



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**AUTOMAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO RECURSIVA DE PLANTA
DIDÁTICA UTILIZANDO CLP INDUSTRIAL DA
ROCKWELL AUTOMATION**

Victor Matheus Rodrigues de Carvalho

Brasília, dezembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**AUTOMAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO RECURSIVA DE PLANTA
DIDÁTICA UTILIZANDO CLP INDUSTRIAL DA
ROCKWELL AUTOMATION**

Victor Matheus Rodrigues de Carvalho

*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. Eugênio Libório Feitosa Fortaleza,

ENM/UnB

Coorientador

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, ENM/UNB

Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES DE CARVALHO, VICTOR MATHEUS

Automação e identificação recursiva de planta didática utilizando CLP industrial da Rockwell Automation

[Distrito Federal] 2017.

xi, 93p., 210 x 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2017). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1. Automação | 2. Identificação de sistemas |
| 3. Mínimos quadrados recursivo | 4. Controle de nível |
| 5. Sistema de quatro tanques | 6. Sistemas supervisórios |

I. Mecatrônica/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE CARVALHO, V. M. R., (2017). Automação e identificação recursiva de planta didática utilizando CLP industrial da Rockwell Automation. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TG-*n*°23/2017, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Victor Matheus Rodrigues de Carvalho

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Automação e identificação recursiva de planta didática utilizando CLP industrial da Rockwell Automation.

GRAU: Engenheiro de Controle e Automação

ANO: 2017

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.

Victor Matheus Rodrigues de Carvalho

Al. das Acácias, Qd. 107 Lts. 2-6 – Águas Claras.

71920-540 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família.

Victor Matheus Rodrigues de Carvalho

Agradecimentos

O maior agradecimento que posso dar é para Deus por ter me proporcionado o dom da vida e do trabalho. Aos meus pais que sempre deram o máximo para prover o melhor a mim, também tenho infinita gratidão. Agradeço também ao meu querido irmão Vinícius pelo seu ânimo que ajuda a encontrar a alegria perante às dificuldades. Não poderia deixar de agradecer à Thaís por toda amizade e apoio, não me deixando esmorecer nem desanimar e me fazendo enxergar a importância de entregar sempre o melhor. Agradeço a também pela ajuda na revisão deste trabalho. Ao Sr. Paulo Pina pela ajuda a mim concedida na instalação dos equipamentos na bancada. Aos meus grandes amigos criados na universidade Carlos, Daniel e Filipe por vosso companheirismo e aprendizado que me proveram. Ao técnico da Universidade de Brasília Célio pela sua sempre disposta ajuda. Por fim, mas de forma alguma menos importante, agradeço ao meu orientador, Professor Eduardo Stockler, pela sua paciência e direcionamentos sempre precisos para que eu pudesse concluir este trabalho com êxito. Ao professor Eugênio pela sua orientação e por ter me concedido os materiais para esse trabalho. Que Deus juntamente com Nossa Senhora me conceda as graças necessárias para exercer minha profissão em benefício do próximo.

Victor Matheus Rodrigues de Carvalho

RESUMO

Este trabalho apresenta uma interessante abordagem que explora as interseções entre teoria de identificação e sistemas de controle e aplicações industriais. Utilizando uma bancada didática com quatro tanques, explorou-se o uso de controladores lógico programáveis (CLP), mais especificamente o 1756-L62 da *Rockwell Automation*, para realização de tarefas que foram desde calibração de sensores até a elaboração de um sistema supervisório. Primeiramente, realizam-se algumas melhorias na bancada didática visando futuras aplicações mais avançadas. Entre as funcionalidades desenvolvidas, implementou-se um algoritmo no CLP para identificação recursiva de um processo industrial caracterizado como sistema de primeira ordem sem atraso baseado no método dos mínimos quadrados recursivo. Além disso, baseado na sintonia IMC, fez-se a própria ferramenta de *autotuning* de controladores PID. Como resultados, obteve-se, para a identificação no CLP, correlações entre modelos de 85% ou mais, o que foi considerado aceitável. No que tange ao controle, usando o modelo e o controlador gerado pelo IMC, percebeu-se similaridades entre o processo real e simulado. Todavia, houve discrepâncias quando comparados os sinais dos controladores - real e simulado - para as bombas, bem como quanto ao comportamento da sub-atuação das bombas devido à variabilidade dos atuadores. Por fim, um sistema supervisório contemplou a possibilidade de realizar diversos testes de modelos e comparações entre a sintonia automática proposta e o PID que estivesse operando na planta.

ABSTRACT

This work presents an interesting approach that explores intersections between control and identification systems and industrial area. Using a four tanks workbench, a Rockwell Automation's Programmable Logic Controller has been explored to perform tasks since sensor calibration until a supervisory system design. Firstly, some improvements were developed aiming future advanced applications. Among the features developed, an recursive identification algorithm based on Recursive Least Squares to an industrial process characterized as a no lag first-order system was implemented. Besides that, a PID self-tuning tool based on IMC was done. As results, for PLC identification, the models correlations was 85% or more. In respect of level control, using the model identified and the controller tuned by IMC, some similarities was noted between real and simulated process. However, there are discrepancies in relation of controller signals - real and simulated -, as well as the pumps sub-actuation behavior due to the variability of actuators. Finally, the supervisory system also has contemplated the possibility to make several model tests and comparisons between the automatic tuning PID proposed and the PID that was operating on plant.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	SISTEMA DE QUATRO TANQUES	1
1.3	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.4	OBJETIVOS DO PROJETO	3
1.5	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	SISTEMAS DINÂMICOS E CONTROLADORES	4
2.2	MODELAGEM DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES	5
2.3	O CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL	8
2.3.1	ARQUITETURA DO SISTEMA	9
2.3.2	LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO DO CLP	11
2.3.3	CICLO DE SCAN	16
2.4	INSTRUMENTAÇÃO DE PROCESSOS	17
2.4.1	SISTEMAS DE MEDIÇÃO	17
2.4.2	ELEMENTOS FINAIS DE CONTROLE	20
2.5	CONTROLE EM TEMPO DISCRETO	22
2.6	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	24
2.6.1	PÓLOS MENOS SIGNIFICATIVOS	24
2.6.2	RESPOSTA AO DEGRAU	25
2.6.3	MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS	25
2.6.4	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO	27
2.7	SINTONIA DE CONTROLADORES PID	29
2.8	CONTROLADOR PID DIGITAL	30
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	DESCRIÇÃO E MELHORIAS DA BANCADA	33
3.2.1	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL - ROCKWELL	33
3.2.2	BOMBAS DIAFRAGMA	36
3.2.3	SENSORES DE PRESSÃO	37
3.2.4	SENSORES DE VAZÃO	38

3.2.5	PLACAS DE POTÊNCIA	39
3.2.6	CONFIGURAÇÃO DA BANCADA.....	40
3.3	CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	41
3.3.1	NÍVEL	41
3.3.2	VAZÃO	42
3.3.3	PLACA DE POTÊNCIA	42
3.4	CONTROLE DE NÍVEL	43
3.4.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO	43
3.4.2	PROJETO DO CONTROLADOR	44
3.5	SISTEMA SUPERVISÓRIO	45
4	RESULTADOS	46
4.1	INTRODUÇÃO	46
4.2	DADOS DE CALIBRAÇÃO.....	47
4.2.1	CÁLCULO DO NÍVEL.....	47
4.2.2	CÁLCULO DA VAZÃO	48
4.2.3	PLACA DE POTÊNCIA.....	48
4.3	IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA.....	50
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE NÍVEL.....	54
4.4.1	CONTROLE TANQUE 4 - BOMBA 1	54
4.4.2	CONTROLE TANQUE 3 - BOMBA 2	58
4.4.3	CONTROLE SIMULTÂNEO	62
4.5	IMPLEMENTAÇÃO NO CLP	63
4.6	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	67
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXOS.....	76
I.1	ROTINAS CLP	77
I.2	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS E PROGRAMAS	77

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquemático adaptado de planta laboratorial de quatro tanques proposto por Johanson, 2000.	2
2.1	Sistema de controle em malha aberta [1].	5
2.2	Sistema de controle em malha fechada [1].	5
2.3	Esquemático considerando o comportamento do nível em um dos tanques.	6
2.4	P&ID da bancada didática com quatro tanques.	7
2.5	Arquitetura geral de um CLP [2].	10
2.6	Exemplo de programa utilizando linguagem LD [3].	12
2.7	Exemplo de um bloco de função [3].	13
2.8	Exemplo de instruções em sequência [3].	13
2.9	Exemplo de diagrama sequencial [2].	15
2.10	Exemplo de diagrama sequencial para uma máquina de lavar [3].	15
2.11	Trecho exemplo de código escrito em IL [3].	16
2.12	Ciclo de Execução do CLP [2].	16
2.13	Funcionalidade de Sistema de Medição [4].	17
2.14	Exemplos de extensômetros [4].	18
2.15	Ponte de Wheatstone com um <i>strain gauge</i>	20
2.16	Medidor de vazão - tipo turbina	21
2.17	Operação da bomba diafragma.	22
2.18	Diagrama de blocos de um sistema de controle discreto.	22
3.1	Arquitetura de todo o sistema da bancada.	34
3.2	Ambiente de programação do LOGIX5000.	35
3.3	Bloco PIDE.	36
3.4	Ambiente de desenvolvimento de telas FactoryTalk View Studio.	37
3.5	Nova bomba diafragma instalada na bancada.	37
3.6	Sensor de pressão MPVZ5004.	38
3.7	Sensor de Vazão YF-S402.	39
3.8	Placa de potência inicialmente instalada.	40
3.9	Placa de potência atualmente instalada.	40
3.10	Bancada didática.	41
4.1	Tensão na bomba 1 em função do sinal de referência do CLP.	49

4.2	Tensão na bomba 2 em função do sinal de referência do CLP.....	49
4.3	Identificação recursiva do modelo simulado.	50
4.4	Identificação recursiva variando bomba 1.....	51
4.5	Identificação recursiva variando bomba 2.....	52
4.6	Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 3 sub-atuado (bomba 1).	53
4.7	Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 4 diretamente atuado (bomba 1).	53
4.8	Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 3 diretamente atuado (bomba 2).	54
4.9	Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 4 sub-atuado (bomba 2).	54
4.10	Configuração dos parâmetros PID para bomba 1.....	56
4.11	Controle no tanque 4 - Bomba 1.....	56
4.12	Erro controle no tanque 4 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 1.....	57
4.13	Sinal controle no tanque 4 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 1.	57
4.14	Nível tanque 3 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 1.....	58
4.15	Configuração dos parâmetros PID para bomba 2.....	59
4.16	Controle no tanque 3 (referência: em azul; nível simulado: em vermelho; nível real: em verde)- Bomba 2.....	60
4.17	Erro controle no tanque 3 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 2.....	60
4.18	Sinal controle no tanque 3 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 2.	61
4.19	Nível tanque 4 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 2.....	61
4.20	Controle simultâneo.	63
4.21	Erro controle simultâneo (simulado: em verde; real: em azul).	64
4.22	Sinal controle simultâneo (simulado: em verde; real: em azul).	65
4.23	Rotinas criadas.	66
4.24	<i>Add-ons instructions</i> criadas.....	67
4.25	Tela de início do supervisorio.	68
4.26	Tela de calibração pelo supervisorio.	68
4.27	Tela de identificação pelo supervisorio.	69
4.28	Tela de validação do modelo pelo supervisorio.	69
4.29	Simulação dos PIDs no modelo identificado.	70
4.30	Comparação do PID real no processo e do PID proposto no modelo identificado.....	71
1	MainRoutine.	77
2	Filtro passa-baixas.....	77
3	IDENTIFICACAO - Página 1.	78
4	IDENTIFICACAO - Página 2.	79
5	IDENTIFICACAO - Página 3.	80
6	IDENTIFICACAO - Página 4.	81
7	MMQR - Página 1.....	82
8	MMQR - Página 2.....	83
9	Sensores.	83
10	PID B1.	84
11	PID B2.	84

12	Simulação B1.	85
13	Simulação B2.	85
14	Add-on Instruction - Nível.	86
15	Add-on Instruction - Sintonia IMC.	87
16	Add-on Instruction - Vazão.	88
17	Simulação do modelo do processo.	88
18	Simulação do modelo do identificado.	89
19	Script do MATLAB para identificação recursiva do processo simulado e real.....	90
20	Diagrama para coleta de dados do controle de nível no tanque 3.	91
21	Diagrama para coleta de dados do controle de nível no tanque 4.	92
22	Diagrama para coleta de dados do controle de nível de ambos os tanques.....	93

LISTA DE TABELAS

2.1	Sistemas Dinâmicos: classificação [2].	4
2.2	Classificação das linguagens do CLP [5].	12
2.3	Instruções de Contato segundo IEC norma 61131-3 [5].	13
2.4	Instruções de Bobina segundo norma IEC 61131-3 [5].	14
2.5	Sintonia MZ por malha fechada.	29
2.6	Sintonia MZ por malha aberta.	29
2.7	Sintonia CHR para resposta sem sobrevalor.	30
2.8	Sintonia IMC.	30
3.1	Especificação dos módulos do CLP.	34
3.2	Características técnicas da bomba.	36
3.3	Especificações técnicas do sensor de pressão MPVZ5004.	38
3.4	Especificações técnicas do sensor de vazão YF-S402.	39
3.5	Algoritmo de implementação do método de mínimos quadrados recursivo	44
4.1	Calibração - Tanque 1	47
4.2	Calibração - Tanque 2	47
4.3	Calibração - Tanque 3	47
4.4	Calibração - Tanque 4	48
4.5	Sensor de Vazão - Bomba 1	48
4.6	Sensor de Vazão - Bomba 2	48
4.7	Degraus aplicados na bomba 1 e mantendo a bomba 2 em 60%	51
4.8	Degraus aplicados na bomba 2 e mantendo a bomba 1 em 50%	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
V	Vazão volumétrica ou tensão	$[L/s]$ $[V]$
h	Nível	$[cm]$
v_w	Velocidade do fluido	$[m/s]$
g	aceleração gravitacional	$[m/s^2]$
a	área da seção trasnversal ou parâmetro de modelo	
K	ganho	
u	sinal	$[\%]$
O	saída	
I	entrada	
l	comprimento	$[m]$
R	resistência	$[ohm]$
e	deformação ou função de erro	
G	fator gauge ou função de transferência	
b	parâmetro de modelo	
Y	matriz de amostras	
J	função custo	
P	período ou ponto de operação	
T	tempo de amostragem ou constante de tempo	$[s]$
EU	Unidade de engenharia	
Q	Vazão volumétrica	$[L/min]$
t	Tempo	$[s]$

Símbolos Gregos

τ	constante de tempo
γ	porcentagem de vazão
Δ	Variação entre duas grandezas similares
ρ	resistividade
θ	atraso ou parâmetros de identificação
φ	matriz de regressores
ϕ	matriz das amostras dos regressores
ξ	erro de estimação
λ	constante de tempo método IMC

Grupos Adimensionais

ν	coeficiente de poisson
Z	transformada Z

Subscritos

in	entrada
out	saída
0	variável no ponto inicial
i	número do tanque ou integral
$b1$ ou $B1$	bomba 1
$b2$ ou $B2$	bomba 2
mx	máximo
mn	mínimo
L	longitudinal
s	saída
k	número de amostra
MQ	mínimos quadrados
p	proporcional
u	ganho que gerou resposta oscilatória
d	derivativo
c	controlador

Sobrescritos

\cdot	Variação temporal
\wedge	Parâmetro estimado

Siglas

EDO	Equação Diferencial Ordinária
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PI	Controlador Proporcional Integral
MIMO	Múltiplas entradas e múltiplas saídas <i>Multiple In Multiple Out</i>
LARA	Laboratório de Automação e Robótica da Universidade de Brasília
CLP	Controlador Lógico Programável
CP	Controlador Programável
P&ID	Diagrama de Instrumentação e Tubulação (<i>Piping and Instrumentation Diagram/Drawing</i>)
E/S	Entradas e Saídas
EPROM	memória programável apagável somente de leitura (<i>erasable programmable read-only memory</i>)
UCP	Unidade central de processamento
IEC	Comissão internacional de eletrotécnica (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
LD	Ladder
FBD	Diagrama de bloco de funções (<i>Function Block Diagram</i>)
IL	Lista de Instruções (<i>Instruction List</i>)
ST	Texto estruturado (<i>Text Structured</i>)
SFC	Mapa de Função Sequenciaç (<i>Sequential Flow Chart</i>)
D/A	conversor digital-analógico
A/D	conversor analógico-digital
MZ	método Ziegler-Nichols
CHR	método Chien, Hrone e Reswick
IMC	Controle por modelo interno (<i>Internal model control</i>)
ident	ferramenta de identificação do MATLAB
IP	Protocolo Industrial (<i>Industrial Protocol</i>)
PIDE	PID aumentado (<i>Enhanced PID</i>)
OPC	OLE para controle de processos (<i>OLE for Processo Control</i>)
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
SA	sinal alto
SB	sinal baixo
VM	Valor medido

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O desejo e um dos principais desafios no setor industrial é a criação de sistemas capazes de melhorar a eficiência e eficácia de processos. Neste sentido, a Engenharia torna-se protagonista para a resolução de tais problemas devido seu aspecto criativo, analítico e racional, sendo esta área uma das mais importantes para o desenvolvimento e crescimento de um país.

Sabendo disso, a Engenharia de Controle e Automação surge com o potencial de inovar no setor secundário da economia. Todavia, para que isso efetivamente ocorra, é necessário, anteriormente, que o Engenheiro, desde sua formação acadêmica, tenha contato com os diversos equipamentos, termos, metodologias, técnicas de controle e possíveis tendências existentes no mercado. Logo, torna-se essencial a existência de pesquisas voltadas à prática com o fim de não só auxiliar na formação deste Engenheiro, mas também de encontrar estratégias que aumentem a eficiência dos projetos de automação em uma indústria. Entre tais estratégias, aliás, encontra-se o controle automático de processos que visa a eliminação de distúrbios externos nos quais o sistema se encontra e é uma excelente forma para melhorar os processos industriais. A seção 1.2 fará uma breve apresentação sobre o sistema de quatro tanques utilizado nesse projeto.

1.2 Sistema de Quatro Tanques

Em 2000, Johansson introduziu um modelo de processo didático com zero ajustável que pode tornar o sistema de fase mínima ou não mínima de acordo com o arranjo da planta. Além disso, com tal modelo é possível testar e produzir diversas técnicas de controle multi-variável. Dessa forma, a bancada descrita torna-se uma excelente ferramenta em âmbito acadêmico para essa área. A figura 1.1 - retirada de [7] - ilustra o modelo proposto.

É possível vislumbrar que, além dos quatro tanques e reservatório, duas bombas atuam no sistema enviando vazão para dois tanques de forma cruzada, isto é, um inferior e outro superior. Como os superiores possuem saída de água, eles também alimentam os inferiores. Assim, percebe-se

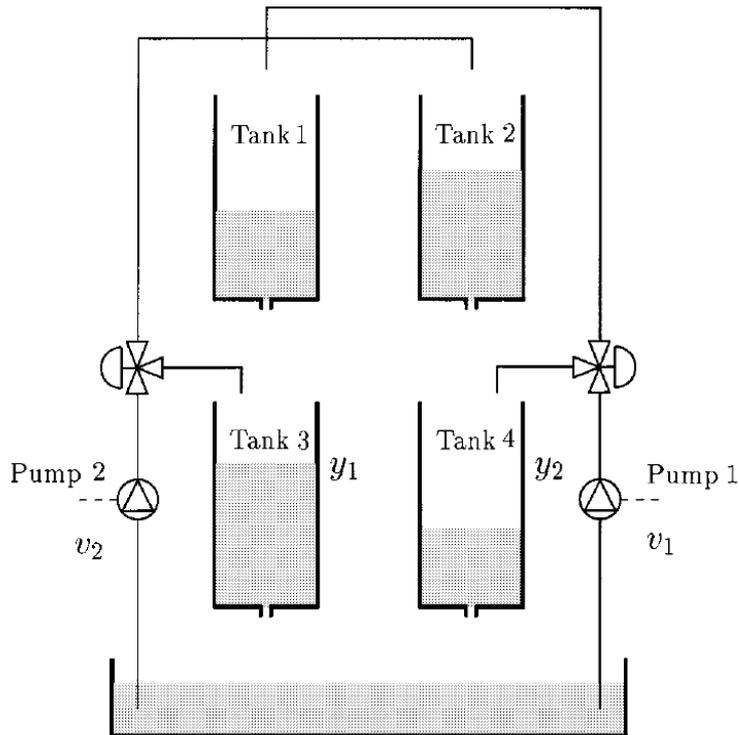


Figura 1.1: Esquemático adaptado de planta laboratorial de quatro tanques proposto por Johanson, 2000.

uma interação no modelo visto que a bomba 1, por exemplo, atua diretamente no tanque 4, mas, de forma indireta, atua no tanque 3 haja vista que ela bombeia fluido para o tanque 1. A modalidade de sistema com interação, por sua vez, é especificada em [6] como sendo uma das características mais presentes nos processos industriais. Logo, confere-se a esta bancada a possibilidade de grandes contribuições no setor industrial de processos. Entre as estratégias de controle já desenvolvidas para esse modelo, tem-se aplicações de controle preditivo [8], PI descentralizado [9], controle ótimo [10] entre outros modelos avançados [9].

1.3 Definição do problema

Uma planta didática de quatro tanques localizada no Laboratório de Automação e Robótica - LARA da Universidade de Brasília deve receber nova instrumentação a fim de tornar possível a implementação de técnicas de controle desde clássicas até as avançadas. Além disso, a construção de ferramentas que aumentem a agilidade e eficiência da metodologia dos projetos de automação industrial e a falta de material prático para alunos interessados no tema são aspectos que devem ser estudados em busca de contribuições de grande valor para a comunidade acadêmica.

1.4 Objetivos do projeto

O objetivo geral deste projeto consiste na construção de um sistema completo de automação e controle utilizando metodologia e equipamentos empregados industrialmente que vão desde a calibração dos sensores até a elaboração de sistema supervisorio para operação da planta.

A fim de alcançar este objetivo geral, traçam-se objetivos específicos também, a saber:

- Instalação de nova instrumentação na bancada e calibração de tais dispositivos;
- Criação de rotinas em Controlador Lógico Programável (CLP) capazes de fazer a identificação do sistemas;
- Implementação de técnicas de controle clássicas a partir do modelo identificado;
- Criação de sistema supervisorio para operação e acompanhamento dos dados da planta.

1.5 Apresentação do manuscrito

No capítulo 2 levantam-se as teorias fundamentais para entendimento do projeto e do tema. Após, o capítulo 3 explicita a metodologia empregada ao longo do desenvolvimento do projeto. No capítulo 4, os resultados experimentais são apresentados comparando-se com o que era esperado. Por fim, o capítulo 5 traz discussões e análises do resultado obtido juntamente com sugestões para trabalhos futuros. Materiais complementares poderão ser encontrados nos anexos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas dinâmicos e Controladores

Um sistema dinâmico é visto, de forma geral, como movimentos gerados por forças e energias e que podem ser descritos por equações diferenciais ordinárias (EDO) em que o tempo é a variável independente, equações a diferenças, algébricas e diferenciais parciais [2]. Este conceito, apesar de ter um viés da mecânica clássica, é estendido também para fenômenos químicos, térmicos, entre outros, já que estes também possuem modelos descritos por uma EDO.

A tabela 2.1 apresenta um resumo dos sistemas dinâmicos encontrados. No que tange àqueles descritos pelo tempo, é possível classificá-los quanto sua linearidade. Em caso positivo, vale a aplicação do princípio da superposição na análise da saída referente a uma entrada muito embora a maioria dos sistemas encontrados serem não-lineares é possível linearizá-los em torno de um ponto de operação.

Tabela 2.1: Sistemas Dinâmicos: classificação [2].

Acionamento	Descrição	Nomes
Tempo	EDO na variável tempo	Contínuos no tempo
	EDO na variável tempo	Discretos no tempo
Eventos	Álgebra booleana, díode, autômatos, redes de Petri	A eventos discretos

Nesses sistemas, existem diversas variáveis que os podem os perturbar, alterando o desejado comportamento deles. Dessa forma, surge a figura do controlador que é responsável por manter o processo dentro dos requisitos previstos.

Um primeiro tipo de arquitetura de controle são os sistemas em malha aberta. Nessa situação, o controlador recebe uma variável de referência segundo a qual o processo deve se adequar e, a partir daí, o controlador atua sobre o sistema. A figura 2.1 ilustra tal arquitetura. Observe que distúrbios estão presentes no processo de tal forma que a saída ainda não será exatamente a mesma que o *set point*.

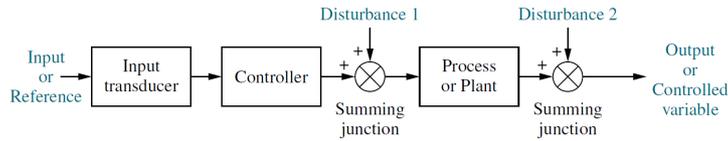


Figura 2.1: Sistema de controle em malha aberta [1].

Outro tipo de sistema de controle é o de malha fechada, o qual, devido à sua simplicidade, é o mais utilizado na indústria [6]. Neste tipo, ocorre uma realimentação do sistema e o erro entre a variável de saída e o *set point* é contabilizado. Logo, com o controlador recebendo tal parâmetro, ele atua no sistema para corrigir o erro. Dessa forma, pode-se fazer uso de diversas técnicas de controle para anular a atuação dos distúrbios. A figura 2.2 ilustra tal arquitetura.

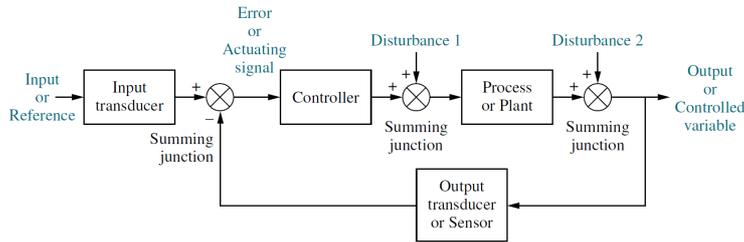


Figura 2.2: Sistema de controle em malha fechada [1].

Dentro dos sistemas de malha fechada diversos tipos de controle podem ser sintonizados. Os clássicos consistem naqueles que estão consolidados na indústria e que seu uso já foi validado. Entre estes estão: PID, controle on-off, *feedforward*, cascata. Além desses, tem se tornado cada vez mais frequente em pesquisas acadêmicas o uso de controles mais avançados como o preditivo, inteligentes (redes neurais e controle *fuzzy*), robusto, adaptativo, não linear e multivariável (sistemas MIMO - *Multiple IN, Multiple Out*).

2.2 Modelagem do Sistema de Quatro Tanques

O sistema com quatro tanques esquemático é mostrado na figura 1.1. Algumas alterações neste modelo em relação à bancada utilizada serão especificadas na seção 3. Seguindo o entendimento do processo, foca-se no comportamento dos tanques inferiores. Para isso, é realizada uma análise do modelo ilustrado na figura 2.3.

Levando em consideração a teoria apresentada por [6] e pelo balanceamento de massas do sistema, tem-se que

$$\dot{V} = A\dot{h} = [f_{in_1} + f_{in_2}] - f_{out}. \quad (2.1)$$

em que \dot{V} é o volume armazenado, A é a área do tanque, \dot{h} consiste na taxa de variação do nível do fluido no tanque, f_{in_1} , f_{in_2} e f_{out} que são as vazões de entrada devido à ação da bomba 1, da

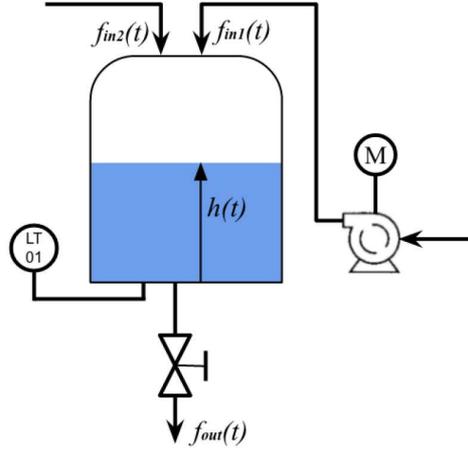


Figura 2.3: Esquemático considerando o comportamento do nível em um dos tanques.

bomba 2 e saída em razão da abertura da válvula. Pela equação de *Bernoulli* é sabido que, no que tange a líquidos incompressíveis

$$v_w = \sqrt{2gh} \quad (2.2)$$

em que v_w é a velocidade do fluido e g a constante de aceleração gravitacional. Contudo,

$$f_{out} = av_w = a\sqrt{2gh} \quad (2.3)$$

em que a é a área da seção transversal da saída de água do tanque. Linearizando em torno do ponto de operação h_0 e, sabendo que $x = h - h_0$, tem-se que

$$f_{out} = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{2g}{h_0}} x. \quad (2.4)$$

Substituindo 2.4 em 2.1, conclui-se que

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{A} [f_{in1}(t) + f_{in2}(t)] - \frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_0}} x(t). \quad (2.5)$$

É importante ressaltar que no caso dos quatro tanques, como há a alimentação cruzada, os níveis dos reservatórios inferiores serão afetados pelas duas bombas de acordo com a porcentagem de vazão direcionada da respectiva bomba para cada tanque. Com isso, estabelecem-se algumas mudanças em relação ao esquemático da figura 1.1 já visando a estrutura da bancada didática deste trabalho. Considera-se, agora, a figura 2.4, a qual ilustra um diagrama P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram/Drawing*) - [11] -, para prosseguimento da modelagem.

Para facilitar o entendimento, utiliza-se a seguinte nomenclatura onde $f_{in_{1i}}$ fará referência à entrada de vazão no tanque i proveniente de uma bomba, bem como $f_{in_{2i}}$ será vazão proveniente de um tanque superior sobre o tanque i . Além disso, f_{out_i} referir-se-á à saída do tanque i . Nota-se,

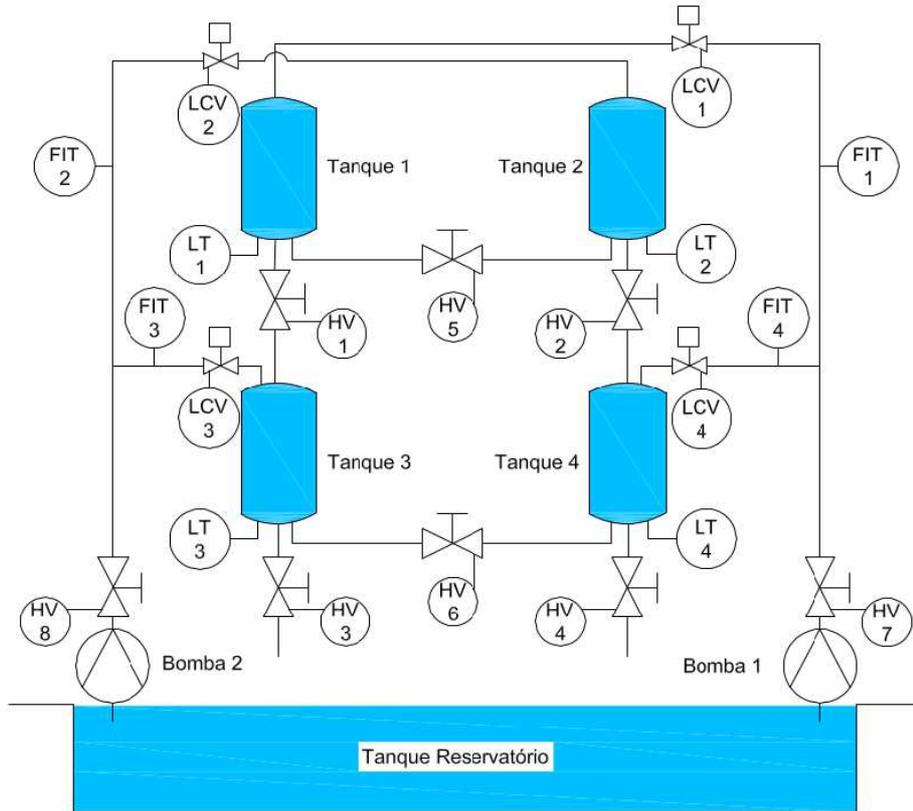


Figura 2.4: P&ID da bancada didática com quatro tanques.

primeiramente que, f_{in21} e f_{in22} serão iguais à zero já que não há tanques superiores em relação a eles. Com isso, escreve-se

$$\begin{bmatrix} f_{in21} \\ f_{in22} \\ f_{in23} \\ f_{in24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{out1} \\ f_{out2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Estabelecendo que a constante de tempo τ será

$$\tau_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_{i0}}{g}} \quad (2.7)$$

multiplica-se e divide-se a equação 2.4 por A_i de forma que se obtém

$$f_{out_i} = \frac{A_i}{\tau_i} x_i. \quad (2.8)$$

Logo, a equação 2.6 resulta em

$$\begin{bmatrix} f_{in21} \\ f_{in22} \\ f_{in23} \\ f_{in24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{A_1}{\tau_1} x_1 \\ \frac{A_2}{\tau_2} x_2 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

No que tange às vazões provenientes da atuação direta da bomba, tem-se que estas dependerão tanto da quantidade de vazão liberada para cada um dos tanques, quanto do sinal aplicado na bomba. Com isso,

$$\begin{bmatrix} f_{in11} \\ f_{in12} \\ f_{in13} \\ f_{in14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \gamma_1)K_{b1}u_{b1} \\ (1 - \gamma_2)K_{b2}u_{b2} \\ \gamma_2 K_{b2}u_{b2} \\ \gamma_1 K_{b1}u_{b1} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

em que γ_1 é a porcentagem de vazão direcionada ao tanque 4 em relação ao tanque 1, γ_2 a porcentagem de vazão direcionado ao tanque 3 em relação ao tanque 2, K_{b1} e K_{b2} são os ganhos em relação aos respectivos sinais da bomba 1 - u_{b1} - e bomba 2 - u_{b2} -. Obtidos tais dados, pode-se estruturar uma equação no espaço de estados como a mostrada na equação 2.11.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_2} & 0 & 0 \\ \frac{A_1}{A_3\tau_1} & 0 & -\frac{1}{\tau_3} & 0 \\ 0 & \frac{A_2}{A_4\tau_2} & 0 & -\frac{1}{\tau_4} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{(1 - \gamma_1)K_{b1}}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{(1 - \gamma_2)K_{b2}}{A_3} \\ 0 & \frac{A_2}{\gamma_2 K_{b2}} \\ \frac{\gamma_1 K_{b1}}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

Por fim, a partir da equação 2.11, chega-se à função de transferência do sistema expresso pela equação 2.12.

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{(1 - \gamma_1)\tau_3 K_{b1}}{A_3(\tau_1 s + 1)(\tau_3 s + 1)} & \frac{\gamma_2 \tau_3 K_{b2}}{A_3(\tau_3 s + 1)} \\ \frac{\gamma_1 \tau_4 K_{b1}}{A_4(\tau_4 s + 1)} & \frac{(1 - \gamma_2)\tau_4 K_{b2}}{A_4(\tau_2 s + 1)(\tau_4 s + 1)} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.3 O Controlador Lógico Programável

Os primeiros tipos de *Controladores Lógico Programáveis* ou CLPs surgiram por volta de 1968 diante de uma necessidade detectada pela *General Motors*. Este equipamento é criado, então, com o objetivo de substituir os antigos sistemas de controle por relés nos quais à medida que a

complexidade aumentava, tornava-se mais difícil o uso de tais dispositivos. Por exemplo, se uma fábrica desejasse introduzir melhorias ou realizar manutenções na linha de produção, três grandes problemas surgiam. O primeiro consistia no fato de que a alteração no sistema de controle baseado em relés durava dias podendo ser estendido a semanas, ou seja, seria tempo de produção perdido e, no caso da empresa, prejuízo. O segundo problema referia-se à existência de muita fiação, a qual ocupava muito espaço implicando que, por vezes, a falha no sistema fosse difícil de ser detectada de imediato pelo colaborador. Por fim, a última questão relacionava-se com a necessidade de um equipamento capaz de suportar as pesadas condições fabris (poluição do ar, vibração, umidade, entre outros).

Diante de tais dificuldades apresentadas anteriormente, os CLPs apareceram como uma excelente opção, já que consistiam em um dispositivo digital robusto capaz de controlar processos e máquinas, realizar cálculos complexos, ocupar menos espaço e a falha em um sistema era melhor detectada pela sua lógica de programação. Além disso, tais equipamentos diminuíram os custos de materiais e mão-de-obra, pois com apenas um controlador e um operador era possível realizar as mudanças desejadas nas linhas de produção.

A partir da década de 80, os CLPs passam a ser chamados de *Controladores Programáveis* (CP). A diferença está na capacidade deste último de realizar cálculos de funções mais complexas [2]. Entre as características dos CPs estão:

- Confiabilidade Operacional;
- Execução de funções avançadas;
- Operação e comunicação em rede;
- Linguagem de programação de alto nível.

Por padrão, fazer-se-ão referências a Controladores Programáveis e Controladores Lógico Programáveis pela sigla CLP.

2.3.1 Arquitetura do Sistema

A figura 2.5 ilustra em blocos a arquitetura geral de um CLP. Esta subseção destrinchará as partes mais importantes deste dispositivo, a saber: unidade central de processamento, memória EPROM, memória imagem e módulos de entrada e saída (E/S). A imagem também ilustra que a composição do CLP se dá por partes internas e externas. A primeira refere-se à unidade de processamento com memória e outros dispositivos. Já a segunda, aos módulos de E/S, que podem ser alterados dependendo da aplicação.

Com a evolução do CLP ao longo dos anos passa a ser possível customizar os módulos E/S. Isso gera flexibilidade ao projetista do sistema de automação, além de facilitar a manutenção tendo em vista que, se um desses módulos falhar, a simples troca dos mesmos pode ser realizada sem interromper os outros processos em andamento.

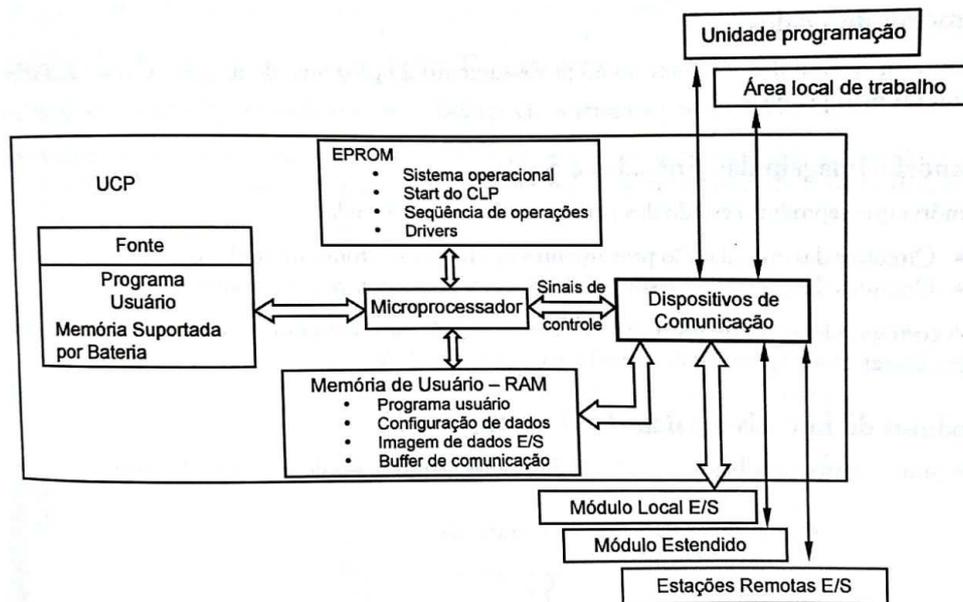


Figura 2.5: Arquitetura geral de um CLP [2].

UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO - UCP

A UCP consiste no processador em si, cuja função está relacionada com a criação de um caminho para os dados, a fim de que se possa atualizar corretamente os elementos de memória e executar o programa do usuário.

MEMÓRIA EPROM

A memória EPROM, contém o sistema operacional que gerencia as atividades do equipamento. Além disso, nela encontra-se o *firmware* utilizado para ligar corretamente o CLP assim como outros softwares essenciais para o funcionamento deste dispositivo. Por tais motivos, essa memória não é acessada pelo usuário.

MEMÓRIA IMAGEM DA ENTRADA E SAÍDA

As memórias-imagem consistem simplesmente em um elemento que corresponde à situação atual da entrada ou saída do CLP. Exemplificando, imagina-se um módulo de entrada que contém apenas uma entrada com tamanho de 8 bits. Ao aplicar um sinal 24Vdc no primeiro bit menos significativo desta entrada, a memória-imagem, que inicialmente estava com todos os bits zerados, terá seu último bit agora em 1.

Continuando o mesmo exemplo, supõe-se que foi feita uma lógica de programação a qual em que a saída gerada foi 10000001. Este valor em binário encontra-se, inicialmente, na memória-imagem da saída que corresponderá exatamente a 24Vdc no primeiro bit mais significativo e no último. Por tais motivos que essa memória apresenta esse nome, já que ela é um "espelho" do que

se encontra na entrada e saída.

MÓDULOS ENTRADA-SAÍDA

Os módulos E/S são elementos externos da arquitetura do CLP que consistem em terminais para conectar os sensores, atuadores ou outros dispositivos necessários no projeto de automação. No que tange aos módulos de saída, e dependendo da aplicação, existem modos de acionamento quais sejam: saída a relé, saída a triac e saída a transistor. As diferenças entre eles estão no custo, imunidade a transientes na rede e na vida útil do elemento. Já o módulo de entrada possui optoisoladores em que, quando um sensor fecha certo circuito, um diodo emissor de luz excita outro componente fazendo com que surja uma corrente interna e, desta maneira, o CLP detecta que o sensor foi acionado por algum motivo.

Outro aspecto importante de tais módulos é a forma como eles são acionados, ou seja, o endereçamento. No caso dos CLPs da *Allen-Bradley* Isso é feito da seguinte forma:

$$I : X/Y$$

ou

$$O : X/Y.$$

A primeira letra será ou a letra “I” (do inglês, *input*) ou “O” (do inglês, *output*) que correspondem a uma entrada ou saída, respectivamente. A letra “X” após os dois pontos é um dígito e indica em qual posição no módulo de entrada ou saída se encontra o parâmetro de interesse. Por fim, a letra “Y”, que também é um dígito, designa qual bit deseja-se acessar daquela entrada ou saída especificada por X.

2.3.2 Linguagens de Programação do CLP

Tendo em vista o avanço no uso dos CLPs, passou a existir a necessidade de se padronizar o projeto de sistemas de automação com este equipamento. Dessa forma, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) publicou pela primeira vez, em 1993, a norma IEC 61131-3 que normaliza o projeto dos CLPs. Em 2003, uma segunda edição foi lançada. De qualquer forma, este foi um importante passo para se definirem os tipos de linguagem de programação suportados por um CLP.

Em [5], estabelece-se, portanto, cinco linguagens: *ladder* - LD, Diagrama de Bloco de Funções (*Function Block Diagram* - FBD), Lista de Instrução (*Instruction List* - IL), Texto Estruturado (*Structured Text* - ST) e Mapa de Função Sequencial (*Sequential Flow Chart* - SFC ou GRAFCET). A tabela 2.2 apresenta a classificação de cada linguagem em dois possíveis tipos.

2.3.2.1 *Ladder* - LD

A linguagem LD assemelha-se aos diagramas de relés e contatos que existiam antes da criação dos CLPs. Por essa razão, ela foi amplamente aceita, tornando-se uma das principais linguagens

Tabela 2.2: Classificação das linguagens do CLP [5].

Classe	Linguagens
Textuais	Lista de Instruções - IL Texto Estruturado - ST
Gráficas	Ladder - LD Diagrama de Bloco de Função - FBD Mapa de Função Sequencial - SFC

na programação dos controladores industriais. Basicamente, por ela ser uma linguagem gráfica, o programador tem a função de fazer a lógica desejada por meio da inserção de contatos e bobinas entre dois terminais energizados. A figura 2.6 ilustra um exemplo simples da programação em *ladder*. É importante ressaltar que as duas linhas verticais representam os terminais energizados.

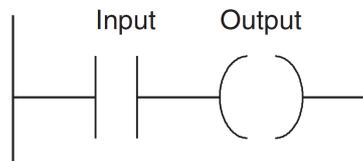


Figura 2.6: Exemplo de programa utilizando linguagem LD [3].

Ainda, no exemplo da figura 2.6, encontram-se duas instruções básicas: contato normalmente aberto (*Input*) e a bobina (*Output*). Supondo que a entrada seja um botão normalmente aberto e a saída, uma lâmpada, é notório que, assim que o primeiro for acionado a bobina é energizada e, conseqüentemente, a lâmpada ficará acesa. A norma IEC 61131-3 estabelece duas tabelas de instruções principais: uma contendo os contatos - tabela 2.3 - e outra as bobinas - tabela 2.4.

Há de se ressaltar que a linguagem LD apresenta ainda outras instruções, a saber: temporizadores, contadores, blocos de funções algébricas e operações lógicas. Atrelada às funções básicas, essa junção permite a elaboração de programas robustos no que tange à segurança - com os intertravamentos de sistema - e a própria automação do processo.

2.3.2.2 Diagrama de Bloco de Função - FBD

Outra linguagem amplamente utilizada na programação de CLPs é o FBD. Por ser uma linguagem gráfica de alto nível, torna-se simples implementar a configuração desejada. Basicamente, os blocos são compostos por elementos de entrada, uma função e saída, como pode ser visualizado pela figura 2.7.

Além disso, as instruções do FBD podem ser sequenciadas conforme mostrado na figura 2.8. Nesse exemplo, note que, primeiramente, o bloco ADD realiza a soma das *tags* WEIGHT1 e WEIGHT2. Em seguida, o resultado desta operação é encaminhado para um outro bloco cuja função é dividir por dois. Logo, a função criada corresponde ao cálculo de uma média aritmética entre dois pesos. Além das operações algébricas e lógicas, blocos mais avançados permitem instru-

Tabela 2.3: Instruções de Contato segundo IEC norma 61131-3 [5].

Contatos Estáticos		
Símbolo	Nome	Descrição
- -	Contato normalmente aberto	O contato só conduzirá o estado à esquerda se a variável booleana associada estiver acionada. Caso contrário, esta não conduzirá e o estado à direita permanecerá desligado.
- / -	Contato normalmente fechado	O contato só conduzirá o estado à esquerda se a variável booleana associada não estiver acionada. Caso contrário, esta não conduzirá e o estado à direita permanecerá desligado
Contatos Sensíveis à Transição		
- P -	Contato de Transição Positiva	O estado da direita é positivo durante um ciclo de scan, caso o estado da esquerda seja verdadeiro e a variável booleana associada estiver acionada.
- N -	Contato de Transição Negativa	O estado da direita é positivo durante um ciclo de scan, caso o estado da esquerda seja verdadeiro e a variável booleana associada NÃO estiver acionada.

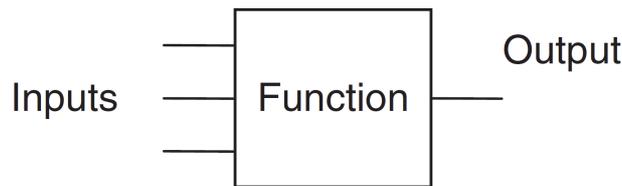


Figura 2.7: Exemplo de um bloco de função [3].

ções como processar caracteres, operar com contadores, temporizadores, comunicação e *flip-flops*, implementar regras de controle, deslocamento e seleção de bits, comparadores entre outras funções [2].

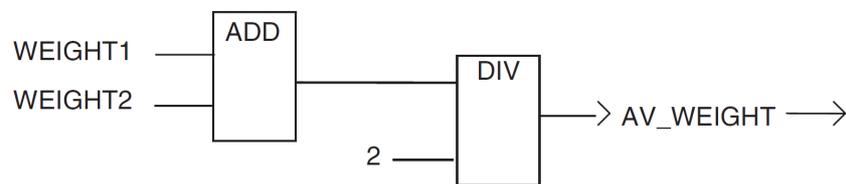


Figura 2.8: Exemplo de instruções em sequência [3].

Tabela 2.4: Instruções de Bobina segundo norma IEC 61131-3 [5].

Bobinas Momentâneas		
Símbolo	Nome	Descrição
-()-	Bobina	O estado da esquerda é copiado para a variável booleana associada.
-(/)-	Bobina negativa	O estado da esquerda é copiado para a variável booleana associada de forma inversa. Caso o estado da esquerda esteja ligado, a variável booleana ficará em 0 e vice-versa.
Bobinas Latch		
-(S)-	Bobina Set (ou latch)	Quando acionada, a variável booleana associada permanece no estado 1 até que a bobina Reset seja acionada.
-(R)-	Bobina Reset (ou unlatch)	Quando acionada, a variável booleana associada permanece no estado 0 até que a bobina Set seja acionada.
Bobinas Sensíveis à Transição		
-(P)-	Bobina de Transição Positiva	Quando acionada, a variável booleana é positiva durante um ciclo de scan quando o estado da esquerda estiver mudado de desativado para ativado.
-(N)-	Bobina de Transição Negativa	Quando acionada, a variável booleana é positiva durante um ciclo de scan quando o estado da esquerda tiver mudado de ativado para desativado.

2.3.2.3 Mapa de Função Sequencial - SFC/Grafcet

O SFC corresponde a uma linguagem de programação gráfica para CLP, sendo composta por *passos* e *transições*. Ela tem grande semelhança com o conceito de máquinas de estados finita e com as Redes de Petri [2]. Dessa forma, utiliza-se o SFC no controle de sequenciamento de operações, já que consiste em um passo-a-passo do processo automático. A figura 2.9 exemplifica tal linguagem.

Os blocos P1, P2 e P3 são os passos do sequenciamento. Em cada um deles é possível estabelecer ações que devem ser realizadas ao chegar no respectivo passo. No que tange às transições, tem-se que o programa só migrará do passo P1 para o P2 caso a transição T1 seja satisfeita. O mesmo ocorre entre o passo P1 e P3 com a diferença que a transição a ser atendida é T2.

A fim de exemplificar melhor, observe o exemplo de algoritmo para uma máquina de lavar ilustrado na figura 2.10. Nota-se que cada passo também corresponde a um estado. Com isso, quando o usuário pressiona o botão para iniciar a lavagem (evento de transição), o programa vai para o primeiro passo. Dentro deste passo, por sua vez, é necessário tomar a ação de encher o tanque até certo nível detectado por um sensor. Quando isso ocorre, "outro evento de transição é disparado

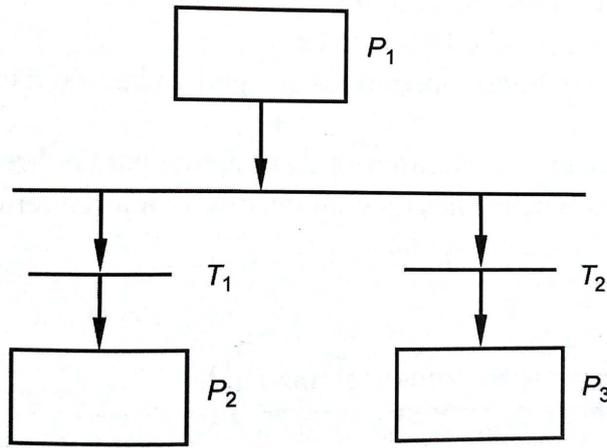


Figura 2.9: Exemplo de diagrama sequencial [2].

fazendo com que, neste momento, o programa vá para o segundo passo e assim sucessivamente.

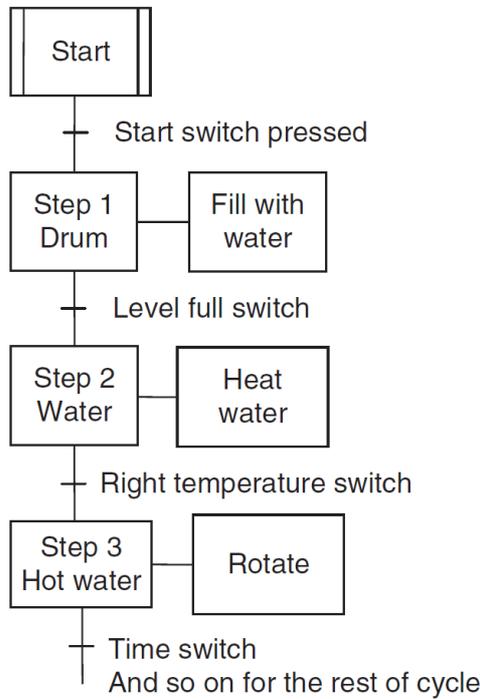


Figura 2.10: Exemplo de diagrama sequencial para uma máquina de lavar [3].

2.3.2.4 Lista de Instruções - IL

A IL é uma linguagem com menos aceitação de mercado devido à semelhança com *Assembly* no que diz respeito à forma como são escritos os códigos. Como o próprio nome invoca, esta metodologia de programação consiste em uma lista em que cada linha há uma instrução com um ou mais operandos [2, 3, 5]. A principal utilidade desta linguagem encontra-se na possibilidade de otimização do código e no controle de sequenciamento por meio de cálculos e *loops*.

A figura 2.11 foi retirada de [3] e exemplifica o formato de um código escrito em IL. Conforme algoritmo, a primeira linha carrega valor de A em um registrador. Em seguida, faz-se a operação lógica AND com o valor em B e, por fim, guarda-se o resultado em Q.

```
LD    A    (*Load A*)
AND   B    (*AND B*)
ST    Q    (*Store result in Q, i.e. output to Q*)
```

Figura 2.11: Trecho exemplo de código escrito em IL [3].

2.3.2.5 Texto Estruturado - ST

Em comparação com IL, o ST é uma linguagem textual de mais alto nível e se assemelha com Pascal [2, 3]. Dessa forma, é possível escrever em uma só linha diversas instruções de acordo com a necessidade. Nesta linguagem, a principal vantagem é a criação de *loops*, elementos condicionais, e a inserção de cálculos mais complexos.

2.3.3 Ciclo de Scan

Um aspecto importante, no que tange ao funcionamento dos CLPs, consiste no ciclo de execução ou *scan*. Inicialmente, faz-se uma varredura dos estados de entrada e atualiza a memória-imagem respectiva. Feito isso, ocorre o processamento do programa armazenado quando, por fim, atualiza-se a memória-imagem da saída e, conseqüentemente, seus respectivos terminais. Estas tarefas continuam até que um comando de parar a execução seja dado. A figura 2.12 ilustra este ciclo.



Figura 2.12: Ciclo de Execução do CLP [2].

2.4 Instrumentação de Processos

2.4.1 Sistemas de Medição

O objetivo principal de um sistema de medição consiste na constituição de elo entre processo e observador [4]. No primeiro, encontra-se o valor real do parâmetro em questão, o qual também é entrada para o sistema de medição. Como saída deste último, está o valor medido que é de importância para quem o observa. A figura 2.13 retirada de [4] ilustra esta funcionalidade.

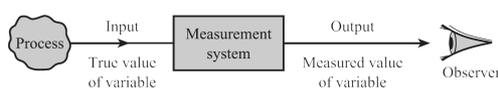


Figura 2.13: Funcionalidade de Sistema de Medição [4].

Pode-se definir o bloco do sistema de medição com quatro elementos básicos. Ressalta-se que, não necessariamente, todos os componentes estarão, de fato, presentes no procedimento de aferição do sinal. O primeiro item, classificado como *elemento sensor*, geralmente está imerso no processo captando a energia do mesmo para realizar a medição, como por exemplo um termopar. Em seguida, encontra-se o *elemento condicionador de sinal* cuja função consiste na manipulação do sinal provinda do elemento sensor, de forma que seja possível processar os dados. Neste grupo, estão os amplificadores operacionais e ponte de wheatstone. Em terceiro lugar, está o *elemento de processamento de sinal* que, como o próprio nome invoca, realiza algum procedimento no dado condicionado a fim de apresentá-lo convenientemente. Este papel quem o faz, por exemplo, são os computadores. Por fim, há o *elemento de apresentação de dados* que é responsável por tornar conhecida a variável medida para o observador. Neste grupo, existem opções como *displays* alfanuméricos e galvanômetros com escala.

2.4.1.1 Caracterização Estática de Sistemas de Medição

A definição estática dos sistemas de medição consiste na imposição de uma entrada sobre os mesmos e a verificação do comportamento da saída em regime permanente. Dentro dessas características estão aquelas que são classificadas com *sistemáticas*, as quais podem ser quantificadas por meio de gráficos ou de forma analítica.

1. **Faixa de indicação - *range***: corresponde aos valores mínimo e máximo possíveis da medição;
2. **Faixa de operação - *span***: máxima variação tanto na entrada quanto na saída, ou seja, valores máximos - valores mínimos;
3. **Linha reta ideal**: reta que passa pelos pontos (O_{mx}, I_{mx}) e (O_{mn}, I_{mn}) . Caso esta reta não passe pela origem, o elemento de medição é tratado como linear em termos de variação;
4. **Não-linearidade**: diferença entre linha reta ideal e real. É possível defini-la em porcentagem com o fundo de escala e a máxima magnitude de não-linearidade \hat{N} , a saber:

$$\frac{\hat{N}}{O_{m\acute{a}x} - O_{m\acute{i}n}} \times 100\%$$

5. **Histerese:** as medições, ao aumentar a entrada, são diferentes quando se diminui a mesma. Pode ser definida como uma porcentagem em função do fundo de escala e da máxima magnitude de histerese, a saber:

$$\frac{\hat{H}}{O_{m\acute{a}x} - O_{m\acute{i}n}} \times 100\%$$

6. **Resolução:** corresponde à máxima variação na entrada, o que não gera nenhuma mudança na saída do sistema de medição. Pode ser definida como uma porcentagem em função do fundo de escala para entrada e tal variação na entrada, a saber:

$$\frac{\Delta I_R}{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}} \times 100\%$$

7. **Banda de Erro:** feita geralmente pelo fabricante especificando a faixa de valores em que a medição pode se encontrar e corresponde aos efeitos de histerese, não-linearidades e resolução.

Essas são as características mais importantes para o desenvolvimento este trabalho. Existem, ainda, outras, mas que não foram especificadas, como: desgaste e envelhecimento, efeitos ambientais e sensibilidade.

2.4.1.2 Medição de Pressão - Efeito Piezoresistivo

Uma das formas de se medir continuamente o nível em um tanque é o uso dos sensores de pressão. Mais especificamente, explorar-se-ão neste trabalho os *strain gauges*. No que tange ao seu funcionamento, estes dispositivos eletrônicos são baseados na deformação de resistores, os quais alteram sua resistência de acordo com a força aplicada sobre eles.

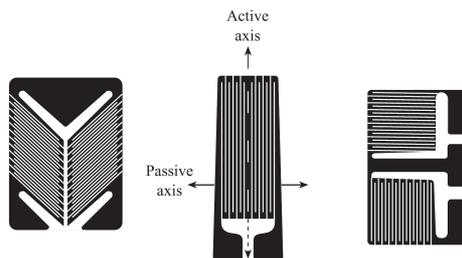


Figura 2.14: Exemplos de extensômetros [4].

Sabe-se que a resistência de um elemento é dada pela equação

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.13}$$

em que ρ é a resistividade do dispositivo, l o comprimento do mesmo e A consiste na seção transversal do elemento. Em um *strain gauge* todos os elementos são alterados quando submetido à pressão de forma que

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial l} \right) \Delta l + \left(\frac{\partial R}{\partial A} \right) \Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho} \right) \Delta \rho. \quad (2.14)$$

Assim, a equação 2.14 fica

$$\Delta R = \frac{\rho}{A} \Delta l - \frac{\rho l}{A^2} \Delta A + \frac{l}{A} \Delta \rho. \quad (2.15)$$

Ao dividir toda a equação por R , tem-se que

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\rho}{AR} \Delta l - \frac{\rho l}{A^2 R} \Delta A + \frac{l}{AR} \Delta \rho. \quad (2.16)$$

Substituindo a equação 2.13 em 2.16 segue que

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (2.17)$$

Sabendo que e_L corresponde à deformação longitudinal relativa, ou seja,

$$e_L = \frac{\Delta L}{l} \quad (2.18)$$

em [4], mostra-se também

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu e_L \quad (2.19)$$

em que ν é o coeficiente de Poisson o qual encontra-se em uma faixa de 0,25 a 0,40. Dessa maneira, substituindo as equações 2.18 e 2.19 em 2.17 chega-se finalmente ao resultado expresso pela equação 2.20.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= e_L + 2\nu e_L + \frac{\Delta \rho}{\rho} \\ \frac{\Delta R}{R} &= e_L(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Seguindo a caracterização dos *strain gauges*, divide-se a equação 2.20 pela deformação relativa e_L . Assim,

$$G = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho e_L} \quad (2.21)$$

em que $G = \frac{\Delta R}{R}$ é o *fator gauge*. Além disso, este termo varia de acordo com $\frac{\Delta \rho}{\rho e_L}$. Este elemento corresponde ao *efeito piezoresistivo* que é a variação da resistividade à medida que ocorre deformação. A grande vantagem do uso desse tipo de medição está no condicionamento do sinal. A figura 2.15 ilustra uma ponte de wheatstone com apenas um *strain gauge*. Neste caso, a referência [4] demonstra uma relação aproximadamente linear conforme indicado pela equação 2.22.

$$E_{th} = \frac{V_s}{4} G e_L \quad (2.22)$$

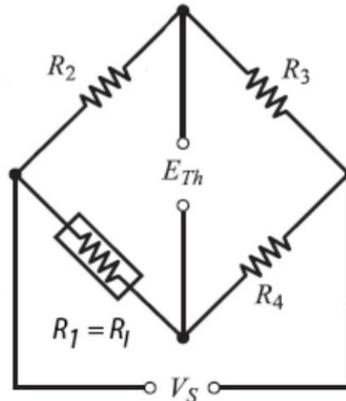


Figura 2.15: Ponte de Wheatstone com um *strain gauge*.

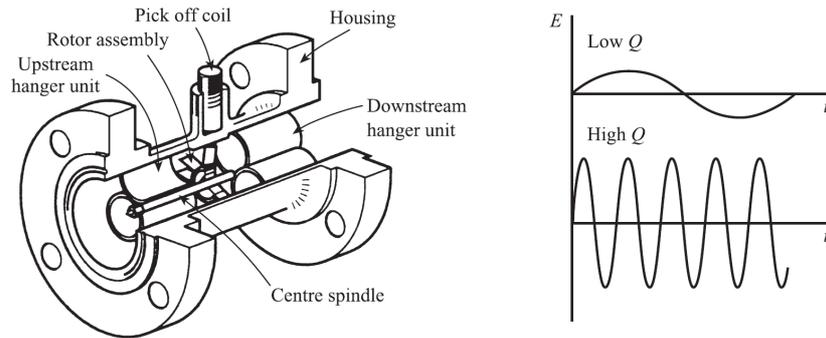
2.4.1.3 Medição de Vazão - Turbina

O medidor de vazão, cujo elemento primário é uma turbina, possui em sua estrutura um rotor o qual é instalado axialmente na tubulação. Esse rotor possui aletas, as quais são elaboradas com materiais ferromagnéticos. Externamente, há a presença de um ímã permanente, ou seja, à medida que o rotor gira, varia a relutância do circuito magnético, induzindo uma tensão alternada - pela lei de Faraday -, cuja frequência é proporcional à velocidade e, conseqüentemente, à vazão.

A fim de tornar o sinal de saída do sensor um sinal pulsado, tais dispositivos o condicionam utilizando um *disparador de Schmitt*. Assim, pode-se calcular a vazão por meio da aferição de quantos pulsos ocorrem em certo intervalo de tempo.

2.4.2 Elementos Finais de Controle

Com o objetivo de ajustar as variáveis do processo que se deseja controlar, atua-se nos elementos que possuem impacto direto no sistema: os elementos finais de controle. Entre eles estão as válvulas e bombas industriais. Como será visto posteriormente, a bancada didática utilizada neste trabalho não possui válvulas de controle atuadas, apenas manual para mudar a dinâmica do sistema. Pelo fato de a atuação ser feita diretamente pelo controle de bombas, esta seção introduzirá seus conceitos mais importantes.



(a) Estrutura e sinal gerado em função da vazão



(b) Tratamento do sinal

Figura 2.16: Medidor de vazão - tipo turbina

2.4.2.1 Bombas

A instalação de bombas é feita em sistemas cuja finalidade é deslocar certo fluido para outras localidades, entregando energia cinética de escoamento. Nesse sentido, alguns parâmetros caracterizam as bombas de forma que elas sejam usadas em condições corretas de operabilidade.

O primeiro desses parâmetros é a *capacidade*. Essa característica consiste na vazão máxima - volumétrica ou mássica - que o atuador consegue entregar ao sistema. Em seguida, há a *pressão* que ela desenvolve entre a entrada e saída do bocal. Em terceiro lugar encontra-se a caracterização da *potência*, a qual pode ser classificada entre cedida ou absorvida. Aquela refere-se à potência entregue pela bomba ao fluido ao passo que esta define a potência entregue ao eixo. Por fim, uma bomba também é caracterizada pelo seu *rendimento*, que é a razão entre potência absorvida e potência cedida, gerando um valor adimensional geralmente escrito como porcentagem.

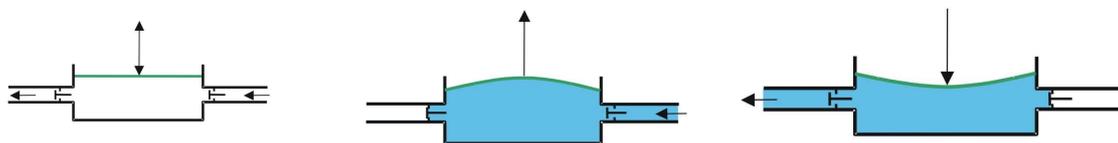
Tais parâmetros, porém, apresentam um viés operacional da bomba, ou seja, o "o quê". Há ainda uma segunda classificação quanto à forma de transferência de energia mecânica para o fluido, isto é, o "como". Dentro desta classificação há dois grandes grupos, a saber: *bombas de deslocamento positivo* e *bombas cinéticas ou centrífugas*. Para este trabalho, atêm-se às primeiras.

Bombas de Deslocamento Positivo

Estas bombas possuem a característica de receber o fluido dentro de uma câmara e exercer sobre ele uma pressão de forma que se desloque. Tal pressão pode ser feita de forma contínua ou intermitente. Nesse sentido, introduz-se duas classificações associadas à bomba, a saber: *alternativas* e *rotativas*.

No que se refere às bombas alternativas, o princípio de funcionamento está ligado ao exercício de força por um êmbolo, pistão ou membrana flexível sob o fluido. Apesar de exercerem grande pres-

são, sua capacidade é relativamente pequena. Dentro deste contexto, deseja-se explorar as bombas alternativas com diafragma. A figura 2.17 ilustra a operação da bomba diafragma. Inicialmente, o diafragma encontra-se em repouso - figura 2.17a -. A partir do momento em que ela começa a operar, varia-se a pressão alternativamente de forma que uma câmara enche em baixa pressão - figura 2.17b - e o fluido é expelido em alta pressão - figura 2.17c -. A contenção e permissão de passagem é gerenciada por válvulas de retenção que se abrem e fecham.



(a) Bomba diafragma em repouso. (b) Bomba diafragma aspirando. (c) Bomba diafragma impulsionando

Figura 2.17: Operação da bomba diafragma.

No que diz respeito às bombas rotativas, o fluido não é mais retido em uma câmara, mas sim no espaço entre aletas, dentes ou palhetas de um rotor. O seu deslocamento é forçado pela rotação deste último componente guiando o fluido desde a entrada até o bocal de saída. Os rotores mais comuns são feitos de engrenagens, lóbulos, rodas dentadas ou peristálticos.

2.5 Controle em Tempo Discreto

O controle em tempo discreto é aplicável em sistemas que usam, por exemplo, microcontroladores ou o próprio processamento de um computador para executar as leis de controle. A diferença dele para o tempo contínuo está no fato de serem coletadas amostras do processo com certa frequência e, a partir disso, calcular os sinais adequados para serem enviados aos atuadores do sistema. A figura 2.18 - retirada de [12] - exemplifica um diagrama de blocos com controlador em tempo discreto. Daí, notoriamente se percebe que alguns elementos são essenciais como conversores D/A e A/D que fazem o elo entre mundo discreto e contínuo.

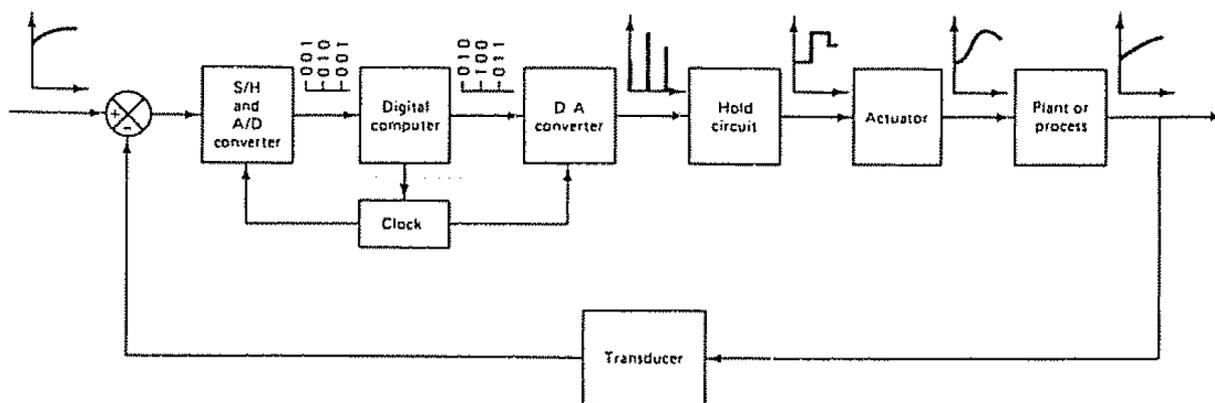


Figura 2.18: Diagrama de blocos de um sistema de controle discreto.

Assim como em tempo contínuo existe a *Transformada de Laplace*, que realiza a síntese de um

modelo, para o tempo discreto tem-se a *transformada Z*. Essa ferramenta, por sua vez, necessita da caracterização de um sistema por uma *equação de diferenças* como a 2.23 em que k representa o número da amostra de certo sinal. Lembra-se que este parâmetro está relacionado diretamente com o tempo de amostragem do sistema. Dessa forma, a transformação para a variável z torna-se imediata por meio dos conceitos apresentados em [12].

$$y[k] + a_1y[k-1] + \dots + a_{n_y}y[k-n_y] = b_1u[k-1] + \dots + b_{n_u}u[k-n_u] \quad (2.23)$$

Todavia, no que tange a processos, muitos dos modelos estão no domínio de Laplace. Logo, é interessante que se construa uma ligação entre o modelo na variável s (Laplace) e z (transformada z). Para isso, considera-se um modelo de primeira ordem como o da equação 2.24. Deseja-se expressá-lo como uma função $G(z)$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.24)$$

Usando a teoria apresentada em [12], sabe-se que

$$G(z) = (1 - z^{-1})\mathcal{Z} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \quad (2.25)$$

em que o operador \mathcal{Z} representa justamente a transformada Z do elemento interno. Assim, segue que

$$G(z) = (1 - z^{-1})\mathcal{Z} \left\{ \frac{\frac{K}{\tau}}{s(s + \frac{1}{\tau})} \right\}. \quad (2.26)$$

Retirando a constante do numerador e aplicando frações parciais, tem-se que

$$G(z) = \frac{K}{\tau}(1 - z^{-1})\mathcal{Z} \left\{ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \right\}. \quad (2.27)$$

Aplicando transformada Z , chega-se em

$$G(z) = \frac{K}{\tau}(1 - z^{-1}) \left[\frac{\tau}{1 - z^{-1}} - \frac{\tau}{1 - z^{-1}e^{-\frac{T}{\tau}}} \right] \quad (2.28)$$

em que T é o tempo de amostragem. Multiplicando-se os termos, obtém-se

$$G(z) = K - \frac{K(1 - z^{-1})}{1 - z^{-1}e^{-\frac{T}{\tau}}}. \quad (2.29)$$

Por fim, colocando todos os termos no mesmo denominador comum, chega-se no seguinte resultado

$$G(z) = \frac{Kz^{-1}(1 - e^{-\frac{T}{\tau}})}{1 - z^{-1}e^{-\frac{T}{\tau}}}. \quad (2.30)$$

Simplificando,

$$G(z) = \frac{b_1z^{-1}}{1 + a_1z^{-1}}. \quad (2.31)$$

em que $a_1 = -e^{-\frac{T}{\tau}}$ e $b_1 = K(1 - e^{-\frac{T}{\tau}})$. Tal resultado será importante para traduzir os termos encontrados na identificação do modelo do processo para o tempo contínuo.

2.6 Identificação de Sistemas

A fase de identificação de sistemas é importantíssima quando se deseja aplicar leis de controle. Isso porque ela modelará matematicamente o comportamento deles. Alguns estudos já foram feitos visando a identificação de sistemas lineares [13]. Todavia, a maioria dos sistemas existentes na natureza apresentam comportamentos não-lineares. Assim, técnicas de linearização e a utilização de controles avançados e inteligentes - como visto em [14, 15] - permitem que os sistemas classificados como não-lineares também possam ser controlados.

Basicamente, existem três formas de se modelar um sistema: modelagem *caixa-branca*, *caixa-cinza* e *caixa-preta*. As duas últimas partem de uma abordagem mais empírica para se descobrirem os parâmetros que descrevem um sistema. Enquanto a caixa-cinza faz uso de alguns conceitos teóricos auxiliares para ajudar no estabelecimento de modelo, a caixa-preta busca definir parâmetros de uma estrutura já conhecida em que o comportamento do sistema se aproxima. Por fim, a modelagem caixa-branca faz o uso de conceitos e teorias para estabelecer uma relação matemática. Assim, quando se diz respeito à identificação de processos, usam-se geralmente técnicas mais empíricas de modo que a estrutura da relação matemática - função de transferência - é sabida.

Nesta seção, apresentar-se-ão alguns métodos para identificação de sistemas dentro do contexto da automação de processos.

2.6.1 Pólos menos significativos

Esse método é usado em modelos de primeira e segunda ordem. Supondo uma função de transferência com a relação expressa pela equação 2.32, usando frações parciais e transformada de Laplace inversa, é sabido que o pólo em -50 é extremamente rápido e não afetaria consideravelmente, neste caso, o comportamento sistema. Assim, o que seria um modelo de segunda ordem passa a ser aproximado por um de primeira ordem. Quando se têm graus maiores do polinômio do denominador, esta técnica pode ajudar a diminuir a ordem do sistema.

$$G(s) = \frac{K}{s(s + 50)} \quad (2.32)$$

2.6.2 Resposta ao Degrau

Diferentemente do caso anterior, identificar um sistema observando sua resposta ao degrau consiste na obtenção de um modelo empírico, ou seja, a estrutura do modelo já é conhecida. Assim, a preocupação neste caso é com a identificação dos parâmetros da estrutura escolhida. Considerando, por exemplo, uma função de transferência expressa na equação 2.33.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2.33)$$

Tem-se que K é o ganho do sistema, τ a constante de tempo e θ corresponde a um atraso na resposta. Observando a resposta gráfica ao degrau, podem-se determinar esses três parâmetros. Antes, porém, é importante ressaltar que o sistema deve encontrar-se em malha aberta e a amplitude do degrau não deve ser grande o suficiente a ponto de não-linearidades contaminarem a resposta. Dentro deste contexto, alguns métodos utilizados são: *gráfico da reta tangente ao ponto de máxima variação*, *definição de constante de tempo*, *método de broida* e *método de Sundaresen*. Para o caso de sistemas de segunda ordem, há o *método dos três pontos* que gera boas estimativas o amortecimento da resposta.

Na próxima subseção, inicia-se a apresentação de formas matemáticas para a identificação de sistemas.

2.6.3 Método de Mínimos Quadrados

Primeiramente, considera-se uma função em que amostras da mesma são coletadas ao longo do tempo. pelo fato de a função se encontrar em tempo discreto, sua forma será dada pela equação 2.23 em que $y[k]$ corresponde à amostra coletada no tempo de amostragem k . Assim, isolando $y[k]$ na equação 2.23, tem-se que

$$y[k] = -a_1 y[k-1] - \dots - a_{n_y} y[k-n_y] + b_1 u[k-1] + \dots + b_{n_u} u[k-n_u]. \quad (2.34)$$

Dessa forma, estabelecem-se dois vetores que são os *regressores* e os *parâmetros do modelo* conforme mostrado nas equações 2.35 e 2.36 respectivamente.

$$\boldsymbol{\varphi}[\mathbf{k}]^T = [-y[k-1] \quad \dots \quad y[k-n_y] \quad u[k-1] \quad \dots \quad u[k-n_u]] \quad (2.35)$$

$$\boldsymbol{\theta}^T = [a_1 \quad \dots \quad a_{n_y} \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n_u}] \quad (2.36)$$

$$y[k] = \boldsymbol{\varphi}[\mathbf{k}]^T \boldsymbol{\theta} \quad (2.37)$$

Note que a multiplicação matricial expressa pela equação 2.37 produz exatamente $y[k]$. Neste método, realizam-se N medidas de y de tal forma a estimar um $\hat{\boldsymbol{\theta}}$. Deseja-se, portanto, que seja

mínima a diferença entre $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ e $\boldsymbol{\theta}$. Para isso, como o nome invoca, o método dos mínimos quadrados minimiza a soma do quadrado dos resíduos expresso por $\boldsymbol{\xi}$. Sabendo disso, tem-se

$$\begin{bmatrix} y[1] \\ y[2] \\ \vdots \\ y[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}[1]^T \\ \boldsymbol{\varphi}[2]^T \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varphi}[N]^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \quad (2.38)$$

o qual pode ter sua notação simplificada por

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\phi}\boldsymbol{\theta}. \quad (2.39)$$

em que $\mathbf{Y} \in \Re^N$, $\boldsymbol{\phi} \in \Re^{(n) \times N}$ e $\boldsymbol{\theta} \in \Re^n$. Assim, se N for igual ao número de parâmetros a serem estimados, tem-se um sistema de equação com solução única. Logo, se $\boldsymbol{\phi}$ possui inversa segue que

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\phi}^{-1}\mathbf{Y}. \quad (2.40)$$

Caso haja mais amostras do que parâmetros, o sistema passa a ser sobredeterminado. Como $\boldsymbol{\phi}$ deixa de ser uma matriz quadrada, ela não possui inversa. Todavia, multiplicando a equação 2.39 em ambos os lados por $\boldsymbol{\phi}^T$ tem-se que

$$\boldsymbol{\phi}^T\mathbf{Y} = \boldsymbol{\phi}^T\boldsymbol{\phi}\boldsymbol{\theta}. \quad (2.41)$$

Com isso, a matriz $\boldsymbol{\phi}^T\boldsymbol{\phi}$ passa a ser quadrada e, caso possua inversa, segue que

$$\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\phi}\boldsymbol{\phi}^T)^{-1}\boldsymbol{\phi}^T\mathbf{Y} \quad (2.42)$$

em que $(\boldsymbol{\phi}\boldsymbol{\phi}^T)^{-1}$ é chamada de matriz *pseudo-inversa*.

Aplicando o erro das amostras na equação 2.39, tem-se que

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\phi}\hat{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\xi}. \quad (2.43)$$

Sabendo que a função custo J_{MQ} é dada por

$$J_{MQ} = \sum_{i=0}^N \xi(i)^2 = \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi}, \quad (2.44)$$

e como J_{MQ} tem influência das amostras tem-se que J_{MQ} será mínimo caso

$$\frac{\partial J_{MQ}}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} = 0. \quad (2.45)$$

Isso é mostrado em [16] que ocorrerá quando

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\phi}\boldsymbol{\phi}^T)^{-1}\boldsymbol{\phi}^T\mathbf{Y}. \quad (2.46)$$

2.6.4 Método dos Mínimos Quadrados Recursivo

Deseja-se nesta subseção, demonstrar um algoritmo para o cálculo iterativo dos parâmetros da equação a serem identificados. Primeiramente, toma-se a equação 2.37 como ponto de partida. O modelo para esse sistema pode ser escrito da seguinte forma:

$$y[k] = \boldsymbol{\varphi}_k[\mathbf{k} - \mathbf{1}]^T \boldsymbol{\theta} \quad (2.47)$$

em que os regressores são calculados com os dados até a iteração $k - 1$. Já os parâmetros, devem ser calculados na iteração atual. Dessa forma e, tomando como base a equação 2.46, tem-se que os estimadores podem ser reescritos como

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \left[\sum_{i=1}^k \boldsymbol{\varphi}(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)^T \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^k \boldsymbol{\varphi}(i-1)y(i) \right]. \quad (2.48)$$

Deve-se tomar esta equação como base porquanto ela leva em consideração os parâmetros anteriores e amostra atual.

Outro parâmetro que deve ser introduzido consiste na matriz de covariância do estimador $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k$ a ser denotado por \mathbf{P}_k . Por [16], tem-se que

$$\mathbf{P}_k = \left[\sum_{i=1}^k \boldsymbol{\varphi}(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)^T \right]^{-1}. \quad (2.49)$$

Tirando-se um termo do somatório e invertendo a matriz \mathbf{P}_k , segue que

$$\mathbf{P}_k^{-1} = \left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)^T \right] + \boldsymbol{\varphi}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)^T. \quad (2.50)$$

Comparando as equações 2.49 e 2.50 tem-se

$$\mathbf{P}_k^{-1} = \mathbf{P}_{k-1}^{-1} + \boldsymbol{\varphi}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)^T. \quad (2.51)$$

Reescrevendo a equação 2.48, obtém-se

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \mathbf{P}_k \left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)y(i) + \boldsymbol{\varphi}(k-1)y(k) \right]. \quad (2.52)$$

No entanto, da equação 2.48 também se encontra

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} = \left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)^T \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)y(i) \right]. \quad (2.53)$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação 2.53 pelo fator $\left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)^T \right]$ conclui-se que

$$\left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)^T \right] \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} = \left[\sum_{i=1}^{k-1} \boldsymbol{\varphi}(i-1)y(i) \right]. \quad (2.54)$$

Nota-se que o primeiro termo que multiplica a matriz $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1}$, comparando-se com a equação 2.49, corresponde ao \mathbf{P}_{k-1}^{-1} . Substituindo, portanto, a equação 2.54 em 2.52 tem-se que

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \mathbf{P}_k \left[\mathbf{P}_{k-1}^{-1} \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \boldsymbol{\varphi}(k-1)y(k) \right]. \quad (2.55)$$

De 2.51, segue que

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \mathbf{P}_k \left[(\mathbf{P}_k^{-1} - \boldsymbol{\varphi}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)^T) \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \boldsymbol{\varphi}(k-1)y(k) \right]$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} - \mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}(k-1)y(k)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}(k-1) \left(y(k) - \boldsymbol{\varphi}(k-1)^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} \right). \quad (2.56)$$

Reescrevendo, tem-se finalmente que

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \mathbf{K}_k e_k \quad (2.57)$$

sendo $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}(k-1)$ e $e_k = y(k) - \boldsymbol{\varphi}(k-1)^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1}$.

Em [16], usando o lema da inversão, demonstra-se ainda que, para modelos com uma saída

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}(k-1)}{1 + \boldsymbol{\varphi}(k-1)^T \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}(k-1)} \boldsymbol{\varphi}(k-1)^T \mathbf{P}_{k-1} \quad (2.58)$$

e,

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}(k-1)}{1 + \boldsymbol{\varphi}(k-1)^T \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}(k-1)} \quad (2.59)$$

2.7 Sintonia de Controladores PID

Um passo primordial para o bom funcionamento do controle consiste na sintonização dos blocos PIDs utilizados no sistema. Na literatura são encontradas diversas metodologias que entregam diferentes respostas dos controladores. Além disso, dependendo do tipo do sistema, as tabelas que serão mostradas aceleram o processo de projeto do controle estando já especificado o algoritmo que deve ser executado para o desenvolvimento do PID.

O método de Ziegler-Nichols (MZ) foi elaborado em 1942, mas ainda possui vasta utilização na área de controle [10]. Essencialmente, dois algoritmos foram desenvolvidos para projetos de PIDs. O primeiro consiste em deixar o sistema em malha fechada, ao passo que o outro deixa-se em malha aberta. No que tange ao processo em malha fechada, tem-se que, primeiramente, o K_p do controlador deve ser aumentado até que a resposta se torne oscilatória. A partir disso, coleta-se o ganho proporcional K_u que gerou a resposta periódica e o período P_u da resposta oscilatória. Assim, pela tabela 2.5 pode-se diretamente vislumbrar os parâmetros do controlador.

Tabela 2.5: Sintonia MZ por malha fechada.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.45 K_u$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6 K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

Porém, essa metodologia apresenta a desvantagem de ter que gerar uma resposta oscilatória no sistema para conseguir encontrar os parâmetros do PID. Isso, em um processo industrial, pode ser arriscado haja visto que a planta estaria operando em um modo inseguro. Por tais fatores, o método em malha fechada não é muito utilizado. Contudo, há ainda uma vertente do MZ, a qual faz uso do sistema em malha aberta.

Considera-se um modelo de primeira ordem com atraso dado pela equação 2.33. Logo, os parâmetros do controlador serão dados de acordo com a tabela 2.6.

Tabela 2.6: Sintonia MZ por malha aberta.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\tau/(K\theta)$	-	-
PI	$0,9\tau/(K\theta)$	$3,33\theta$	-
PID	$1,2\tau/(K\theta)$	2θ	$0,5\theta$

Um outro método que tem boa aceitação na indústria é o de Chien, Hrone e Reswick (CHR) criado em 1952 [17]. A ideia proposta foram duas formas de projeto do controlador PID: um para resposta rápida, sem sobrevalor, e outro para resposta rápida, com sobrevalor de 20%. O primeiro é mais utilizado devido sua robustez perante perturbações no processo e pelo fato de estar mais longe da estabilidade quando comparado ao MZ. A tabela 2.7 indica a forma de cálculo dos parâmetros do controlador.

Tabela 2.7: Sintonia CHR para resposta sem sobrevalor.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,3\tau/(K\theta)$	-	-
PI	$0,6\tau/(K\theta)$	4θ	-
PID	$0,95\tau/(K\theta)$	$2,375\theta$	$0,421\theta$

Por fim, o último método que será apresentado é o IMC (*Internal Model Control*)[18]. Como o próprio nome faz alusão, esta metodologia procura projetar um PID de acordo com um modelo identificado do processo. Um primeiro requisito é a utilização de filtros para que tal modelagem não afete negativamente o comportamento do controlador. A partir do modelo proposto, escolhe-se um λ que será a nova constante de tempo do sistema. Diversas formas de sintonia foram propostas utilizando o IMC. Todavia, especifica-se neste trabalho um que foi proposto em [18] o qual consiste em obter uma resposta em malha fechada dada por

$$G_{MF}(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}. \quad (2.60)$$

Assim, pela tabela 2.8, projeta-se o controlador de acordo com o modelo do processo. Existem, ainda, diversas outras sintonias que podem ser realizadas considerando modelos com atraso [18][19].

Tabela 2.8: Sintonia IMC.

Modelo	K_p	T_i	T_d
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\tau/(K\lambda)$	τ	-
$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$(\tau_1 + \tau_2)/(K\lambda)$	$\tau_1 + \tau_2$	$\tau_1\tau_2/(\tau_1 + \tau_2)$
$\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1}$	$2\xi\tau/(K\lambda)$	$2\xi\tau$	$\tau/(2\xi)$
$\frac{K}{s}$	$1/(K\lambda)$	-	-
$\frac{K}{s(\tau s + 1)}$	$1/(K\lambda)$	-	τ

2.8 Controlador PID Digital

Pela teoria de controle, é sabido que o controle PID se trata de três ações (proporcional, integral e derivativo) sobre o erro, as quais, em conjunto, são capazes de controlar a maioria dos sistemas lineares existentes. A seguir, estão descritas as características principais de cada uma das ações do PID.

1. **Ação Proporcional** - K_p : tem por objetivo acelerar a resposta do sistema perante mudanças no setpoint;
2. **Ação Integral** - K_i : aumenta o tipo do sistema, eliminando o erro em regime permanente. Também possui a característica de, quando muito elevado, criar sobressinais nas respostas do sistema;

3. **Ação Derivativa** - K_d : consegue "frear" a resposta do sistema de forma que haja diminuição no sobressinal. Todavia, torna a resposta mais lenta e, caso haja ruídos de medição, tal ação os amplifica.

Nesse contexto, tem-se que a resposta do controlador em tempo contínuo será

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.61)$$

Todavia, pelo fato de o CLP referir-se a um equipamento que trabalha com ciclos de clock para processamento, tem-se que o PID deverá ser implementado no tempo discreto com certo tempo de amostragem T . Realizando algumas alterações na equação 2.61 é possível demonstrar que a ação de controle em tempo discreto será dado por

$$u[n] = K_p e[n] + K_i T \sum_{j=0}^n e[j] + K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T}. \quad (2.62)$$

Esta forma da equação do PID é comumente chamada de *forma posicional* (*positional form*) [20].

Nota-se, porém, que esse algoritmo ainda não é o mais adequado para implementação em um CLP. Em um processo industrial que costuma operar por dias seguidos, um erro é acumulado devido a limitações na representação numérica do computador e consequentes arredondamentos, o que, a longo prazo, pode ser um problema para o processo. Dessa forma, introduz-se a segunda forma - chamada de *forma rápida* (*velocity form*) - do PID que é dada pela equação 2.63[20].

$$u[n] = u[n-1] + K_p(e[n] - e[n-1]) + K_i T e[n] + \frac{K_d}{T}(e[n] - 2e[n-1] + e[n-2]) \quad (2.63)$$

Assim, essa equação torna-se mais apropriada para aplicações em ciclos de scan haja vista a dependência de amostras e a não realização de somatórios que podem trazer comportamentos inadequados em operações de ponto flutuante.

Como visto, o PID é um controlador caracterizado por três tipos de ganho. Esses, por sua vez, podem ser descritos de duas formas diferentes: a dependente e a independente. A primeira - equação 2.64 - estabelece o ganho do controlador K_c e as constantes de tempo integral T_i e derivativa T_d .

$$u[n] = u[n-1] + K_c \left((e[n] - e[n-1]) + \frac{1}{T_i} T e[n] + T_d T (e[n] - 2e[n-1] + e[n-2]) \right) \quad (2.64)$$

A segunda, por outro lado, como o próprio nome faz alusão, caracteriza o PID por ganhos independentes para cada ação. Assim, estabelece-se um K_p , K_i e K_d como mostrado na equação 2.63. A conversão de uma forma para outra é bastante simples e é dada por

$$K_c = K_p \tag{2.65}$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} \tag{2.66}$$

$$K_d = K_c T_d \tag{2.67}$$

em que as constantes de tempo são dadas em segundos.

Capítulo 3

Desenvolvimento

3.1 Introdução

Esta seção abordará a descrição detalhada dos componentes da bancada, bem como os passos realizados para a execução do projeto.

Um primeiro passo antes da execução de experimentos na bancada didática foi o diagnóstico de operação da mesma. Tendo em vista outros trabalhos realizados, verificou-se a necessidade de mudança dos atuadores e dos elementos de controle das bombas. Além disso, mudou-se a alimentação de alguns sensores observando as características técnicas do módulo de entrada utilizado juntamente com o CLP. Nesse contexto, será importante entender o funcionamento dos componentes da planta. A partir disso, a segunda etapa foi calibrar a instrumentação visando coleta de dados acuradas do sistema. Com isso, passou-se para o controle do nível dos tanques inferiores propriamente dito em que, primeiramente, implementou-se o método dos mínimos quadrados recursivo no CLP e validou-se o algoritmo usando a ferramenta *ident* do MATLAB. Tendo confiança na identificação, utilizou-se a sintonia IMC com o fito de projetar um PID para cada bomba separadamente e, depois, funcionando simultaneamente. Por fim, um sistema supervisorio foi criado para interface com usuário de todas as etapas citadas. A arquitetura de todo o sistema é mostrado na figura 3.1.

3.2 Descrição e Melhorias da Bancada

3.2.1 Controlador Lógico Programável - Rockwell

Todo o desenvolvimento desse projeto foi executado utilizando o modelo de CLP 1756 - L62 da Rockwell Automation, o qual também é vastamente aplicado nas indústrias. Tendo em vista a aplicação da bancada, outros módulos são conectados à CPU do controlador. O primeiro corresponde ao ethernet/IP, o qual permite que a comunicação entre CLP e computador fosse feita por meio de cabo ethernet. No que tange aos módulos de entrada e saída, utilizaram-se 4 módulos de entradas e saídas digitais e analógicas. Ainda no contexto, uma fonte *Allen-Bradley* de 24V alimentava os módulos que dela necessitavam. Os modelos e suas respectivas posições no chassi

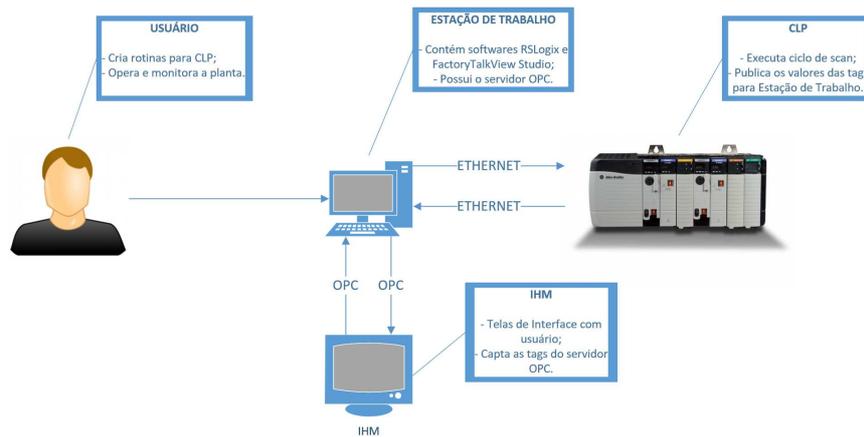


Figura 3.1: Arquitetura de todo o sistema da bancada.

são especificados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificação dos módulos do CLP.

Módulo	Descrição	Posição (Slot)
1756 - L62	CPU	0
1756 - ENBT/A	Ethernet/IP Bridge	1
1756 - IF8/A	Entrada Analógica - 8 Pontos	2
1756 - OF8/A	Saída Analógica - 8 pontos	3
1756 - IB16I/A	Entrada Digital - 16 pontos	4
1756 - OB8/A	Saída Digital - 8 pontos	5

No trabalho, as entradas analógicas correspondem aos do sensores piezoresistivos - descritos a seguir - que realizam a medição de nível. Em relação às saídas analógicas, dois pontos foram responsáveis por enviar sinais de controle para duas placas que manipulavam tal sinal para controlar as bombas. No caso das entradas digitais, dois sensores de vazão foram conectados. Por fim, o módulo de saída digital não teve nenhuma função.

3.2.1.1 Desenvolvimento de Programas

Por se tratarem de equipamentos pertencentes a Rockwell Automation, todo o desenvolvimento também foi realizado em softwares proprietários que serão descritos nesta sub-seção.

A primeira ferramenta utilizada para programação do CLP foi o *RSLOGIX 5000* ou simplesmente *Logix*. Até a data deste trabalho, verificou-se que o programa vem sendo substituído por um novo ambiente de desenvolvimento chamado *STUDIO 5000*. Todavia, as interfaces continuam similares. Quanto à ferramenta em si, é possível organizar todas tarefas, programas e módulos desenvolvidos o que facilita em projetos de grande porte. Há de se lembrar que as linguagens

aceitas pelo software são LD, SFC, FBD e ST apresentados na seção 2.3. Nele também é possível fazer o *download* de projeto para o CLP ou o *upload* do que se encontra na sua memória. A figura 3.2 apresenta a tela inicial do LOGIX.

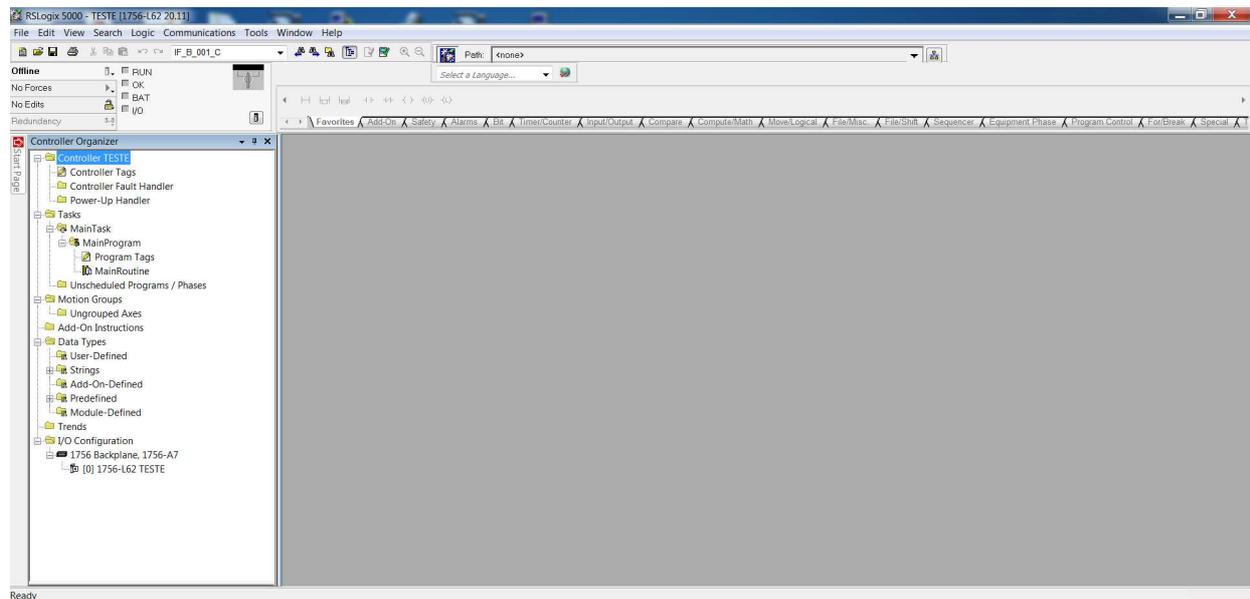


Figura 3.2: Ambiente de programação do LOGIX5000.

Outra interessante ferramenta de programação são as *add-ons instructions* que são como funções em outras linguagens, podendo aceitar parâmetros de entrada e retornar valores de saída. A intenção de uso de tal facilidade seria para ajudar na manutenção de código e deixá-lo modularizado.

Além disso, diversas funcionalidades dentro do contexto de controle de processos estão implementadas como pode ser visto em [20]. Entre estes está o bloco PIDE (*Enhanced PID*) - figura 3.3 - que fornece uma série de parâmetros para configuração de controle PID. Esse bloco utiliza a forma rápida de cálculo do sinal de controle apresentado na seção 2.8. Outro fato importante a ser ressaltado é a inserção, neste bloco, de constantes de tempo das ações em **minutos**. A figura 3.3 mostra a série de parâmetros que são possíveis configurar. Além dessas, existem outras abas em que se pode definir: a faixa de valores que o processo trabalha, alarmes para certas variáveis, tags para o controlador operar em manual/automático, inserção de efeito *anti-windup*, controles *feedforward*, em cascata, entre outros. Uma ferramenta presente é o *autotuning* em que se pode definir o degrau a ser aplicado no processo e o próprio controlador sugere os parâmetros para o PID.

Existe, ainda, outro bloco que permite realizar simulações dos processos para controle antecipatório chamado *Lead-lag*(avanço-atraso). Isso será útil para este projeto objetivando a comparação entre modelo identificado e o processo real. Por fim, filtros passa-baixas também podem ser aplicados nas medições dos sensores, o que também é interessante para este projeto. Todos os blocos existentes e suas possíveis configurações estão presentes em [20].

No que diz respeito ao desenvolvimento de telas para supervisão da planta, utilizou-se o software

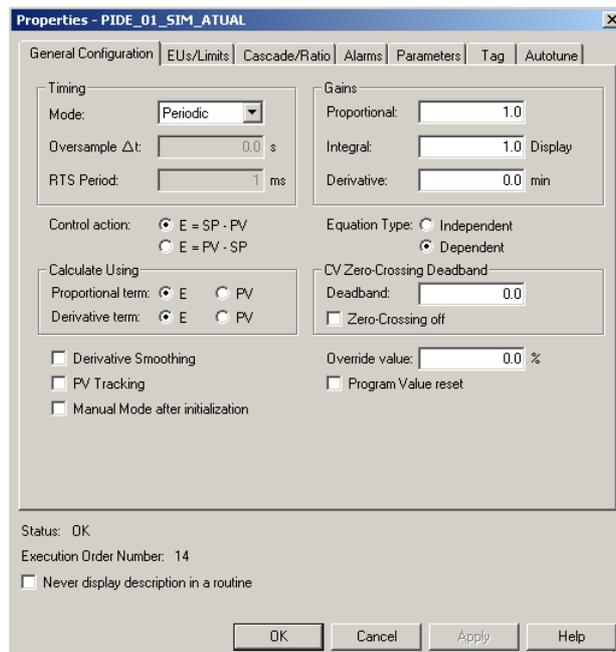


Figura 3.3: Bloco PIDE.

FactoryTalk View Studio Machine Edition cujo exemplo de projeto é mostrado na figura 3.4. Nele, encontram-se todas as ferramentas de design para desenvolvimento de telas. Além disso, para o enlace entre as *tags* criadas no Logix e a tela do supervisor, duas formas eram possíveis. A primeira faz uso de um servidor próprio da Rockwell chamado *RSLinx Enterprise*. A segunda maneira é por meio da criação de um servidor OPC, o qual pode ser feito pelo software também da Rockwell: o *RSLinx Classic*.

Uma funcionalidade que foi utilizada foram as macros. Como o supervisor contemplará um modelo simulado e real, seria interessante poder atualizar duas tags ao mesmo tempo. Todavia, os botões presentes no software podem alterar uma tag apenas. Assim, utilizou-se essas macros em que diversas ações podem ser incorporadas nelas.

3.2.2 Bombas Diafragma

A primeira melhoria instalada na planta didática foi a dos atuadores para realizar a movimentação de água do reservatório para os tanques. Tratam-se de bombas diafragma cujo funcionamento foi apresentado na seção 2.4.2. A figura 3.5 apresenta o modelo do atuador utilizado nos experimentos e instalado neste trabalho. Em seguida, a tabela 3.2 mostra suas especificações técnicas.

Tabela 3.2: Características técnicas da bomba.

Especificação	Valor
Tensão Máx.	12V
Potência	60W
Vazão Máx.	5L/min

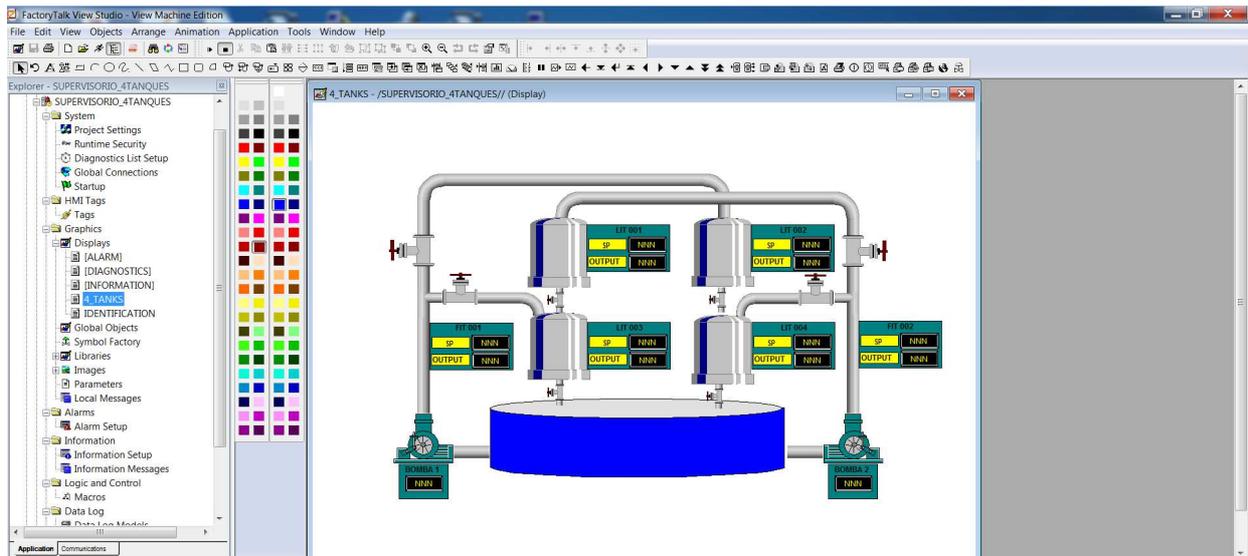


Figura 3.4: Ambiente de desenvolvimento de telas FactoryTalk View Studio.



Figura 3.5: Nova bomba diafragma instalada na bancada.

Tal mudança foi motivada pela dificuldade encontrada na bancada em outros trabalhos quando se usava um outro modelo de bomba. Nesses casos, o atuador superaquecia e tinha uma perda de desempenho considerável. Logo, as etapas de identificação e controle eram prejudicadas visto que o comportamento da bomba era imprevisível, além de ela não aguentar muitos minutos seguidos de testes.

3.2.3 Sensores de Pressão

Para medição dos níveis nos tanques da bancada, quatro sensores do tipo MPVZ5004 - já presentes na bancada - da *Freescale Semiconductors* foram usados. Como apresentado na seção 2.4.1.2,

este sensor possui *strain-gauges* inseridos em seu encapsulamento o que torna seu funcionamento aproximadamente linear à medida que o nível aumenta. Além disso, já dentro do circuito integrado faz-se o condicionamento do sinal gerando como saída valores entre 1V e 4.9V e compensa-se a influência da temperatura na medição do mesmo [21]. A figura 3.6 e a tabela 3.3 ilustram o modelo e suas especificações técnicas respectivamente.



Figura 3.6: Sensor de pressão MPVZ5004.

Tabela 3.3: Especificações técnicas do sensor de pressão MPVZ5004.

Especificação	Valor
Pressão	0 até 400mm H ₂ O
Alimentação	4,75V - 5,25V
Saída	1V até 4.9V

Como havia apenas uma fonte de 24V na bancada, fez-se um circuito simples de regulação da tensão para 5V a fim de se alimentar corretamente os sensores de pressão.

3.2.4 Sensores de Vazão

Os sensores de vazão não vinham, até então, sendo utilizados nos projetos anteriores feitos na bancada. Apesar de que neste trabalho não se fará uso de tal dado, verificou-se que, da forma como estava instalado, o CLP não conseguiria detectar a vazão correspondente.

Primeiramente, o sensor é do modelo YF-S402 feito por um fabricante chinês. Seu princípio de funcionamento é similar ao apresentado na seção 2.4.1.3. Uma pequena turbina instalada no interior do encapsulamento gira à medida que ocorre passagem de fluido. Dessa forma, isso gera pulsos com certa frequência que é diretamente proporcional à vazão. A figura 3.7 e a tabela 3.4 apresentam o sensor e suas especificações técnicas.

Pelo fato de a saída do sensor ser pulsada, instalou-se o mesmo no módulo de entrada digital. Inicialmente, este sensor estava sendo alimentado com tensão mínima (5V). Todavia, observando o manual do respectivo módulo, observou-se que esta tensão seria insuficiente para o CLP reconhecer o pulso, já que o estado "on" deveria ser de, no mínimo, 10V. [22]. Logo, como foi adquirida



Figura 3.7: Sensor de Vazão YF-S402.

Tabela 3.4: Especificações técnicas do sensor de vazão YF-S402.

Especificação	Valor
Alimentação	5 - 24Vdc
Faixa de Operação (vazão)	1 - 5L/min
Saída	4380 pulsos = 1L

uma outra fonte de 24V com 3 saídas para fazer a alimentação de novos elementos da bancada, aproveitou-se para também fazer a alimentação correta dos sensores de vazão.

3.2.5 Placas de Potência

Outra melhoria que foi colocada na bancada refere-se às placas de potência que controlam as bombas diafragma. Antes de adentrar em suas especificações, é importante salientar que, inicialmente, existia outra placa que tinha a mesma função (figura 3.8). O drive é fabricado pela T&S Equipamentos Eletrônicos [23]. O grande imbróglio se deu pelo fato de que as bombas, como já mencionado, possuem alimentação de 12V e potência de 60W, ou seja, a corrente consumida pelo atuador seria de 5A. Observando o manual da placa, verificou-se que o máximo que ela conseguia fornecer era 3A. Assim, não se conseguia bombear água com vazão máxima fazendo com que os tanques, sobretudo os superiores, não tivessem os níveis elevados.

Dessa maneira, procurou-se outra placa que fornecesse potência suficiente para a bomba. A solução escolhida foi um drive PWM para motor DC fabricado pela J. Yazbek Indústria Eletrônica, como o ilustrado pela figura 3.9. Dentre suas características, pode-se realizar o controle da bomba com o PWM da saída que possui *feedback* para estabilização do mesmo. Além disso, é possível variar a saída do controle por meio de um sinal referência de 0 - 10V ou conectando um potenciômetro. Diversos outros ajustes como regulação de carga, aceleração do motor, limite de corrente estão disponíveis [24]. Ainda em relação à placa, sua corrente máxima de saída é de 10A, o que é

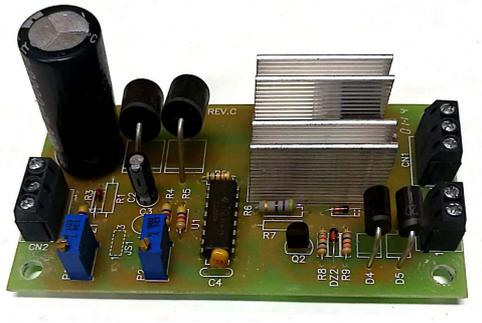


Figura 3.8: Placa de potência inicialmente instalada.

suficiente para a aplicação na bancada didática.



Figura 3.9: Placa de potência atualmente instalada.

É importante mencionar, também, que a alimentação da placa é de 24V. Dessa forma, utilizou-se outra saída da nova fonte adquirida para alimentá-la. Ademais, note que a bomba é de 12V. Assim, foi necessário limitar via software a saída do CLP para ir de 0 - 5V de forma que o sinal de 5V gerasse um *duty cycle* na saída de 50% o qual corresponderia exatamente aos 12V.

3.2.6 Configuração da Bancada

Tomando como base o esquemático mostrado na figura 2.4, algumas diferenças devem ser estabelecidas. Primeiramente, a bancada didática deste trabalho possui apenas válvulas manuais. Logo, onde se vê LCV, corresponde, na verdade, a uma válvula manual cuja sigla seria HV. Nessa bancada, não há os elementos HV 8, tampouco HV 7. Os sensores de vazão, expressos na figura como FIT, encontram-se logo na saída das bombas e existem apenas uma para cada bomba.

Sabendo de tais diferenças, configurou-se a bancada em que as válvulas manuais ficaram abertas, com exceção da HV 5 e HV 6, a fim de que os tanques fossem não-comunicantes. Além disso, alguns ajustes nas válvulas, porém, tiveram de ser feitas para ter mais vazão para os tanques superiores, mas, ao mesmo tempo, ela não poderia ser maior que a vazão enviada para o tanque de atuação direta da bomba. Por isso, as válvulas não se encontravam totalmente abertas. Esta é uma configuração simples da bancada, a fim de se ter um sistema de fase não-mínima. Isso porque

o foco do projeto estava na automação da bancada e na criação do algoritmo de identificação, sendo a parte de controle feita para validação dos procedimentos realizados.



Figura 3.10: Bancada didática.

Por fim, definiu-se que a área dos tanques é de $47,6\text{cm}^2$ e que a altura máxima da coluna de líquido será de 20cm

3.3 Calibração dos Equipamentos

A primeira etapa, de fato, do projeto, foi a calibração dos sensores de vazão, nível e ajuste dos parâmetros da placa de potência. Esta seção apresentará os procedimentos tomados em cada um desses aspectos.

3.3.1 Nível

No que tange à variável de processo nível, quando se notava certa discrepância entre valor medido e real, executava-se um procedimento para calibração. Sabendo que os níveis em unidade de engenharia de 0% a 100% correspondia a 0cm e 20cm da altura da coluna de líquido, colocava-se primeiramente o nível do respectivo tanque em nível baixo anotando a tensão de saída do sensor. Após, elevava-se o nível até 20cm e também anotava-se tal valor, sendo que esse procedimento

era repetido até haver boa correlação entre as grandezas. Portanto, a relação linear poderia ser facilmente extraída por

$$EU[\%] = \frac{100}{SA - SB} \times VM[V] - \frac{SB \times 100}{SA - SB} \quad (3.1)$$

em que SA é o sinal de nível alto do sensor, SB corresponde ao sinal de nível baixo, EU é o sinal do sensor em unidade de engenharia em % e VM é o valor medido pelo sensor em Volts. Essa relação também pode ser especificada apenas fazendo referência a valores de ganho e offset. Todos esses cálculos foram implementados em uma *add-on instruction* no CLP cujo parâmetro de entrada era o valor bruto do sensor em Volts ao passo que a saída indicava ganho, offset e a variável em unidades de engenharia. Nesse contexto, para verificar a linearidade em termos de variação da medição, traçou-se um gráfico relacionando nível real com o nível medido em unidade de engenharia.

Ainda, é importante salientar que, por experiência de testes realizados na planta, a medição do nível é ruidosa e o principal responsável por isso é a atuação das bombas. Assim, a fim de melhorar a visualização do comportamento de tal variável, blocos de filtro passa-baixas, fornecidos pelo LOGIX, foram utilizados.

3.3.2 Vazão

De acordo com as informações sobre o sensor utilizado, o qual foi apresentado anteriormente, fez-se uma *add-on instruction* responsável por calcular a quantidade de pulsos dadas em 1 segundo e convertê-la em unidade de vazão. Portanto, uma simples conversão é dada por

$$Q[L/min] = \frac{PULSOS}{4380} \times 60. \quad (3.2)$$

Para validação desse procedimento, toma-se uma bomba que se deseja analisar sua vazão e fecha-se a válvula para o tanque superior que ela alimenta, bem como a válvula de saída do tanque de atuação direta. Dessa forma, cronometra-se o tempo que a altura da coluna de líquido demora a atingir certo valor. Logo, sabendo a área do tanque tem-se que

$$Q[L/min] = \frac{Ah}{t} \times 60. \quad (3.3)$$

em que t é o tempo em segundos, A a área do tanque e h a altura da coluna de líquido. Ressalta-se que o termo Ah deve estar em litros.

3.3.3 Placa de Potência

Visando o funcionamento adequado da placa de potência, conectou-se a bomba à saída dela para verificar seu comportamento. Aumentando de forma gradativa a tensão de referência do CLP que, inicialmente, encontrava-se limitada de 0 - 5V, até haver alguma atuação da bomba. Então,

à medida em que a referência fosse aumentando e, com a ajuda de um multímetro, verificava-se a saída da bomba. Assim, realizaram-se tais ações até que os 5V da entrada do CLP na placa correspondesse aos 12V na saída da bomba. Todavia, verificou-se, também, que o comportamento da placa tinha certa alteração de um teste para outro, sendo que a saída variava em 1V para cima quando aplicado 5V na referência.

Continuando o procedimento e tendo a placa sido ajustada, iniciou-se o próximo passo de estabelecer a unidade de engenharia em %. Assim, aumentando-se novamente a referência gradativamente chegou-se num valor em que a bomba ainda não tinha nenhuma reação, mas que, se aumentasse um pouco mais a referência, ela saía da zona morta. Para manter a consistência nos dados, tal faixa de valor foi utilizada para ambas as bombas.

3.4 Controle de Nível

3.4.1 Identificação do Processo

Um dos objetivos desse projeto consistiu na aplicação de identificação de processos em rotinas internas ao CLP. Dessa forma, escolheu-se o método dos mínimos quadrados recursivo, haja vista que tal equipamento opera em ciclos de scan. Nesse sentido, implementou-se, primeiramente, uma simulação no Simulink com um processo de nível similar ao modelo matemático da planta. Observa-se, ainda, o fato de que, para o projeto do controlador, seria necessária a obtenção do modelo no tempo contínuo, ou seja, no domínio de Laplace. Logo, a conversão apresentada na seção 2.5 será utilizada. Nesse contexto, por se tratar da identificação de um sistema em malha aberta com uma única entrada e uma saída em análise, bem como a identificação ser de um modelo de primeira ordem, tem-se que os vetores de regressores e parâmetros serão respectivamente:

$$\varphi[\mathbf{k}]^T = \begin{bmatrix} -y[k-1] & u[k-1] \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}^T = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \end{bmatrix}.$$

Estabelecido o algoritmo a ser implementado - apresentado na tabela 3.5 -, fez-se o programa no MATLAB para validação do código o qual é mostrado na figura 19 no anexo. Tendo ele funcionado conforme desejado, converteu-se para linguagem em ST para o CLP. Esse programa pode ser visualizado da figura 7 até 8 no anexo.

No que diz respeito à validação desse algoritmo, testou-se no seguinte ponto de operação, o qual foi escolhido em uma condição de regime interessante:

$$P1 : Bomba1 = 50\%; Bomba2 = 60\%.$$

Vale ressaltar que tal condição tem dependência com a relação sinal-ruído da medição. Por exemplo, um nível muito baixo potencializa a ação da reverberação da água no tanque e, conseqüentemente,

Tabela 3.5: Algoritmo de implementação do método de mínimos quadrados recursivo

Algoritmo - Mínimos Quadrados Recursivo
1) Estabelecer matriz P_{k-1} inicial. Deve ser uma matriz identidade para evitar forte influência nos cálculos dos parâmetros
2) Estabelecer matriz dos parâmetros θ_{k-1} iniciais. Deve ser montada a partir do conhecimento inicial da planta
3) Iniciar coleta das amostras
4) Calcular erro de acordo $e_k = y[k] - \varphi(k-1)^T \theta_{k-1}$
5) Calcula a nova matriz P_k pela equação 2.58
6) Achar novos matriz dos parâmetros θ_k por $\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + P_k \varphi(k-1) e_k$

gera mais ruído. Por outro lado, um nível muito alto poderia ser também testado, mas esse projeto não o fez.

Aplicaram-se sinais degraus e obteve-se o comportamento do nível no tanque de atuação direta da bomba e no de atuação indireta, ou seja, nos tanques 3 e 4, chegando-se a um total de 2 funções de transferência para cada bomba. Denota-se por G_{B1_i} a função de transferência no tanque i , trabalhando no ponto de operação citado, variando-se a bomba $B1$ e G_{B2_i} , caso se varie a bomba 2. Após, tal resultado foi também identificado utilizando a ferramenta *System Identification* do MATLAB para efeitos de comparação com o algoritmo implementado no CLP.

3.4.2 Projeto do Controlador

Como o modelo identificado para certo ponto de operação consistiu em um modelo de primeira ordem sem atraso, o método IMC - apresentado na seção 2.7 - foi escolhido para realizar a sintonia do PID. É importante ressaltar que os parâmetros desse método correspondem a ganhos **dependentes**. Dessa forma, estabeleceu-se que

$$\lambda = \frac{\tau}{3}$$

e calcularam-se os ganhos do controlador e a constante de tempo da ação integral. Sabendo que o bloco PIDE recebe constantes de tempo em minutos, dividiu-se o valor encontrado por 60.

Outro ponto importante nessa etapa foi de identificar a zona morta da bomba. Feito isso, limitou-se, via software, o mínimo do controlador PID para garantir que não houvesse não-linearidades.

Dentro desse contexto, pegou-se o modelo no tanque de atuação direta da bomba e projetou-se o controlador via IMC para o controle de nível nesse mesmo tanque. É preciso enfatizar que a bomba com atuação indireta no tanque em questão manteve-se no ponto de operação estabelecido com valor constante, a fim de manter a consistência do projeto.

3.5 Sistema Supervisório

Conforme já descrito, para fazer o sistema supervisório, o software *FactoryTalk View Studio* foi utilizado. Definiram-se, primeiramente, as telas que deveriam estar presentes. Assim, uma tela de início com o sistema de quatro tanques visual deveria ser a tela inicial com botões de navegação para outras duas telas de calibração dos sensores de nível e para o procedimento de identificação.

Dentro deste último poderiam ser visualizados os parâmetros do modelo identificado, assim como aplicar degraus nas bombas que estavam sendo analisadas. Outro aspecto importante era o cálculo automático dos parâmetros do PID assim como funcionalidades para validação e análise do desempenho do controlador.

Logo, todo o aspecto gráfico e visual foi projetado para tornar visual o procedimento de identificação e projeto de controlador ao usuário .

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

Para coletar resultados consistentes, a calibração dos sensores foi realizada. No que tange à variável de processo nível, converteram-se as alturas dos tanques para unidades de engenharia e verificou-se a linearidade na medição. A escala da medição foi, então, transmitida para o CLP em forma de uma *add-on instruction*. Outra variável presente no processo era a vazão, apesar de que esta não foi necessária para a aplicação nesse projeto. No entanto, também coletaram-se os resultados para verificação da correta medição do sensor objetivando deixá-lo operando para trabalhos futuros. Por fim, nessa etapa ainda se definiu a escala das placas de potência e também coletaram-se amostras, a fim de verificar a linearidade delas.

Para a identificação do processo, um ponto de operação foi testado e comparou-se o resultado obtido no método implementado pelo CLP - mínimos quadrados recursivo - e pela ferramenta de identificação do MATLAB.

Validada a identificação no CLP, ele foi utilizado para realizar o controle do nível dos tanques inferiores. Primeiramente, projetaram-se dois controladores PIDs separadamente para cada bomba, de acordo com os tanques de atuação diretas delas. Um outro teste foi realizado juntando ambos os controladores e testando referências altas e baixas em ambas, a fim de verificar o comportamento conjunto.

Por fim, todas as etapas foram implementadas em um sistema supervisório para facilitar os procedimentos e criar uma ferramenta visual de análise diretamente do CLP.

Para cada experimentação apresentada, descrever as condições de experimentação (e.g., instrumentos, ligações específicas, configurações dos programas), os resultados obtidos na forma de tabelas, curvas ou gráficos. Por fim, tão importante quando ter os resultados é a análise que se faz deles. Quando os resultados obtidos não forem como esperados, procurar justificar e/ou propor alteração na teoria de forma a justificá-los.

4.2 Dados de Calibração

4.2.1 Cálculo do Nível

Realizados os procedimentos já apresentados, os dados de medição e os dados reais foram comparados para verificar a validade dos sinais provindos dos sensores e sua linearidade.

Tabela 4.1: Calibração - Tanque 1

Nível Real (%)	Nível Medido (%)
25	25,47
50	50,71
75	75,65
100	100,2
Sinal Baixo (V)	Sinal Alto (V)
1.542	3.445

Tabela 4.2: Calibração - Tanque 2

Nível Real (%)	Nível Medido (%)
25	24,40
50	49,91
75	74,67
100	100,1
Sinal Baixo (V)	Sinal Alto (V)
1.528	3.424

Tabela 4.3: Calibração - Tanque 3

Nível Real (%)	Nível Medido (%)
25	25,69
50	50,41
75	74,62
100	100,1
Sinal Baixo (V)	Sinal Alto (V)
1.693	3.637

Pelas tabelas apresentadas, percebeu-se que todos os sensores tinham uma correlação R^2 de quase 100%, o que indicou a linearidade da medição. Dessa forma, implementou-se no CLP, por meio de lógica LD - apresentada na figura 14 no anexo - uma *add-on instruction* que convertia o sinal vindo do sensor para unidades de engenharia de 0% a 100% juntamente com um filtro passa-baixas (figura 2 anexada).

Por fim, vale mencionar que tais valores obtidos correspondem a um experimento. Toda vez que fosse percebida uma diferença significativa entre os valores de medição e real, o processo de

Tabela 4.4: Calibração - Tanque 4

Nível Real (%)	Nível Medido (%)
25	25,24
50	49,99
75	74,88
100	100,1
Sinal Baixo (V)	Sinal Alto (V)
1.627	3.524

calibração era repetido. Dessa forma, os resultados das próximas etapas não necessariamente usarão os sinais de nível baixo e alto apresentados.

4.2.2 Cálculo da Vazão

Para a vazão, fez-se o experimento apenas para verificar se a medição do sensor estava coerente com o que foi especificado pelo fabricante. Dessa forma, colocando as bombas em 50% e, com as válvulas de saída dos tanques fechadas, cronometrou-se o tempo que o nível demorou para atingir 50%. Há de se ressaltar que os tanques inferiores e superiores estavam sendo alimentados. Dessa forma, coletou-se o tempo de cada tanque e somou-se. Os resultados encontram-se nas tabelas 4.5 e 4.6. Além disso, a rotina implementada no CLP encontra-se na figura 16 do anexo.

Tabela 4.5: Sensor de Vazão - Bomba 1

Vazão calculada (L/min)	Vazão Medida (L/min)
2,009	2,008

Tabela 4.6: Sensor de Vazão - Bomba 2

Vazão calculada (L/min)	Vazão Medida (L/min)
1,7487	2,082

Tais diferenças nas medições podem ser possíveis discrepâncias entre a quantidade de pulsos dada pelo sensor e a vazão em si. Outro ponto a ser considerado é que os sensores estão levemente inclinados, o que também pode alterar a medição. Todavia, mesmo assim, os resultados mostraram-se satisfatórios para a vazão

4.2.3 Placa de potência

A nova placa de potência foi instalada e, então, partiu-se para conhecer mais sobre seu comportamento. Verificou-se que, para ambas as bombas, suas operações começavam a partir de uma

tensão de referência de $3,7V \sim 3,8V$. Dessa forma, estabeleceu-se que os pontos de referência para unidade de engenharia seria de $3,6V$ (0%) até $5,2V$ (100%). Dessa maneira, as zonas de banda morta para as bombas foram as seguintes:

$$Bomba1 = 17\%$$

$$Bomba2 = 10\%$$

Para conhecer o comportamento das placas, no que tange às suas saídas, tendo como referência a entrada provinda do CLP, traçaram-se as curvas mostrada nas figuras 4.1 - bomba 1 - e 4.2 - bomba 2-.

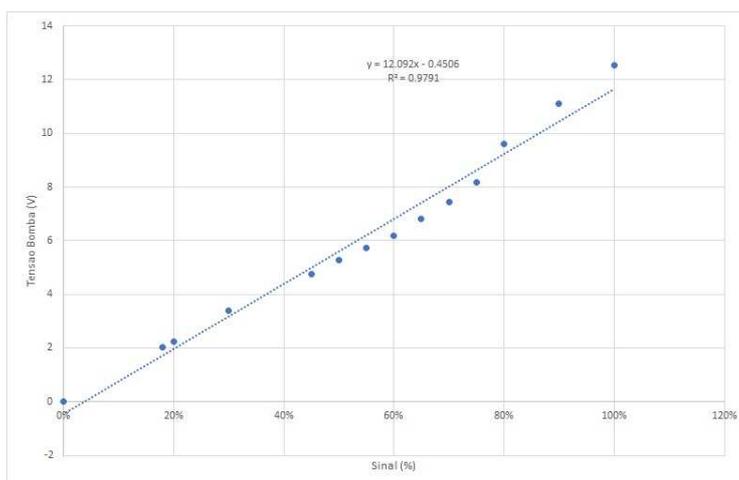


Figura 4.1: Tensão na bomba 1 em função do sinal de referência do CLP.

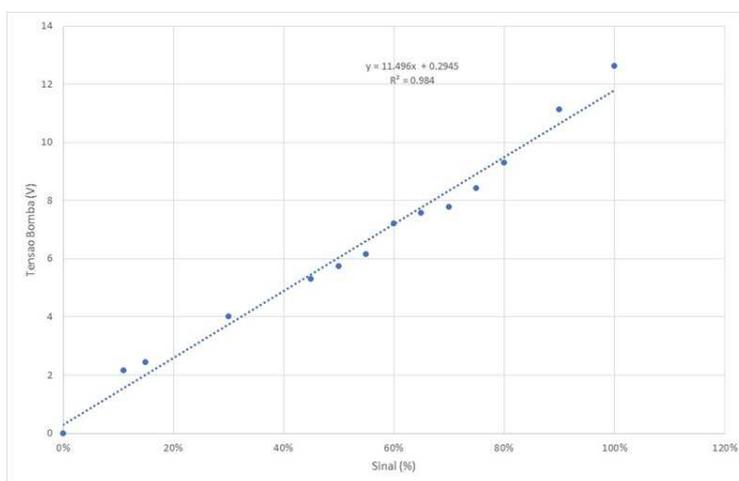


Figura 4.2: Tensão na bomba 2 em função do sinal de referência do CLP.

Note que a correlação R^2 para linearidade foi de praticamente 98% para ambas as bombas. Tal resultado também mostra a importância da escolha de pontos de operação para as bombas a fim de que as diferenças observadas não afetem consideravelmente a linearização do processo.

Toma-se cuidado também de que no controle não se atinja a banda morta da bomba para não haver não-linearidades no processo.

4.3 Identificação do Sistema

Como especificado na seção 3, o método utilizado para identificação do modelo do processo foi o de mínimos quadrados recursivo. Antes, porém, da implementação no CLP, simulou-se o mesmo processo utilizando Simulink e o MATLAB aplicando um degrau na bomba do modelo teórico de 60% para 70% e coletando os dados de saída do nível. Para aproximar-se o máximo possível do processo real, aplicou-se também ruídos na simulação, a fim de verificar a robustez do algoritmo. O resultado encontra-se na figura 4.3 e os diagramas de simulação nas figuras 17 e 18 no anexo.

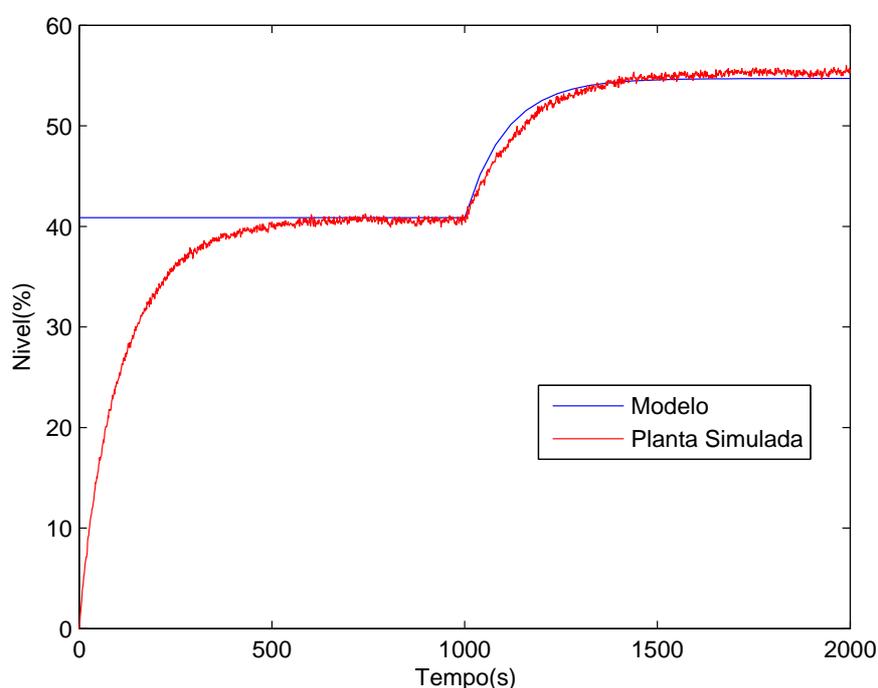


Figura 4.3: Identificação recursiva do modelo simulado.

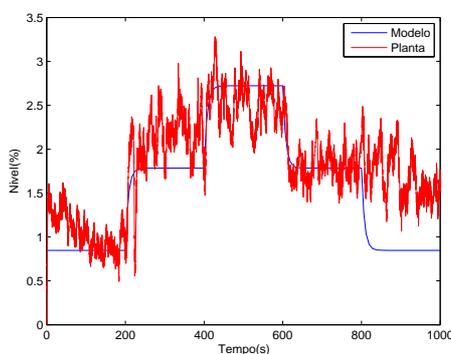
Notou-se, portanto, que o algoritmo recursivo foi bem implementado, sendo tolerante as diferenças encontradas em relação ao modelo simulado e identificado devido aos ruídos.

O próximo passo consistiu na aplicação do mesmo algoritmo no processo real. Em primeiro lugar, constatou-se que um interessante ponto de operação para se trabalhar seria com as bombas 1 e 2 operando em 50% e 60%, respectivamente. Dessa forma, mantendo uma das bombas constante em tais pontos de operação, aplicaram-se degraus na outra e coletaram-se os dados da medição. Por exemplo, a figura 4.4 mostra o resultado comparando-se o modelo obtido pelo algoritmo recursivo e o processo real, variando a bomba 1. O resultado para o tanque 2 não é mostrado, já que seu nível se mantém constante devido ao fato da bomba 2 permanecer com o mesmo sinal durante todo o experimento. O mesmo procedimento foi realizado variando-se a bomba 2 e mantendo a bomba

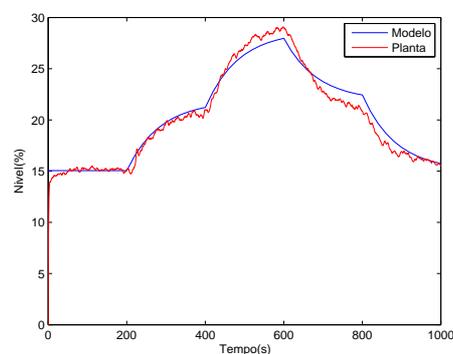
1 constante. Exatamente por isso, a figura 4.5 não mostra o modelo obtido para o tanque 1. Para ambos os testes, utilizou-se o diagrama apresentado na figura 18, bem como o script mostrado na figura 19 anexadas.

Tabela 4.7: Degraus aplicados na bomba 1 e mantendo a bomba 2 em 60%

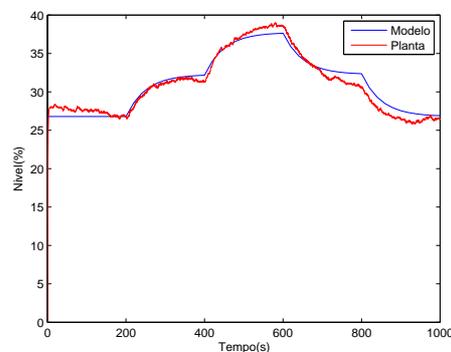
Sinais Bomba 1	Tempo (s)
50%	0
55%	200
60%	400
55%	600
50%	800



(a) Identificação recursiva tanque 1.



(b) Identificação recursiva tanque 3.



(c) Identificação recursiva tanque 4.

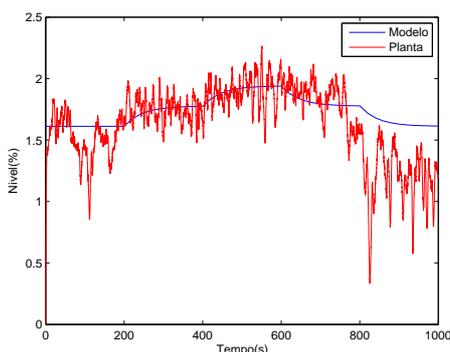
Figura 4.4: Identificação recursiva variando bomba 1.

Esses resultados também explicitam um fato importante: é notória que a relação sinal/ruído dos tanques 1 e 2 é insatisfatória. Isso ocorre tendo em vista que o nível nesses não tem elevação considerável. No ponto de operação em que se enxerga certa elevação, os níveis nos tanques inferiores passam de 100%. Assim, não se encontrou um ponto razoável em que houvesse maior vazão nos tanques inferiores ao mesmo tempo em que o nível se elevasse nos tanques superiores. Contudo, isso não influenciou no projeto, já que o foco estava no comportamento dos tanques inferiores. Portanto, o método dos mínimos quadrados também teve um comportamento adequado

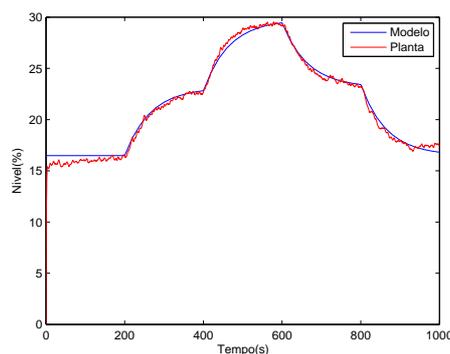
para identificação do processo real.

Tabela 4.8: Degraus aplicados na bomba 2 e mantendo a bomba 1 em 50%

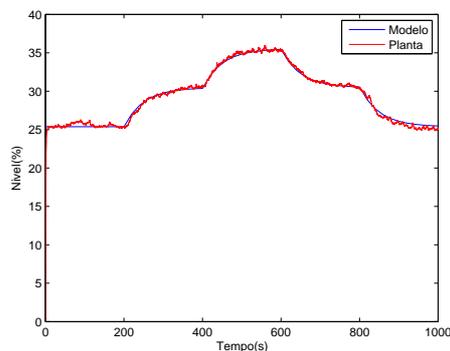
Sinais Bomba 1	Tempo (s)
60%	0
65%	200
70%	400
65%	600
60%	800



(a) Identificação recursiva tanque 2.



(b) Identificação recursiva tanque 3.



(c) Identificação recursiva tanque 4.

Figura 4.5: Identificação recursiva variando bomba 2.

Algo que pode ser notado dos resultados da identificação no MATLAB é que, para a bomba 1, percebeu-se maior variabilidade em sua operação, uma vez que, no momento da variação do sinal aplicado sobre ela, sobretudo em degraus de descida, ela tem um comportamento diferente de quando esteve na mesma unidade de engenharia. Dessa forma, definiu-se para os próximos experimentos que apenas degraus de subida seriam aplicados em ambas as bombas a fim de se obterem modelos mais exatos.

Validado o código no MATLAB, elaborou-se uma rotina denominada "**IDENTIFICACAO**" em LD responsável por chamar a subrotina "**MMQR_TANQUEX**" (figura 7 e 8 do anexo) em ST - X é o tanque - com o método dos mínimos quadrados recursivo implementado. Como pode ser

visto nas figuras 3,4,5 e 6 anexadas, tem-se que, quando o operador aperta o botão para iniciar a identificação, a rotina armazena parâmetros iniciais como o nível e o ponto de operação da bomba em análise. Um contador também foi introduzido para funcionar como o disparador para coleta de amostras de 1 em 1 segundo. Dessa forma, assim que o contador chegava em 1 segundo, ele era reiniciado e a subrotina dos mínimos quadrados era chamada. Ao mesmo tempo, a sintonia do PID também era calculada. Quando o usuário requisita a finalização da identificação, a matriz P_{k-1} é reinicializada e os parâmetros do PID são enviados diretamente para os blocos PIDE da simulação assim como os modelos obtidos para o bloco *lead-lag*.

Variando a bomba 1, obtiveram-se os resultados apresentados nas figuras 4.6 - para o tanque 3 sub-atuado - e 4.7 - para o tanque 4 atuado diretamente -. Os sinais aplicados na bomba 1 foram 50%, 55% e 60% e a bomba 2 manteve-se em 60%

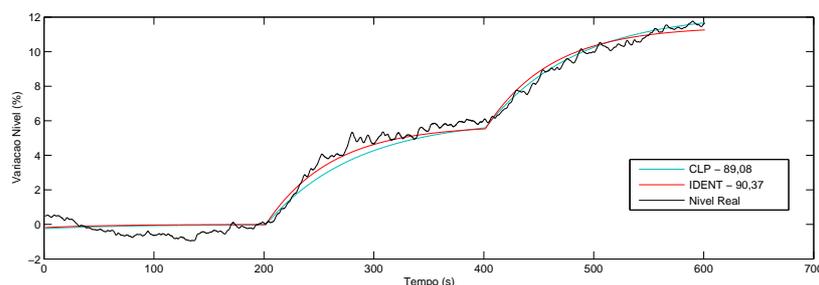


Figura 4.6: Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 3 sub-atuado (bomba 1).

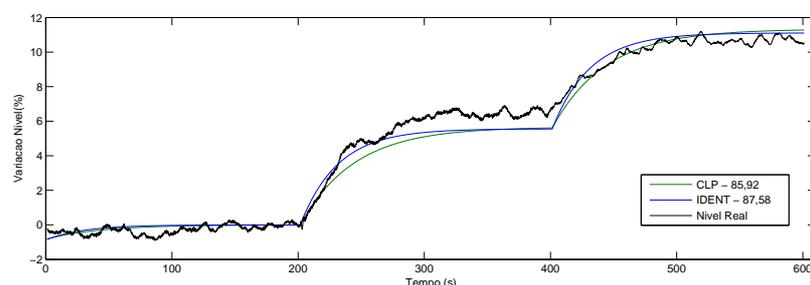


Figura 4.7: Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 4 diretamente atuado (bomba 1).

Observa-se que a identificação recursiva no CLP manteve sua razoabilidade provendo um modelo similar ao comportamento real da planta. Devido a oscilações no comportamento das bombas tem-se que esses modelos não descrevem perfeitamente os modelos reais, mas são boas aproximações. Assim, o CLP forneceu as seguintes funções de transferência para variações na bomba 1:

$$G_{B13}(s) = \frac{1,2263}{82,239s + 1}$$

$$G_{B14}(s) = \frac{1,133}{42,766s + 1}$$

No que tange à identificação, mantendo a bomba 1 constante em 50% e variando a bomba 2 com sinais de 60%, 65% e 70%, tem-se os resultados ilustrados pelas figuras 4.8 e 4.9.

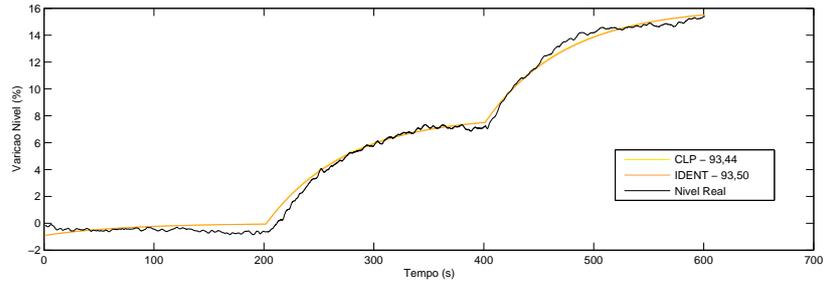


Figura 4.8: Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 3 diretamente atuado (bomba 2).

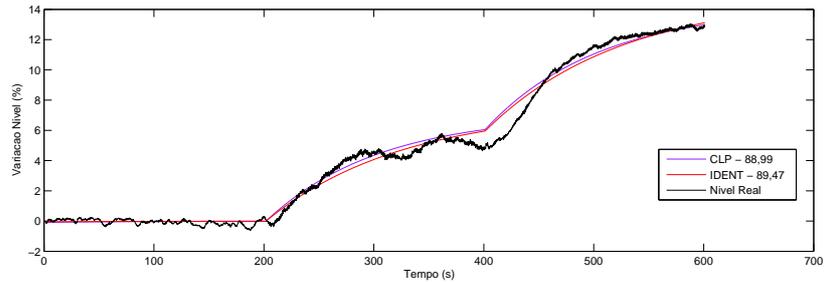


Figura 4.9: Identificação recursiva no CLP x IDENT - Tanque 4 sub-atuado (bomba 2).

As funções de transferência dadas pelo CLP foram:

$$G_{B2_3}(s) = \frac{1,6038}{71,496s + 1}$$

$$G_{B2_4}(s) = \frac{1,4146}{102,94s + 1}$$

Portanto, tais resultados validam o algoritmo de identificação implementado no CLP. Vale ressaltar, ainda, que de um experimento para outro houve variações no comportamento das bombas. Dessa forma, para as próximas etapas, o procedimento de identificação foi novamente realizado para obter melhor aproximação do modelo do processo no momento dos experimentos.

4.4 Implementação do Controle de Nível

O controlador implementado consiste em um PI projetado pelo método IMC para modelos de primeira ordem sem atraso. Como já mencionado, executou-se novamente o processo de identificação em ambas as bombas a fim de obter um modelo mais exato do seu comportamento no momento do experimento.

4.4.1 Controle Tanque 4 - Bomba 1

O primeiro controle projetado objetivava que a bomba 1 controlasse o nível do tanque de atuação direta, ou seja, do tanque 4. A identificação feita no CLP proveu as seguintes funções de

transferência:

$$G_{B13}(s) = \frac{1,469}{63,38s + 1}$$
$$G_{B14}(s) = \frac{1,526}{42,82s + 1}$$

Dessa forma,

$$\lambda = \frac{\tau_{TQ4}}{3} = 14,27s.$$

Com esse valor de λ e, utilizando as equações apresentadas na tabela 2.8 para um modelo de primeira ordem sem atraso, os seguintes parâmetros para o PI foram fornecidos

$$K_c = 1,979$$
$$T_i = 42,82s \rightarrow K_i = 0,046s^{-1}$$

cujos níveis no ponto de operação foram

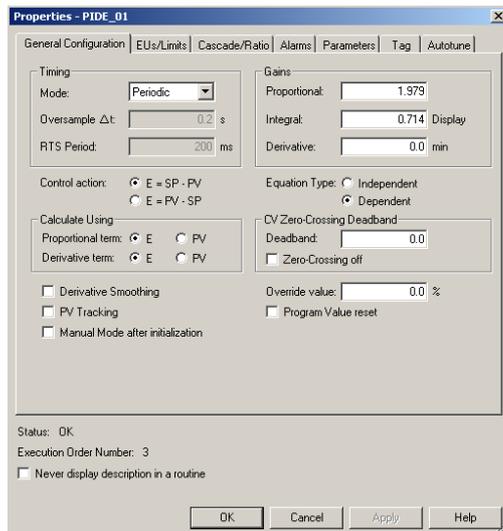
$$h_{0_{B1tanque3}} = 31,13\%$$
$$h_{0_{B1tanque4}} = 35,42\%.$$

Como o bloco PIDE requer que a constante de tempo esteja em minutos, segue que os parâmetros empregados estão dispostos na figura 4.10. Observa-se também que se limitou a saída do PID para 18%, a fim de afastar não-linearidades no processo. A figura 21 do anexo mostra o diagrama completo para o controle nesse tanque.

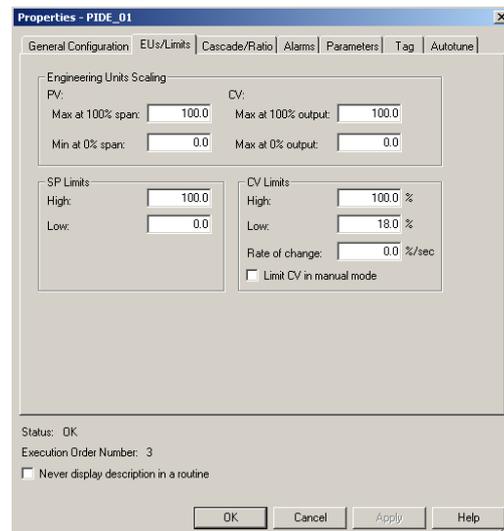
Utilizando o diagrama ilustrado na figura 21 do anexo para coleta de dados e, aplicando o PI projetado, cujos parâmetros são calculados por uma *add-on instruction* mostrada na figura 15 anexada, traçou-se a curva apresentada na figura 4.11 comparando com o modelo simulado. Lembrando que a malha de atuação da bomba 2 permaneceu em modo manual no ponto de operação constante de 60%.

É notório que a curva obtida do processo real tem semelhança com o modelo identificado e simulado, sendo que a nova constante de tempo do processo com o controlador é de aproximadamente 15,23s na subida e de 14,34s na descida, que é bem próximo ao λ . Tais diferenças se dão, principalmente, pelo ruído provindo, sobretudo, da atuação da bomba. O resultado satisfatório gerado é confirmado observando o gráfico do erro - figura 4.12 ao longo do experimento.

Quanto ao sinal do controlador ilustrado na figura 4.13, foi o aspecto de controle que apresentou maior discrepância. Como já mencionado, as bombas apontaram certa variabilidade de comportamento ao longo dos experimentos, sendo que o mesmo sinal aplicado em certo momento



(a) Configuração geral dos parâmetros PID para bomba 1.



(b) Limites configurados para saída do PID da bomba 1.

Figura 4.10: Configuração dos parâmetros PID para bomba 1.

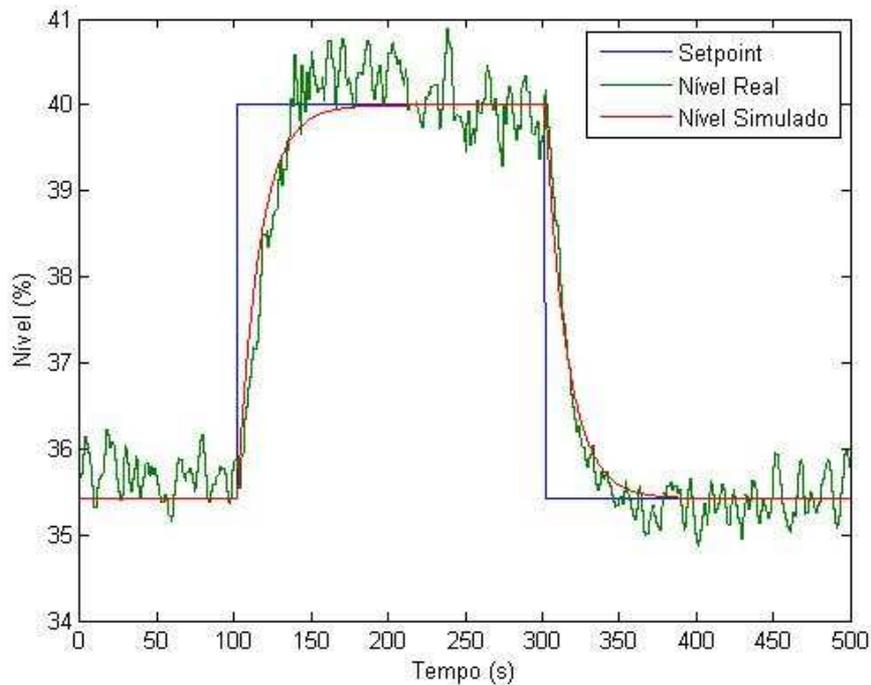


Figura 4.11: Controle no tanque 4 - Bomba 1.

e, em outro, geravam diferentes níveis nos tanques de atuação direta. Isso é ratificado pelo comportamento revelado em tal figura. No momento da identificação do processo, o nível inicial foi de aproximadamente 35,42%. No controle, para manter o processo nesse ponto de operação inicial, a bomba reduziu seu funcionamento para aproximadamente 48% e transmitiu esse *offset* de 2% para todo o controle. Não se pode descartar também a possibilidade da placa de potência gerar tal variação de comportamento.

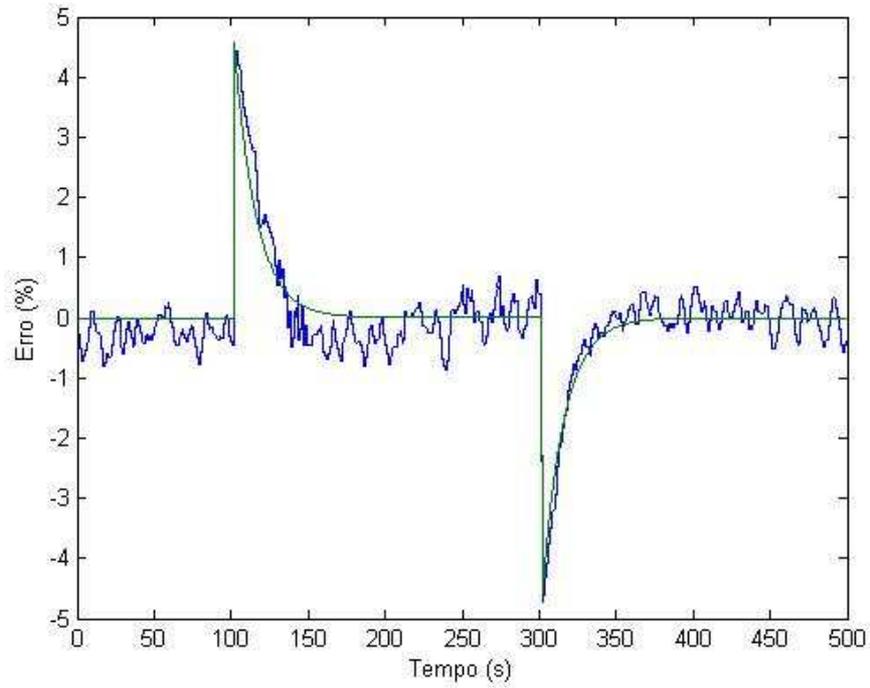


Figura 4.12: Erro controle no tanque 4 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 1.

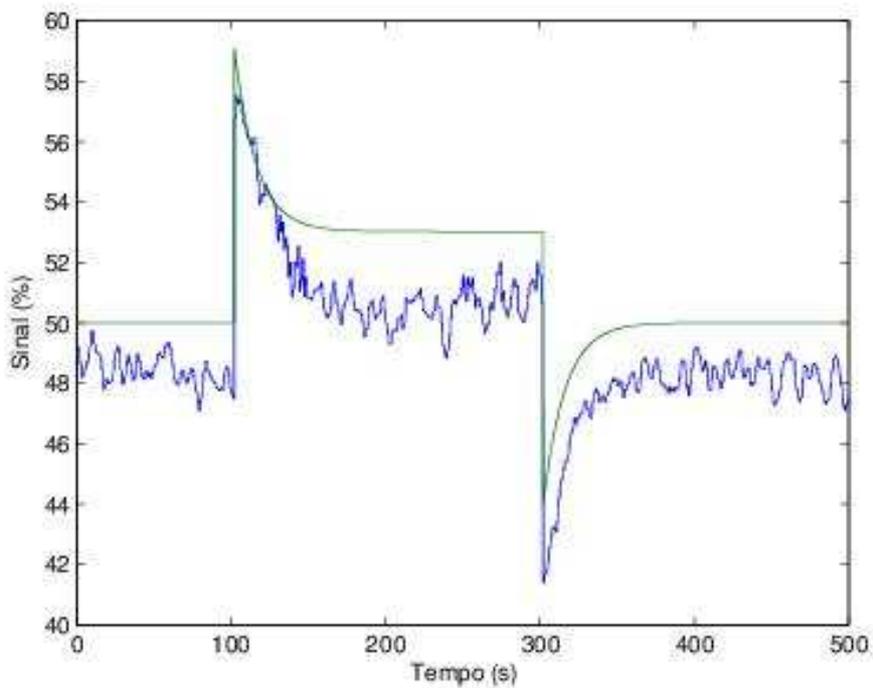


Figura 4.13: Sinal controle no tanque 4 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 1.

Por fim, com o objetivo de verificar se o modelo de atuação indireta da bomba 1 sobre o tanque 3 também é válido, traçou-se o gráfico apresentado na figura 4.14. Observa-se, portanto, que houve um deslocamento do nível inicial no momento do controle em comparação com a identificação feita.

Mais uma vez, a variabilidade no comportamento da bomba torna difícil prever tais mudanças.

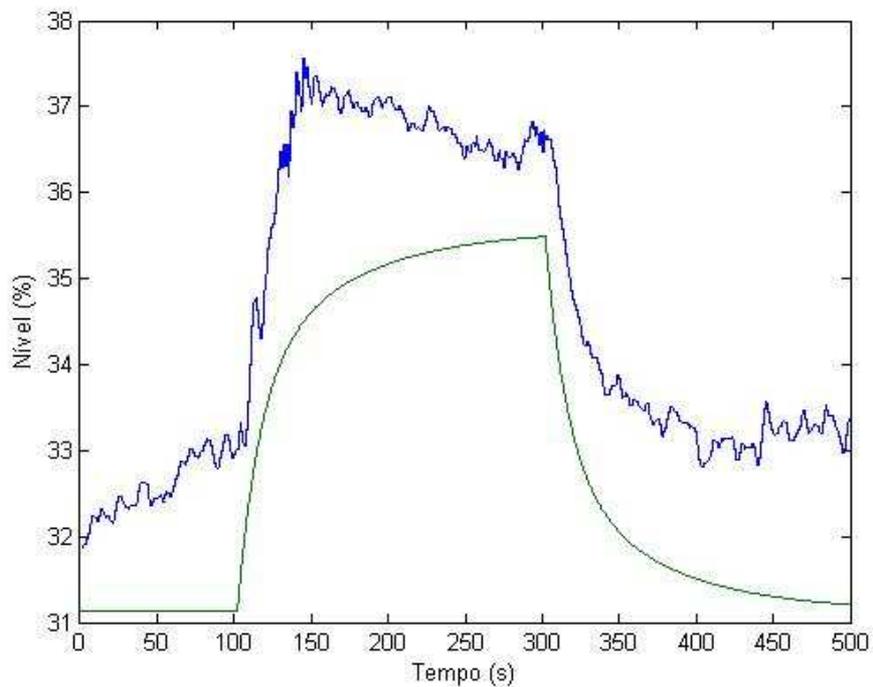


Figura 4.14: Nível tanque 3 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 1.

4.4.2 Controle Tanque 3 - Bomba 2

Realizando o procedimento para identificação, novamente com o CLP, obtiveram-se as seguintes funções de transferência com a atuação da bomba 2:

$$G_{B2_3}(s) = \frac{1,550}{61,96s + 1}$$

$$G_{B2_4}(s) = \frac{1,171}{44,02s + 1}$$

cujos níveis no ponto de operação foram

$$h_{0_{B2tanque3}} = 41,27\%$$

$$h_{0_{B2tanque4}} = 39,50\%.$$

Projetando o controlador via IMC, tem-se que

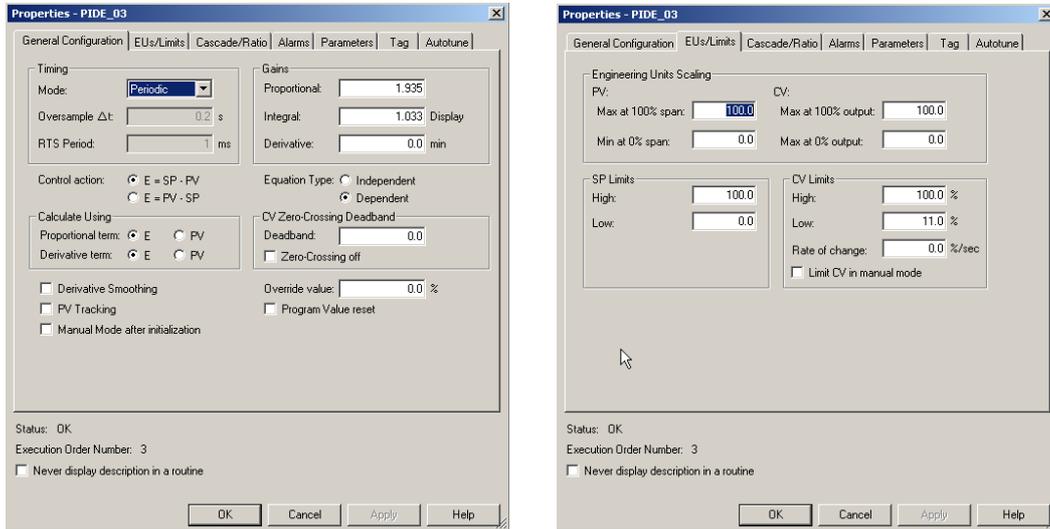
$$\lambda = \frac{\tau_{TQ3}}{3} = 20,65s$$

resultando nos seguintes parâmetros para o PI:

$$K_c = 1,935$$

$$T_i = 61,96s \rightarrow K_i = 0,031s^{-1}.$$

Portanto, os parâmetros do bloco PIDE estão ilustrados na figura 4.15, bem como todo o diagrama feito, na figura 20 do anexo. Note, novamente, que se limitou a saída inferior do PID para 11%, a fim de não existirem não-linearidades devido à zona morta da bomba.



(a) Configuração geral dos parâmetros PID para bomba 1.

(b) Limites configurados para saída do PID da bomba 2.

Figura 4.15: Configuração dos parâmetros PID para bomba 2.

Aplicando o PI projetado pelo código da figura 15 anexada e, comparando com o modelo simulado, traçou-se a curva apresentada na figura 4.16. Importante lembrar que a malha da bomba 1 permanece em modo manual no ponto de operação constante de 50%.

O resultado obtido explicita o condizente modelo gerado pelo CLP e o correto projeto do controlador PI. Percebe-se, também, que a constante de tempo em malha fechada foi de aproximadamente 17,8s para o degrau de subida do setpoint e de 21,87s para o de descida, ou seja, próximos ao λ do projeto.

Quanto ao erro do controle, o resultado é demonstrado na figura 4.17. Nota-se que o comportamento foi similar ao modelo identificado.

Por fim, analisando o gráfico da figura 4.18, identifica-se melhor comportamento quando comparado ao controle da bomba 1, mas, mesmo assim, ainda se nota leve diferença entre simulado e real. Todavia, os modelos foram capazes de prever adequadamente o comportamento do processo em malha fechada.

Além disso, constata-se pela figura 4.19 certa proximidade do comportamento da atuação indireta da bomba 2 no tanque 4. As discrepâncias que aparecem podem ser explicadas pelas experiências que se obtiveram com a bancada em que as identificações apresentaram parâmetros

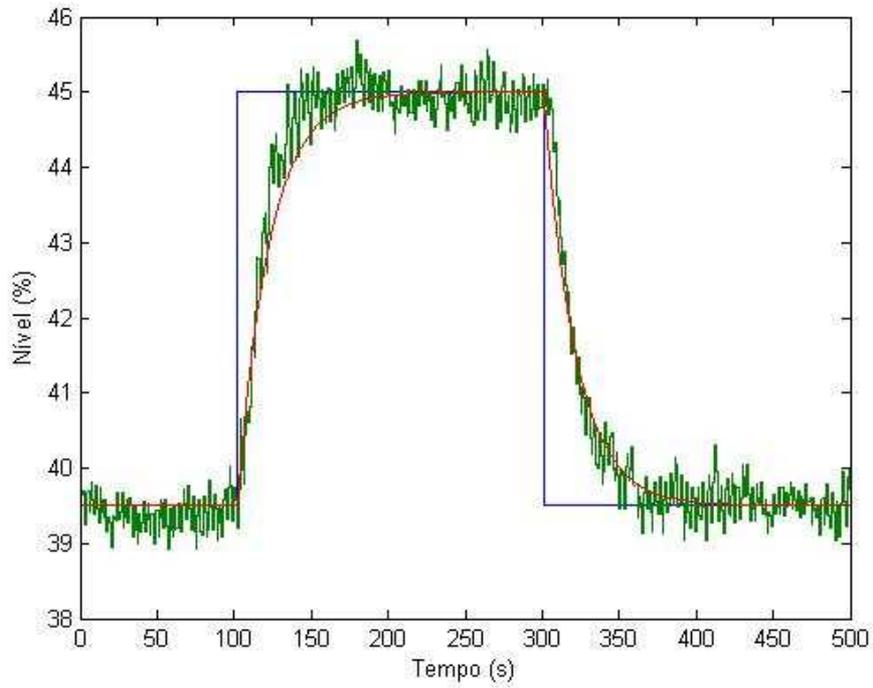


Figura 4.16: Controle no tanque 3 (referência: em azul; nível simulado: em vermelho; nível real: em verde)- Bomba 2.

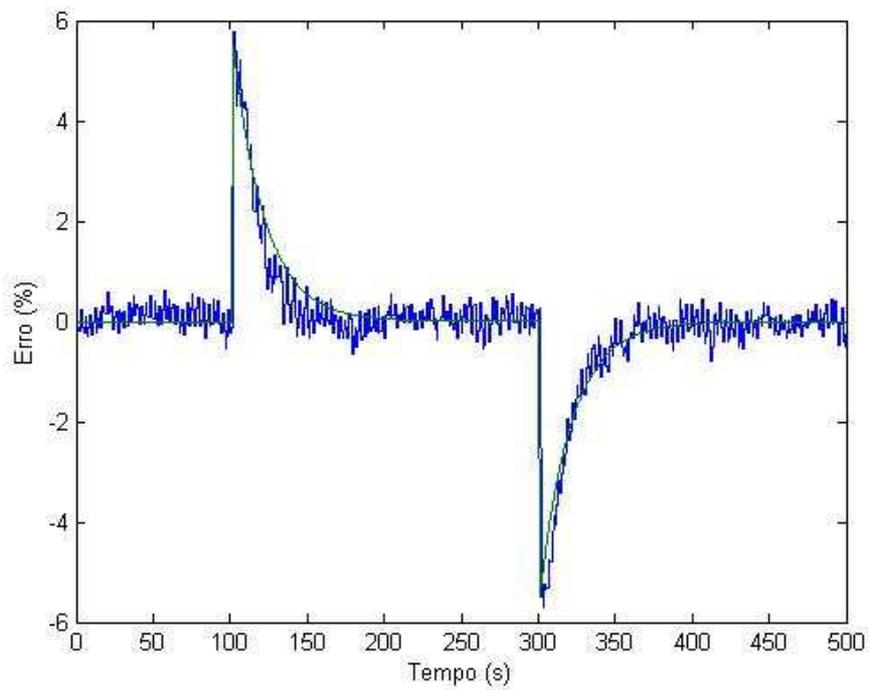


Figura 4.17: Erro controle no tanque 3 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 2.

diferentes em prazos relativamente curtos de tempo. Todavia, tais diferenças, apesar de ser um importante ponto a se estudar, não impediram de que a modelagem feita pelo CLP se tornasse

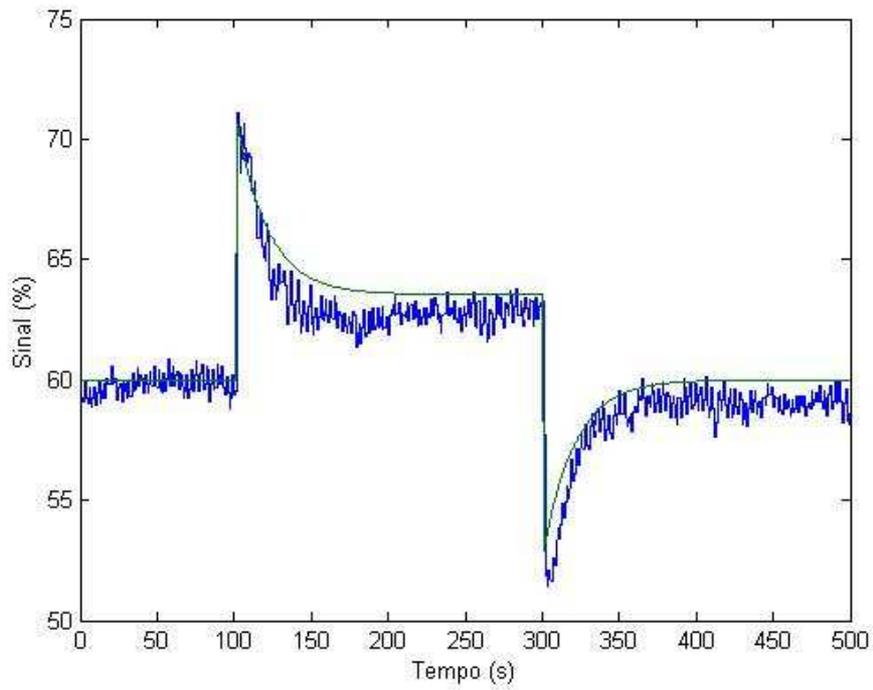


Figura 4.18: Sinal controle no tanque 3 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 2.

errônea e, conseqüentemente, o controle foi implementado com sucesso e seu comportamento foi semelhante ao esperado.

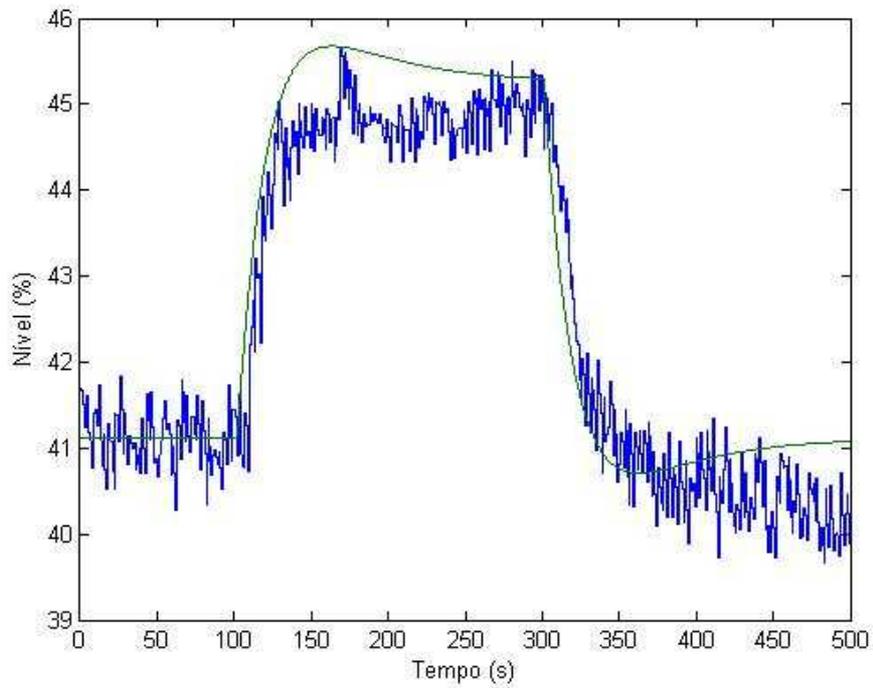


Figura 4.19: Nível tanque 4 (simulado: em verde; real: em azul) - Bomba 2.

4.4.3 Controle simultâneo

Projetados ambos controladores para cada bomba, em relação ao tanque de atuação direta, testou-se o controle simultâneo dos tanques inferiores. Nesse experimento, no ponto de operação inicial das bombas, os níveis iniciais foram os seguintes:

$$H_{0TANQUE3} = 40,35\%$$

$$H_{0TANQUE4} = 42,2\%$$

Menciona-se que não foi realizada a identificação novamente e os modelos de atuação direta e indireta são os mesmos apresentados anteriormente nessa seção.

No experimento, foram testados diversos pontos de operação a fim de observar o comportamento dos controladores e se os setpoints de nível foram alcançados. Assim, tem-se que as referências definidas são:

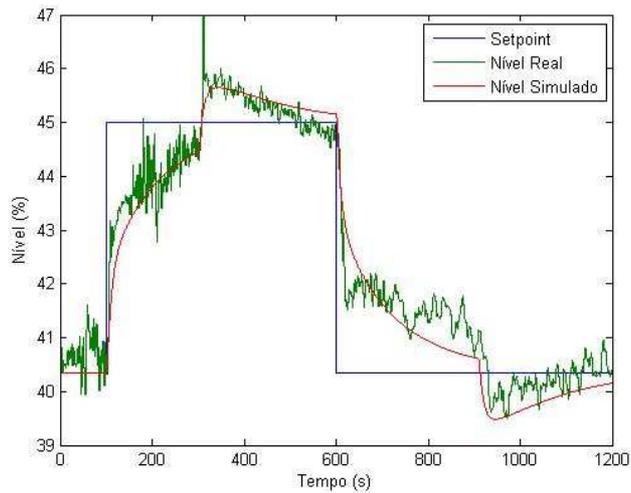
- $H_{TANQUE3}$ alto (45%) e $H_{TANQUE4}$ baixo (42,2%);
- $H_{TANQUE3}$ alto (45%) e $H_{TANQUE4}$ alto (45%);
- $H_{TANQUE3}$ baixo (40,35%) e $H_{TANQUE4}$ alto (45%);
- $H_{TANQUE3}$ baixo (40,35%) e $H_{TANQUE4}$ baixo (42,2%);

O resultado do controle simultâneo encontra-se na figura 4.20. Para tal, utilizou-se o diagrama ilustrado na figura 22 - do anexo - para coleta de dados e simulação do processo. Percebe-se que, mesmo não realizando a identificação e o nível inicial dos tanques ter mudado, o modelo ainda permaneceu coerente com o processo real. No que tange ao controle em si, observa-se pelo modelo simulado que o setpoint, tanto para o tanque 3, quanto para o tanque 4, não são alcançados. No entanto, isso aconteceu para o modelo real tendo em vista o fato de existir ruídos na medição provindos, não só do sensor, mas também da atuação das bombas.

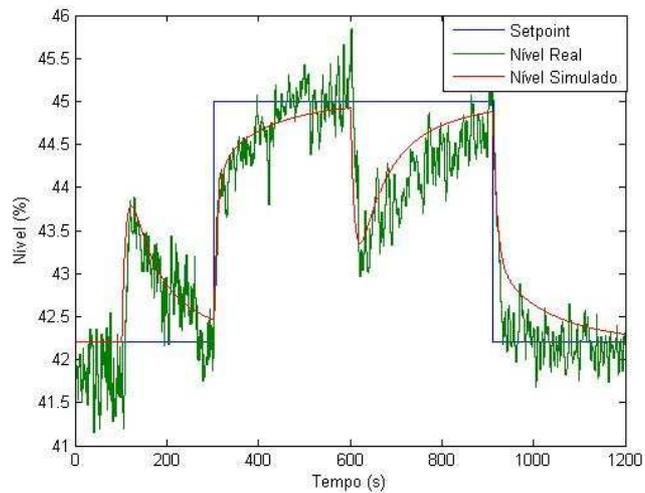
Continuando a análise do controle simultâneo, a figura 4.21 ilustra o comportamento do erro em relação ao setpoint nos respectivos tanques.

Por fim, analisa-se o sinal dos atuadores vindos do PI. Nota-se que o sinal foi o parâmetro mais discrepante em relação ao modelo. No começo do experimento, observa-se que o processo real se mantém semelhante ao simulado. A partir da primeira mudança do setpoint no tanque 3, ambos os sinais das bombas parecem novamente sofrer um *offset*. Há momentos, também, que os atuadores aumentam ou diminuem sua atuação de uma forma mais brusca devido a comportamentos não previstos no processo.

Diante de todos esses resultados, percebeu-se que um fator essencial no projeto do controle para a bancada, a saber, o acoplamento entre os tanques, interfere diretamente no desempenho do controlador e esse parâmetro não foi corretamente previsto pela simulação. Além disso, o fato de o



(a) Tanque 3.



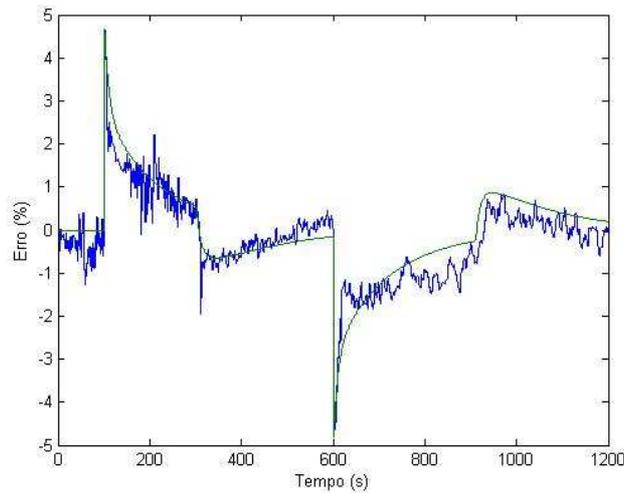
(b) Tanque 4.

Figura 4.20: Controle simultâneo.

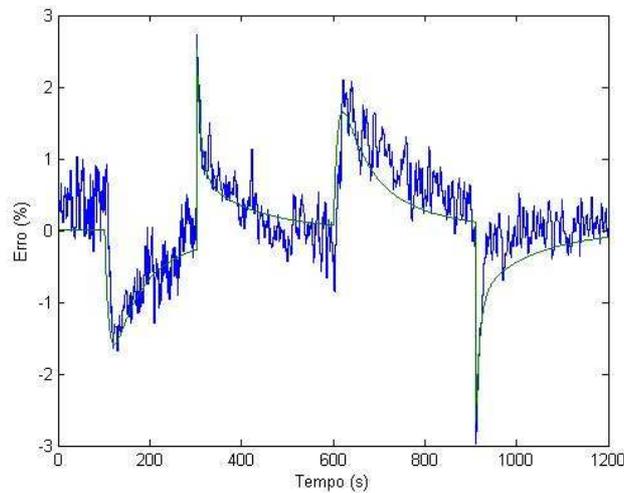
desempenho das bombas ter certa variabilidade e isso ser difícil de prever, conduz os resultados para diferenciação do modelo previsto. De qualquer forma, conclui-se que, para o controle simultâneo dos tanques, projetar um PI separadamente para cada bomba não resulta numa alternativa adequada.

4.5 Implementação no CLP

Para que todo o projeto fosse possível, desde a calibração até o controle do nível, diversas rotinas foram implementadas no CLP a fim de se conseguir utilizar tal equipamento industrial para fazer todo o trabalho. O objetivo disso era justamente criar um elo entre teoria acadêmica e aplicação industrial por meio de tal equipamento. Logo, nesse contexto, a figura 4.23 mostra a árvore de projeto do LOGIX contendo todas as rotinas criadas.



(a) Tanque 3.



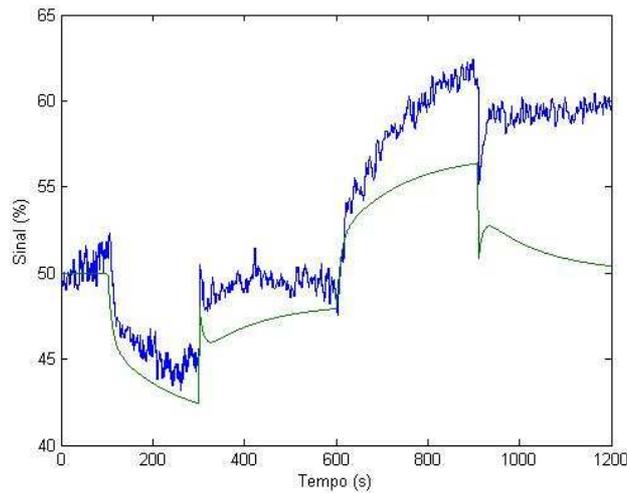
(b) Tanque 4.

Figura 4.21: Erro controle simultâneo (simulado: em verde; real: em azul).

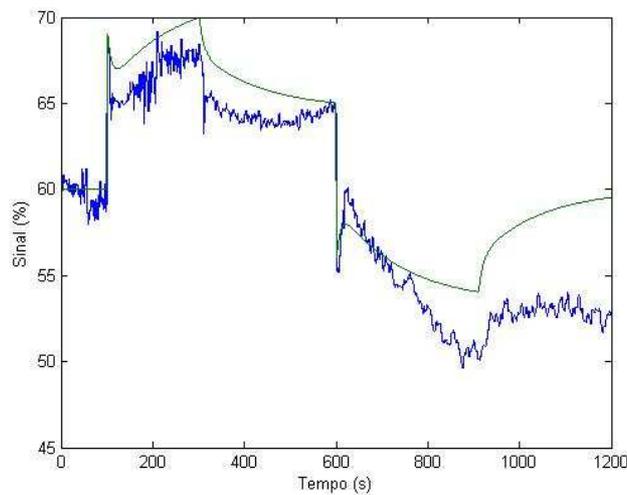
Existem no programa duas tarefas principais: as que executam os PIDs de forma periódica - no caso, a cada $200ms$ -; e a que contém as rotinas executadas de forma contínua. Antes de adentrar em tais programas, é importante mencionar sobre as três *add-ons instructions* criadas para varrer os sinais analógicos e digitais dos sensores presentes na bancada. A figura 4.24 mostra as funções implementadas cujas rotinas estão disponíveis no anexo.

Seguem as descrições de cada rotina.

- Tarefa: PID
 - **PID_B1**: utiliza o bloco PIDE para executar o algoritmo PID para a bomba 1;
 - **PID_B2**: utiliza o bloco PIDE para executar o algoritmo PID para a bomba 2;
- Tarefa: QUATRO_TANQUES



(a) Bomba 1.



(b) Bomba 2.

Figura 4.22: Sinal controle simultâneo (simulado: em verde; real: em azul).

- **MainRoutine**: rotina mestre do programa que chama a execução de outras subrotinas;
- **FILTRO**: trata o sinal dos sensores analógicos - nível - funcionando como filtro passa-baixas;
- **IDENTIFICACAO**: executa todo o procedimento para interface com usuário na etapa de identificação do processo. Por exemplo, assim que o operador aperta um botão virtual para iniciar a identificação, o nível inicial é coletado e os parâmetros do modelo de primeira ordem começam a ser calculados. Ao final, é possível enviar os parâmetros para o PID do processo e atualizar os modelos *lead-lag*;
- **MMQR_TANQUE(1,2,3,4)**: consiste no método dos mínimos quadrados implementado;
- **SENSORES**: varre e transforma para unidades de engenharia os valores dos sensores de nível e de vazão por meio das *add-ons instructions* criadas;

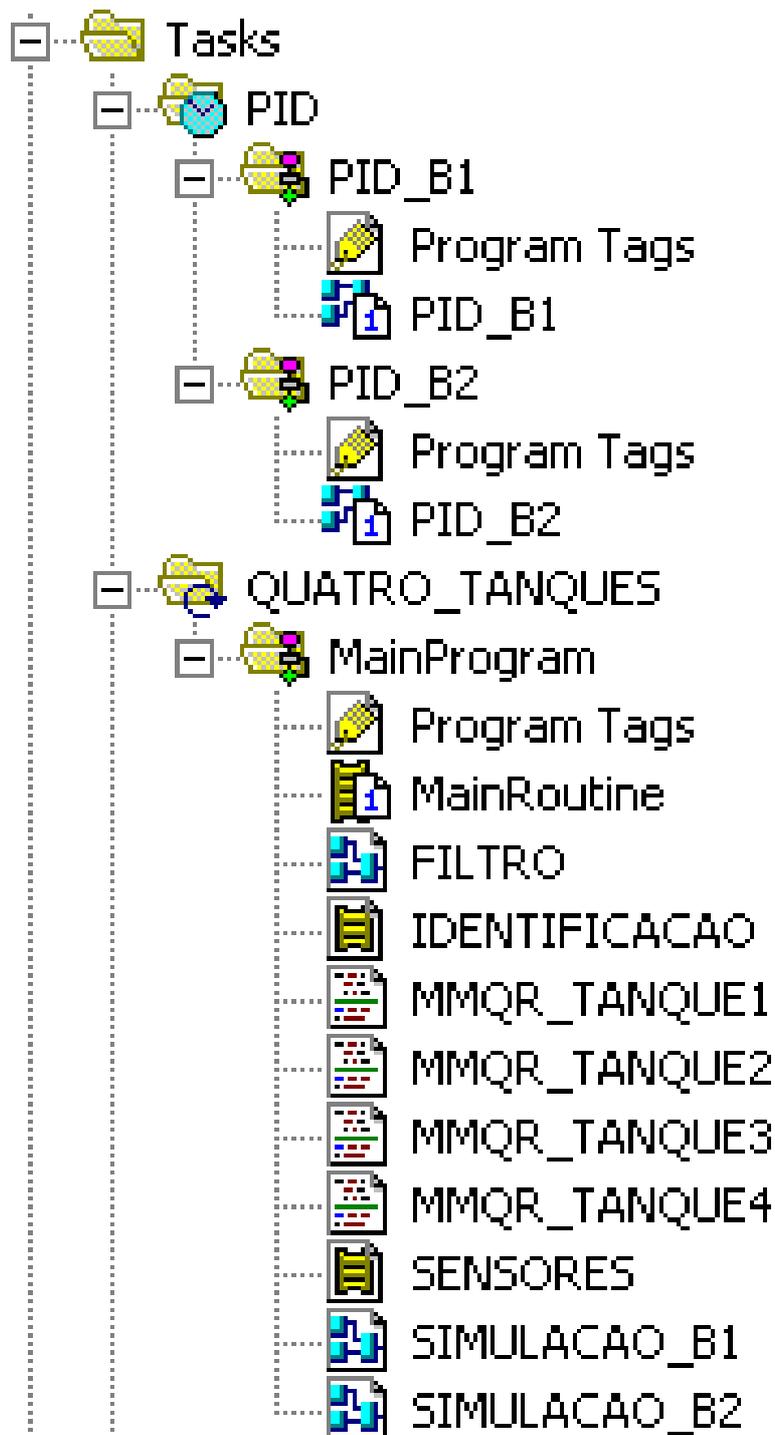


Figura 4.23: Rotinas criadas.

- **SIMULACAO_B1(B2)**: utiliza blocos *lead-lag* para simular os modelos identificados, além dos PIDs que serão testados no supervisório;

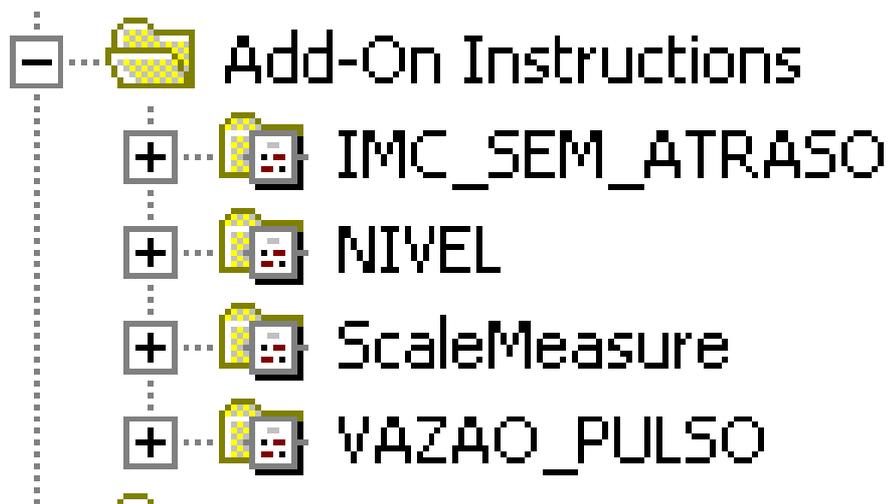


Figura 4.24: *Add-ons instructions* criadas.

4.6 Implementação do Sistema Supervisório

Todos os resultados foram originados totalmente pelo CLP e enviado pelo MATLAB via OPC apenas para apresentação dos dados. Criou-se, então, um sistema supervisório para fazer a interface com o operador e eliminar tal dependência do MATLAB. Objetiva-se, com isso, a concepção de uma ferramenta visando a aplicação real em uma indústria simulando o processo da bancada de quatro tanques.

A tela de início consiste num panorama sinótico geral contendo os valores do nível e botões de navegação para outras telas. Outro ponto é que nela também já é possível colocar as malhas da bomba 1 e bomba 2 em manual ou automático.

Outra etapa do projeto que também foi implementada no sistema supervisório foi a de calibração. Na tela - vide figura 4.26 - é possível inserir os valores de nível alto e baixo do sensor a fim de ajustar a medição em unidades de engenharia.

Partindo para a tela de identificação, todo o procedimento apresentado foi inserido de forma gráfica a fim de que um suposto operador da indústria pudesse realizar facilmente as mesmas etapas. O primeiro ambiente dessa tela consiste em definir os parâmetros da identificação podendo o usuário escolher qual bomba ele variará o sinal e quais tanques ele desejará obter o modelo. Após, inicia-se a identificação pelo botão "INICIA IDENTIFICAÇÃO" e uma luz verde indica que o modelo está sendo calculado. Com isso, o operador pode escolher o degrau que ele deseja dar na bomba que está variando e, finalmente, apertar o botão de "FINALIZA IDENTIFICAÇÃO" para obtenção dos parâmetros.

Uma das opções criadas foi a de validar o modelo identificado pelo CLP. Ao apertar o botão "VALIDAR", uma outra tela abre permitindo que o operador insira valores para a bomba em questão, sendo que o modelo real e simulado são plotados em um mesmo gráfico. A figura 4.28 ilustra o gráfico referente a um exemplo para a bomba 1 variando-a de 50% a 55%. Percebe-se mais uma vez a adequação do modelo ao processo.

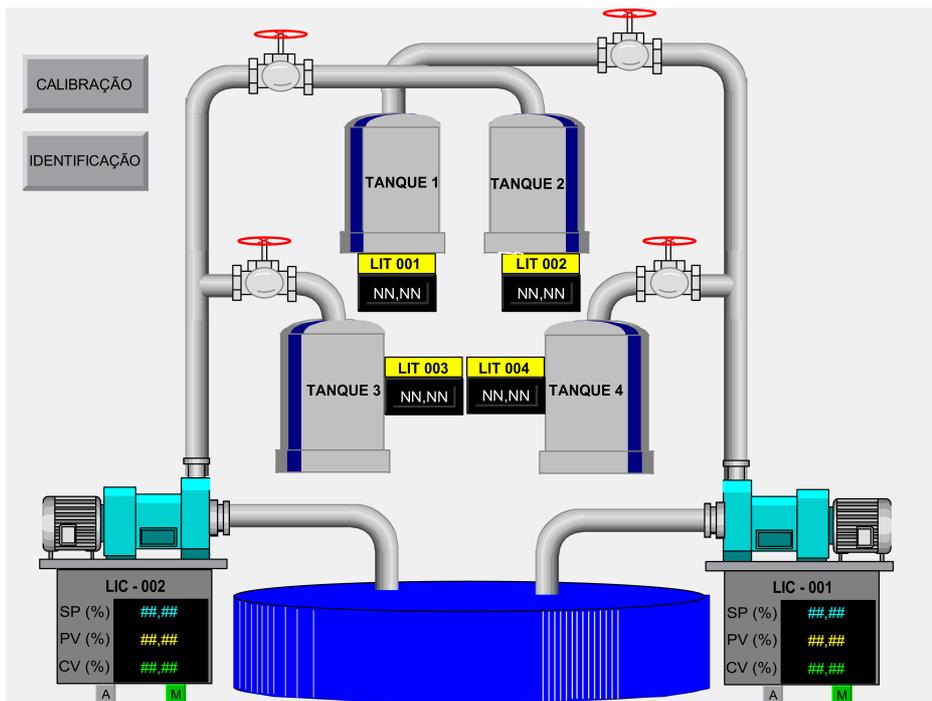


Figura 4.25: Tela de início do supervisório.

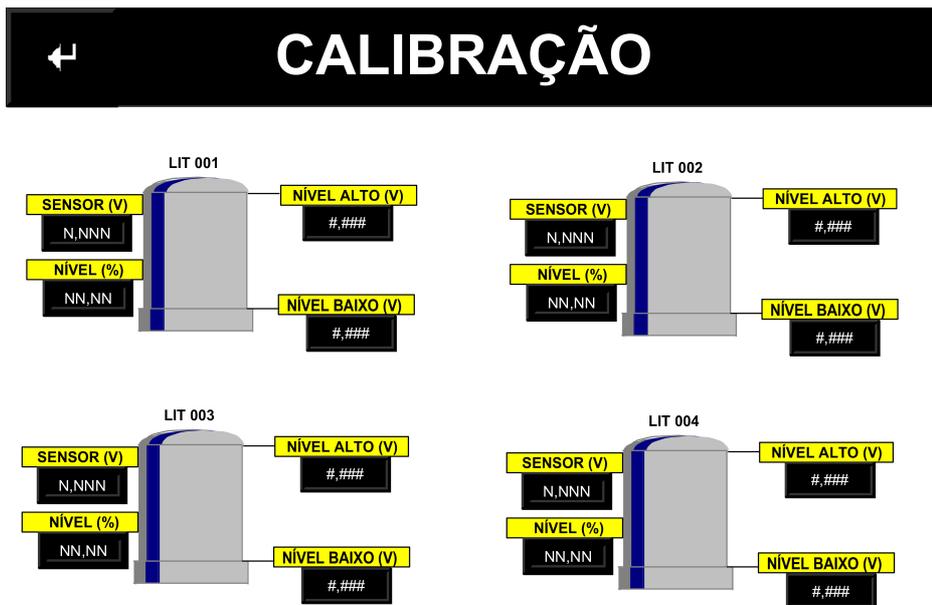


Figura 4.26: Tela de calibração pelo supervisório.

Outro ambiente na tela de identificação é a sintonia do PID. Já durante esse processo, um *autotuning* é executado baseado no IMC. Quando finalizado, o usuário tem a opção de comparar os parâmetros do PID atual no processo e os parâmetros calculados. Daí, ele pode optar por transmitir os valores calculados para o PID do processo real. Além disso, existe a opção de simular os PIDs no modelo identificado e comparar com a resposta do mesmo modelo com o PID em operação. Assim,

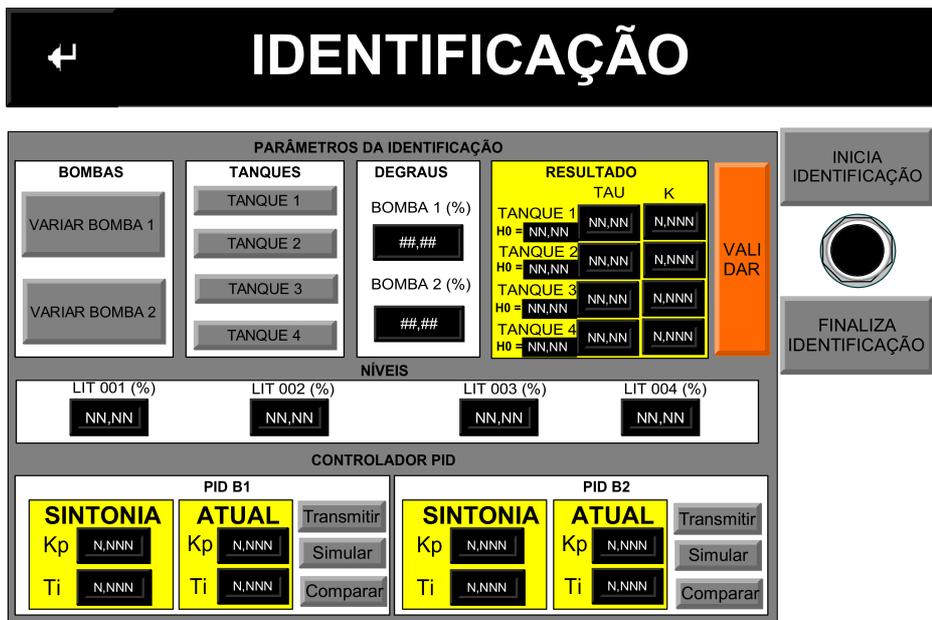


Figura 4.27: Tela de identificação pelo supervisor.

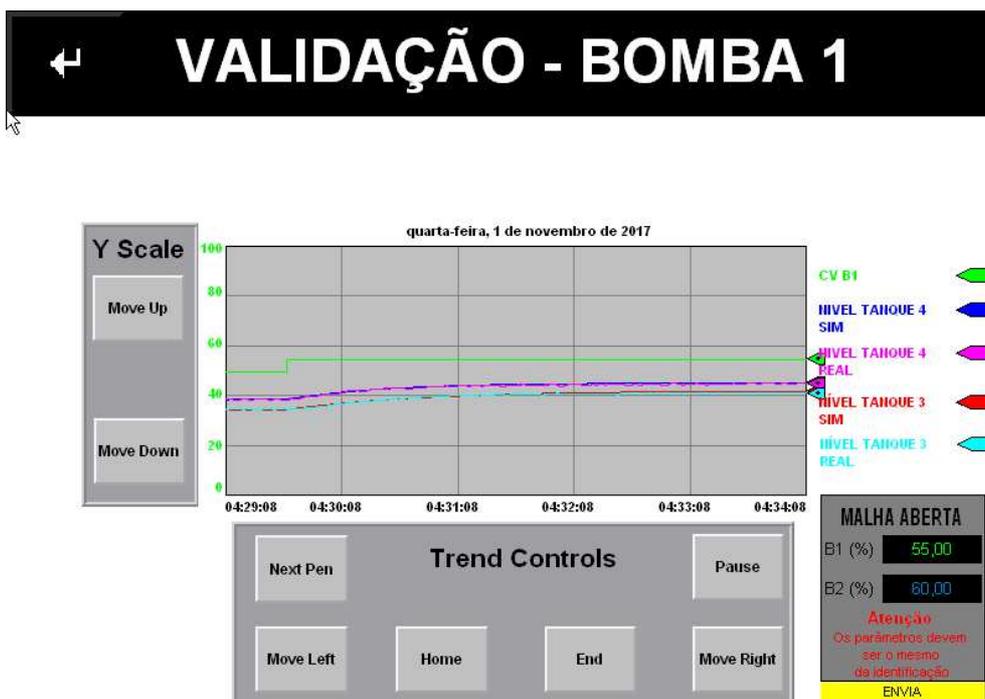


Figura 4.28: Tela de validação do modelo pelo supervisor.

o operador poderia verificar se há uma melhora na resposta antes de transmitir os parâmetros. A figura 4.29 mostra uma captura de tela da simulação em funcionamento. Estabeleceu-se parâmetros quaisquer de PID apenas para mostrar que o objetivo dessa tela consiste na apresentação de melhorias com o PID calculado. Observa-se a diferença de agilidade pelas linhas azul e rosa,

correspondente ao nível do tanque 4 com o PID proposto e o atual, respectivamente.

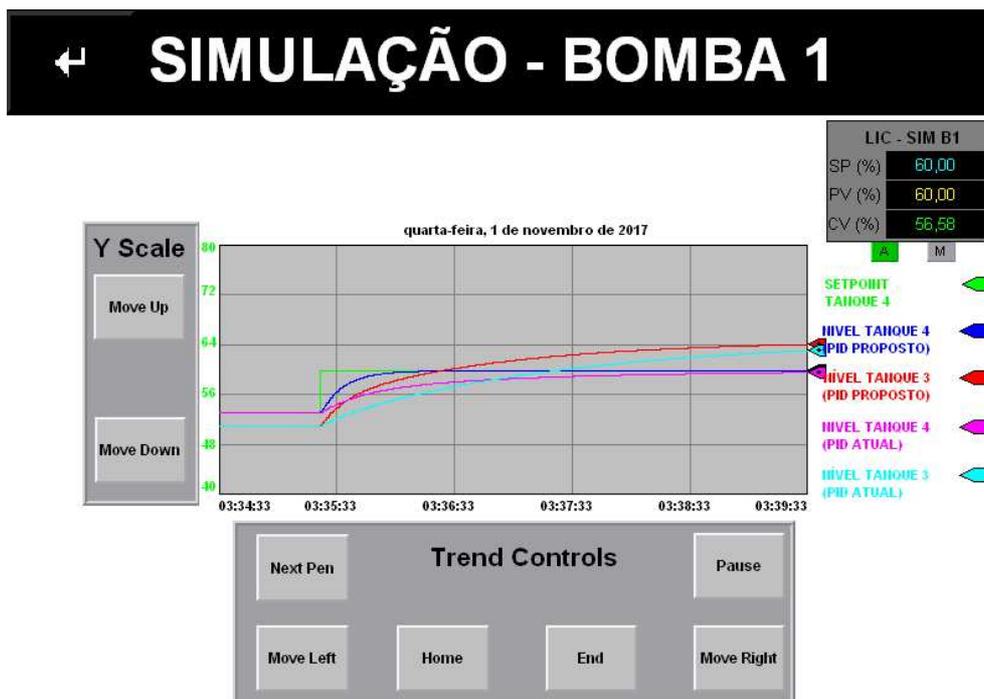


Figura 4.29: Simulação dos PIDs no modelo identificado.

A última opção para o operador seria a de comparação dos controles PID. Nessa tela, o objetivo é verificar o PID atual rodando na planta e como seria se ela estivesse com o PID proposto. Esse último caso é simulado no modelo identificado. A figura 4.30 mostra um exemplo para a bomba 1 e indica uma melhora na resposta, caso o PID proposto fosse transmitido para o do processo (veja linhas azul e rosa). Logo, o usuário teria várias funcionalidades por meio das quais ele poderia verificar melhoria no comportamento do controlador.

COMPARAÇÃO CONTROLE BOMBA 1

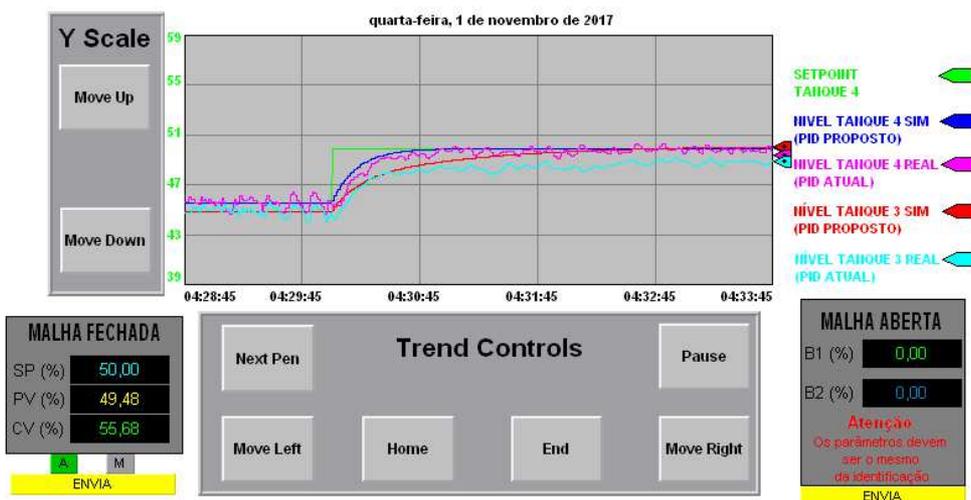


Figura 4.30: Comparação do PID real no processo e do PID proposto no modelo identificado.

Capítulo 5

Conclusões

Esse projeto mostrou a possibilidade de aplicações úteis para a indústria utilizando aspectos da pesquisa acadêmica e incorporando conhecimento teórico em equipamentos industriais. Todas as etapas, desde a calibração dos sensores, passando pela identificação e controle, até a implementação de um sistema supervisório, foram realizadas pelo CLP, sendo que o MATLAB foi utilizado em alguns momentos para fins de simulação, coleta e apresentação de dados. É interessante e motivador criar esse elo entre aplicações acadêmicas e industriais de forma a construir sistemas cada vez mais robustos nessa área.

Quanto ao desenvolvimento do projeto, algumas melhorias foram empregadas na bancada didática como a inserção dos sensores de vazão, instalação de bomba mais potente e adoção de placa de potência capaz de prover corrente suficiente para os atuadores. Isso deixou a bancada mais interessante, mas ainda são necessários alguns ajustes para fazer aplicações mais avançadas. Por exemplo, o fato de o nível nos tanques superiores não aumentar torna impossível a aplicação de controle para tal, já que a quantidade de ruído confunde-se com o sinal verdadeiro. Sugere-se, então, que as válvulas de saída dos tanques superiores sejam levemente fechadas.

Além disso, implementaram-se diversas rotinas no CLP para executar as etapas do projeto. Esta, sem dúvida, foi muito proveitosa, tendo em vista que o aluno pôde conhecer mais a fundo uma de suas principais ferramentas de trabalho como engenheiro de controle e automação. Tais programas, por sua vez, demonstraram funcionamento correto, o que indica que as lógicas implementadas foram corretas. Dentro desse contexto, ainda tem-se a elaboração do algoritmo recursivo de mínimos quadrados pelo qual foi possível identificar o modelo da planta diretamente pelo CLP. Houve, certamente, discrepâncias entre simulação e processo real, mas todas elas foram explicadas baseando-se no comportamento dos atuadores e da instrumentação.

Implementadas as lógicas, aplicou-se o controle simples de nível dos tanques inferiores usando um PI projetado pelo IMC para cada bomba de forma independente. Percebeu-se nesta etapa, a proximidade entre modelo e processo real. Todavia, é necessário um controlador mais robusto no que diz respeito ao controle simultâneo do nível dos tanques inferiores, já que, pelo modelo, nenhum dos níveis alcançou o setpoint desejado. Completou-se o projeto com sistema supervisório que aproximou a aplicação didática com o mercado de trabalho.

Comparando os resultados obtidos com os objetivos gerais e específicos inicialmente propostos, conclui-se que o projeto foi executado com êxito já que o trabalho contemplou todos os pontos mencionados.

Por fim, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Implementar algoritmos de filtragem estocástica iterativos e adaptativos (por exemplo, filtro de Kalman);
- Controles avançados para sistemas de fase mínima e não-mínima;
- Melhoria de identificação pelo sistema supervisorio para contemplar modelos com atraso;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NISE, N. S. *Control Systems Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] MORAES, C. C. D.; CASTRUCCI, P. de L. *Engenharia de Automação Industrial*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2007.
- [3] BOLTON, W. *Programmable logic controllers*. [S.l.]: Newnes, 2015.
- [4] BENTLEY, J. P. *Principles of measurement systems*. [S.l.]: Pearson Education India, 1988.
- [5] JOHN, K.-H.; TIEGELKAMP, M. *IEC 61131-3: programming industrial automation systems: concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
- [6] CARLOS, A.; CORRIPIO, A. B. Principles and practice of automatic process control. Jhon Wiley & Sons, 1997.
- [7] JOHANSSON, K. H. The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. *IEEE Transactions on control systems technology*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 456–465, 2000.
- [8] MERCANGÖZ, M.; DOYLE, F. J. Distributed model predictive control of an experimental four-tank system. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 297–308, 2007.
- [9] VADIGEPALLI, R.; GATZKE, E. P.; DOYLE, F. J. Robust control of a multivariable experimental four-tank system. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 40, n. 8, p. 1916–1927, 2001.
- [10] ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, v. 64, n. 11, 1942.
- [11] MARINHO, F. B. Instrumentação e controle de planta piloto industrial de quatro tanques acoplados. 2016.
- [12] OGATA, K. *Discrete-time control systems*. [S.l.]: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [13] WANG, Q.-G.; GUO, X.; ZHANG, Y. Direct identification of continuous time delay systems from step responses. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 11, n. 5, p. 531–542, 2001.

- [14] MONTENEGRO, P. H. d. M. et al. Controladores adaptativos de temperatura em um túnel psicrométrico. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 17, n. 3, p. 257–264, 2006.
- [15] GONÇALVES, M. G. Monitoramento e controle de processos. *Rio de Janeiro: Petrobras*, 2003.
- [16] AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. [S.l.]: Editora UFMG, 2004.
- [17] HRONES, K. C. J.; RESWICK, J. On the automatic control of the generalized passive systems. *Trans. Assoc. Soc. Mech. Eng*, 1952.
- [18] RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal model control: Pid controller design. *Industrial & engineering chemistry process design and development*, ACS Publications, v. 25, n. 1, p. 252–265, 1986.
- [19] SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of process control*, Elsevier, v. 13, n. 4, p. 291–309, 2003.
- [20] ROCKWELL AUTOMATION. *Logix5000 Controllers Advanced Process Control and Drives and Equipment Phase and Sequence Instructions*. [S.l.], 12 2016.
- [21] FREESCALE SEMICONDUCTORS. *Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated*. [S.l.], 9 2009. Rev. 12.
- [22] ROCKWELL AUTOMATION. *ControlLogix I/O Specifications Technical Data*. [S.l.], 11 2016.
- [23] T&S EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS. *Variador de velocidade PWM - Modelo VV24/10*. [S.l.]. Rev. 2.
- [24] J.YAZBEK INDÚSTRIA ELETRÔNICA. *Placa de Controle PWM para Motores DC 24V*. [S.l.], 2 2017. Rev. 3.

ANEXOS

I.1 ROTINAS CLP

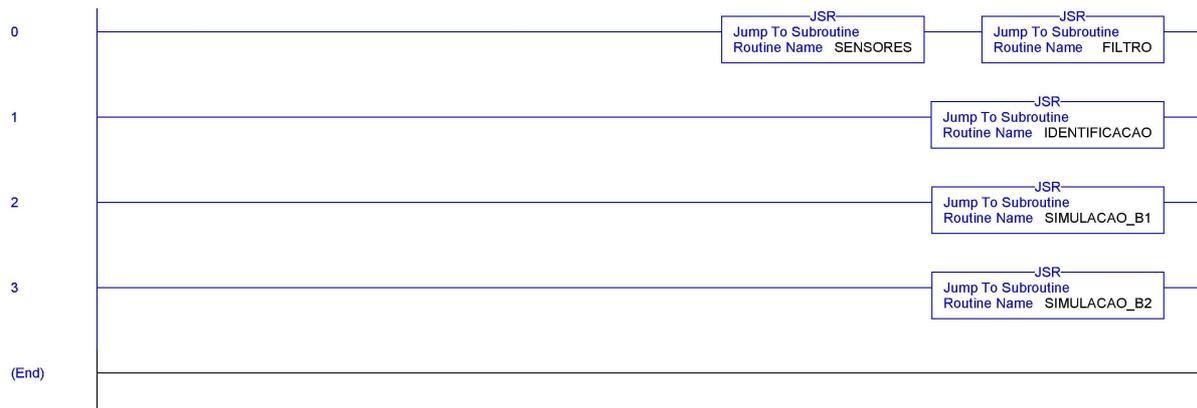


Figura 1: MainRoutine.

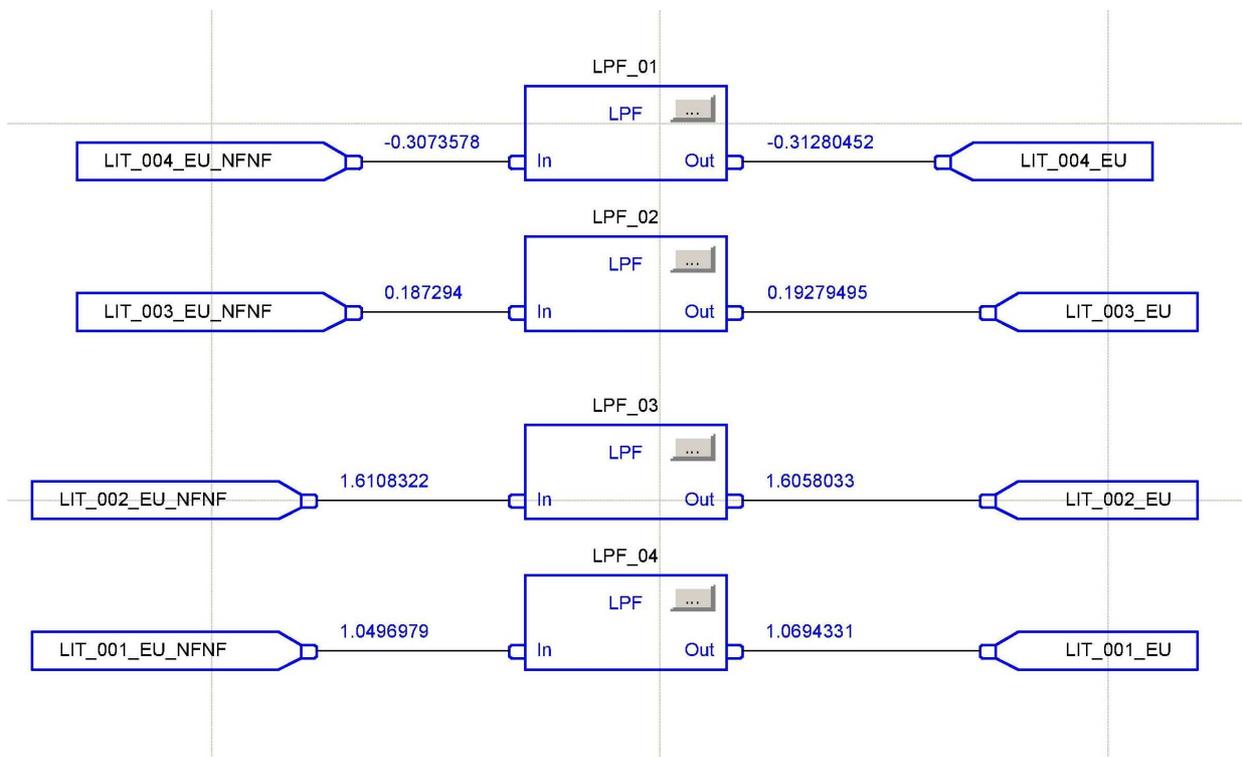


Figura 2: Filtro passa-baixas.

I.2 DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS E PROGRAMAS

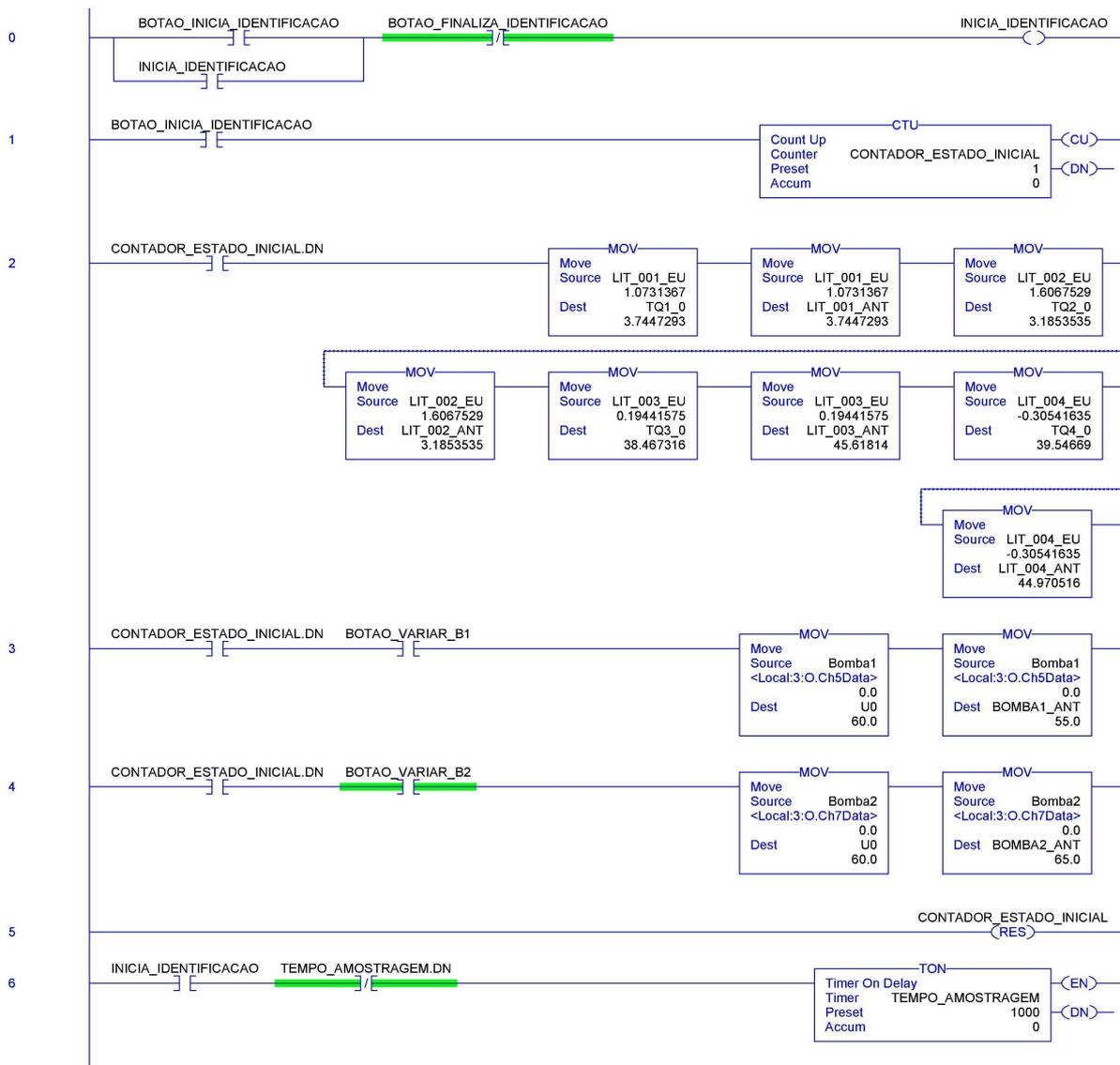
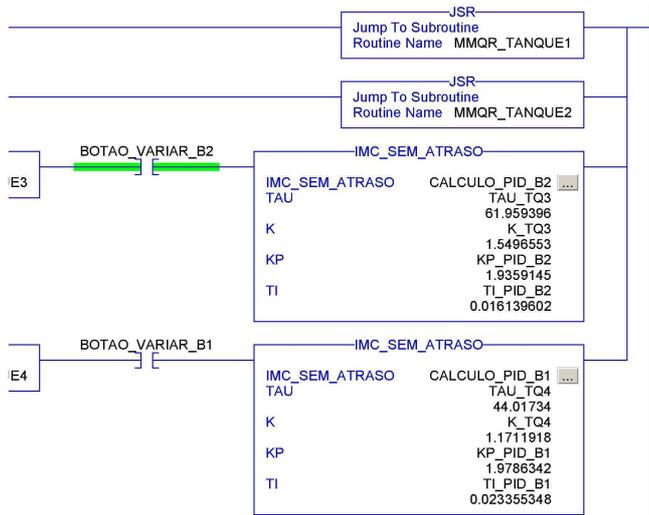
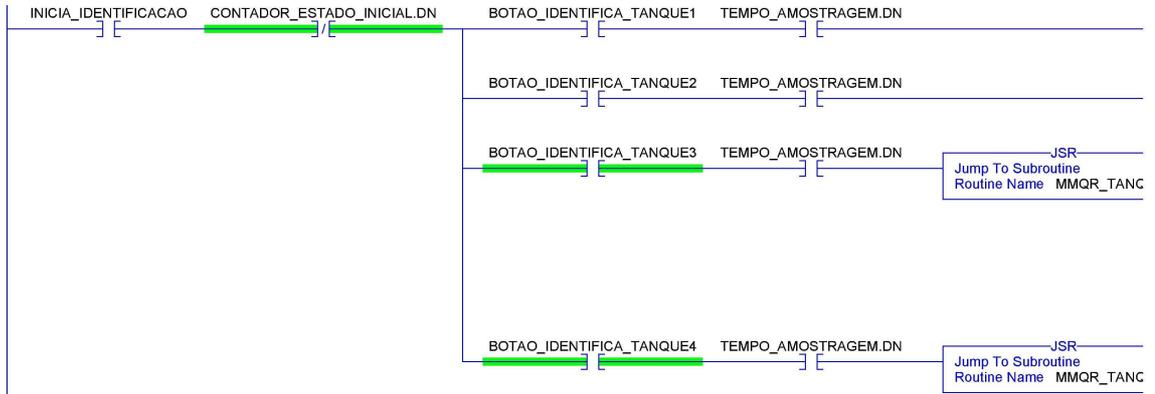


Figura 3: IDENTIFICACAO - Página 1.

7



8

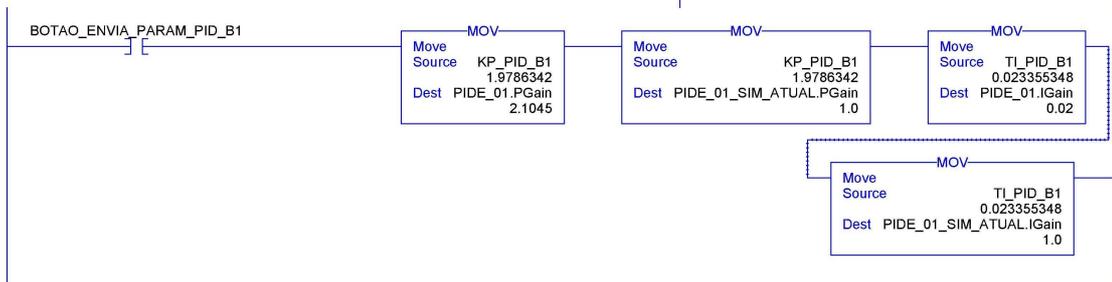


Figura 4: IDENTIFICACAO - Página 2.

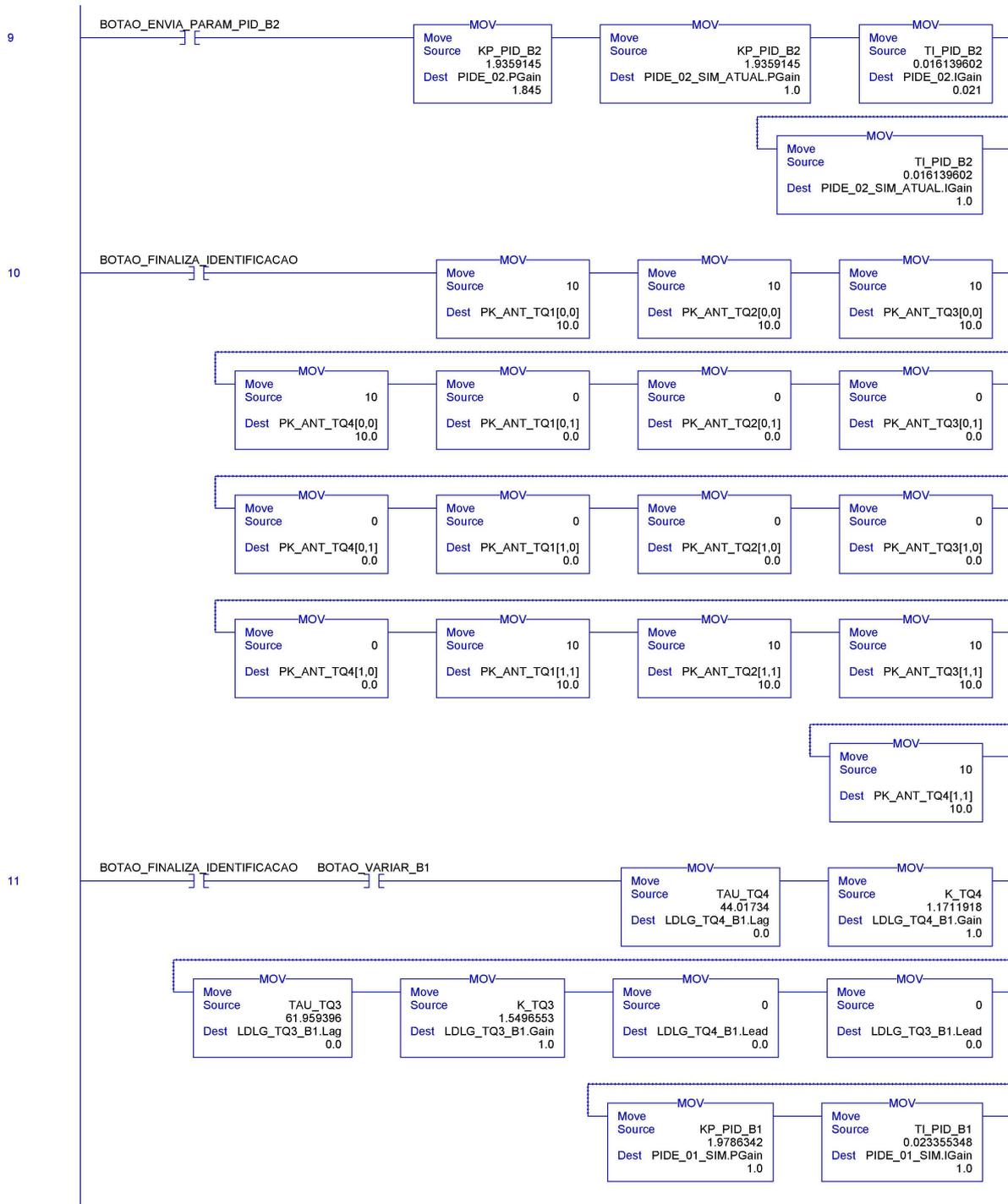


Figura 5: IDENTIFICACAO - Página 3.

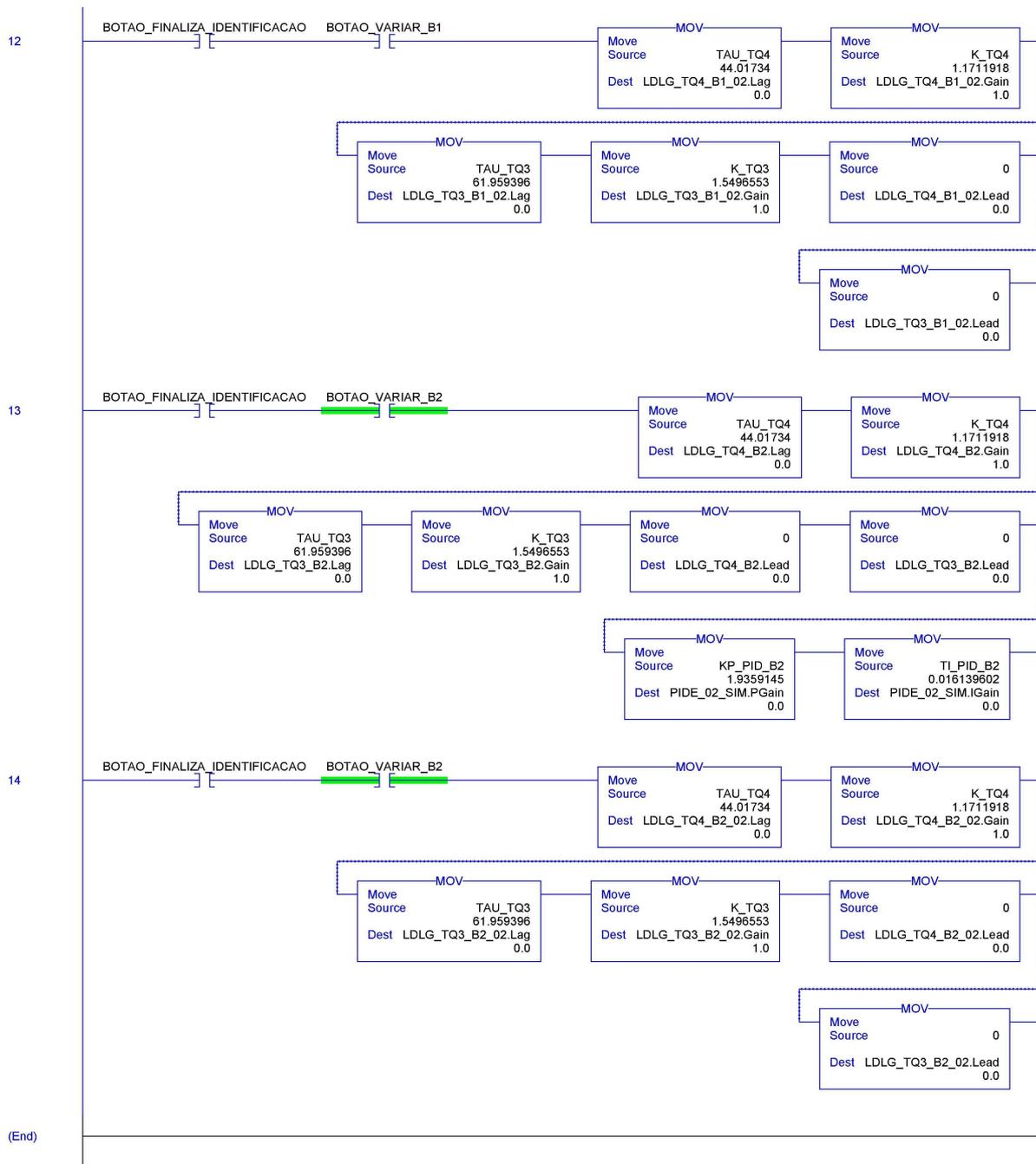


Figura 6: IDENTIFICACAO - Página 4.

```

1
2 IF BOTAO VARIAR_B1 THEN
3
4     PHI_ANT_TQ4[0]:=(LIT_004_ANT-TQ4_0);
5     PHI_ANT_TQ4[1]:=(BOMBAL_ANT-U0);
6
7     EK:=(LIT_004_EU-TQ4_0)-(PHI_ANT_TQ4[0]*THETA_ANT_TQ4[0]+PHI_ANT_TQ4[1]*THETA_ANT_TQ4[1]);
8
9     AUX[0]:=PK_ANT_TQ4[0,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK_ANT_TQ4[0,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
10    AUX[1]:=PK_ANT_TQ4[1,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK_ANT_TQ4[1,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
11
12    AUX_2[0,0]:=AUX[0]*PHI_ANT_TQ4[0];
13    AUX_2[0,1]:=AUX[0]*PHI_ANT_TQ4[1];
14    AUX_2[1,0]:=AUX[1]*PHI_ANT_TQ4[0];
15    AUX_2[1,1]:=AUX[1]*PHI_ANT_TQ4[1];
16
17    AUX_3[0,0]:=AUX_2[0,0]*PK_ANT_TQ4[0,0]+AUX_2[0,1]*PK_ANT_TQ4[1,0];
18    AUX_3[0,1]:=AUX_2[0,0]*PK_ANT_TQ4[0,1]+AUX_2[0,1]*PK_ANT_TQ4[1,1];
19    AUX_3[1,0]:=AUX_2[1,0]*PK_ANT_TQ4[0,0]+AUX_2[1,1]*PK_ANT_TQ4[1,0];
20    AUX_3[1,1]:=AUX_2[1,0]*PK_ANT_TQ4[0,1]+AUX_2[1,1]*PK_ANT_TQ4[1,1];
21
22    AUX_4[0]:=PHI_ANT_TQ4[0]*PK_ANT_TQ4[0,0]+PHI_ANT_TQ4[1]*PK_ANT_TQ4[1,0];
23    AUX_4[1]:=PHI_ANT_TQ4[0]*PK_ANT_TQ4[0,1]+PHI_ANT_TQ4[1]*PK_ANT_TQ4[1,1];
24
25
26    PK[0,0] := PK_ANT_TQ4[0,0]-AUX_3[0,0]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
27    PK[0,1] := PK_ANT_TQ4[0,1]-AUX_3[0,1]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
28    PK[1,0] := PK_ANT_TQ4[1,0]-AUX_3[1,0]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
29    PK[1,1] := PK_ANT_TQ4[1,1]-AUX_3[1,1]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
30
31    AUX_5[0]:=PK[0,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK[0,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
32    AUX_5[1]:=PK[1,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK[1,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
33
34
35    THETA_TQ4[0]:=THETA_ANT_TQ4[0]+AUX_5[0]*EK;
36    THETA_TQ4[1]:=THETA_ANT_TQ4[1]+AUX_5[1]*EK;
37
38    THETA_ANT_TQ4[0]:=THETA_TQ4[0];
39    THETA_ANT_TQ4[1]:=THETA_TQ4[1];
40    PK_ANT_TQ4[0,0]:=PK[0,0];
41    PK_ANT_TQ4[0,1]:=PK[0,1];
42    PK_ANT_TQ4[1,0]:=PK[1,0];
43    PK_ANT_TQ4[1,1]:=PK[1,1];
44    BOMBAL_ANT:=Bombal;
45
46    TAU_TQ4:=-1/LN(-THETA_TQ4[0]);
47    K_TQ4:=THETA_TQ4[1]/(1+THETA_TQ4[0]);
48    LIT_004_ANT:=LIT_004_EU;
49
50 END_IF;
51
52 IF BOTAO VARIAR_B2 THEN
53
54     PHI_ANT_TQ4[0]:=(LIT_004_ANT-TQ4_0);
55     PHI_ANT_TQ4[1]:=(BOMBA2_ANT-U0);
56
57     EK:=(LIT_004_EU-TQ4_0)-(PHI_ANT_TQ4[0]*THETA_ANT_TQ4[0]+PHI_ANT_TQ4[1]*THETA_ANT_TQ4[1]);
58
59     AUX[0]:=PK_ANT_TQ4[0,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK_ANT_TQ4[0,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
60     AUX[1]:=PK_ANT_TQ4[1,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK_ANT_TQ4[1,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
61
62     AUX_2[0,0]:=AUX[0]*PHI_ANT_TQ4[0];
63     AUX_2[0,1]:=AUX[0]*PHI_ANT_TQ4[1];
64     AUX_2[1,0]:=AUX[1]*PHI_ANT_TQ4[0];
65     AUX_2[1,1]:=AUX[1]*PHI_ANT_TQ4[1];
66
67     AUX_3[0,0]:=AUX_2[0,0]*PK_ANT_TQ4[0,0]+AUX_2[0,1]*PK_ANT_TQ4[1,0];
68     AUX_3[0,1]:=AUX_2[0,0]*PK_ANT_TQ4[0,1]+AUX_2[0,1]*PK_ANT_TQ4[1,1];
69     AUX_3[1,0]:=AUX_2[1,0]*PK_ANT_TQ4[0,0]+AUX_2[1,1]*PK_ANT_TQ4[1,0];
70     AUX_3[1,1]:=AUX_2[1,0]*PK_ANT_TQ4[0,1]+AUX_2[1,1]*PK_ANT_TQ4[1,1];
71
72     AUX_4[0]:=PHI_ANT_TQ4[0]*PK_ANT_TQ4[0,0]+PHI_ANT_TQ4[1]*PK_ANT_TQ4[1,0];
73     AUX_4[1]:=PHI_ANT_TQ4[0]*PK_ANT_TQ4[0,1]+PHI_ANT_TQ4[1]*PK_ANT_TQ4[1,1];
74
75
76     PK[0,0] := PK_ANT_TQ4[0,0]-AUX_3[0,0]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
77     PK[0,1] := PK_ANT_TQ4[0,1]-AUX_3[0,1]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
78     PK[1,0] := PK_ANT_TQ4[1,0]-AUX_3[1,0]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
79     PK[1,1] := PK_ANT_TQ4[1,1]-AUX_3[1,1]/(1+AUX_4[0]*PHI_ANT_TQ4[0]+AUX_4[1]*PHI_ANT_TQ4[1]);
80
81     AUX_5[0]:=PK[0,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK[0,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
82     AUX_5[1]:=PK[1,0]*PHI_ANT_TQ4[0]+PK[1,1]*PHI_ANT_TQ4[1];
83
84
85     THETA_TQ4[0]:=THETA_ANT_TQ4[0]+AUX_5[0]*EK;
86     THETA_TQ4[1]:=THETA_ANT_TQ4[1]+AUX_5[1]*EK;
87
88     THETA_ANT_TQ4[0]:=THETA_TQ4[0];
89     THETA_ANT_TQ4[1]:=THETA_TQ4[1];
90     PK_ANT_TQ4[0,0]:=PK[0,0];

```

```

91      PK_ANT_TQ4[0,1]:=PK[0,1];
92      PK_ANT_TQ4[1,0]:=PK[1,0];
93      PK_ANT_TQ4[1,1]:=PK[1,1];
94      BOMBA2_ANT:=Bomba2;
95
96      TAU_TQ4:=-1/LN(-THETA_TQ4[0]);
97      K_TQ4:=THETA_TQ4[1]/(1+THETA_TQ4[0]);
98      LIT_004_ANT:=LIT_004_EU;
99
100 END_IF;
101
102
103
104
105

```

Figura 8: MMQR - Página 2.

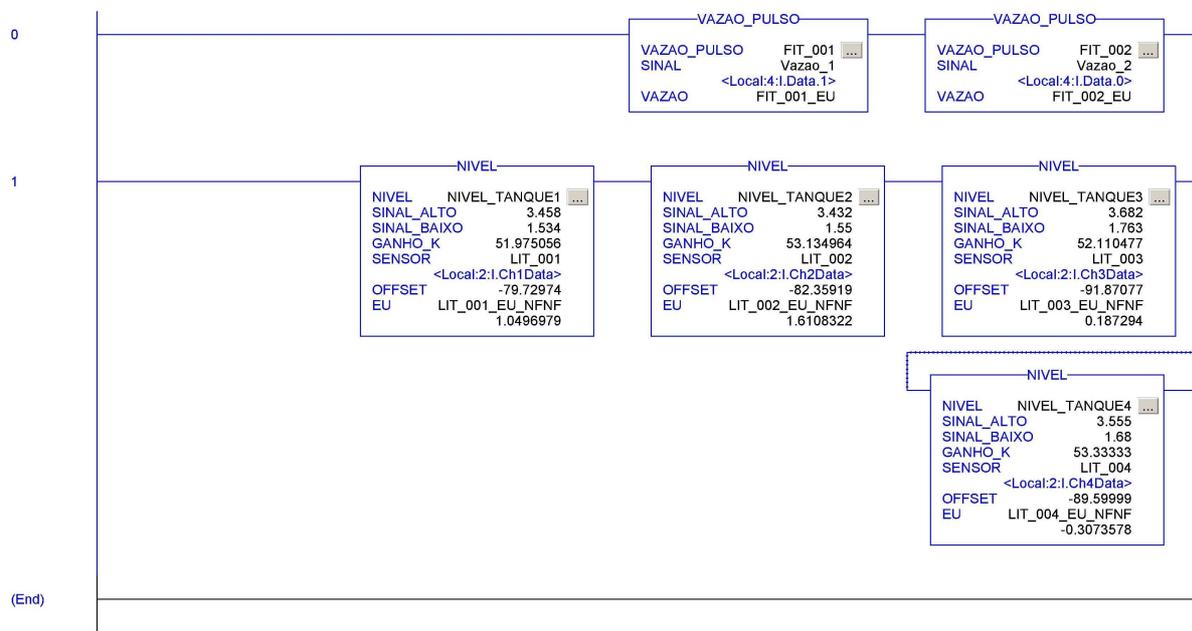


Figura 9: Sensores.

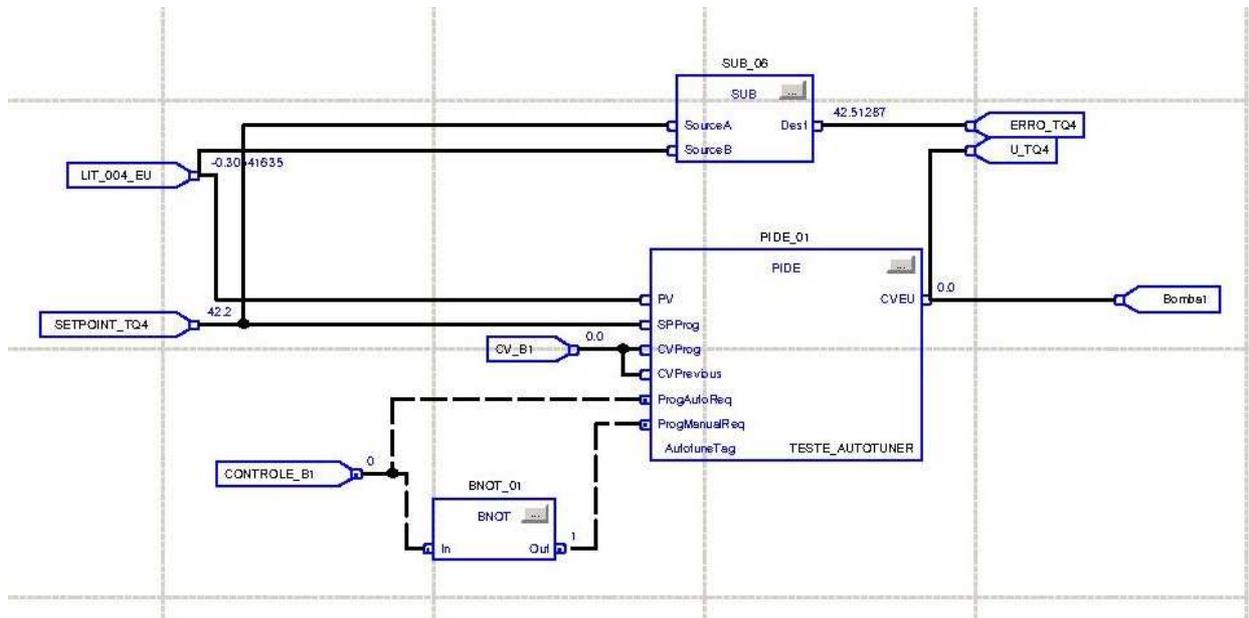


Figura 10: PID B1.

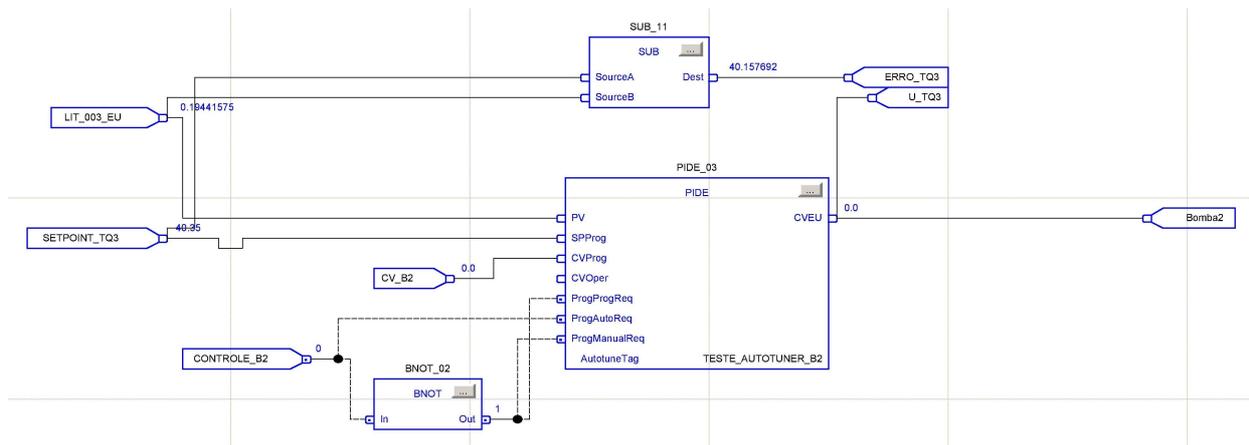


Figura 11: PID B2.

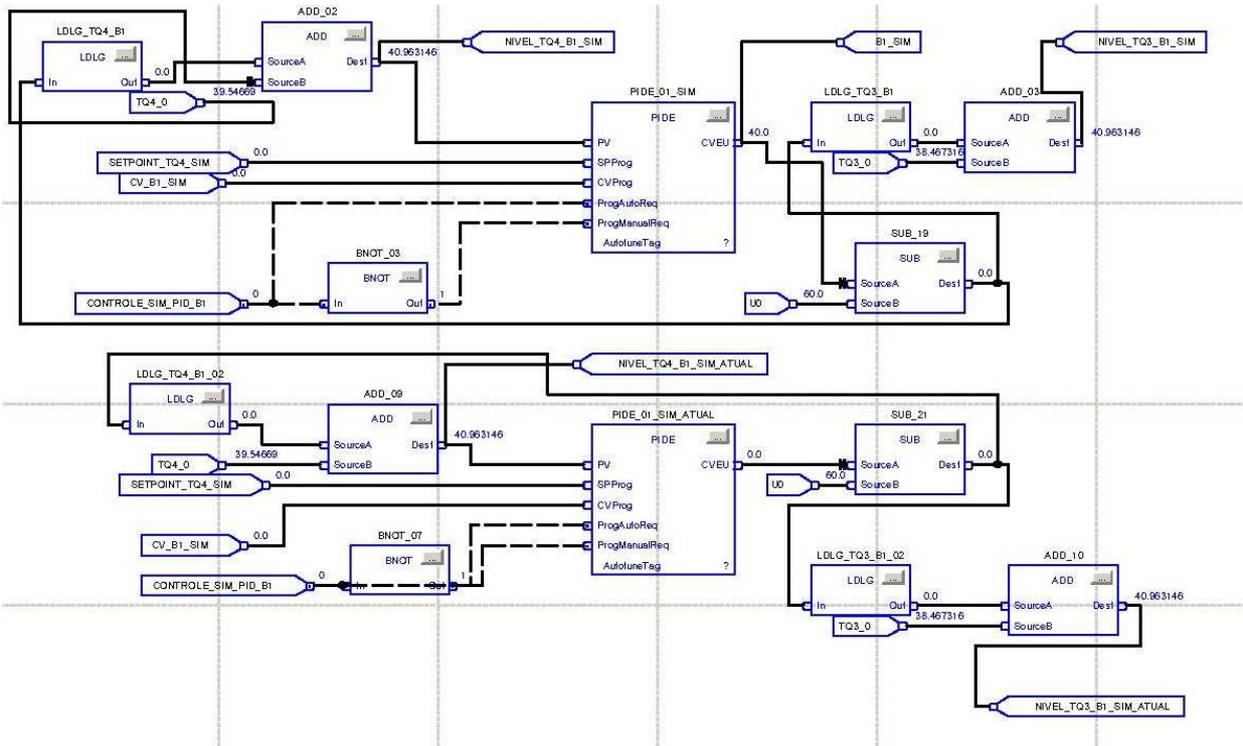


Figura 12: Simulação B1.

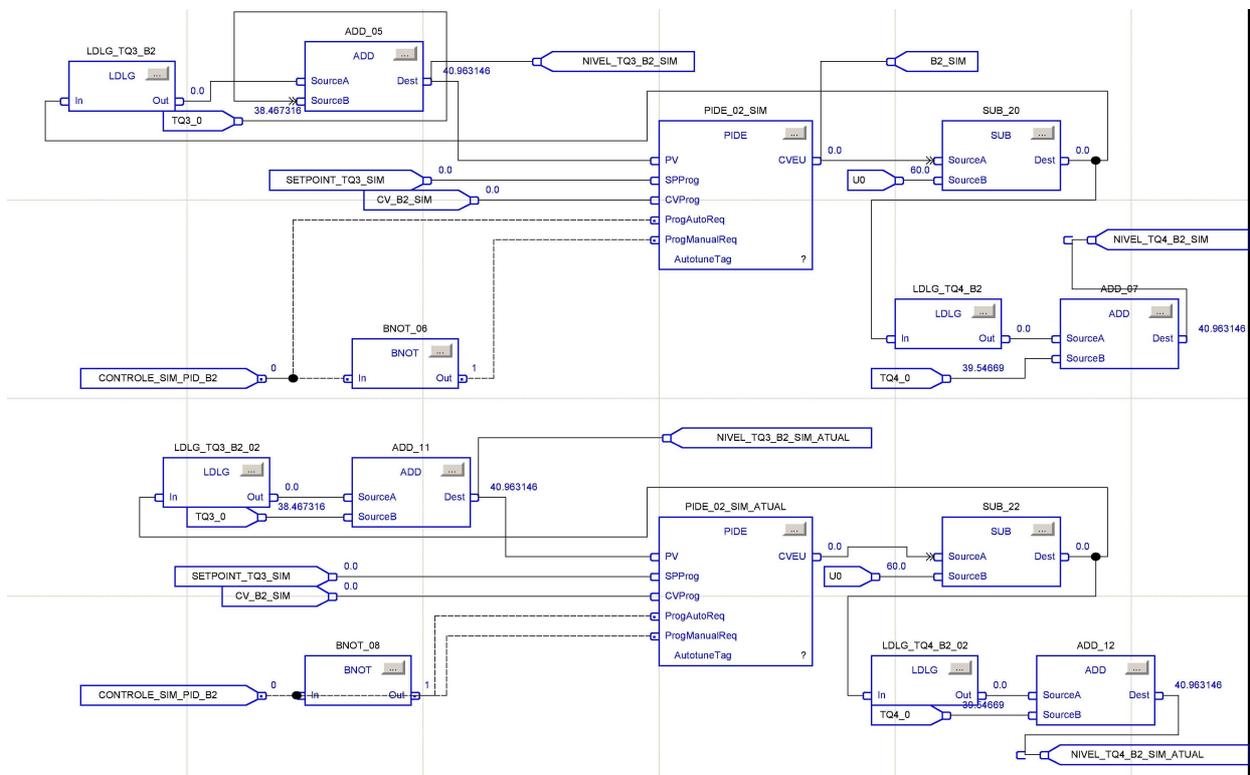


Figura 13: Simulação B2.

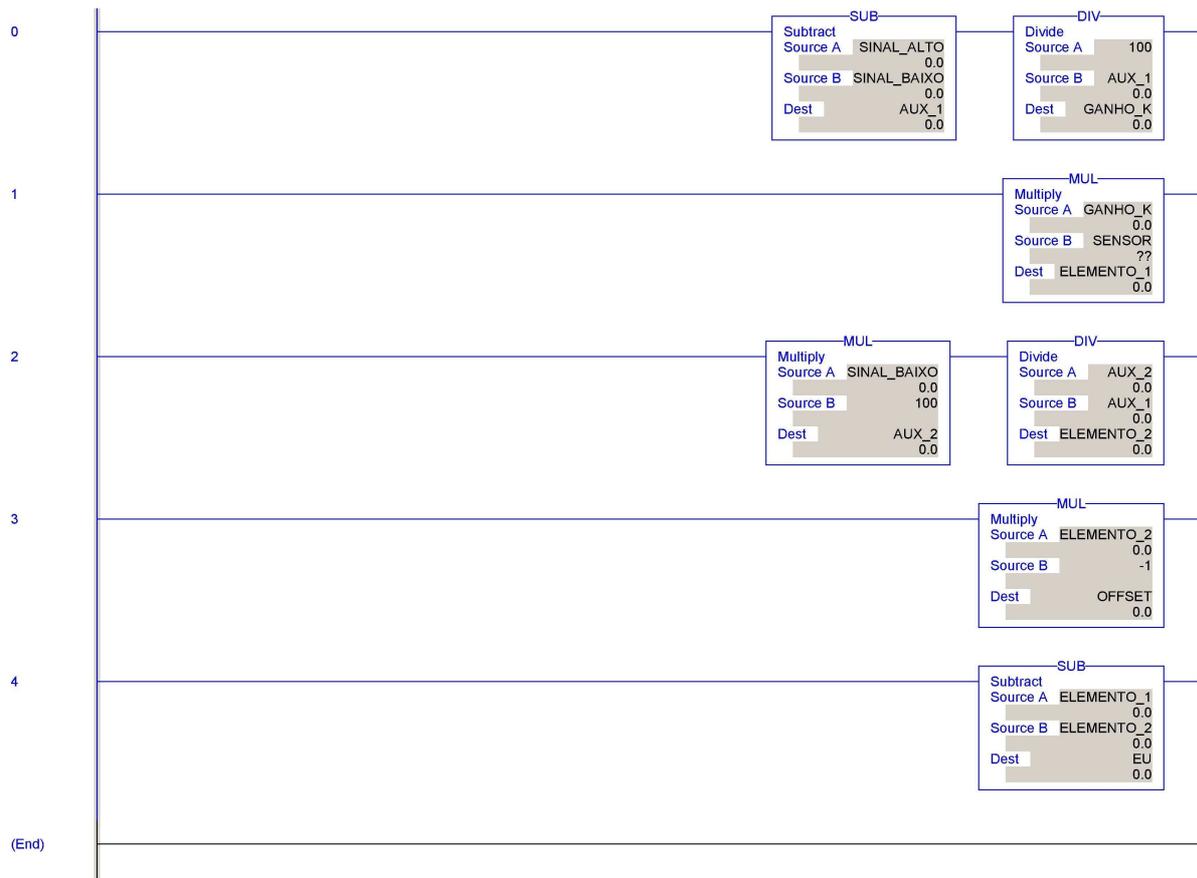
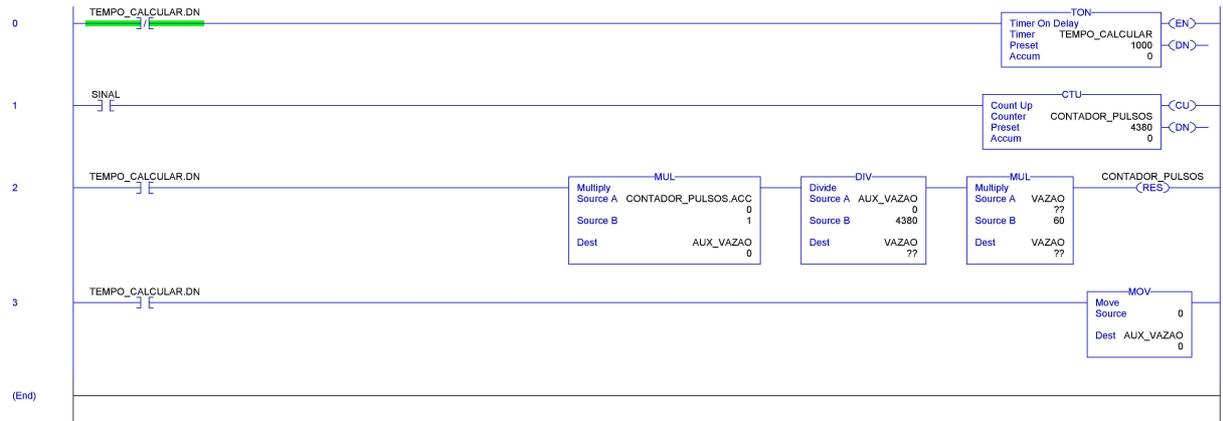


Figura 14: Add-on Instruction - Nível.



Figura 15: Add-on Instruction - Sintonia IMC.



RSLogix 5000

Figura 16: Add-on Instruction - Vazão.

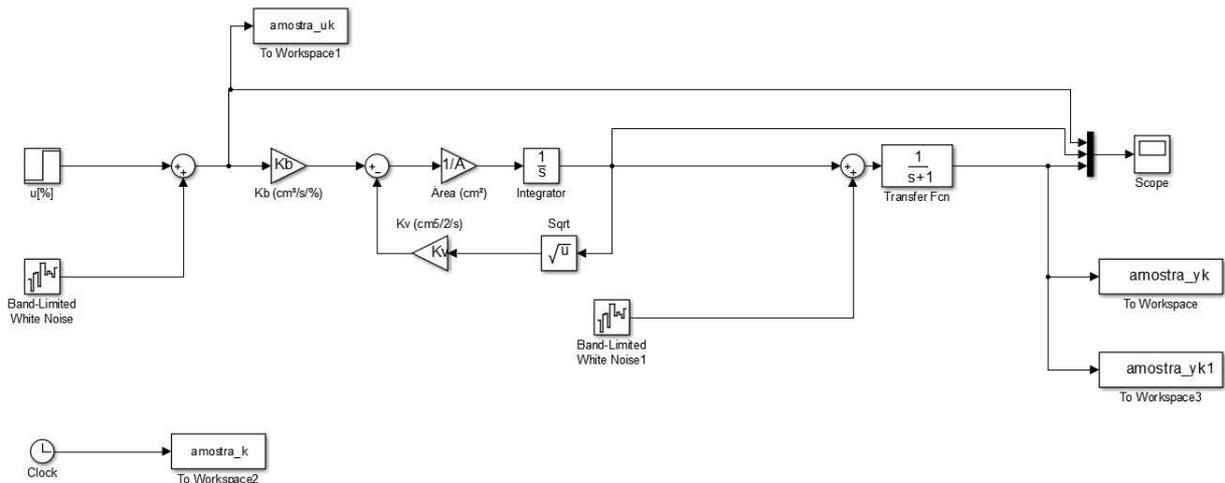


Figura 17: Simulação do modelo do processo.

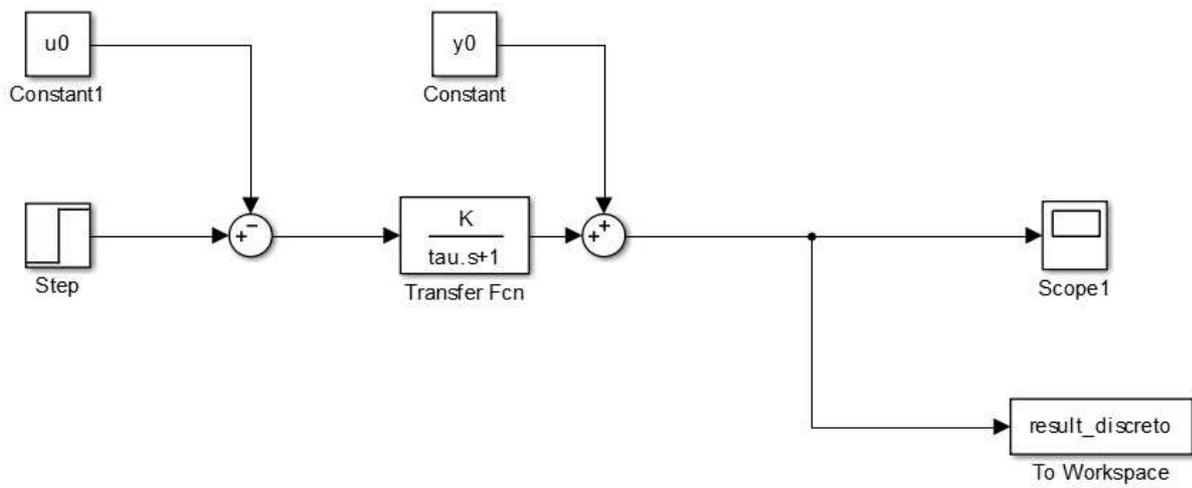


Figura 18: Simulação do modelo do identificado.

```

clc
clear

A=50;
H=20;
Kb=0.5;
Kv=4.7;
sample_time=1;
total_time=2000;
step_time=1000;
u0=60;
uf=70;

sim('simulacao_recur_siva.slx');
Pk_ant=eye(2)*10;
theta_ant=[-0.5;0.024];

for contador=1:1:total_time+1
    if mod(amostra_k(contador,1),1)<0.001 & abs(amostra_k(contador,1)-999)<0.001
        y0=amostra_yk(contador,1);
        u0=amostra_uk(contador,1);
        end
        if mod(amostra_k(contador,1),1)==0 & amostra_k(contador,1)>1000
            phi_ant=-(amostra_yk(contador-1,1)-y0); amostra_uk(contador-1,1)-u0];
            ek=(amostra_yk(contador,1)-y0)-phi_ant'*theta_ant;
            Pk=Pk_ant-(Pk_ant*phi_ant*phi_ant'*Pk_ant)/(1+phi_ant'*Pk_ant*phi_ant);
            theta=theta_ant+Pk*phi_ant*ek;
            %ATUALIZAR PARÂMETROS ANTERIORES
            theta_ant=theta;
            Pk_ant=Pk;
        end
    end

theta
tau=sample_time/log(-theta(1,1));
K=theta(2,1)/(1+theta(1,1));
sim('simplanta_ident.slx');
plot(result_discreto,'DisplayName','Modelo')
hold on;
plot(amostra_yk1,'r','DisplayName','Planta Simulada')
xlabel('Tempo(s)')
ylabel('Nivel(%)')
title('Comparação identificação utilizando recursividade')
legend('show')

```

Figura 19: Script do MATLAB para identificação recursiva do processo simulado e real.

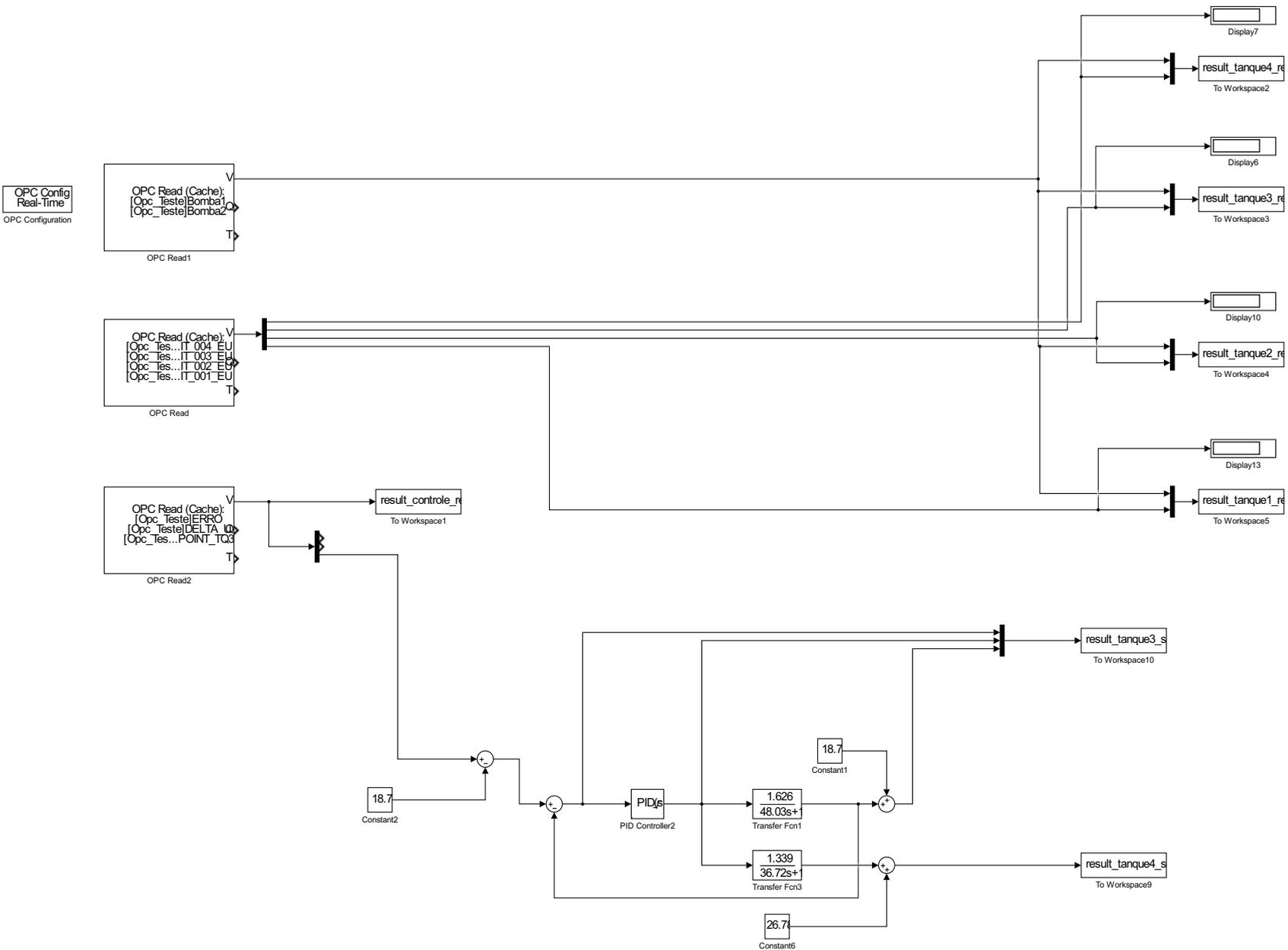


Figura 20: Diagrama para coleta de dados do controle de nível no tanque 3.

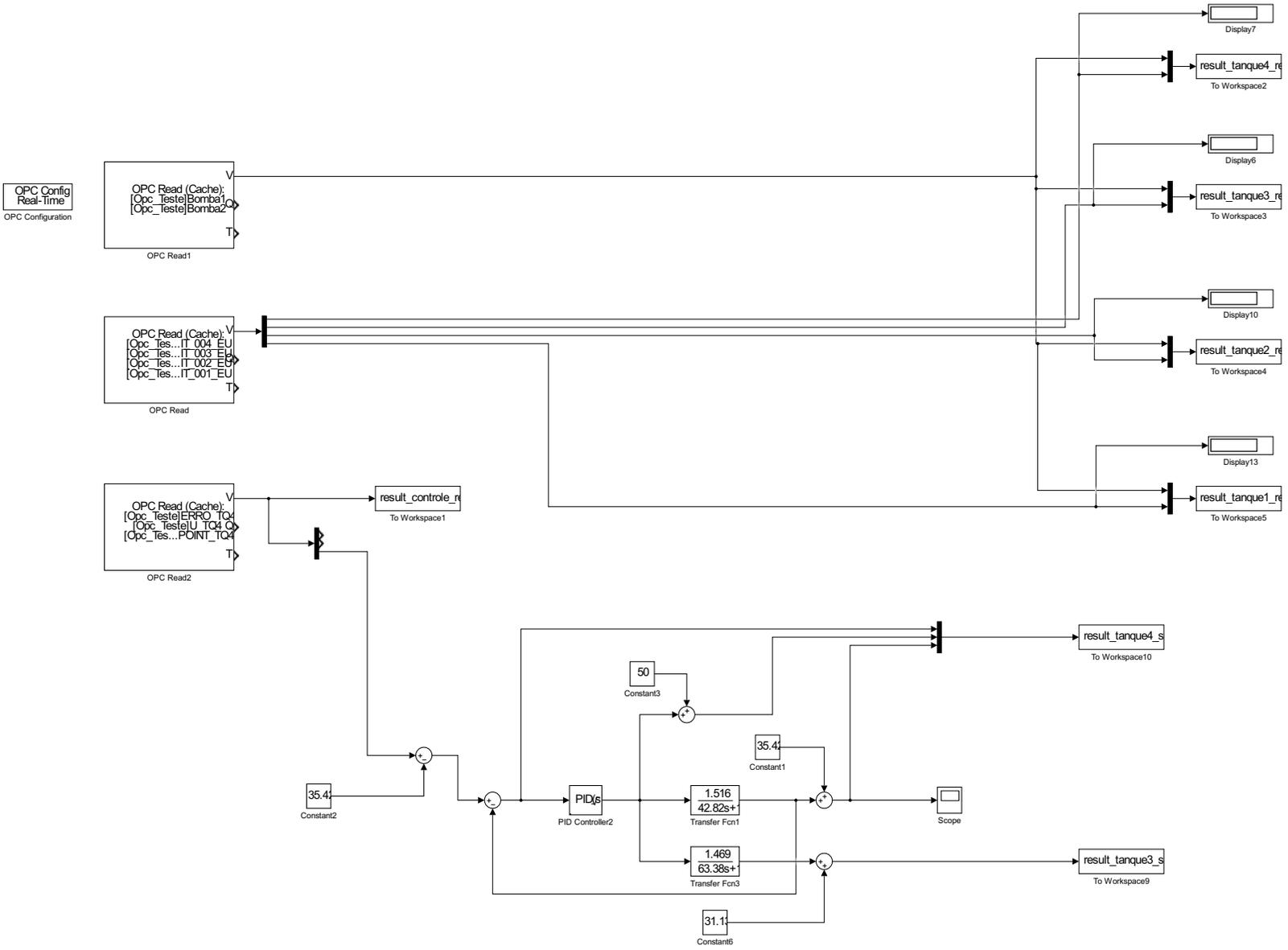


Figura 21: Diagrama para coleta de dados do controle de nível no tanque 4.

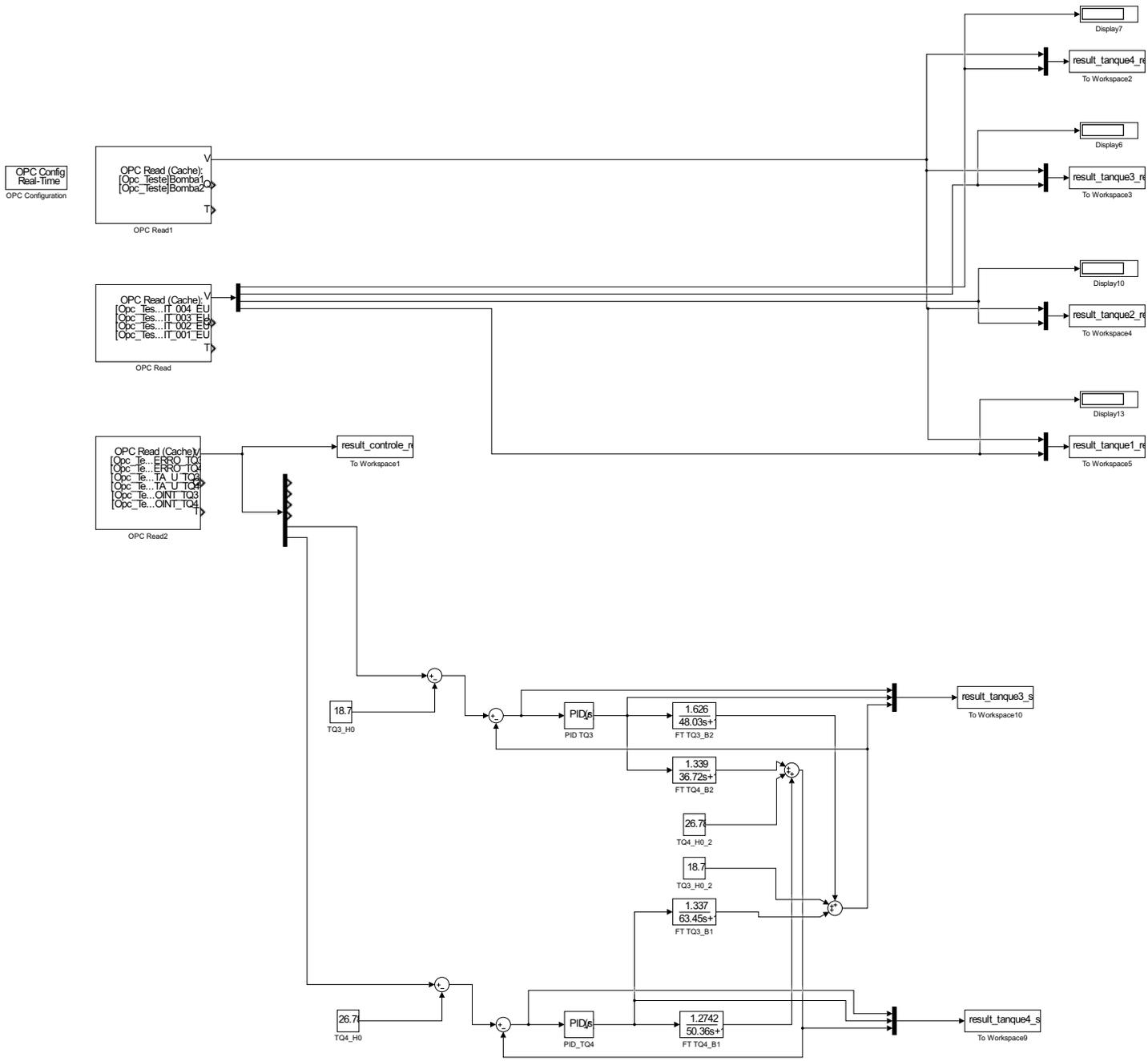


Figura 22: Diagrama para coleta de dados do controle de nível de ambos os tanques.