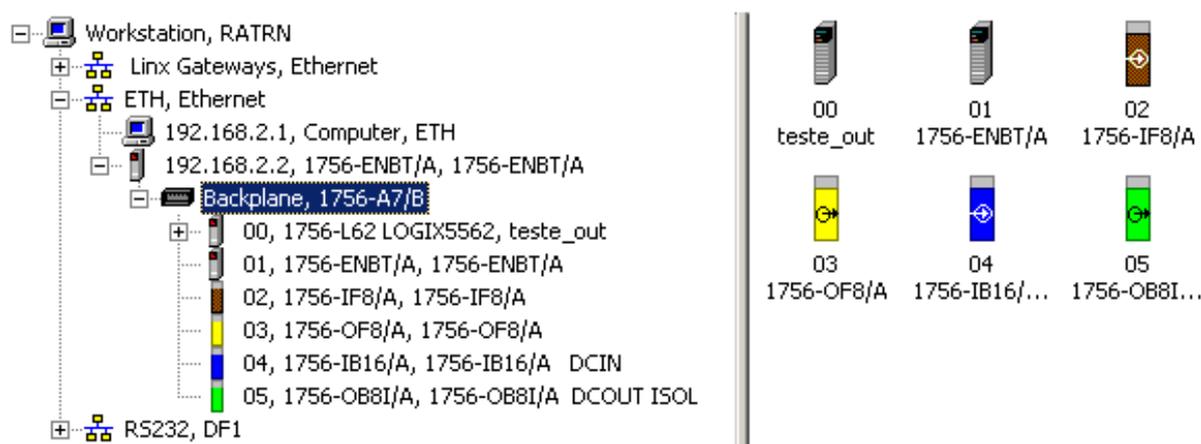


Figura 2.5: Software RSLinx mostrando os cartões do CLP

- Chassi: Estrutura onde são encaixados o cartões do CLP e a fonte de alimentação. Por meio dessa estrutura ocorre a alimentação e a comunicação entre os diversos cartões. Código: 1756-A7/B.
- Fonte de Alimentação: Responsável por converter a tensão de entrada para a tensão de funcionamento dos cartões. A tensão de entrada é 115 Volts AC, 60 Hz, e a tensão do CLP é 24 Volts DC. Código: 1756-PA72/C.
- CPU: Módulo onde são gravados os programas contendo a lógica de controle. Realiza os cálculos e comparações em tempo real. Especificações: 4 MB de memória para programas, 478 KB de memória para sinais de entrada e saída (memória *buffer*), comunicação serial RS-232. Código: 1756-L62/B.
- Cartão de Comunicação Ethernet - Permite a comunicação em alta velocidade entre o CLP e o computador. Todos os cálculos e a lógica é realizada no CLP, o computador é utilizado para coletar os dados e para enviar sinais de controle, ou mudar o valor de referência. Código: 1756-ENBT.
- Cartão de Entrada Analógica: É utilizado neste projeto para ler os sinais de tensão dos sensores de nível. Especificações: Cartão de 8 canais não isolados, ou seja, todos os terras (RTN) internamente conectados. Resolução de 16 bits, capaz de medir tensão ou corrente

em modo diferencial, com referências distintas para cada canal, ou no modo terminação única (*single-ended*), com uma única referência para todos os canais. A faixa de operação dos sinais lidos é de -10 V a +10 V, ou 0 mA a 20 mA. Aquisição em tempo real (RTS) com intervalo mínimo de 18 ms no modo terminação única. Possui um filtro passa-baixas analógico *anti-aliasing* configurável de 10 Hz a 1000 Hz. Este filtro é aplicado antes da amostragem com o objetivo de cortar sinais de frequências superiores e evitar uma distorção do sinal adquirido. A frequência de corte do filtro é relacionada com a frequência de aquisição, uma baixa frequência de corte exige uma baixa frequência de aquisição. Cada canal possui também um filtro digital com constante de tempo ajustável para suavizar o sinal de entrada. Código: 1756-IF8.

- Cartão de Saída Analógica: Utilizado para excitar as bombas com sinais de tensão DC. Especificações: Cartão de 8 canais não isolados, ou seja, todos os terras (RTN) internamente conectados. Resolução de 16 bits, capaz de gerar tensão ou corrente em modo diferencial, com referências distintas para cada canal, ou no modo terminação única (*single-ended*), com uma única referência. A faixa de operação é de -10 V a +10 V, ou 0 mA a 20 mA. Código: 1756-OF8.

2.3 Softwares

Diversos softwares são utilizados para a configuração e o funcionamento deste projeto. O computador da bancada tem as seguintes especificações: Dell Inspiron 3647, com processador Intel I5 3 GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 8. A instalação de diversos softwares proprietários é necessária para a operação do CLP, e esses não são compatíveis com o sistema operacional Windows 8. Para solucionar este problema, utilizou-se uma máquina virtual com o sistema operacional Windows XP. É apresentada a lista de softwares utilizados no projeto:

- VMware Workstation: Permite o uso de máquinas virtuais, que operam junto com a máquina física. É instalado no sistema operacional hospedeiro, Windows 8, e emula uma máquina virtual, hóspede, onde se instala o sistema operacional Windows XP e todos os softwares de comunicação, configuração e programação do CLP.
- RSLinx: É um software de comunicação desenvolvido pela Rockwell. É utilizado para interface de comunicação com todos os seus equipamentos, e, neste caso o CLP. É instalado no sistema operacional da máquina virtual, Windows XP.
- RSLogix 5000: É um software de programação e compilação de programas para o CLP, desenvolvido pela Rockwell. Nele é realizada a configuração e calibração dos módulos de entrada e saída. Também é onde os programas e a lógica de controle são implementados.

2.4 Conexões entre Sistemas

Os três sistemas apresentados são: bancada de quatro tanques, CLP e computador. O CLP precisa se comunicar com os sensores e atuadores da bancada. O computador é utilizado para supervisionar e trocar informações com o CLP. Nessa seção são apresentados os componentes físicos de conexão entre os sistemas.

2.4.1 Comunicação entre a Bancada e o CLP

A bancada didática possui um terminal de conexão elétrica dos sensores e atuadores com equipamentos externos, um conector do tipo DB15 fêmea mostrado na Figura 2.6. A comunicação da bancada com o CLP ocorre por um cabo: em uma extremidade há um conector do tipo DB15 macho que encaixa no terminal da bancada de quatro tanques, e na outra extremidade do cabo há fios soltos que se conectam aos cartões de entrada e saída analógica do CLP por meio de bournes elétricos, como mostrado na Figura 2.7.



Figura 2.6: Conector de comunicação DB15 presente na bancada

O esquema de ligação do cabo é apresentado na tabela 2.2. O cartão de entrada é usado para ler os sinais dos sensores, enquanto o de saída para mandar sinal de atuação das bombas. A nomenclatura utilizada na quarta coluna é referente ao *User Manual* um009 da Rockwell. RTN é a referência de tensão, e são todos ligados internamente em cada cartão. Os métodos de ligação escolhidos são de terminação única (*single-ended*), pois todos os sinais de entrada e saída da bancada têm a mesma referência: os pinos 2, 7 e 8, que estão interconectados dentro da bancada. O canal de cada sinal é igual à numeração indicada: IN-1 é o canal 1, e VOUT-5 é o canal 5, por exemplo.

O cartão de saída analógica só tem um intervalo de operação para a tensão: -10 Volts a +10 Volts. O sinal é limitado para a faixa de operação da bomba (0 a 5 Volts) por software, dentro da configuração dos módulos, como apresentado na seção 4.2.3.2.

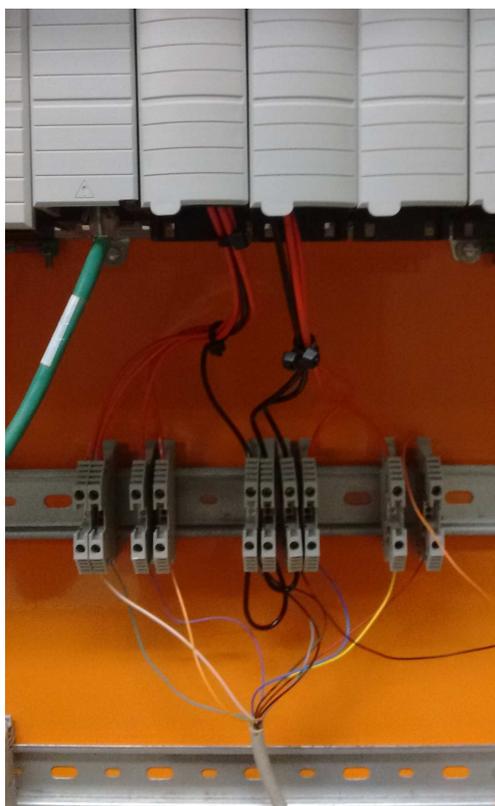


Figura 2.7: *Bournes* de conexão do cabo DB15 ao CLP

Um fio é utilizado para alimentar os sensores com uma tensão constante de 5 Volts por meio de um circuito com o regulador de tensão LM7805, como mostrado na Figura 2.8. O sinal de entrada do circuito é proveniente de uma fonte de tensão constante de 24 Volts, e os capacitores são utilizados para estabilizar as tensões de entrada e saída do regulador de tensão. A referência do circuito de alimentação (terra) é conectada à referência da bancada de quatro tanques. A fonte de 24 Volts e o circuito estão localizados dentro do painel elétrico.

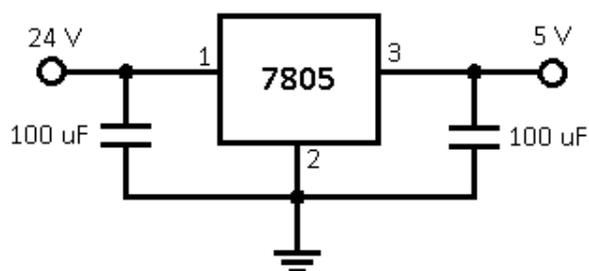


Figura 2.8: Circuito de alimentação dos sensores

Tabela 2.2: Esquema de ligação do cabo DB15 que conecta a bancada ao CLP

Pino DB15	Cor fio	Cartão CLP	Canal no Cartão	Descrição
1	vermelho	—	—	5 Volts
2	cinza	entrada\saída	RTN	terra
7	marrom	entrada\saída	RTN	terra
8	preto	entrada\saída	RTN	terra
9	branco	entrada	IN-1	h_1
10	verde	entrada	IN-2	h_2
11	lilás	entrada	IN-3	h_3
12	laranja	entrada	IN-4	h_4
13	amarelo	saída	VOUT-5	v_1
14	azul	saída	VOUT-7	v_2

2.4.2 Comunicação entre o CLP e o Computador

A comunicação entre o CLP e o computador pode ser feita por um cabo serial, entretanto, é consideravelmente lenta e não muito confiável. O cabo serial foi utilizado somente para configurações iniciais dos cartões, e tão logo o cartão de comunicação 1756-ENBT entrou em funcionamento, toda a comunicação foi realizada através deste cartão com o uso de cabos ethernet. Para conectar o CLP ao computador com cabo ethernet foi utilizado um *ethernet hub*, mostrado na Figura 2.9. A comunicação não funciona com um simples cabo ethernet ligando os dois sistemas. O *hub* é utilizado para prover uma ligação interna entre os cabos normais, sem precisar alterar os conectores ethernet.



Figura 2.9: Dispositivo *ethernet hub*

Capítulo 3

Modelagem Matemática e Controle

3.1 Introdução

Neste capítulo são obtidos os modelos matemáticos do sistema por meio de dois métodos: caixa branca, baseados nos artigos [1] e [2]; e caixa preta, baseado em técnicas de identificação de sistemas da literatura de controle de processos, [9], [10]. Em seguida são apresentadas duas estratégias de controle usuais para este problema: controle descentralizado por meio de controladores PI, e controle desacoplador, também com controladores PI. O controle descentralizado com PI apresentou bons resultados no artigo de Johansson [1] na configuração de fase mínima. O controle desacoplador é baseado no artigo de Vázquez [11].

3.2 Sistema de Quatro Tanques

A descrição matemática do comportamento do sistema é a base para a realização de um projeto de controle de processos. Duas técnicas de obtenção do modelo são apresentadas: a modelagem caixa branca do sistema de quatro tanques e a identificação dos parâmetros da planta didática em estudo através de curva de reação (modelagem caixa preta).

3.2.1 Modelagem Caixa Branca

A modelagem caixa branca, ou fenomenológica, pressupõe um conhecimento profundo sobre o comportamento do sistema, assim como das relações matemáticas que descrevem todos os fenômenos envolvidos. A modelagem fenomenológica do sistema, de acordo com [1] e [2], é baseada no princípio de Bernoulli para líquidos incompressíveis, válida para qualquer ponto de uma linha corrente:

$$\frac{\rho v_m^2}{2} + \rho gh + P = \text{constante} \quad (3.1)$$

Onde ρ é a massa específica da água, P é a pressão, g é a aceleração da gravidade, v_m é a velocidade média e h é o nível de água no tanque.

No topo do tanque, P é igual à pressão atmosférica, e v_m é considerada nula, pois é muito lenta comparada à velocidade de escoamento pela base. Tomando a base do tanque como referência de altura, na abertura ($h = 0$), P é igual à pressão atmosférica novamente.

$$\begin{aligned} \text{(topo):} \quad & \rho gh + P = \text{constante} \\ \text{(base):} \quad & \frac{\rho v_m^2}{2} + P = \text{constante} \\ & \rho gh + P = \frac{\rho v_m^2}{2} + P \\ & v_m = \sqrt{2gh} \end{aligned}$$

Calcula-se o fluxo de saída q_{out} como a área da seção transversal da saída do tanque i multiplicada pela velocidade média de escoamento da água v_m . Para cada tanque, têm-se:

$$q_{out,i} = o_i v_{m,i} = o_i \sqrt{2gh_i} \quad , \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3.2)$$

Assume-se que o fluxo de água gerado pelas bombas é direta e linearmente proporcional à tensão aplicada, como mostrado na equação 3.3, e o fluxo de entrada nos tanques é igual ao fluxo gerado pelas bombas, como mostram as equações 3.4 e 3.5. As constantes γ_3 e γ_4 indicam a proporção do fluxo de saída das bombas que entra nos tanques 3 e 4 respectivamente.

$$q_{bomba,i} = k_i v_i \quad , \quad i = 1, 2 \quad (3.3)$$

$$q_{bomba,1} = q_{in,1} + q_{in,4} \quad (3.4)$$

$$q_{bomba,2} = q_{in,2} + q_{in,3} \quad (3.5)$$

$$\gamma_4 = \frac{q_{in,4}}{q_{in,1} + q_{in,4}} \quad (3.6)$$

$$\gamma_3 = \frac{q_{in,3}}{q_{in,2} + q_{in,3}} \quad (3.7)$$

Os fluxos de saída dos tanques superiores entram nos tanques inferiores. As expressões que indicam o fluxo de entrada em cada tanque são mostradas abaixo:

$$\text{(tanque 1):} \quad q_{in,1} = (1 - \gamma_4)k_1 v_1$$

$$\text{(tanque 2):} \quad q_{in,2} = (1 - \gamma_3)k_2 v_2$$

$$\text{(tanque 3):} \quad q_{in,3} = \gamma_3 k_2 v_2 + q_{out,1}$$

$$\text{(tanque 4):} \quad q_{in,4} = \gamma_4 k_1 v_1 + q_{out,2}$$

Para determinar a dinâmica de nível do tanque i , aplica-se o balanço de massas^{1,2}:

$$\dot{V} = A \dot{h}_i = q_{in,i} - q_{out,i} \quad (3.8)$$

$$\dot{h}_i = \frac{q_{in,i} - q_{out,i}}{A} \quad (3.9)$$

Onde V é o volume de água no tanque, h é o nível de água no tanque, q_{in} é o fluxo de entrada, q_{out} é o fluxo de saída de água do tanque em questão. A é a área de seção transversal, é a mesma para todos os tanques pois são considerados iguais.

¹O domínio tempo (t) será omitido por brevidade de notação. Assim, $h_1(t)$ é representado por h_1 .

²Será adotado um ponto sobrescrito nas variáveis para simbolizar a derivada com relação ao tempo.

O fluxo de saída de água do tanque 1 cai no tanque 3, de forma semelhante, o fluxo de saída do tanque 2 entra no tanque 4. Aplicando as expressões de fluxo de entrada e saída de cada tanque na equação 3.9, obtém-se a dinâmica de nível de cada tanque, mostrado em 3.10.

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A}((1 - \gamma_4)k_1v_1 - o_1\sqrt{2gh_1}) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A}((1 - \gamma_3)k_2v_2 - o_2\sqrt{2gh_2}) \\ \dot{h}_3 = \frac{1}{A}(\gamma_3k_2v_2 + o_1\sqrt{2gh_1} - o_3\sqrt{2gh_3}) \\ \dot{h}_4 = \frac{1}{A}(\gamma_4k_1v_1 + o_2\sqrt{2gh_2} - o_4\sqrt{2gh_4}) \end{cases} \quad (3.10)$$

3.2.1.1 Linearização

O sistema será linearizado em torno do estado estacionário $(\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{h}_3, \bar{h}_4, \bar{v}_1 \text{ e } \bar{v}_2)$ para obter a representação em espaço de estados linearizada. Define-se variável de desvio como:

$$\Delta h_1 = h_1 - \bar{h}_1 \quad (3.11)$$

em que h_1 é o nível medido do tanque 1, \bar{h}_1 é o valor do nível em estado estacionário e Δh_1 é a variável de desvio. O mesmo procedimento é realizado para as demais variáveis do sistema.

É realizada a expansão na série de Taylor. Isso permite representar de forma linear o comportamento das variáveis de desvio em função das variáveis do sistema e dos sinais de entrada.

$$\dot{h}_1(v_1, h_1) = \dot{h}_1(\bar{v}_1, \bar{h}_1) + \Delta v_1 \frac{\partial \dot{h}_1(v_1, h_1)}{\partial v_1} \Big|_{(v_1, h_1) = (\bar{v}_1, \bar{h}_1)} + \Delta h_1 \frac{\partial \dot{h}_1(v_1, h_1)}{\partial h_1} \Big|_{(v_1, h_1) = (\bar{v}_1, \bar{h}_1)} \quad (3.12)$$

$$\Delta v_1 \frac{\partial (\frac{\gamma_1 k_1 v_1}{A})}{\partial v_1} \Big|_{v_1 = \bar{v}_1} = \Delta v_1 \frac{\gamma_1 k_1}{A} \quad ; \quad \Delta h_1 \frac{\partial (\frac{o_1 \sqrt{2gh_1}}{A})}{\partial h_1} \Big|_{h_1 = \bar{h}_1} = \Delta h_1 \frac{o_1 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_1}} \quad (3.13)$$

Reescrevendo o sistema de equações 3.10 em função das variáveis de desvio $(\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta v_1 \text{ e } \Delta v_2)$ em torno do estado estacionário, têm-se:

$$\begin{cases} \Delta \dot{h}_1 = \Delta v_1 \frac{(1-\gamma_4)k_1}{A} - \Delta h_1 \frac{o_1 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_1}} \\ \Delta \dot{h}_2 = \Delta v_2 \frac{(1-\gamma_3)k_2}{A} - \Delta h_2 \frac{o_2 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_2}} \\ \Delta \dot{h}_3 = \Delta v_2 \frac{\gamma_3 k_2}{A} + \Delta h_1 \frac{o_1 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_1}} - \Delta h_3 \frac{o_3 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_3}} \\ \Delta \dot{h}_4 = \Delta v_1 \frac{\gamma_4 k_1}{A} + \Delta h_2 \frac{o_2 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_2}} - \Delta h_4 \frac{o_4 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{\bar{h}_4}} \end{cases} \quad (3.14)$$

Assim, a representação no espaço de estados é mostrada abaixo. o vetor y representa os estados do sistema.

$$\begin{cases} \Delta \dot{h} = A\Delta h + B\Delta v \\ y = C\Delta h \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{h}_1 \\ \Delta \dot{h}_2 \\ \Delta \dot{h}_3 \\ \Delta \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{o_1 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{o_2 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_2}} & 0 & 0 \\ \frac{o_1 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_1}} & 0 & -\frac{o_3 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_3}} & 0 \\ 0 & \frac{o_2 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_2}} & 0 & -\frac{o_4 \sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(1-\gamma_4)k_1}{A} & 0 \\ 0 & \frac{(1-\gamma_3)k_2}{A} \\ 0 & \frac{\gamma_3 k_2}{A} \\ \frac{\gamma_4 k_1}{A} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix}$$

(3.16)

3.2.2 Modelagem Caixa Preta

A modelagem caixa preta parte dos conhecimento básicos do funcionamento do sistema e descreve o comportamento com base nos dados empíricos obtidos da planta. As funções de transferência do sistema em torno do estado estacionário são obtidas a partir de dados empíricos, curvas de resposta ao degrau. é uma metodologia estabelecida na indústria de processos e na literatura, [9], [10].

As válvulas foram ajustadas para obter o estado estacionário escolhido. Os valores nesse ponto de operação são aproximadamente iguais a: $\bar{h}_1 = 8 \text{ cm}$, $\bar{h}_2 = 8 \text{ cm}$, $\bar{h}_3 = 12 \text{ cm}$ e $\bar{h}_4 = 12 \text{ cm}$. As proporções do fluxo de saída das bombas que alimentam diretamente os tanques 3 e 4 são $\gamma_3 = 0.592$ e $\gamma_4 = 0.622$, respectivamente.

Sabe-se que a o fluxo gerado pela bomba 1 não afeta o nível do tanque 2, semelhantemente, a bomba 2 não influi no nível do tanque 1. Infere-se também que o fluxo de saída de um tanque é proporcional ao nível. Desta forma, o seguinte diagrama de blocos do sistema é proposto:

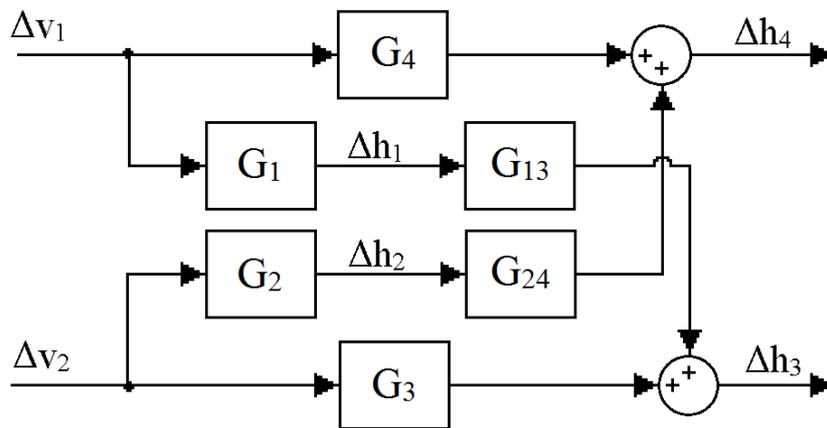


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema em malha aberta

As funções de transferência $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$ e $G_4(s)$ descrevem o comportamento da variação dos níveis dos tanques 1 a 4, respectivamente, em função do sinal enviado às bombas. A função de transferência $G_{13}(s)$ representa o comportamento da variação de nível do tanque 3 em função da variação de nível do tanque 1. De forma semelhante, A função de transferência $G_{24}(s)$ representa o comportamento da variação de nível do tanque 4 em função da variação de nível do tanque 2. Assume-se que todas as funções de transferência são de 1ª ordem.

Os seguintes experimentos são realizados para obter as curvas de resposta do sistema, e as funções de transferência: para obter $G_1(s)$ e $G_4(s)$, é aplicado um degrau no sinal de tensão enviado à bomba 1, e as curvas dos níveis dos tanques 1 e 4 são obtidas. Para obter $G_2(s)$ e $G_3(s)$, é aplicado um degrau no sinal de tensão enviado à bomba 2, e as curvas dos níveis dos tanques 2 e 3 são obtidas.

Para determinar as funções de transferência $G_{13}(s)$ e $G_{24}(s)$, os níveis dos tanques superiores são controlados em malha fechada com controladores PI. $G_{13}(s)$ é obtida aplicando um degrau na referência do nível do tanque 1 e verificando a resposta do nível do tanque 3. O nível do tanque 1 comporta-se como uma aproximação de um degrau. O tempo de assentamento de h_1 em malha fechada é cerca de 20 segundos, muito inferior à constante de tempo observada na resposta de h_3 , logo pode ser desprezado, por simplificação. De modo semelhante, $G_{24}(s)$ é obtida aplicando um degrau na referência do nível do tanque 2 e verificando a curva de nível do tanque 4.

Assume-se que todas as funções de transferência do sistema são de 1ª ordem, e a resposta ao degrau pode ser modelada por uma curva exponencial. A Figura 3.2 mostra a resposta de uma função de transferência de primeira ordem, $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$, a um degrau unitário. K é o ganho da função, e é proporcional ao valor de assentamento M , que neste caso é 1, logo $K = 1$. τ é a constante de tempo da função, igual ao tempo necessário para a função atingir 63.2% do valor de assentamento. Neste caso, $\tau = 1$ segundo.

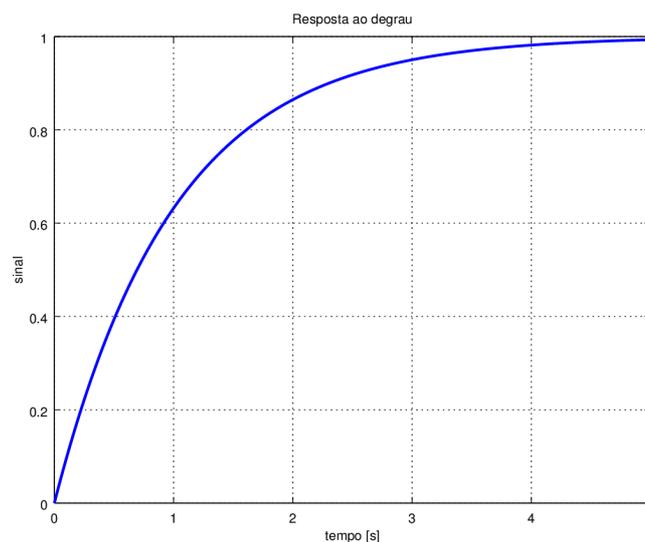


Figura 3.2: Resposta de uma função de primeira ordem ao degrau

A resposta do sistema real não é exatamente como a curva mostrada na Figura 3.2. O ideal seria aplicar um degrau no fluxo gerado pelas bombas, mas não há sensor de fluxo nesta planta. Ao aplicar um degrau no sinal de tensão das bombas, um fluxo proporcional é produzido, entretanto este fluxo está em malha aberta e não é constante. Isso provoca ruídos e distúrbios no sinal de nível dos tanques, e é preciso fazer um ajuste de curva para obter o modelo de 1ª ordem correspondente. Enquanto é aplicado o degrau no sinal de tensão de uma bomba, a outra bomba mantém o fluxo estacionário constante por meio de uma malha de controle fechada, mantendo o nível de um dos tanques constante. Isso por que os atuadores são de baixa qualidade, e uma tensão constante na entrada da bomba não garante um fluxo constante de saída. Conseqüentemente, as curvas de resposta ao degrau não fornecem informações tão confiáveis, e erros de modelagem, como ganho e constante de tempo, podem ocorrer.

3.2.2.1 Ajuste de Curva

Aqui será apresentada a metodologia para a obtenção dos parâmetros das funções de transferência a partir dos gráficos de resposta ao degrau do sistema real, [9], [10]. Como explicado anteriormente, os sinais medidos estão sujeitos a distúrbios e ruídos, e é necessário um ajuste de curvas para obter a melhor representação do sistema real em funções de transferência. Como exemplo, obtém-se o modelo para representar a variação do nível do tanque 4 em função do sinal de tensão aplicado à bomba 1. A resposta ao degrau é mostrada na Figura 3.3.

A resposta de uma função de transferência de $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$ a um degrau não unitário D é a curva $g(t)$, com a representação matemática mostrada abaixo. K é o ganho da função, proporcional ao valor de assentamento, M . Tem-se que $M = DK$. Para obter τ é preciso aplicar a função logarítmica natural para isolá-lo, como mostrado abaixo. Após as operações, espera-se obter uma reta com inclinação negativa igual a $\frac{-1}{\tau}$.

$$\begin{aligned} g(t) &= M(1 - e^{(\frac{-t}{\tau})}) \\ M - g(t) &= M e^{(\frac{-t}{\tau})} \\ \ln(M - g(t)) &= \ln(M) + \frac{-1}{\tau}t \end{aligned}$$

A Figura 3.3 mostra a resposta do nível do tanque 4 a um degrau de excitação de 0.15% no sinal de tensão da bomba 1. As mesmas operações de ajuste de curva são realizadas para obter os parâmetros do modelo de 1ª ordem correspondente. A regressão linear é aplicada com o método dos mínimos quadrados, como mostrado na Figura 3.5. Uma comparação entre a resposta ao degrau do sistema real e do modelo é mostrado na Figura 3.6. O ganho da função de transferência é 11.67, ou seja, se a tensão variar 1%, o nível do tanque 4 variará 11.67 cm. A constante de tempo é igual a 276.5 segundos.

De modo semelhante, para determinar as funções de transferência $G_{13}(s)$ e $G_{24}(s)$ foram aplicados degraus nas referências dos níveis dos tanques 1 e 2, que estão em malha fechada, e as respostas dos níveis dos tanques 3 e 4 foram modeladas por funções de transferência da 1ª ordem. O mesmo método de ajuste de curva foi aplicado. O tanque 2 saiu do estado estacionário $\bar{h}_2 = 8 \text{ cm}$ para $h_2 = 10 \text{ cm}$, ou seja, um degrau de 2 cm.

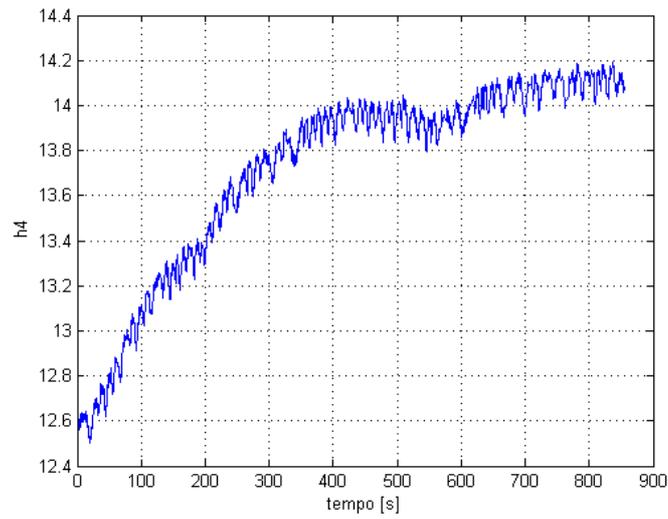


Figura 3.3: Resposta do nível do tanque 4 ao degrau de excitação na bomba 1

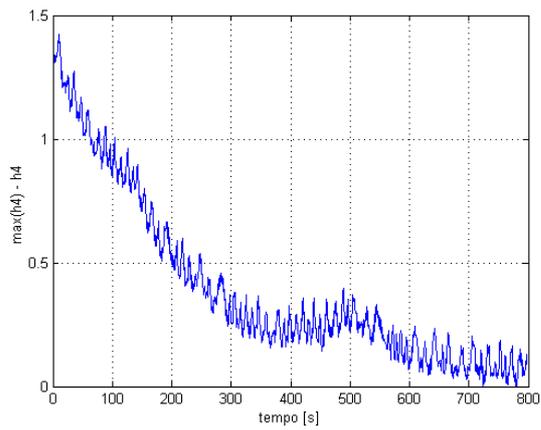


Figura 3.4: Resposta do nível do tanque 4 valor estacionário - sinal medido

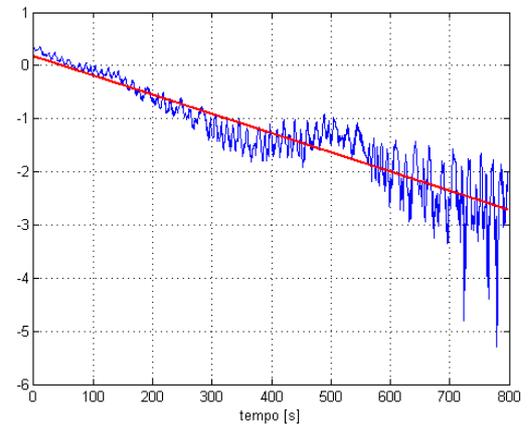


Figura 3.5: Logaritmo e regressão linear dos dados da Figura 3.4

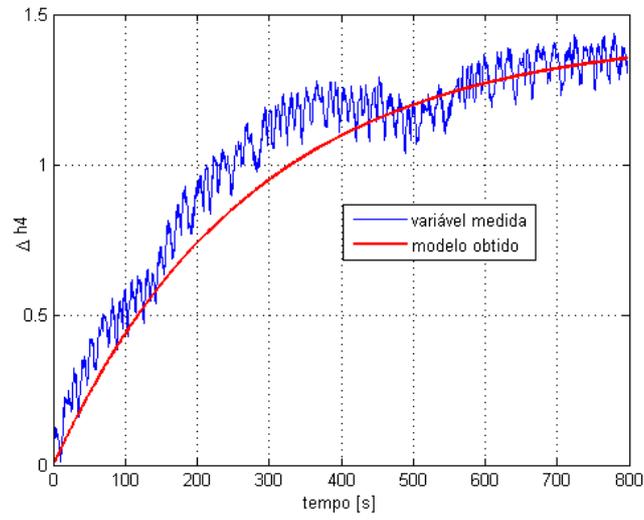


Figura 3.6: Resposta do nível do tanque 4 a um degrau no sinal da bomba 1 e modelo obtido

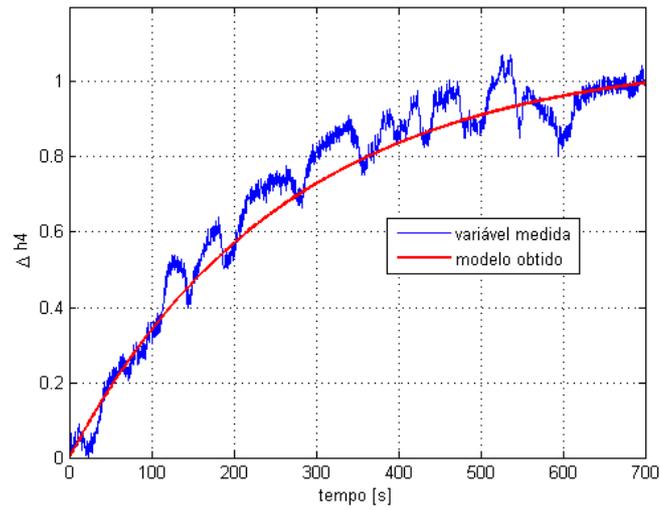


Figura 3.7: Resposta do nível do tanque 4 a um degrau no nível do tanque 2 e modelo obtido

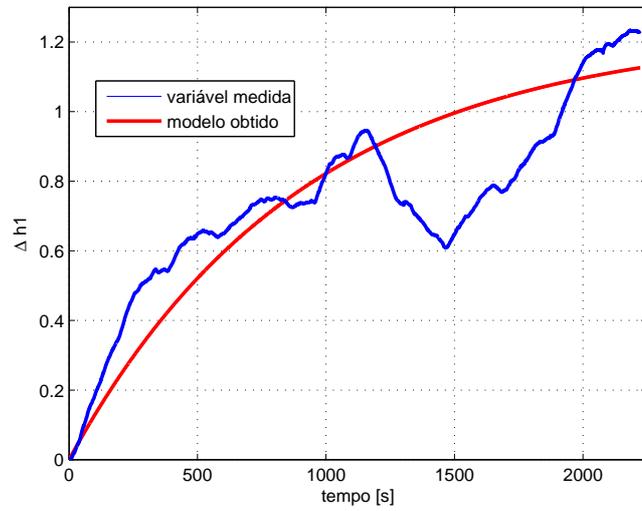


Figura 3.8: Resposta do nível do tanque 1 ao degrau de excitação na bomba 1 e modelo obtido

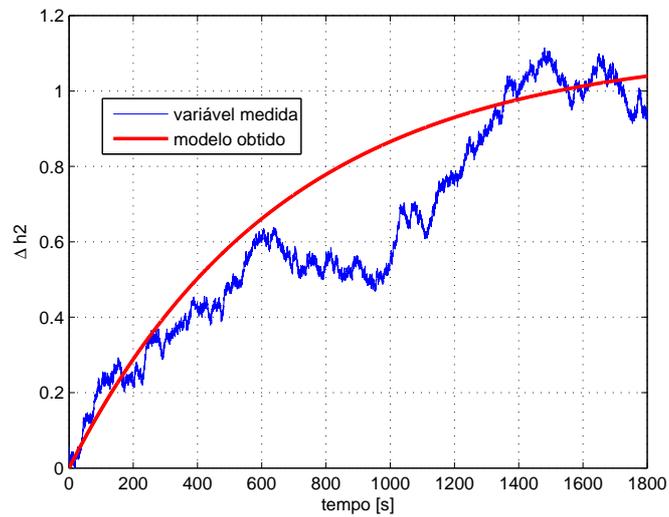


Figura 3.9: Resposta do nível do tanque 2 ao degrau de excitação na bomba 2 e modelo obtido

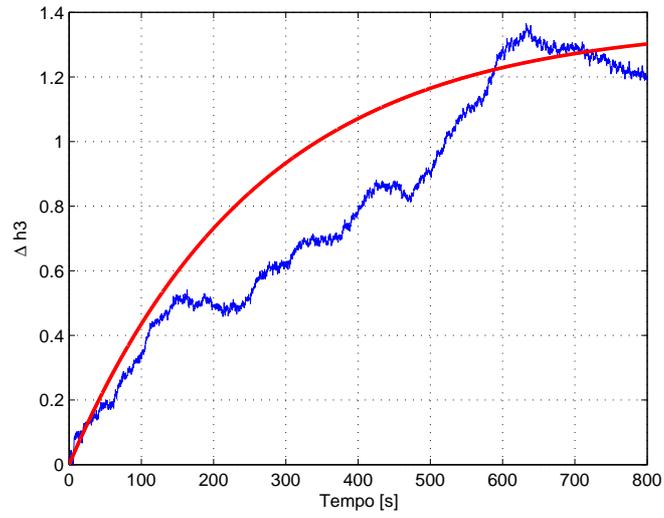


Figura 3.10: Resposta do nível do tanque 3 ao degrau de excitação na bomba 2 e modelo obtido

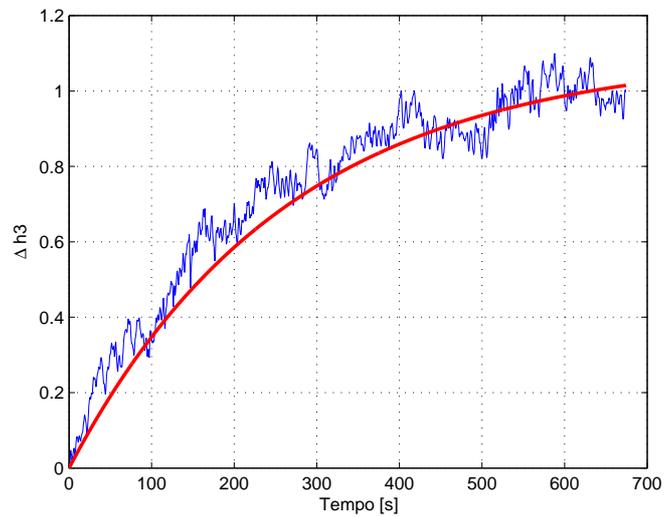


Figura 3.11: Resposta do nível do tanque 3 a um degrau no nível do tanque 1 e modelo obtido

Verifica-se ruído nos sinais medidos, apesar dos filtros implementados no cartão de entrada. O ruído é causado principalmente pelas bombas, que não geram um fluxo de água constante em malha aberta.

A tabela 3.1 mostra os parâmetros das funções de transferência do sistema completo, com base no diagrama de blocos mostrado na Figura 3.1. O mesmo procedimento de ajuste de curvas foi aplicado nas respostas ao degrau, partindo do estado estacionário. Os degraus aplicados foram: 0.1% de tensão em v_1 e v_2 para gerar as curvas de resposta dos níveis h_1 e h_2 , e 0.15% de tensão nas duas bombas para as curvas de h_3 e h_4 . Com o controle em malha fechada, foi aplicado um degrau de 2 cm em h_1 e 2 cm em h_2 para determinar as dinâmicas dos tanques inferiores em função da variação do nível dos superiores. Para $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$ e $G_4(s)$, ganho K representa a variação de nível dos tanques (cm) em função da variação de 1% do sinal de tensão enviado às bombas (equivalente a 50 mV). Para $G_{13}(s)$ e $G_{24}(s)$, o ganho K representa a variação de nível dos tanques inferiores (cm) em função da variação do nível dos tanques superiores (cm). A constante de tempo τ representa o tempo necessário, em segundos, para o modelo atingir 63.2% do valor de assentamento de uma excitação tipo degrau. Todas as funções de transferência são de 1ª ordem, $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$, pois não é verificada nenhuma dinâmica de ordem superior nas curvas de resposta ao degrau. Acredita-se que as oscilações medidas são provenientes do comportamento não constante do sistema em malha aberta.

Tabela 3.1: Parâmetros das funções de transferência

Função de Transferência	Ganho K	Constante de Tempo τ
$G_1(s)$	13.17	823
$G_2(s)$	12.92	849
$G_3(s)$	10.65	282
$G_4(s)$	11.67	276
$G_{13}(s)$	0.56	277
$G_{24}(s)$	0.54	264

3.3 Controle

São aplicados métodos de controle clássico para o controle de nível dos tanques inferiores, h_3 e h_4 . O valor lido pelos sensores de nível é comparado com um valor de referência, gerando um sinal de erro. O controlador atua sobre as bombas com o fim de minimizar o erro, ou seja, fazer com que o valor lido pelo sensor seja o mais próximo da referência. Os controladores utilizados são do tipo PI (Proporcional Integral), muito utilizados para controle de nível na indústria, e para diversas outras aplicações [12].

A primeira estratégia é a mais simples: consiste em fazer duas malhas fechadas de controle desacopladas e independentes, um controlador PI atuando sobre a bomba 2 a fim de controlar o nível h_3 e outro controlador PI atuando sobre a bomba 1 para controlar o nível h_4 . A segunda estratégia é baseada na primeira: além dos controladores PI supracitados, usa uma técnica de desacoplamento para diminuir a interferência entre as malhas independentes.

3.3.1 Controlador PI

O controle do sistema é baseado no controlador PI (Proporcional Integral). É um dos controladores mais utilizados na indústria, pois são facilmente ajustáveis e muitas técnicas de sintonia foram desenvolvidas e estão consolidadas na literatura. Uma grande vantagem é a generalidade, possibilidade de aplicação na maioria dos sistemas de controle. A equação 3.17 define a função de transferência base do controlador PI utilizado neste projeto.

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (3.17)$$

3.3.1.1 *Windup*

De acordo com Smith [13], o problema de *windup* pode ocorrer sempre que há um canal integral no controlador. Quando o atuador está saturado e o erro permanece, o canal integral continua incrementando, e pode ser solicitado que o atuador aplique um sinal fora dos limites de operação. Somente garantir que o atuador não aplique um sinal fora da faixa de operação não resolve o problema totalmente. Quando é solicitado que o atuador diminua o sinal aplicado, por exemplo, mas canal integral está fora dos limites, o sinal diminuirá a partir do ponto que o controlador acha que está, e isso causa um tempo morto no controle do sistema.

Os blocos PI utilizados neste projeto utilizam mecanismos que evitam este problema. O canal integral é limitado quando o atuador está saturado. Os limites inferior e superior de operação das bombas é definido no próprio bloco do controlador.

3.3.1.2 Sintonia

Visto que as bombas só podem injetar água nos tanques, e não podem retirar, não é desejável que ocorra muito sobrevalor, ou seja, que o nível não ultrapasse muito o valor de referência.

Pois quando o nível ultrapassa o valor de referência, é necessário esperar que o nível diminua, dependendo somente da força da gravidade, que ocorre lentamente. Com isso em mente, um dos métodos de sintonia de controladores PI e PID (Proporcional Integral Derivativo) mais consolidados da literatura, o método Ziegler-Nichols, não é adequado para este problema, pois é conhecido por gerar um sobrevalor de cerca de 50% na variável objetivo, de acordo com Smith [13]. É necessário que a sintonia realizada gere um controlador que seja capaz de rejeitar distúrbios rapidamente e que possa realizar uma mudança de referência sem muito sobrevalor.

Para a sintonia dos controladores PI, é utilizado o método SIMC (*Skogestad IMC, ou Skogestad Internal Model Control*), desenvolvido por Skogestad em 2001 [14]. Neste método obtém-se as constantes de ajuste do controlador com base na função de transferência do sistema em malha aberta. Deseja-se que a resposta ao degrau do sistema em malha fechada se assemelhe à de um sistema de primeira ordem: $\frac{1}{\tau_c s + 1}$. O ganho é unitário, pois o sistema em malha fechada segue a referência, e a constante de tempo de resposta τ_c é um parâmetro escolhido. Assume-se que o sistema em malha aberta não tem tempo morto, ou seja, não existe um intervalo de tempo entre o degrau da bomba e o momento em que o sistema reage. Da mesma maneira, assume-se que o sistema controlado também não apresentará tempo morto ($\theta = 0$). A tabela 3.2 apresenta o algoritmo de sintonia do método SIMC para um processo de primeira ordem, de acordo com Campos [15], página 71. O controlador utilizado é descrito na equação 3.17.

Tabela 3.2: Sintonia do controlador PI pelo método SIMC (com τ_c como um parâmetro de sintonia)

Função de transferência em malha aberta	K_c	τ_i
$K \frac{e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\tau_c + \theta}$	$\min\{\tau, 4(\tau_c + \theta)\}$
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K \tau_c}$	$\min\{\tau, 4 \tau_c\}$

O método SIMC gera controladores robustos. O ajuste dos parâmetros é simples, depende apenas de τ_c . Um controlador com τ_c pequeno é mais rápido, mas perde em estabilidade e apresenta maior sobrevalor a um degrau na referência. Com τ_c grande, o controle é lento, porém mais estável e robusto. Alguns controladores foram criados variando o parâmetro τ_c , e o controlador escolhido apresenta o menor τ_c possível com sobrevalor menor que 10% para um degrau na referência dos níveis dos tanques inferiores, h_3 e h_4 . Para um degrau de 2 cm na referência, o sobrevalor deve ser menor que 2 mm. Os controladores foram obtidos a partir das funções de transferência $G_3(s)$ e $G_4(s)$ para controlar os níveis h_3 e h_4 , respectivamente. A constante de tempo do sistema controlado escolhido é $\tau_c = 2$ segundos. É preciso fazer um ajuste das variáveis do controlador, pois o controlador PI do CLP é da forma independente [16], como mostra a equação 3.18.

$$C_{CLP}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} K_p &= K_c \\ K_i &= \frac{K_c}{\tau_i} \end{aligned}$$

O nível h_3 é controlado através do fluxo da bomba 2, que entra diretamente no tanque 3. Isto é, atua-se sobre o sinal enviado à bomba 2 (v_2) para controlar h_3 . De forma semelhante, atua-se sobre v_1 para controlar h_4 . A tabela 3.3 apresenta os parâmetros dos controladores PI utilizados no projeto de controle do CLP. As variáveis foram ajustadas e o controlador em questão se comporta conforme a equação 3.18. Os controladores com estes parâmetros são utilizados na primeira estratégia de controle, controle descentralizado.

Tabela 3.3: Controladores PI pelo método SIMC, $\tau_c = 2$ segundos, controle descentralizado

Variável do processo	Variável manipulada	K_p	K_i
h_4	v_1	12.19	1.52
h_3	v_2	13.23	1.65

As válvulas foram ajustada para o sistema operar na configuração de fase mínima. As proporções de alimentação dos tanques inferiores são: $\gamma_3 = 0.592$ e $\gamma_4 = 0.622$. Nessa configuração o sistema é de fase mínima, e as bombas alimentam diretamente os tanques inferiores com maior ganho que os superiores. O ponto de operação do sistema é: $h_3 = 12 \text{ cm}$, $h_4 = 12 \text{ cm}$, $h_1 = 8 \text{ cm}$ e $h_2 = 8 \text{ cm}$. Logo, as bombas escolhidas para o controle dos tanques inferiores são as que alimentam diretamente cada tanque, como mostrado na tabela 3.3.

3.3.2 Estratégia de controle descentralizado

Esta é a estratégia mais simples para controlar os níveis dos tanques inferiores. Consiste em fazer duas malhas de controle independentes, uma para controlar o nível do tanque 3 e outra para controlar o nível do tanque 4. O diagrama de blocos simplificado desta estratégia de controle é mostrado na Figura 3.12. As bomba 1, controlada por v_1 , alimenta diretamente o tanque 4, e a bomba 2 alimenta o tanque 3. Os controladores C_1 e C_2 são controladores PI, pois geram bons resultados para o sistema em fase mínima, de acordo com Johansson [1]. Os parâmetros de sintonia dos controladores são obtidos pelo método SIMC, e são mostrados na tabela 3.3.

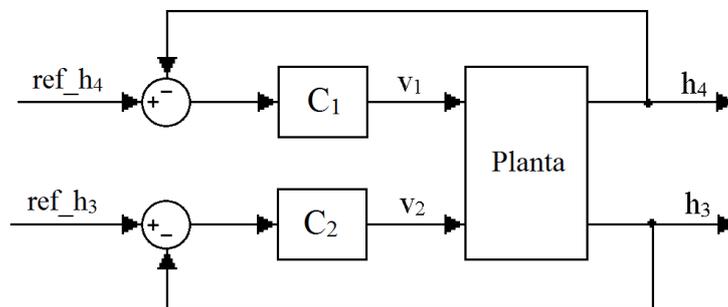


Figura 3.12: Diagrama de blocos da estratégia de controle descentralizado

3.3.3 Estratégia de controle desacoplador

Esta estratégia tem o objetivo de eliminar a interferência de uma malha de controle sobre a outra, seguindo a metodologia de Vázquez [11]. São propostos desacopladores $D_{24}(s)$ e $D_{13}(s)$ de modo que o nível do tanque 4, h_4 , só dependa do sinal u_1 e h_3 só dependa de u_2 . A Figura 3.13 mostra o diagrama de blocos desta estratégia em malha aberta.

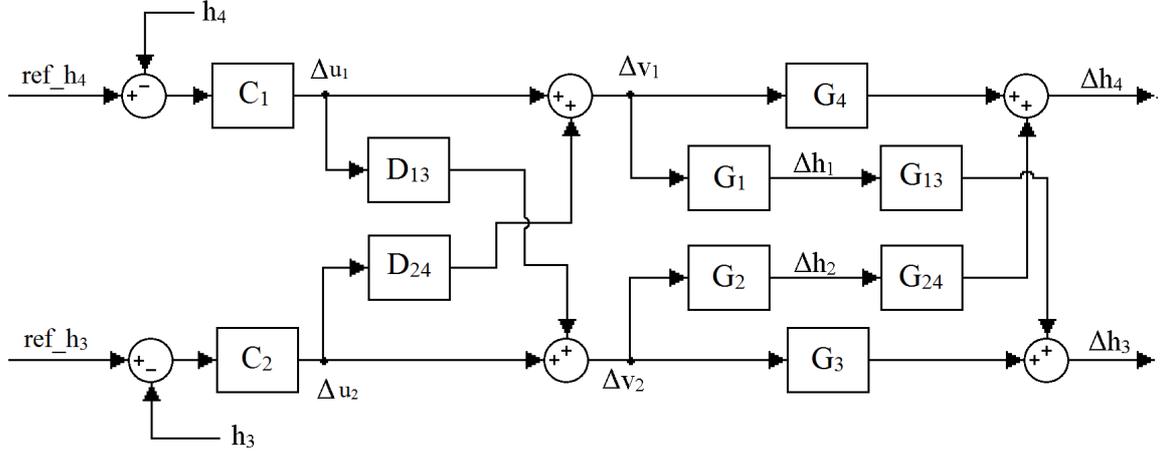


Figura 3.13: Diagrama de blocos da estratégia de controle desacoplador

As equações abaixo descrevem o comportamento do sistema em malha aberta:

$$\begin{aligned}\Delta h_4(s) &= G_4(s) \left(\Delta u_1(s) + D_{24}(s) \Delta u_2(s) \right) + G_2(s) G_{24}(s) \left(\Delta u_2(s) + D_{13}(s) \Delta u_1(s) \right) \\ \Delta h_3(s) &= G_3(s) \left(\Delta u_2(s) + D_{13}(s) \Delta u_1(s) \right) + G_1(s) G_{13}(s) \left(\Delta u_1(s) + D_{24}(s) \Delta u_2(s) \right)\end{aligned}$$

Para que o sistema esteja desacoplado, ou seja, Δh_4 dependa somente de Δu_1 e Δh_3 dependa somente de Δu_2 , tem-se que $D_{24}(s) = -\frac{G_2(s)G_{24}(s)}{G_4(s)}$ e $D_{13}(s) = -\frac{G_1(s)G_{13}(s)}{G_3(s)}$. Logo, o sistema tem as seguintes saídas:

$$\begin{aligned}\Delta h_4(s) &= \left(G_4(s) - \frac{G_1(s)G_{13}(s)G_2(s)G_{24}(s)}{G_4(s)} \right) \Delta u_1(s) \\ \Delta h_3(s) &= \left(G_3(s) - \frac{G_2(s)G_{24}(s)G_1(s)G_{13}(s)}{G_3(s)} \right) \Delta u_2(s)\end{aligned}$$

Os blocos desacopladores $D_{24}(s)$ e $D_{13}(s)$ são funções de transferência de 2ª ordem, contudo não há funções disponíveis na linguagem de programação do CLP para a sua implementação. Dessa forma, aproximou-se $D_{24}(s)$ e $D_{13}(s)$ por funções de transferência de 1ª ordem calculando-se o ganho estático e a constante de tempo por meio de divisão polinomial. As Figuras 3.14 e 3.15 mostram a resposta ao degrau das funções $D_{13}(s)$ e $D_{24}(s)$ comparadas à resposta das funções de 1ª ordem utilizadas para a aproximação.

Os blocos desacopladores são implementados na lógica do CLP por um bloco de ganho (MUL) em série com um filtro avanço-atraso (*lead-lag filter*) de primeira ordem (LDL2). A estratégia

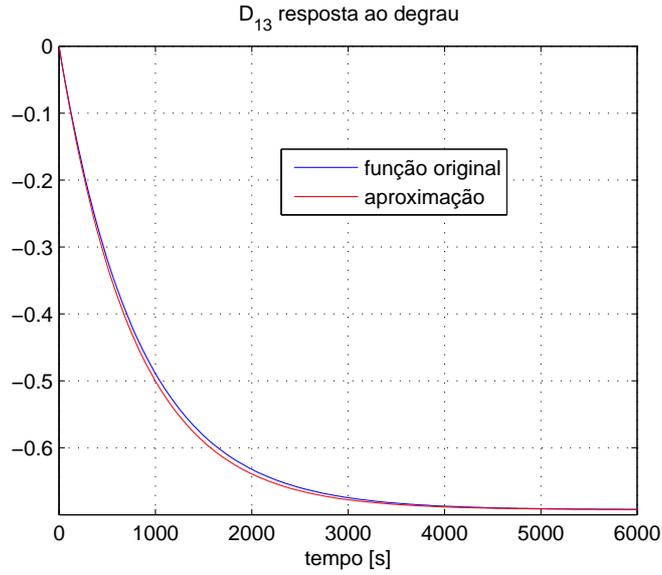


Figura 3.14: Resposta ao degrau unitário do bloco desacoplador D_{13} e aproximação

desacopladora utiliza também blocos de soma (ADD) e saturação de sinal (HLL). A fórmula do filtro avanço-atraso é mostrada na equação 3.19. As fórmulas que descrevem o funcionamento dos blocos e suas propriedades são fornecidas pelo fabricante, [17], [16].

$$G_f(s) = \frac{\frac{s}{w_{lead}} + 1}{\frac{s}{w_{lag}} + 1} \quad (3.19)$$

em que w_{lead} é a frequência angular de avanço e w_{lag} a de atraso, ambas em $\frac{rad}{s}$. A função de transferência aproximada não apresenta nenhum avanço, somente atraso, então faz-se w_{lead} muito grande, de modo que seja desprezível. A tabela 3.4 mostra os parâmetros dos blocos desacopladores utilizados.

Tabela 3.4: Blocos desacopladores, controle desacoplador

Desacoplador	Ganho	w_{lead}	w_{lag}
$D_{24}(s) = -\frac{0.5978}{745s+1}$	-0.5978	99999	0.0002136
$D_{13}(s) = -\frac{0.6925}{781s+1}$	-0.6925	99999	0.0002038

Tabela 3.5: Controladores PI pelo método SIMC, $\tau_c = 2$ segundos, controle desacoplador

Variável do processo	Variável manipulada	K_p	K_i	Atuador
h_4	u_1	18.5930	2.3241	bomba 1
h_3	u_2	24.2330	3.0291	bomba 2

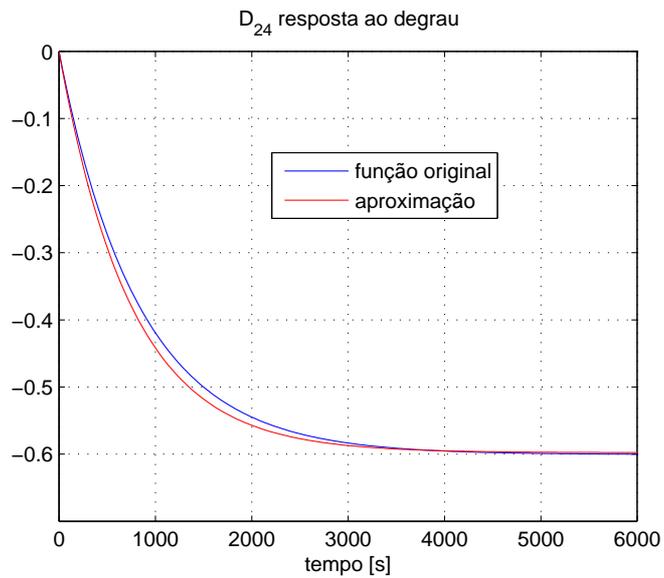


Figura 3.15: Resposta ao degrau unitário do bloco desacoplador D_{24} e aproximação

Os controladores são C_1 e C_2 também são PI. O mesmo método de obtenção de modelo de 1ª ordem foi aplicado para as funções de transferência $\frac{\Delta h_4(s)}{\Delta u_1(s)}$ e $\frac{\Delta h_3(s)}{\Delta u_2(s)}$, calcula-se o ganho em malha aberta e realiza-se uma divisão polinomial para determinar a constante de tempo dominante. Sintonizam as funções de transferência das saídas do sistema pelo método SIMC com $\tau_c = 2$ segundos. A tabela 3.5 apresenta os parâmetros dos controladores obtidos.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Neste capítulo são implementadas as estratégias de controle e mostrados os resultados obtidos. As condições de experimentação dependem principalmente das configurações dos softwares. Os esquemas de ligação e uma descrição mais detalhada dos componentes do sistema são mostrados no capítulo 2.

4.2 Configurações dos softwares

São apresentadas as configurações básicas e resumidas dos softwares utilizados no projeto. Com todos os softwares listados na seção 2.3 instalados corretamente, as seguintes configurações, em ordem, são utilizadas para a operação do sistema de controle:

4.2.1 VMware Workstation

Instalado no sistema operacional hospedeiro, é utilizado para emular uma máquina virtual com sistema operacional Windows XP. Nas suas configurações de rede, seguir estes passos: Adaptador de rede (*Network Adapter*) conectado e conexão de rede (*Network Connection*) em ponte (*Bridged*), como mostrado na Figura 4.1. Isso é necessário para haver comunicação da máquina virtual com o CLP por meio de cabo ethernet.

4.2.2 RSLinx

Instalado dentro da máquina virtual com sistema operacional Windows XP, os cartões do CLP devem ser corretamente configurados, principalmente o cartão de comunicação. Na configuração do cartão de comunicação é preciso declarar os endereços de IP do CLP, máquina virtual e qualquer outro computador utilizado para se comunicar com o CLP. A comunicação deve estar em funcionamento antes de prosseguir para a programação do CLP.

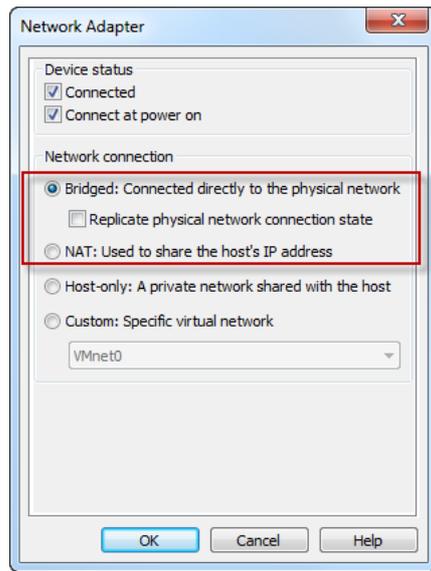


Figura 4.1: Configuração de rede do software VMware Workstation

4.2.3 RSLogix 5000

Também instalado na máquina virtual. É o programa utilizado para criar a lógica de operação do CLP. Antes de começar a desenvolver a lógica propriamente dita, é necessário configurar alguns detalhes, seguindo a ordem apresentada a seguir:

4.2.3.1 Configurações do Cartão de Entrada 1756-IF8

Utilizado para receber os sinais dos sensores de nível. São sinais de tensão no modo terminação única (*single-ended*). É preciso definir o tipo e faixa do sinal lido pelo cartão. Neste caso variam de 0 a 5 Volts. Os parâmetros de calibração, seguindo a tabela 2.1, são colocados no campo *Scaling*, de forma que os valores de tensão lidos são convertidos para o nível correspondente em centímetros. A tabela 4.1 apresenta os parâmetros utilizados neste projeto, seguindo a nomenclatura em inglês do software.

Tabela 4.1: Propriedades dos canais do cartão de entrada do CLP

RPI	Input Range	Sensor Offset	Digital Filter	RTS	Module Filter (-3 dB)
25 ms	0 V to 5 V	0.0	1000 ms	100 ms	60 Hz

Este sensor faz amostragens com intervalos constantes de 100 ms (RTS, ou *real time sample*), se comunica com o CLP por meio de troca de pacotes de dados com intervalos de 25 ms (*Request Package Interval*). O RPI é o intervalo de comunicação do cartão com o CPU. O cartão não tem memória interna, então se o intervalo RPI for maior que o RTS alguns dados medidos não serão entregues para o programa controlador. Recomenda-se que RPI seja menor que a metade de RTS.

4.2.3.2 Configurações do Cartão de Saída 1756-OF8

Este cartão gera sinais de tensão DC para as bombas, a fim de controlar o fluxo de água que entra nos tanques. Foi configurado para operar no modo de terminação única (*single-ended*). O intervalo de comunicação RPI também é 25 ms. Não foi definido nenhum *offset* para as bombas, e a calibração no campo *Scaling* é: $0 V = 0\%$ e $5 V = 100\%$. As bombas têm uma zona morta, mas o problema é contornado na configuração dos blocos PID. É definido um *offset*, e o controlador sempre gera um sinal dentro da faixa de operação da bomba, pois tem um mecanismo de *anti-windup*.

4.2.3.3 Configurações do Programa

É preciso definir os nomes e atributos das variáveis utilizadas, isso é feito no campo *Controller Tags*, e todos os sinais de entrada e saída são do tipo REAL. No campo *Main Task* é escolhido o tipo de programa, neste caso *Periodic* e definido o intervalo de execução do programa, *100ms*.

4.2.3.4 Configurações dos Controladores PI

O mesmo bloco é utilizado para implementar o controlador PI nas duas estratégias. O bloco PID, lógica *ladder*. Neste bloco são colocados os ganhos K_p e K_i de acordo com as tabelas 3.3 e 3.5 para as estratégias de controle descentralizado e desacoplado, respectivamente. O ganho K_d é igual a zero para todos os controladores.

Este controlador tem uma nomenclatura própria de variáveis: PV (*Process Variable*) é a variável medida, o nível de água do tanque; SP (*Set Point*) é a referência, valor desejado para o nível; e CV (*Controlled Variable*), o sinal de saída enviado para as bombas. O controlador tem um mecanismo de *anti-windup* integrado, interrompendo o canal integral quando a bomba está saturada. No próprio bloco do controlador são definidas as tensões máxima e mínima de operação das bombas. O mecanismo de *anti-windup* é utilizado para garantir que o sinal de tensão aplicado esteja dentro da faixa de operação das bombas, evitando a zona morta. A bomba 1 é mais forte que a bomba 2, mas o sinal de tensão máxima é reduzida para que ambas tenham comportamento similar. A tabela 4.2 apresenta os dados de configuração dos controladores de ambas estratégias.

Tabela 4.2: Configurações dos blocos PID

CV	PID Equation	Control Action	Loop Update Time	CV High Limit	CV Low Limit
v_1	Independent	SP - PV	0.1 sec	70%	18%
v_2	Independent	SP - PV	0.1 sec	100%	25%

4.2.3.5 Registro de Dados

Dentro do programa RSLogix 5000 é possível coletar, registrar e exportar os sinais recebidos e enviados para a bancada. Usando o comando *Trend*, as variáveis são escolhidas e seus valores podem ser visualizadas em tempo real. Em seguida são exportadas no formato *.csv* e os gráficos podem ser gerados em outro programa a escolha, como Excel ou Matlab. Esta foi a metodologia utilizada para gerar todos os gráficos neste projeto.

4.3 Controle Descentralizado

Estratégia apresentada no capítulo anterior. Consiste em utilizar dois controladores PI para controlar os níveis dos tanques inferiores. A Figura 4.2 mostra a estratégia implementada no RSLogix 5000. São mostradas duas janelas: a do programa principal com os blocos PID na lógica *ladder* e a janela *Trend* com os gráficos das curvas dos níveis dos tanques inferiores e suas referências.

Para o controlador do tanque 4 tem-se que: $PV=h_4$ (*Process Variable*, ou variável do processo), $CV=v_1$ (*Controlled Variable*, ou variável do controlada) e SP é modificado no próprio bloco PID (*Set Point*, ou referência). De forma análoga, para o controlador do tanque 3 tem-se $PV=h_3$ e $CV=v_2$. Os parâmetros dos controladores são mostrados na tabela 3.3, e as configurações dos blocos PID na tabela 4.2.

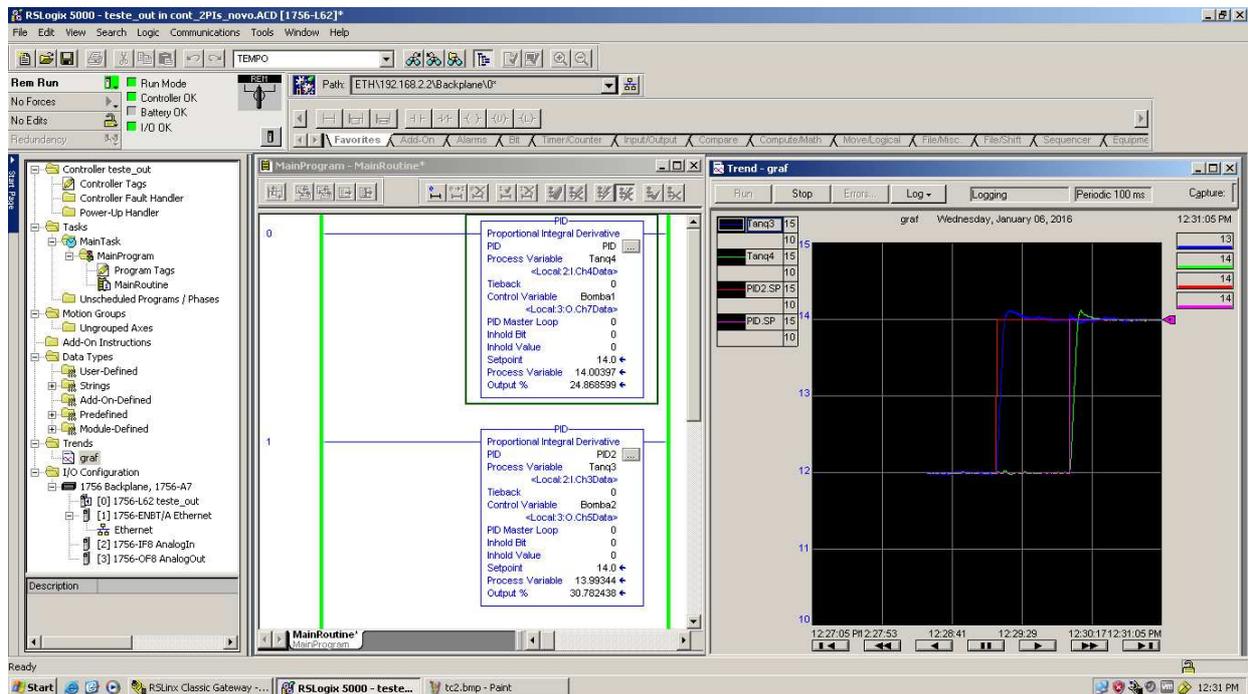


Figura 4.2: Estratégia de controle descentralizado no RSLogix 5000

4.4 Controle Desacoplador

Esta estratégia também utiliza controladores PI, porém utiliza também blocos desacopladores que tentam diminuir a interferência que uma malha de controle causa na outra. Os controladores PI são similares aos anteriores, a diferença principal é que o sinal de saída dos controladores não excita as bombas diretamente, são variáveis internas do programa. A estratégia desacopladora foi implementada na lógica de diagramas de funções de blocos (*Function Block Diagram*), e os controladores PI em lógica *ladder*. A Figura 4.3 mostra uma página do controle desacoplador, e a Figura 4.4 os controladores. Há blocos de filtros e multiplicação para implementar os desacopladores, outros blocos para somar sinais, definir os limites de operação das bombas e comunicar com os controladores PI.

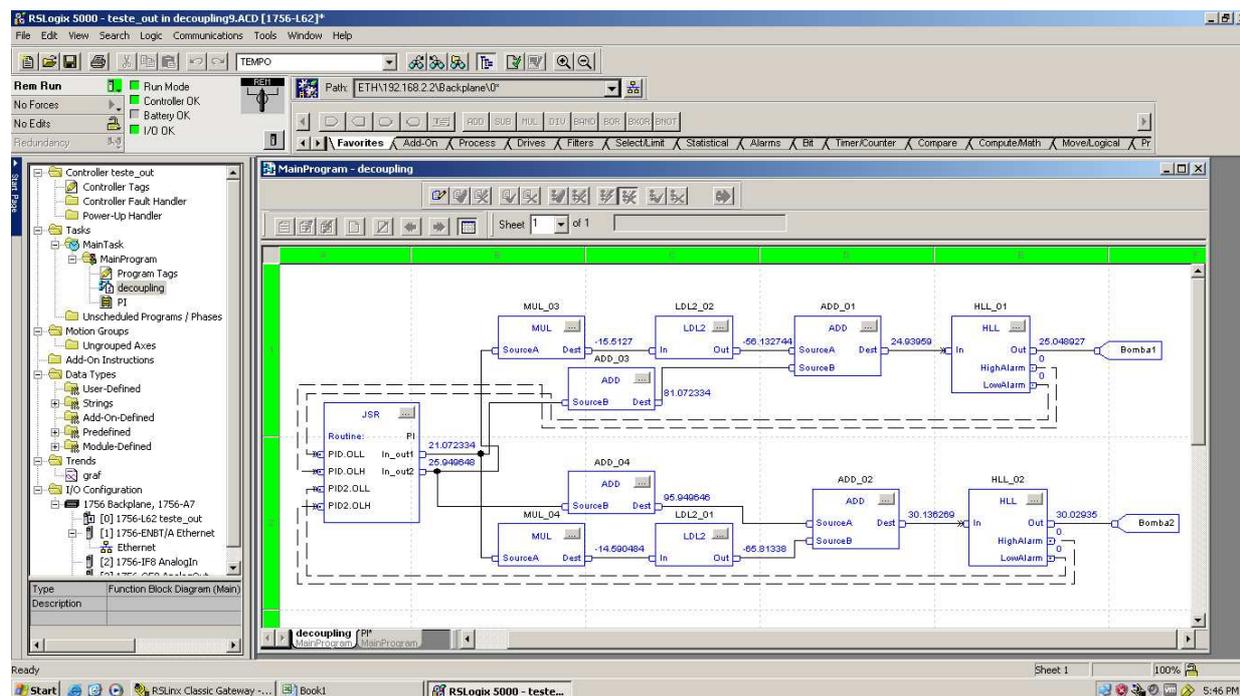


Figura 4.3: Estratégia de controle desacoplador no RSLogix 5000, funções de blocos

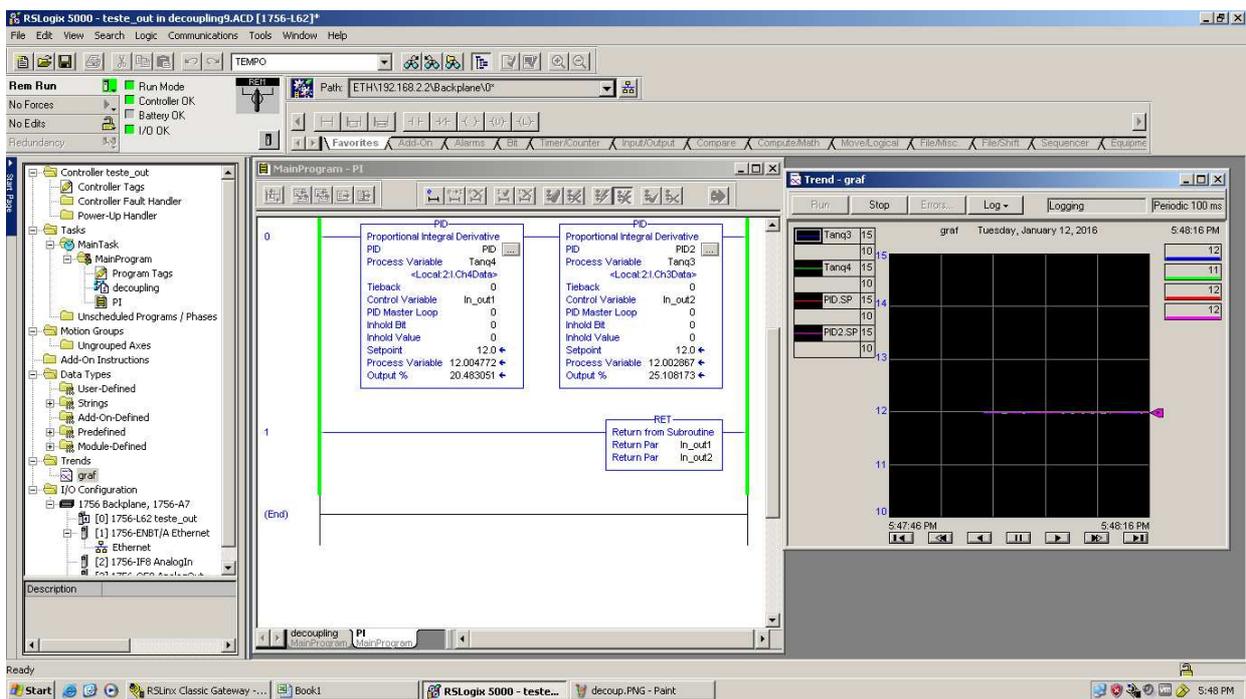


Figura 4.4: Estratégia de controle desacoplador no RSLogix 5000, lógica ladder

4.5 Resultados obtidos

Para verificar a eficácia das estratégias de controle descentralizado e desacoplador, foram aplicados degraus aos sinais de referência dos níveis e as curvas de resposta foram obtidas. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a resposta do níveis h_3 e h_4 , e suas referências, das estratégias descentralizadora e desacopladora, respectivamente. Em ambos os casos o sistema partiu do estado estacionário, verifica-se que os níveis h_3 e h_4 são iguais a 12 cm no instante $t = 0$ segundos. É aplicado um degrau de 2 cm na referência de h_4 no instante $t = 22$ segundos, aproximadamente. Pode-se ver que o nível h_4 acompanha a referência, mas apresenta um sobrevalor e causa um distúrbio em h_3 . Analogamente, é aplicado um degrau de 2 cm na referência de h_3 no instante $t = 64$ segundos, aproximadamente. O nível h_3 acompanha a referência, apresentando também um sobrevalor e causando um distúrbio em h_4 . Comparando as Figuras 4.5 e 4.6, mostrando a resposta do controle em malha fechada, com as Figuras 3.6 a 3.11, em que o sistema estava em malha aberta, percebe-se que o ruído nos níveis em malha aberta é muito superior ao ruído em malha fechada. Em malha aberta as bombas geram um fluxo irregular, não constante, mas os controladores implementados corrigem o sinal enviado às bombas rapidamente, fazendo com que a resposta em malha fechada apresente pouco ruído.

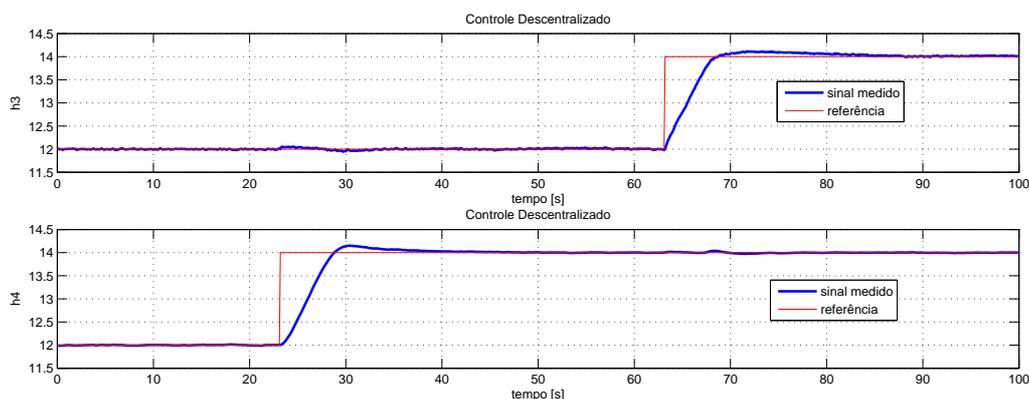


Figura 4.5: Respostas dos níveis dos tanques inferiores, controle descentralizado

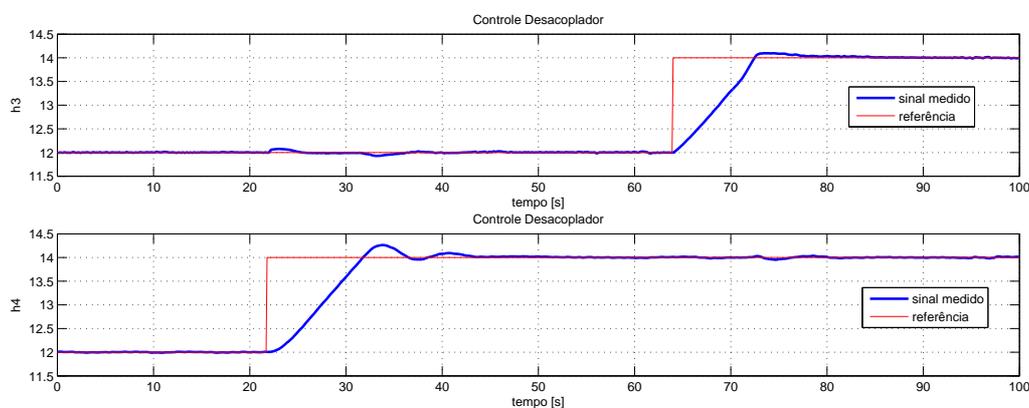


Figura 4.6: Respostas dos níveis dos tanques inferiores, controle desacoplador

4.6 Comparação de resultados

São obtidas métricas indicadoras de desempenho a partir dos resultados das estratégias de controle descentralizado, Figura 4.5, e controle desacoplador, Figura 4.6. As métricas são: sobrevalor, tempo de assentamento (critério 2%) e distúrbio. O sobrevalor é o quanto a variável ultrapassa o valor de referência quando é aplicado um degrau; O tempo de assentamento é o tempo mínimo, a partir do degrau, para que o erro seja inferior a 2% da amplitude do degrau; e o distúrbio causado é medido com a amplitude máxima do erro causado no nível do tanque quando é aplicado um degrau no sinal de referência do outro tanque. Estes indicadores são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Métricas de desempenho das estratégias de controle

Métrica	Unidade	Controle Descentralizado	Controle Desacoplador
sobrevalor de h_3	cm	0.12	0.10
sobrevalor de h_4	cm	0.15	0.26
distúrbio em h_3	cm	0.05	0.08
distúrbio em h_4	cm	0.04	0.05
tempo de assentamento de h_3	s	21.1	14.6
tempo de assentamento de h_4	s	14.4	20.7

Com base nos dados da tabela 4.3, verifica-se que o controle desacoplador gera menor sobrevalor em h_3 que o controle descentralizado, porém gera maior sobrevalor em h_4 . O distúrbio medido na estratégia desacopladora é maior para os dois níveis que na estratégia descentralizada. O tempo de assentamento das duas estratégias é similar, com h_4 estabilizando mais rápido que h_3 na estratégia descentralizada, e h_3 mais rápido que h_3 na estratégia desacopladora. Quando os níveis estão estáveis, o erro medido é inferior a 0.02 cm, nas duas estratégias, que é um resultado muito bom. Vale ressaltar que a configuração do sistema é de fase mínima. As proporções γ_3 e γ_4 são maiores que 0.5 e a maior parte do fluxo gerado pelas bombas não vai para os tanques superiores, responsáveis pelo distúrbio. De acordo com Johansson [1], controladores PI geram bons resultados para esta configuração, pois acoplamento das variáveis não é tão significativo. Caso o sistema fosse de fase não-mínima, provavelmente a estratégia desacopladora apresentaria melhores resultados que a descentralizada.

Outro fator importante é a modelagem do sistema, seção 3.2.2. Além de apresentar muito ruído, as curvas de resposta ao degrau mostram que as bombas não geram um fluxo de água constante com uma tensão de entrada constante. Flutuações do nível são observadas, principalmente com longos intervalos de tempo. Portanto, a determinação dos parâmetros das funções de transferência em malha aberta não é muito confiável, e a estratégia desacopladora, por ser mais complexa e depender mais dos parâmetros do sistema, é mais prejudicada que a estratégia descentralizada por causa da modelagem imprecisa. Uma maneira de melhorar a resposta é o ajuste empírico dos parâmetros do controlador, mas esta técnica não foi empregada neste projeto.

Capítulo 5

Conclusões

Uma bancada didática de quatro tanques acoplados foi o objeto de estudo deste trabalho. Um CLP foi utilizado para controlar os níveis de água dos tanques inferiores. O projeto apresenta também os softwares e os componentes utilizados para a comunicação e automação da bancada. A modelagem do sistema foi obtida a partir das curvas de resposta ao degrau dos atuadores. A partir das funções de transferência, duas estratégias de controle foram estudadas e aplicadas, ambas com o uso de controladores PI.

A primeira estratégia é descentralizada, consiste em fechar duas malhas de controle utilizando somente os controladores PI. A segunda estratégia é desacopladora, e tenta diminuir o acoplamento entre as malhas. Os testes mostram que a primeira estratégia resulta em com menor sobrevalor e menor distúrbio. A estratégia desacopladora não apresentou resultados tão bons por causa da modelagem imprecisa, e também porque o sistema não é tão acoplado, menos da metade do fluxo de água vai para os tanques superiores.

Comparando com o Matlab, a utilização do CLP implicou em maiores dificuldades de instalação e configuração inicial. Configurar os módulos e estabelecer a comunicação foi trabalhoso. O ambiente Simulink, do Matlab, oferece mais opções de blocos e funções úteis para o controle de processos que o RSLogix 5000, do CLP. Não foi possível implementar os blocos desacopladores tão facilmente na lógica do CLP, por exemplo, uma simplificação foi necessária. Entretanto, há muitas funções e possibilidades de desenvolver programas para o CLP, e ele apresenta diversas vantagens em relação ao Simulink. É possível configurar filtros e limites nos cartões de entrada e saída, além de proporcionar outras funcionalidades próprias, como alarmes, configuração de falta (falha do sistema), configuração em modo de programação, e funcionar sem conexão com o computador. O CLP é mais robusto e confiável, e é uma ótima oportunidade para os alunos da universidade aprenderem a operar este equipamento, que é muito utilizado em ambientes industriais.

5.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Este foi o primeiro trabalho com o CLP nesta bancada, muitos outros projetos com modificações e melhorias podem ser desenvolvidos. Algumas sugestões:

- Estabelecer comunicação OPC para aquisição de dados e possibilitar uma camada de controle avançado (otimização *PC-based*);
- Implementar estratégias de controle antecipatório para diminuir o distúrbio entre as malhas;
- Utilizar técnicas de controle ótimo, como o regulador linear quadrático (*linear quadratic regulator*, ou LQR), ou o controlador Gaussiano linear quadrático (LQG);
- Aplicar técnicas de controle robusto, ou técnicas de controle no espaço de estados, como controle por realimentação de estados;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JOHANSSON, K. H. The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. *Control Systems Technology*, 2000.
- [2] ROINILA, T.; VILKKO, M.; JAATINEN, A. Corrected mathematical model of quadruple tank process. *The International Federation of Automatic Control*, 2008.
- [3] GATZKE, E. P. et al. Model based control of a four-tank system. *Computers and Chemical Engineering*, 2000.
- [4] DORMIDO, S.; ESQUEMBRE, F. The quadruple-tank process: An interactive tool for control education. *European Control Conference*, 2003.
- [5] JOHANSSON, K. H. et al. Teaching multivariable control using the quadruple-tank process. *Decision and Control*, 1999.
- [6] MANUAL - ControlLogix System, [Online]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1756-um001_-en-p.pdf. Acessado em Dezembro de 2015.
- [7] 1756 ControlLogix Controllers, [Online]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/1756-td001_-en-p.pdf. Acessado em Dezembro de 2015.
- [8] MANUAL - ControlLogix Analog I/O Modules, [Online]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1756-um009_-en-p.pdf. Acessado em Dezembro de 2015.
- [9] GOODWIN, G.; PAYNE, R. *Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis*. Academic Press, 1977. (Developmental Psychology Series). ISBN 9780122897504. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=tu5QAAAAMAAJ>>.
- [10] LJUNG, L. *System Identification: Theory for the User*. Pearson Education, 1998. ISBN 9780132440530. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=fYSrk4wDKPsC>>.
- [11] VÁZQUEZ, F.; MORILLA, F. Centralized multivariable control by simplified decoupling. *Journal of Process Control*, 2012.
- [12] WANG, Y.-G.; SHAO, H.-H. Optimal tuning for pi controller. *Automatica*, 2000.

- [13] SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. *Princípios E Prática Do Controle Automático De Processo*. [S.l.]: LTC, 2008.
- [14] SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of Process Control*, 2003.
- [15] CAMPOS, M. M. de. *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, 2ªedição, 2011.
- [16] LOGIX5000 Controllers General Instructions Reference Manual, [Online]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1756-rm003_-en-p.pdf. Acessado em Dezembro de 2015.
- [17] LOGIX5000 Controllers Advanced Process Control and Drives Instructions, [Online]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1756-rm006_-en-p.pdf. Acessado em Dezembro de 2015.

ANEXOS

I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS



Figura I.1: Estratégia de controle descentralizado no software RSLogix 5000 - lógica *ladder*

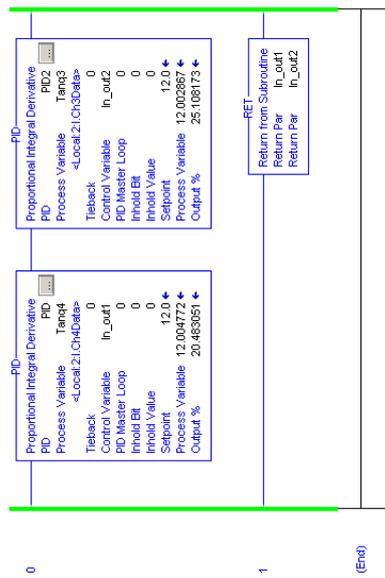


Figura I.2: Estratégia de controle desacoplador no software RSLogix 5000, página 2 - lógica *ladder*

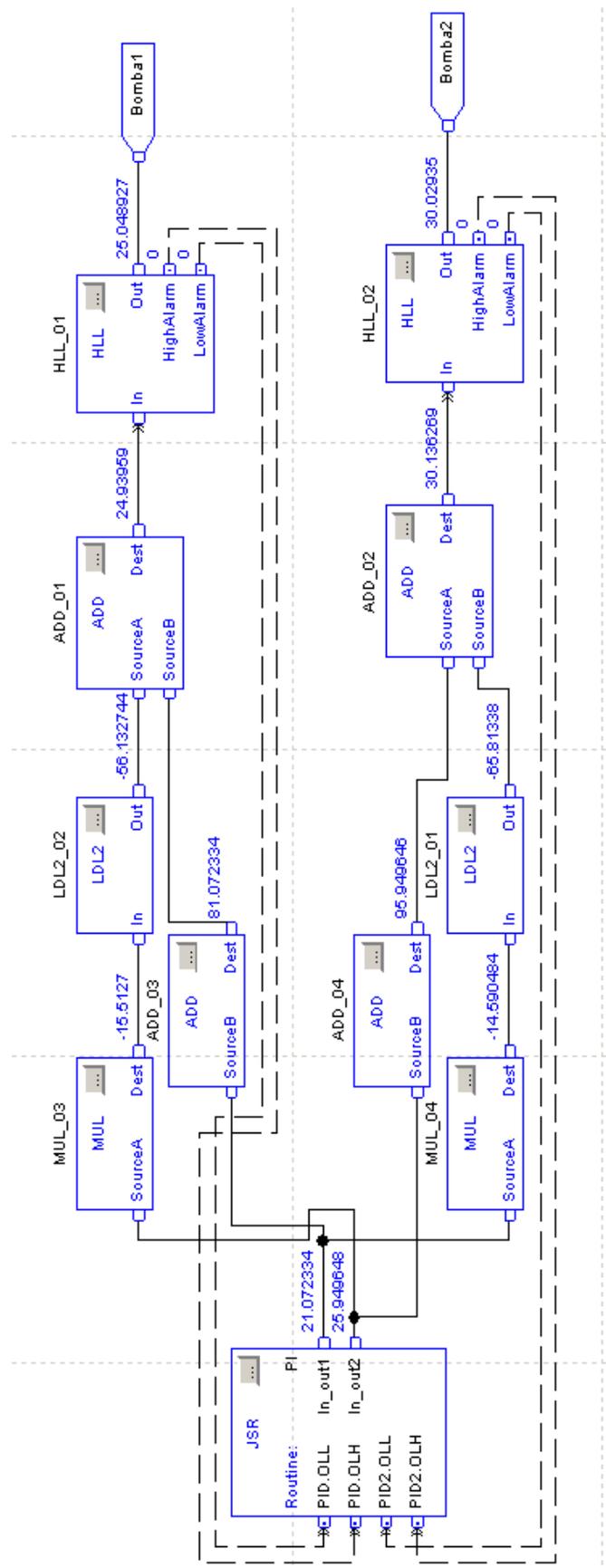


Figura I.3: Estratégia de controle desacoplador no software RSLogix 5000, página 1 - lógica de diagramas de funções de blocos

II. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

- `setup_tcc.m`: *script* do Matlab que carrega as constantes das funções de transferência em malha aberta e gera os parâmetros de sintonia dos controladores;
- `PI_tcc.m`: função do Matlab que calcula os parâmetros de sintonia de controladores PI segundo o método de Skogestad SIMC;
- `csv_array.m`: função do Matlab que gera os sinais medidos pelo CLP a partir do arquivo `.csv` gerado no RSLogix 5000;
- `regressão_ln_MA.m`: *script* do Matlab que realiza o ajuste de curva da resposta ao degrau. Gera os parâmetros do modelo de primeira ordem correspondente;
- `controle_descentralizado.ACD`: arquivo do RSLogix 5000 com a estratégia de controle descentralizada implementada;
- `controle_desacoplador.ACD`: arquivo do RSLogix 5000 com a estratégia de controle desacoplador implementada;