



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

BRUNO MILTON PEREIRA BARBOSA

**SISTEMA DE SUPERVISÃO INTELIGENTE NO INTOUCH PARA
AUTOMAÇÃO MULTIMALHAS DA BANCADA NVPT**

MANAUS / AMAZONAS

2016

BRUNO MILTON PEREIRA BARBOSA

**SISTEMA DE SUPERVISÃO INTELIGENTE NO INTOUCH PARA
AUTOMAÇÃO MULTIMALHAS DA BANCADA NVPT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro em conformidade com as normas ABNT.

Orientador: Dr. Israel Francisco Benitez Pina.

MANAUS / AMAZONAS

2016

BRUNO MILTON PEREIRA BARBOSA

**SISTEMA DE SUPERVISÃO INTELIGENTE NO INTOUCH PARA
AUTOMAÇÃO MULTIMALHAS DA BANCADA NVPT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro em conformidade com as normas ABNT.

Orientador: Dr. Israel Francisco Benitez Pina.

Aprovado em 05 de dezembro de 2016.

Dr. Israel Francisco Benitez Pina

Orientador

Me. Charles Luiz Silva de Melo

Professor

Me. Luiz Alberto Queiroz Cordovil Júnior

Convidado 1

Professor

Convidado 2

MANAUS / AMAZONAS

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a saúde e a força que precisei para chegar nesta importante etapa da minha vida.

A meus pais, Denilson Araujo e Carlete Pereira, por acreditarem em mim e no meu sonho.

Ao meu orientador, Dr. Israel Francisco Benitez Pina, por sua paciência e orientação no decorrer desta monografia, por sempre transmitir o máximo de conhecimento em suas aulas e por estar sempre disponível a orientar seus alunos.

Agradeço também aos meus amigos, principalmente ao Lucas Belido, Davi da Silva e Brennda Lima por me acompanharem nesses anos de estudo, por todo apoio, sobretudo nos momentos que mais precisei.

*“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados”
(Mahatma Gandhi)*

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de supervisão inteligente capaz de realizar o controle simples malha e multimalha de uma bancada didática, com o objetivo de torná-la mais eficiente, aumentando suas funcionalidades para possíveis utilizações em aulas práticas. O sistema supervisorio foi implementado na bancada NVPT (nível, vazão, pressão e temperatura) adquirida pela instituição de ensino. Para o controle simples malha foram necessários os ajustes das malhas de vazão e pressão, cujo os sistemas de controle não correspondiam ao valor desejado pelo usuário, problema que a bancada apresentou no seu estado inicial. Foram aplicados ensaios na bancada antes e depois dos ajustes realizados para avaliar o desempenho dos mesmos, nos quais foram obtidos bons resultados. Já o controle multimalha foi aplicado sobre as variáveis de nível e vazão. Nele, foi desenvolvido um algoritmo fuzzy que através de algumas variáveis do processo determina a abertura da válvula de atuação contínua e o setpoint ideal de vazão que deve ser inserido na malha fechada de vazão para que os valores desejados pelo usuário nos setpoints sejam atendidos da melhor forma possível, apesar da forte interação existente entre as variáveis. O algoritmo fuzzy foi desenvolvido e implementado no software *Matlab*, e integrado ao sistema supervisorio, posteriormente. A interface humano máquina (IHM) para controle e monitoramento dos processos da bancada foi desenvolvida e implementada no software *Intouch*. A interface desenvolvida é de fácil uso e se assemelha às encontradas nas indústrias, onde os operadores tem acesso aos dados e controle dos processos em interfaces amigáveis.

Palavras-chaves: Controle Simples Malha Fechada. Controle Multimalha. Algoritmo Fuzzy. Sistema Supervisorio.

ABSTRACT

In this work was developed an intelligent supervision system capable of performing the simple and multi loop control of a didactic workbench, with the objective of making it more efficient, increasing its functionalities for possible uses in practical classes. The supervisory system was implemented in the NVPT workbench (level, flow, pressure and temperature, from Portuguese, Nivel, Vazão, Pressão and Temperatura) acquired by the institution. For the simple control was necessary to adjust the flow and pressure loops, whose control systems didn't match to the value desired by the user, an problem in the initial workbench's state. Tests were applied before and after the adjustments made to evaluate their performance and good results were obtained. Multi-loop control was applied to the level and flow variables. In it, a fuzzy algorithm was developed that, through some process variables, determines the opening of the continuous actuation valve and the ideal flow setpoint that must be inserted in the closed flow network so that the values desired by the user in the setpoints are better satisfied, despite the strong iteration between the variables. The fuzzy algorithm was developed and implanted in *Matlab* software, and later integrated into the supervisory system. The Human Machine Interface (HMI) for control and monitoring of loop processes was developed and implemented in *Intouch* software. The interface developed is easy to use and resembles those found in the industries where operators have access to data and process control in friendly interfaces.

Key-words: Simple Loop, Multi Loop, Fuzzy Algorithm, Supervisory System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de supervisão e controle.....	23
Figura 2 - Diagrama de lógica Ladder.....	26
Figura 3 - Software <i>TwidoSuite</i>	26
Figura 4 - Oscilação periódica da saída $y(t)$ de um sistema.	31
Figura 5 – Definição de meia idade segundo a lógica booleana convencional.	32
Figura 6 – Definição de meia idade segundo a lógica fuzzy.	33
Figura 7 - Variável lingüística “nível” e suas respectivas funções de pertinências.	33
Figura 8 - Estrutura básica de um controlador fuzzy.....	34
Figura 9 - Métodos de desfuzzyficação.....	35
Figura 10 - Tela gráfica desenvolvida no <i>Intouch</i>	36
Figura 11 - Visão geral da bancada.	38
Figura 12 - Bancada NVPT com as melhorias.	39
Figura 13 - Sensor ultrassônico XX930A1A1M12.	40
Figura 14 – Sensor de vazão DS8030.....	40
Figura 15 - Sensor de pressão XM_XMLP010BC21V.	40
Figura 16 – Sensor de temperatura PT100.	41
Figura 17 – Motobomba	41
Figura 18 - Válvula de atuação contínua.....	42
Figura 19 - Resistência de Aquecimento.....	42
Figura 20 - CLP TWDLCAA40DRF.	42
Figura 21 - Programação para filtragem de sinal do sensor de vazão (Parte 1).	43
Figura 22 - Programação para filtragem de sinal do sensor de vazão (Parte 2).	44
Figura 23 - Programação para filtragem de sinal do sensor de vazão (Parte 3).	44
Figura 24 - Tanques superiores acoplados em série.....	46
Figura 25 - Tanques Inferiores.	46
Figura 26 - Software OPC <i>Kepserverex</i> para comunicação com o CLP.	48
Figura 27 - Esquema no <i>Simulink</i> para obtenção da resposta do sistema.....	48
Figura 28 - Ferramenta <i>System Identification Tools</i> do software <i>Matlab</i>	49
Figura 29 - Degrau aplicado na abertura da válvula.....	50
Figura 30 - Resposta temporal do nível ao de grau aplicado na válvula.....	50

Figura 31 - Degrau aplicado na velocidade da motobomba.	51
Figura 32 - Resposta temporal do nível ao degrau aplicado na motobomba.....	51
Figura 33 - Malha de controle de nível.	52
Figura 34 - Degrau aplicado na velocidade da motobomba.	52
Figura 35 - Resposta temporal da vazão ao degrau aplicado na motobomba.....	53
Figura 36 - Malha de controle de vazão.	53
Figura 37 - Degrau aplicado na velocidade da motobomba.	54
Figura 38 - Resposta temporal da pressão ao degrau aplicado na motobomba.	54
Figura 39 - Malha de controle de pressão.....	55
Figura 40 - Esquema para projeto do controlador de vazão.	55
Figura 41 - Resposta temporal oscilatória do sistema.	56
Figura 42 - Resposta do sistema com controlador do tipo PD.	57
Figura 43 - Resposta do sistema com controlador do tipo PI.....	58
Figura 44 - Resposta do sistema com controlador do tipo PID.....	59
Figura 45 - Esquema para projeto do controlador de pressão.	59
Figura 46 - Resposta temporal oscilatória do sistema.	60
Figura 47 - Resposta do sistema com controlador do tipo PD.	60
Figura 48 - Resposta do sistema com controlador do tipo PI.....	61
Figura 49 - Resposta do sistema com controlador do tipo PID.....	62
Figura 50 - Esquema para simular o funcionamento simultâneo das malhas.....	63
Figura 51 - Resposta da malha de nível.....	64
Figura 52 - Resposta da malha de vazão.	64
Figura 53 - Variáveis de entrada e saída.....	65
Figura 54 - Funções de pertinências da variável de entrada setpoint de nível.	66
Figura 55 - Funções de pertinências da variável de entrada nível do tanque.	66
Figura 56 - Funções de pertinências da variável linguística vazão de entrada.....	67
Figura 57 - Funções de pertinências da variável de entrada setpoint de vazão.	67
Figura 58 - Funções de pertinências da variável de saída abertura da válvula.....	68
Figura 59 - Funções de pertinências da variável de saída setpoint de vazão final.	68
Figura 60 - Esquema no <i>Simulink</i> para avaliação do controlador fuzzy.	70
Figura 61 - Tela de acesso ao usuário.	71
Figura 62 - Tela de comandos manuais.....	72
Figura 63 - Parte direita da tela de comandos manuais (bancada NVPT).....	72
Figura 64 - Tela de modo automático selecionado a malha de nível.	73

Figura 65 - Tela de modo automático selecionado a malha de vazão.	73
Figura 66 - Tela de modo automático selecionado a malha de pressão.	74
Figura 67 - Tela de modo automático selecionado a malha de temperatura.	74
Figura 68 - Tela de modo automático selecionado o controle multimalhas de nível/vazão.....	75
Figura 69 - Algoritmo fuzzy implementado no <i>Simulink</i>	75
Figura 70 - Tela de alarme.....	76
Figura 71 - Resposta da malha de vazão antes do projeto.....	77
Figura 72 - Resposta da malha de vazão depois do projeto.....	78
Figura 73 - Resposta da malha de pressão antes do projeto.	78
Figura 74 - Resposta da malha de pressão depois do projeto.....	79
Figura 75 - Resposta do controle multimalha da variável de nível.	80
Figura 76 - Resposta do controle multimalha da variável de vazão.....	80
Figura 77 - Valor de abertura da válvula na saída do algoritmo fuzzy.	81
Figura 78 - Usuário realizando login para acesso ao supervisório.....	82
Figura 79 - Supervisório operando no modo manual.	83
Figura 80 - Tela de alarme com sinalização de alerta.	83
Figura 81 - Controle simples malha fechada da variável de vazão.	84
Figura 82 - Controle multimalha das variáveis de nível e vazão.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras de ajuste para o primeiro método de Ziegler-Nichols.....	31
Tabela 2 - Índices de desempenho dos tipos de controladores para malha de vazão.....	59
Tabela 3 - Índices de desempenho dos tipos de controladores para malha de pressão.....	62
Tabela 4 – Amostra de regras do algoritmo fuzzy.....	69
Tabela 5 – Lista de Tags utilizadas.....	91
Tabela 6 – Regras do Controlador Fuzzy (Parte 1).....	92
Tabela 7 – Regras do Controlador Fuzzy (Parte 2).....	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problemática	15
1.2	Motivação	15
1.3	Justificativa	16
1.4	Objetivo	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivos Específicos	16
1.5	Metodologia	17
1.6	Organização do Trabalho	19
2	TRABALHOS RELACIONADOS	20
2.1	Sistema de Monitoramento a Distância para Unidade de Célula a Combustível	20
2.2	Supervisório Inteligente de Processos na Indústria do Petróleo e Gás: Aplicação em uma Coluna de Destilação Simulada Integrada a Instrumentação Real	20
2.3	Sistema Supervisório de Parâmetros de Máquinas Elétricas Via TCP/IP e Painel Eletrônico de Mensagem	21
3	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1	Sistemas Supervisórios	22
3.1.1	Componentes físicos de um sistema de supervisão	22
3.1.2	Componentes lógicos de um sistema SCADA	23
3.1.3	Modos de comunicação	24
3.2	Controladores Lógico Programáveis	25
3.3	Diagramas de Lógica Ladder	25
3.4	Twido Suite	26
3.5	OPC	27
3.6	Kepserverex	28
3.7	Matlab	28
3.7.1	Simulink	28
3.7.2	OPC Toolbox	29
3.7.3	System Identification Tools	29
3.7.4	Fuzzy Logic Toolbox	29
3.8	Sintonia de Malhas de Controle	29
3.8.1	Sintonia de controladores por Ziegler-Nichols	30
3.9	Lógica Fuzzy	31
3.9.1	Variáveis linguísticas	33
3.9.2	Controlador Fuzzy	33
3.10	Intouch	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37

4.1 Bancada NVPT	37
4.1.1 Elementos da Bancada	39
4.2 Malhas de Controle do Processo	45
4.2.3 Malha de controle de nível	45
4.2.4 Malha de controle de vazão	46
4.2.5 Malha de controle de pressão	47
4.2.6 Malha de controle de temperatura	47
4.3 Aquisição de Dados do Processo	47
4.4 Identificação Experimental das Malhas de Controle	49
4.4.1 Identificação da Malha de Nível	49
4.4.2 Identificação da malha de vazão	52
4.4.3 Identificação da malha de pressão	53
4.5 Sintonia dos Controladores	55
4.5.1 Sintonia do controlador da malha de vazão	55
4.5.2 Sintonia do controlador da malha de pressão	59
4.6 Algoritmo Fuzzy	63
4.6.1 Variáveis de entradas	65
4.6.2 Variáveis de saídas	67
4.6.3 Regras do algoritmo fuzzy	68
4.7 Sistema Supervisório	70
5 RESULTADOS OBTIDOS	77
5.1 Ensaios das malhas de Vazão e Pressão	77
5.2 Ensaios do controle multimalha de Nível e Vazão	79
5.3 Controle e monitoração da Bancada pelo Supervisório	82
6 CONCLUSÃO	86
6.1 Dificuldades encontradas	87
6.2 Trabalhos futuros	87
7 REFERÊNCIAL	89
APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DAS TAGS	91
APÊNDICE B – REGRAS DO CONTROLADOR FUZZY	92

1 INTRODUÇÃO

Com o mercado industrial cada vez mais competitivo, o controle e monitoramento dos processos de produção tornam-se fundamentais para uma empresa mais sólida dentro dos padrões exigidos de qualidade e confiabilidade do mercado. Por esse motivo, o uso de ferramentas operacionais, como os sistemas supervisórios, que auxiliem nas novas práticas de gestão, as quais exigem cada vez mais dados dos processos em intervalo de tempo menores, são essenciais para o controle das crescentes demandas do mercado.

Segundo Silva e Salvador (2015), os sistemas supervisórios, também chamados de SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Essas informações são coletadas por meio de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipuladas, analisadas, armazenadas e, posteriormente, apresentadas ao usuário.

Os sistemas supervisórios permitem não só a visualização de variáveis fundamentais em processos produtivos, mas também seu controle e tomadas de decisões, tanto pelo operador em operações cotidianas como pelo próprio sistema de forma automática, contribuindo também para estrutura de gestão da empresa, já que mostra de maneira clara o real estado do processo através de gráficos, tendências ou relatórios. Por esse motivo, o estudo e pesquisa dos sistemas supervisórios no ramo acadêmico são essenciais para o desenvolvimento das indústrias locais.

O trabalho apresentado foi realizado com o objetivo de desenvolver e implementar um sistema SCADA no software *Intouch* para monitoramento e controle da bancada NVPT (*Nível, Vazão, Pressão e Temperatura*) do laboratório de Automação III da Escola Superior de Tecnologia. O sistema apresenta gráficos, tendências, alarmes e relatórios para automação multimalhas e simples malha da planta com um supervisório inteligente baseado em lógica fuzzy. Porém, antes de sua implementação foram realizados ajustes nas malhas, como a implementação de filtros nos sensores das malhas de pressão e vazão para correção de ruídos, e a identificação experimental das funções de transferências das mesmas, para se obter um controle otimizado da planta pelo sistema supervisório. O sistema possuirá três malhas de controle PID para a variável de nível, vazão e pressão, já para variável de temperatura o controle será on/off com histerese. O sistema supervisório inteligente permite reajustar online as malhas de nível e vazão para garantir o controle multimalha dessas duas variáveis de controle.

Foram realizados na bancada, anteriormente, trabalhos de conclusão de fim de curso (TCC) dos alunos Alcimara e Fabrício com interesse de aperfeiçoar a mesma e criar condições

para o controle multimalhas. Este trabalho aproveita esses resultados e acrescenta a possibilidade de uma supervisão inteligente que permite coordenar o trabalho de duas das quatro malhas principais da bancada NVPT de forma simultânea, sendo elas a malha de nível e vazão, que possuem interações. Para esse objetivo ser obtido foi necessária a aplicação de algoritmos de inteligência artificial (lógica fuzzy) com o objetivo de eliminar os efeitos das interações existentes entre essas malhas.

1.1 Problemática

Ausência de um sistema supervisor integrado com algoritmos de inteligência artificial, mas especificamente a lógica difusa ou lógica fuzzy, que possibilitem o controle multimalhas e simples malha da bancada NVPT.

Mau funcionamento das malhas de vazão e pressão da bancada NVPT configuradas em malhas fechadas simples, não conseguindo se ajustar ao valor desejado pelo usuário.

1.2 Motivação

A bancada NVPT é um kit didático da *Automatus* adquirido pela Universidade do Estado do Amazonas para o uso em aulas práticas no laboratório de Automação III. Sua estrutura sofreu diversas modificações e melhorias que foram realizadas por alunos em trabalhos de fim do curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação. Porém, a problemática quanto ao comportamento indesejado das malhas de pressão e vazão não foram solucionados.

A bancada NVPT permite o controle de quatro malhas de controle: nível, vazão, pressão e temperatura de forma simples malha, não garantindo controle multimalha de nenhum das quatro malhas de controle. A adição de um sistema de supervisão inteligente que possibilite a automação multimalha tornaria o processo mais eficiente e mais próximo do encontrado nas indústrias locais, permitindo o melhor aproveitamento do kit da *Automatus*. Porém, para a sua conclusão devem ser realizados os ajustes das malhas do processo de pressão e vazão, solucionando a problemática quanto o comportamento indesejado, e também criado um sistema supervisão inteligente, que permita a execução eficiente do controle simples malha das variáveis de controle, e também o controle multimalha das malhas de nível e vazão, para a automação multimalhas da bancada NVPT.

1.3 Justificativa

Nas primeiras etapas que antecedem o desenvolvimento do supervisor, serão realizados os ajustes das malhas de controle de pressão e vazão da bancada NVPT, as quais não estão tendo o comportamento desejado, através da correção de ruídos nos sensores de pressão e vazão (filtragem) e a identificação experimental dessas malhas defeituosas para a obtenção dos parâmetros PID para controle das mesmas, trazendo melhorias para o funcionamento da bancada. O desenvolvimento e implementação do sistema de supervisão inteligente no software *Intouch* para controle da bancada NVPT, permitindo o controle multimalha das malhas de nível e vazão, facilitará o uso da mesma em aulas práticas, pois apresentará os dados do processo de forma mais clara e ilustrativa, garantindo a execução simultânea das malhas de nível e vazão ou controle simples das malhas separadamente.

O sistema supervisor, aplicado ao ambiente industrial, otimizará o controle dos dados do processo, permitindo sua aquisição e processamento em um intervalo de tempo menor, assim agilizando a análise da produção, tomadas de planos de ação e medidas emergenciais.

O desenvolvimento desse projeto utilizará os conhecimentos adquiridos nas seguintes disciplinas: Instrumentação Industrial, Automação e Supervisão de Processos, Sistemas Supervisórios, Sistema de Eventos Discretos, Redes de Computadores I, Redes Industriais de Comunicação, Controle e Automação I e II e Tópicos Especiais I (Supervisão Inteligente), entre outras.

1.4 Objetivo

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar um sistema supervisor inteligente no software *Intouch* para automação multimalhas e simples malha da bancada NVPT e a utilização do mesmo em aulas práticas.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Adicionar condicionadores de sinais para os dados dos sensores de pressão e vazão coletados pelo CLP da bancada para correção dos ruídos observados no processo;
- b) Ajustar as malhas de pressão e vazão dos sistemas de controle da bancada NVPT, como identificação experimental das mesmas e obtenção dos parâmetros dos controladores PID para seus controles;
- c) Realizar a identificação experimental da malha de nível e a interação existente entre esta e a malha de vazão, a fim de estudar o comportamento simultâneo das duas malhas e auxiliar no desenvolvimento do algoritmo fuzzy que permitirá o controle simultâneo das mesmas, ou seja, o controle multimalhas do processo;
- d) Desenvolver um sistema de supervisão inteligente integrado com algoritmos de lógica fuzzy para automação multimalhas das malhas de nível e vazão ou automação simples malha da bancada NVPT, utilizando um computador como unidade central de processamento que se comunicará com o CLP da *Shneider Eletric* através do protocolo OPC e o software *Intouch*, no qual será desenvolvida a aplicação do sistema supervisorio (SCADA), apresentando gráficos, tendências, alarmes e relatórios para representação gráfica do processo da bancada, e o software *Matlab* onde será executado o algoritmo inteligente baseado em lógica fuzzy no controle multimalhas da bancada.
- e) Implementar o sistema de supervisão na bancada NVPT.

1.5 Metodologia

O trabalho apresentado corresponde a uma pesquisa aplicada, cujo objetivo foi a realização de uma pesquisa exploratória e explicativa sobre o material bibliográfico adquirido sobre o assunto. A coleta de dados foi realizada através da documentação dos componentes presentes na bancada e dados experimentais.

O trabalho foi desenvolvido da seguinte maneira:

Inicialmente, foi realizado o levantamento bibliográfico sobre os métodos que seriam utilizados e a bancada NVPT, seu funcionamento e os dispositivos utilizados na mesma para controle do processo, tais como: O CLP da *Shneider Eletric* e sua programação em linguagem Ladder, e os sensores e atuadores do processo. Foi realizada uma pesquisa sobre os softwares que foram utilizados no desenvolvimento do projeto: tais como: O *Twido suite*, onde é realizada a programação em Ladder do CLP da *Shneider Eletric*; o *Matlab* para identificação

experimental, projeto dos controladores PIDs e desenvolvimento do algoritmo fuzzy que permitiria o controle multimalhas do processo de nível e vazão; e o software *Intouch*, para desenvolvimento do supervisor.

O segundo passo consistiu no desenvolvimento de condicionadores de sinais para filtragem dos sensores de pressão e vazão para eliminação dos ruídos presentes nos processos. Os filtros foram implementados por meio da manipulação dos sinais dos sensores com a adição de linhas de programação na linguagem Ladder existente na bancada no software *TwidoSuite*.

Em seguida, foi realizada a comunicação do CLP da bancada com o software *Matlab* por meio do protocolo OPC para a aquisição dos dados mensuráveis do processo para a realização das identificações experimentais das malhas de nível, vazão e pressão. Através das respostas temporais obtidas foram estimados os modelos matemáticos que representam os comportamentos dinâmicos dessas malhas, assim como foi identificada a interação existente entre a malha de nível e vazão.

Após a obtenção das funções de transferências das malhas de vazão e pressão, foram realizados os projetos dos parâmetros dos controladores PID através do método de sintonia de Ziegler e Nichols para estas malhas, utilizando o *Matlab* e as funções de transferências obtidas na identificação experimental. Por fim, foram realizados ensaios na bancada com a adição dos controladores PID obtidos, visualizando as respostas temporais das malhas de pressão e vazão para comprovar a eficiência dos ajustes realizados, validando os projetos.

O quinto passo realizado foi o desenvolvimento do algoritmo fuzzy para o controle multimalha nível/vazão. Através de algumas variáveis dos processos, como setpoint de nível, nível do tanque, setpoint de vazão e vazão no sistema de bombeamento, o algoritmo consegue determinar os valores da abertura da válvula de atuação contínua e do setpoint ideal de vazão que deve ser inserido na malha de controle de vazão, para que os reais setpoints do usuário sejam obtidos, permitindo o funcionamento simultâneo das mesmas. Este sistema foi desenvolvido por meio do software *Matlab*, a partir da utilização do *Fuzzy Logic Toolbox*.

Por último, foi desenvolvida a aplicação do supervisor no *Intouch*, com a criação das telas para controle e supervisão dos processos da bancada, tais como: modo manual, modo automático, alarmes e relatórios para automação multimalha e simples malha da planta.

O algoritmo fuzzy foi implementado no software *Matlab* e integrado ao sistema supervisor a partir da utilização do software *Keplerverex*, que utiliza o protocolo de comunicação OPC, possibilitando enviar e receber dados do CLP da bancada, permitindo a aplicação do algoritmo fuzzy desenvolvido, pois o software *Matlab* pode receber os dados reais dos processos de nível e vazão armazenados no CLP e aplicar no mesmo à abertura da válvula

de atuação contínua e o setpoint ideal de vazão para que o nível do tanque e vazão da bomba possam ser o mais próximo dos valores desejados pelo usuário.

1.6 Organização do Trabalho

No capítulo 1 são descritos os seguintes itens deste trabalho: introdução, problemática, motivação, justificativa, objetivo e a metodologia que foi utilizada para conclusão desse trabalho.

No Capítulo 2 são descritos alguns trabalhos relacionados com o tema abordado nesta monografia expondo suas principais características para realização de um comparativo entre os mesmos e o trabalho apresentado nesta monografia.

O Capítulo 3 mostra o referencial teórico da monografia, com as pesquisas relacionadas com o tema do trabalho, para o melhor entendimento do leitor;

O Capítulo 4 tem como título “Materiais e métodos”. Nele, são descritos os principais materiais utilizados no decorrer do trabalho, assim como os métodos e técnicas utilizados para sua conclusão.

O Capítulo 5 tem como título “Resultados obtidos”. Neste capítulo, são expostos os principais resultados obtidos na conclusão deste trabalho.

No Capítulo 6 está a conclusão da monografia. Nela, também estão à seção de dificuldades encontradas e trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

No capítulo apresentado são descritos alguns trabalhos científicos que se assemelham com o tema proposto nessa monografia, resumindo cada um deles e citando suas principais semelhanças e diferenças.

2.1 Sistema de Monitoramento a Distância para Unidade de Célula a Combustível

No artigo de Lima, Cordeiro e Souza (2012), os autores propõem apresentar uma arquitetura de um sistema supervisor SCADA baseado em uma ferramenta Web que pode ser aplicado a qualquer sistema de geração e distribuição de energia elétrica. A arquitetura tem como objetivo desenvolver uma plataforma Web acessível via internet para coleta, gerenciamento e análise de dados, com capacidade de gerar indicadores e gráficos para interação dos usuários com o processo e equipamentos. O sistema supervisor utiliza o software *ScadaBR* e uma página Web para exibição dos dados do processo por meio de um servidor Web baseado. A principal semelhança com o projeto de pesquisa apresentado é o desenvolvimento de um sistema supervisor de uma planta, no caso uma célula combustível.

2.2 Supervisor Inteligente de Processos na Indústria do Petróleo e Gás: Aplicação em uma Coluna de Destilação Simulada Integrada a Instrumentação Real

Na dissertação de Barros (2012), foi desenvolvido um supervisor inteligente sobre uma simulação de uma coluna de destilação modelada no *Unisim*, utilizando o protocolo de comunicação *OLE Automation* para comunicação entre o supervisor e o software de simulação, no qual junto ao uso de bancos de dados proveu uma arquitetura de fácil manutenção e escalável. Também foram desenvolvidos módulos inteligentes para pré-processamento, extração de características dos dados e inferência de variáveis, tendo como principal base o software *Encog*. Como resultado obtido foi desenvolvido um supervisor inteligente que centraliza a integração de diferentes tecnologias, como: softwares de simulação de processos industriais (*Hysis* e *Unisim*); banco de dados (*PostgreSQL*) para armazenamento eficiente das

variáveis de processos simulados; inferência de variáveis através de redes neurais (pacote *Encog*); pré-processamento para compressão de dados através do PCA (Análise de Componentes Principais); e a comunicação entre os softwares do processo através do *OLE Automation* para troca de informação, principalmente entre o supervisor e a simulação.

2.3 Sistema Supervisor de Parâmetros de Máquinas Elétricas Via TCP/IP e Painel Eletrônico de Mensagem

A dissertação de Ranieri (2007) propõe o desenvolvimento de um sistema supervisor de baixo custo, utilizando o protocolo TCP/IP, aplicado em máquinas elétricas, podendo ser generalizado na supervisão de outros tipos de sistemas. O sistema a ser supervisionado é um motor DC e os parâmetros observados são algumas de suas grandezas dinâmicas, como a corrente de armadura, tensão de armadura, temperatura do motor, velocidade de rotação do eixo do mesmo, entre outros. Além da exibição dos parâmetros supervisionados através de gráficos e labels da forma convencional, o sistema permite também que esses sejam exibidos através de painéis eletrônicos, fornecendo assim, uma nova interface visual ao usuário com o objetivo de facilitar sua supervisão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas Supervisórios

Os sistemas supervisórios, também conhecido como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Tais informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipuladas, analisadas, armazenadas e posteriormente, apresentadas aos usuários (Silva; Salvador, 2005).

Os sistemas de automação industriais atuais utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar o monitoramento e controle dos processos industriais, realizando a coleta de dados em ambientes complexos, na maior parte das vezes dispersos geograficamente, e a respectiva representação do processo para o operador de forma amigável com recursos gráficos elaborados em HMI (interface homem-máquina) e conteúdo multimídia (Silva; Salvador, 2005).

3.1.1 Componentes físicos de um sistema de supervisão

De acordo com Silva e Salvador (2005), os componentes físicos de um sistema de supervisão podem ser resumidos de forma simplificada em: sensores e atuadores, rede de comunicação, estações remotas (aquisição/controle) e de monitoração central.

Os dispositivos ligados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas SCADA são os sensores que convertem grandezas físicas, tais como nível de um líquido e temperatura para sinais analógicos e digitais legíveis pela estação remota, já os atuadores atuam sobre o sistema, a fim de controlar variáveis de interesses (Silva; Salvador, 2005).

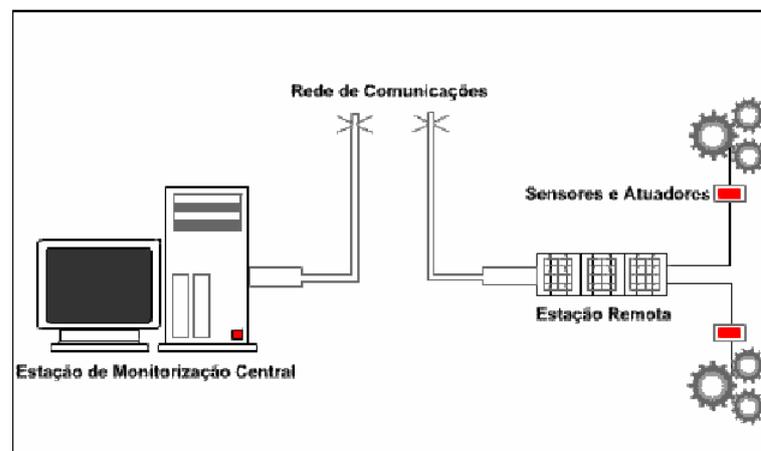
O controle e aquisição de dados são realizados nas estações remotas, os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) e RTUs (Remote Terminal Units), com a leitura dos valores atuais dos dispositivos que estão sendo controlados no processo através dos sensores. Os CLPs e RTUs são unidades computacionais específicas utilizadas em processos industriais para realização do controle dos mesmos (Silva; Salvador, 2005).

O meio físico onde fluem as informações dos CLPs/RTUs para o sistema SCADA é a rede de comunicação e podem ser utilizadas conforme os requisitos do sistema e a distância a

cobrir por meio de cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas dial-up, linhas dedicadas, rádio, modems, entre outras (Silva; Salvador, 2005).

As unidades principais dos sistemas SCADA são as estações de monitoração central, sendo responsáveis por recolher a informação gerada pelas estações remotas e agir em conformidade com os eventos detectados, podem ser centralizadas num único computador ou distribuídas por uma rede de computadores, de modo a permitir o compartilhamento das informações coletadas (Silva; Salvador, 2005).

Figura 1 - Sistema de supervisão e controle.



Fonte: Silva e Salvador (2005).

3.1.2 Componentes lógicos de um sistema SCADA

Segundo Silva e Salvador (2005), os sistemas SCADA geralmente dividem suas principais tarefas em blocos ou módulos, internamente, permitindo uma maior ou menor flexibilidade e robustez de acordo com a solução desejada. Essas tarefas podem ser divididas em:

- Núcleo de processamento;
- Comunicação com PLCs/RTUs;
- Gerenciamento de Alarmes;
- Históricos e Banco de Dados;
- Lógicas de programação interna (Scripts) ou controle;
- Interface gráfica;
- Relatórios;
- Comunicação com outras estações SCADA;
- Comunicação com Sistemas Externos / Corporativos;

- Entre outros.

Partem dos processos de comunicação com os equipamentos de campo a regra geral para o funcionamento de um sistema SCADA, na qual as informações são enviadas para o núcleo principal do software. O núcleo é responsável por distribuir e coordenar o fluxo dessas informações para os demais módulos, até chegarem na forma esperada para o operador do sistema, na interface gráfica ou console de operação com o processo desenvolvidas no software aplicativo do sistema supervisorio que podem ser acompanhados de gráficos, animações, relatórios, entre outros, de modo a exibir a evolução do estado dos dispositivos e do processo controlado, permitindo informar anomalias, sugerir medidas a serem tomadas ou reagir automaticamente (Silva; Salvador, 2005).

3.1.3 Modos de comunicação

Segundo Silva e Salvador (2005), a principal funcionalidade de qualquer sistema SCADA está ligada à troca de informações, que podem se, basicamente:

- Comunicação com os PLCs/RTUs;
- Comunicação com outras estações SCADA;
- Comunicação com outros sistemas.

Geralmente, a comunicação com os equipamentos de campo, realizada através de um protocolo em comum, pode ocorrer por polling ou por interrupção, normalmente designada por Report by Exception. A comunicação por polling ou Master / Slave faz com que a estação central (Master) tenha controle absoluto das comunicações, efetuando sequencialmente o polling aos dados de cada estação remota (Slave), que apenas responde à estação central após a recepção de um pedido, ou seja, em half-duplex. Esse tipo de comunicação pode gerar simplicidade na coleta de dados processo, pois permite a inexistência de colisões no tráfego da rede, facilidade na detecção de falhas de ligação e uso de estações remotas não inteligentes. Porém, o seu uso traz incapacidade de comunicar situações à estação central por iniciativa das estações remotas. Já a comunicação por interrupção é realizada quando o CLP ou o RTU monitoram os seus valores de entrada e detectando alterações significativas ou valores que ultrapassem os limites definidos, enviam as informações para a estação central, podendo assim

evitar a transferência de informação desnecessária, diminuindo o tráfego na rede, além de permitir uma rápida detecção de informação urgente e a comunicação entre estações remotas (Silva; Salvador, 2005).

3.2 Controladores Lógico Programáveis

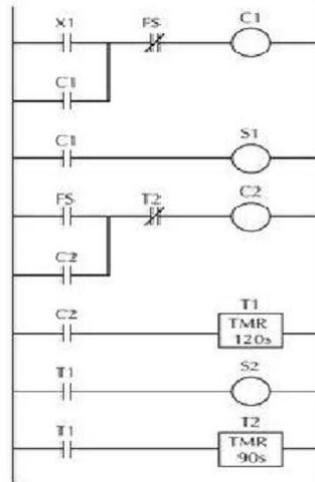
O CLP (Controlador Lógico Programável) é um dispositivo digital desenvolvido na década de 1960 com o objetivo de controlar máquinas e processos industriais em ambientes hostis. Como substituto de circuitos de relés esse equipamento se mostrou mais confiável e de custo menor, seja em material e na fiação associada, seja no espaço, na mão de obra de instalação e na localização de falhas. Através dele, alterar a fiação de um circuito de relés transformou-se simplesmente na alteração de um programa. Os CLPs modernos possuem a capacidade de trabalhar em rede e realizam rapidamente operações matemáticas e estatísticas complexas, dentre eles os algoritmos PID de controle dinâmico (Castrucci; Bittar; Sales, 2011).

Os CLPs geralmente são programados por meio de um computador pessoal (terminal de programação). A linguagem mais utilizada é a ladder (escada), em referência aos clássicos esquemas ladder dos circuitos lógicos a relés. O programa é desenvolvido em linguagem ladder no software de programação por meio de blocos-padrão da linguagem, usando teclado e mouse do PC. Em seguida, pode ser testado e transferido do PC para memória do CLP (Castrucci; Bittar; Sales, 2011).

3.3 Diagramas de Lógica Ladder

De acordo com Groover (2011), uma técnica de diagramação que exhibe a lógica e, de certo modo, o tempo e o sequenciamento de sistemas é o diagrama de lógica ladder que é um método gráfico análogo aos circuitos elétricos usados para realizar a lógica e o controle sequencial. Nos diagramas de lógicas ladder, vários elementos lógicos e outros componentes são dispostos ao longo de linhas horizontais ou degraus conectados em ambas as extremidades a dois trilhos verticais, conforme a figura 2. Ele possui aparência geral de uma escada (do inglês, ladder) e daí vem o nome.

Figura 2 - Diagrama de lógica Ladder.



Fonte: Groover (2011).

Os elementos e componentes são contatos, representando entradas lógicas, e cargas, também conhecida como bobinas, representando saídas. As entradas incluem interruptores e contatos de relés, e as cargas são motores, lâmpada e alarmes, entre outros dispositivos. A energia para o componente é fornecida por dois trilhos verticais. Nos diagramas ladder é comum posicionar as entradas à esquerda de cada degrau e as saídas à direita (Groover, 2011).

3.4 Twido Suite

O software *Twido Suite* é um ambiente gráfico de desenvolvimento para criar, configurar e manter aplicações para Controladores Lógicos Programáveis. Ele permite que o usuário insira linhas de programação para o controle, em seguida, transferir o programa para ser executado em um Controlador Lógico Programável.

Figura 3 - Software *TwidoSuite*.

Fonte: Manual de Software.

Para criar programas de controle utilizando o software *Twido Suite* pode se usar as seguintes linguagens de programação:

- Lista de Instruções: consiste em uma série de expressões lógicas escritas como uma sequência de instruções booleanas;
- Linguagem Ladder: um diagrama de lógica Ladder é uma forma gráfica de mostrar uma expressão lógica;
- Grafcet: o *Twido Suite* suporta lista de instruções Grafcet, mas não gráfica Grafcet.

3.5 OPC

Os controles dos processos industriais têm se tornado cada vez mais complexo. Tal complexidade produz grandes quantidades de dados a serem gerenciados pelos três níveis de controle de processos: dispositivos de campo, sistemas de controle e software para gerenciamento e negócios. A integração desses níveis que utilizam dados de inúmeros tipos de equipamentos dos mais diversos fabricantes é de extrema importância para as indústrias (Cavalho; Silva; Nascimento, 2015).

A tecnologia OPC foi desenvolvida para solucionar essa problemática de realizar a comunicação de equipamentos de diferentes fabricantes independente da disponibilidade de drivers de comunicação proprietários. O OPC é um protocolo de comunicação aberto que conectam aplicações Windows e equipamentos de controle de processos permitindo um método consistente de acesso a dados de inúmeros equipamentos dos mais variados fabricantes. Tal tecnologia é construída usando tecnologia Microsoft OLE/COM, mas a especificação OPC foi desenvolvida por uma fundação aberta, a OPC Foundation (Cavalho; Silva; Nascimento, 2015).

Os componentes OPC são classificados em duas categorias: Clientes OPC e Servidores OPC. Um Cliente OPC é um usuário de dados e um Servidor OPC é uma fonte de dados que coleta ou gera dados a partir de um processo, disponibilizando-os aos Clientes OPC. O padrão OPC, basicamente, estabelece as regras para que sejam desenvolvidos sistemas com interfaces padrões para comunicação dos dispositivos de campo (controladores, sensores, etc.) com sistemas SCADA de monitoração, supervisão.

3.6 Kepsverex

O *Kepsverex* é um aplicativo para Windows de 32 bits que fornece um meio de aquisição, para um PC, de dados e informações de uma ampla faixa de dispositivos industriais por meio do protocolo de comunicação OPC, como os CLPs, e sistemas em aplicações cliente. O *Kepsverex* pertence à categoria de aplicação "Servidor". É muito comum ouvir o termo "aplicação cliente/servidor" em muitos softwares, disciplinas e segmentos de negócios. No mercado industrial, isso geralmente significa o compartilhamento de dados de produção entre uma variedade de aplicações, que variam de softwares IHM (Interface humano máquina) a histórico de dados.

3.7 Matlab

O programa *Matlab* (que abrevia MATrix LaBoratory – Laboratório de Matrizes) é especializado e otimizado para cálculos científicos e de engenharia. Inicialmente, foi projetado para cálculos com matrizes; ao longo dos anos, se tornou um sistema computacional flexível, capaz de resolver essencialmente qualquer problema técnico. O programa *Matlab* implementa a linguagem de programação Matlab, juntamente com uma grande biblioteca de funções predefinidas que tornam as tarefas de programação técnica mais fáceis e eficientes (Chapman, 2003).

3.7.1 Simulink

O *Simulink* é um ambiente de diagrama de blocos para a simulação de variáveis em diversos domínios. Suporta a simulação, a geração automática do código, o teste e a verificação de sistemas contínuos acoplados. Este fornece um editor gráfico, bibliotecas personalizadas de blocos e solucionadores para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. É integrado com o software *Matlab* permitindo-lhe incorporar algoritmos na linguagem Matlab em modelos e resultados de simulação com exportação para o *Matlab* para análise posterior.

3.7.2 OPC Toolbox

Segundo a documentação do *Matlab* o OPC Toolbox fornece acesso online a dados OPC e históricos diretamente no *Matlab* e *Simulink*. É possível escrever e registrar dados OPC de dispositivos, como sistemas de controle distribuídos, sistemas de controle de supervisão e aquisição de dados, e controladores lógicos programáveis (CLP). Esta ferramenta permite trabalhar com dados de servidores online e histórico de dados que estejam em conformidade com o padrão OPC Data Access (DA), o padrão OPC Historical Data Access (HDA) e a arquitetura unificada OPC padrão (UA).

3.7.3 System Identification Tools.

O *System Identification Tools* é uma ferramenta do software *Matlab* utilizada para a construção de modelos matemáticos de sistemas dinâmicos a partir de dados de entrada e saída medidos no processo. Essa ferramenta permite usar dados de entrada e saída do processo seja no domínio do tempo ou no domínio da frequência para identificar a função de transferência do mesmo.

3.7.4 Fuzzy Logic Toolbox

O *Fuzzy Logic Toolbox* fornece funções, aplicativos, e uma bloco no *Simulink* para análise, projeto e sistemas de simulação baseados em lógica difusa. Esta ferramenta orienta o usuário através das etapas da criação de sistemas de inferência fuzzy. As funções são fornecidas para muitos métodos comuns, incluindo agrupamento fuzzy e aprendizagem adaptativa neurofuzzy. Sua caixa de ferramentas permite modelar comportamentos complexos do sistema usando regras de lógica simples e, em seguida, implementar essas regras em um sistema de inferência fuzzy. Alternativamente, o usuário pode usar blocos de inferência fuzzy no *Simulink* e simular os sistemas fuzzy dentro de um modelo abrangente de todo o sistema dinâmico.

3.8 Sintonia de Malhas de Controle

Quando um determinado processo ou planta necessita de uma malha de controle automatizada, o adequado funcionamento da mesma é fundamental para manter características

de produção como qualidade e produtividade. Os procedimentos mais usuais e eficientes para sintonia de malhas de controle de processos ou plantas podem ser resumidos em:

- Obtenção do modelo da planta;
- Escolha de um método de sintonia;
- Cálculo dos parâmetros do controlador utilizado;
- Simulação da malha resultante;
- Teste prático de verificação.

3.8.1 Sintonia de controladores por Ziegler-Nichols

Os processos industriais possuem muitas das vezes modelos matemáticos complexos e ajustar os parâmetros de um controlador sem os prévios modelos matemáticos e os seus cálculos são frequentemente necessário. Com essa finalidade, John G. Ziegler e Nathaniel B. Nichols desenvolveram uma notável técnica que tem a vantagem de abranger peculiaridades e parâmetros parasitas que os modelos matemáticos raramente incorporam (Castrucci; Bittar; Sales, 2011).

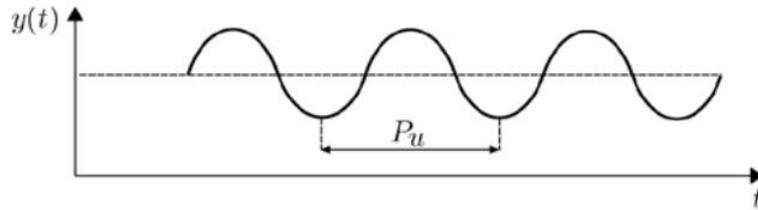
A seguir são apresentados os passos para os ajustes de controladores PID de dois métodos propostos por Ziegler e Nichols.

3.8.1.1 Primeiro método

Segundo Castrucci, Bittar e Sales (2011), este método é realizado com o sistema em malha fechada e os passos para ajuste do ganho do controlador são os seguintes:

- Passo 1: Ajuste T_d e $1/T_i$ do controlador PID em zero;
- Passo 2: Aumente lentamente o ganho K_c até que a saída do sistema oscile periodicamente (Oscilações mantidas). Caso isso não se ocorra o método não se aplica;
- Passo 3: Seja K_u o ganho final e P_u o período da oscilação, como mostra a figura 4;
- Passo 4: Ajuste os parâmetros do controlador de acordo com a tabela 1.

Figura 4 - Oscilação periódica da saída $y(t)$ de um sistema.



Fonte: Castrucci, Bittar e Sales (2011).

Tabela 1 - Regras de ajuste para o primeiro método de Ziegler-Nichols.

Tipos de controlador	K_c	T_d	$1/T_i$
P	$0,5K_u$	0	0
PD	$0,6K_u$	$P_u/8$	0
PI	$0,45K_u$	0	$1,2/P_u$
PID	$0,6K_u$	$P_u/8$	$2/P_u$

Fonte: Castrucci, Bittar e Sales (2011).

3.8.1.2 Segundo método

Este método também é realizado com o sistema em malha fechada e os passos para ajuste do ganho do controlador são os seguintes:

- Passo 1: Ajuste T_d e $1/T_i$ do controlador PID em zero;
- Passo 2: Aumente lentamente o ganho K_c até que a saída do sistema oscile periodicamente. Caso isso não ocorra, o método não se aplica;
- Passo 3: Reduza o ganho K_c à metade;
- Passo 4: Diminua T_i até que a saída do sistema oscile periodicamente;
- Passo 5: Duplique o valor de T_i ;
- Passo 6: Ajuste $T_d = T_i$.

3.9 Lógica Fuzzy

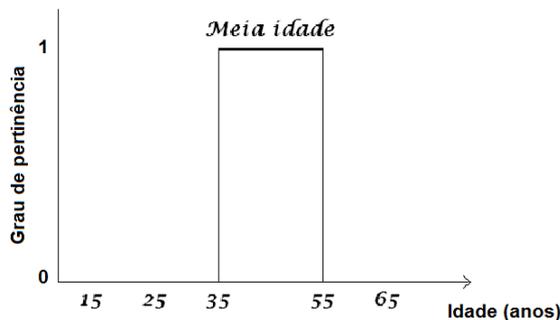
Os princípios de lógica fuzzy ou difusa foram desenvolvidos inicialmente por Jan Lukasiewicz (1878-1956), que em 1920 desenvolveu e introduziu conjuntos com grau de pertinência que combinados aos conceitos da lógica clássica, desenvolvida por Aristóteles, deram embasamento suficiente para que Lofti Asker Zadeh chegasse a ser o primeiro autor de

uma publicação sobre lógica fuzzy em seu artigo “Fuzzy Sets” publicado no ano de 1965 (Rignel; Chenci; Lucas, 2011).

Diferente da Lógica Booleana que admite apenas valores booleanos, ou seja, verdadeiro ou falso, a lógica difusa ou fuzzy, trata de valores que variam entre 0 e 1. Assim, os valores assumidos representam os graus de verdade desta proposição. Então, uma pertinência de 0.5 pode representar meio verdade, logo 0.9 e 0.1, representam quase verdade e quase falso, respectivamente (SILVA, 2005).

Um exemplo de lógica fuzzy é considerar o período meia-idade que começa em 35 anos e termina após os 55 anos. De acordo com a lógica tradicional, uma pessoa só iria ser considerada no período de meia idade ao completar 35 anos e sairia desse grupo ao completar 56 anos, como a figura 5 mostra a definição de meia idade segundo a teoria de conjuntos convencional.

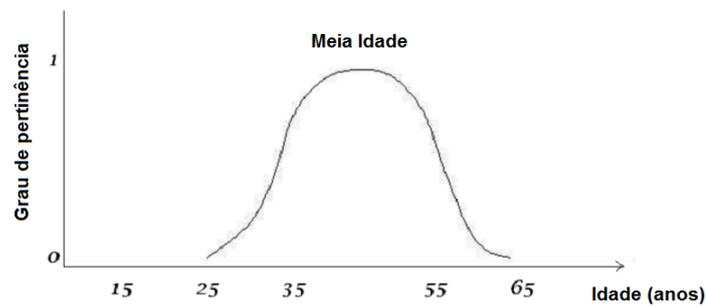
Figura 5 – Definição de meia idade segundo a lógica booleana convencional.



Fonte: (Autor).

A figura 6 pode ser uma definição de meia idade segundo a teoria fuzzy. Observa-se que o grau de pertencia que tem uma pessoa de 25 anos é muito menor em relação a uma pessoa de 45 anos, pois o grau de verdade de que uma pessoa de 25 anos pertence a tal grupo é muito menor do que uma pessoa de 45 anos.

Figura 6 – Definição de meia idade segundo a lógica fuzzy.

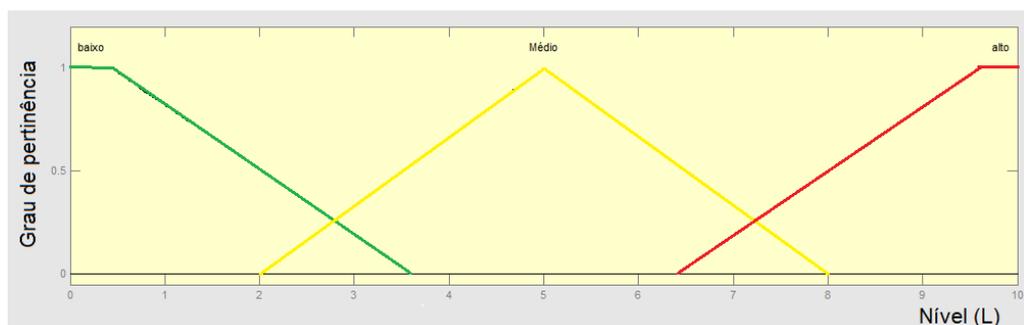


Fonte: (Autor).

3.9.1 Variáveis linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy. Por exemplo, tomando os valores de 0 a 10 litros em um tanque, pode-se definir uma variável linguística “nível”. Esta variável pode ter 3 valores linguísticos ou três funções de pertinência: baixo, médio e alto. Estes valores podem ser observados como subconjuntos fuzzy, no qual as funções de pertinência são apresentadas na figura 7. Assim, a variável “nível” pode ser representada como: $N = \{\text{baixo}, \text{médio}, \text{alto}\}$. Cada valor de nível será associado a um dos subconjuntos de N com função de pertinência entre 0 e 1.

Figura 7 - Variável linguística “nível” e suas respectivas funções de pertinências.



Fonte: (Autor).

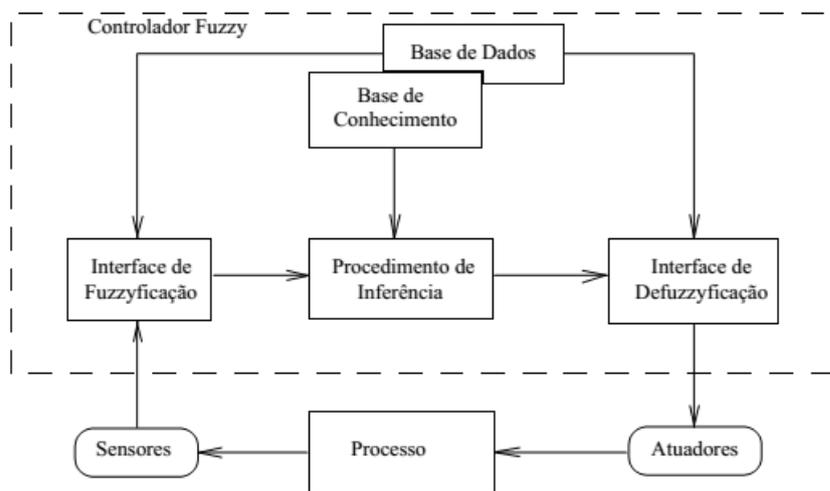
3.9.2 Controlador Fuzzy

A ideia principal de um controlador fuzzy é modelar as ações a partir de conhecimento especialista. Então, não há necessidade de se ter o modelo matemático do processo levando a uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle de processos, no qual é

utilizado os modelos matemáticos para o projeto dos controladores de modo a corrigir desvios que ocorrem no controle do processo. O que motiva essa nova abordagem veio de casos onde o conhecimento especialista de controle era disponível, seja por meio de operadores ou de projetistas, e os modelos matemáticos envolvidos eram muito custosos, ou muito complicados para serem desenvolvidos (Gomide; Gudwin; Tanscheit, 2015).

A estrutura de um processo controlado por um controlador fuzzy possui 5 componentes básicos: a interface de fuzzyficação, a base de conhecimento, a base de dados, o procedimento de inferência e a interface de defuzzyficação.

Figura 8 - Estrutura básica de um controlador fuzzy.



Fonte: Gomide, Gudwin e Tanscheit (2015).

Na componente da interface de fuzzyficação são lidos os valores das variáveis de entradas, faz-se um escalonamento para condicionar os valores a universos de discurso normalizados e, é realizada a fuzzyficação dos valores, transformando os números lidos em conjuntos fuzzy, de modo que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas.

A base de conhecimento consiste numa base de regras característica da estratégia de controle e suas metas.

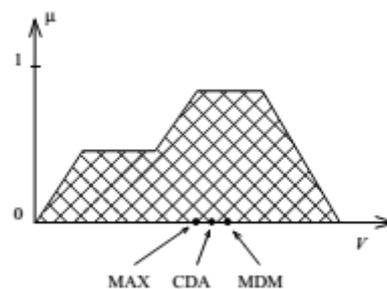
Na base de dados são armazenadas as definições necessárias sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, as partições fuzzy dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinência de todas as variáveis linguísticas utilizadas.

No procedimento de inferência são processados os dados fuzzy de entrada, junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle do controlador fuzzy, aplicando o operador de implicação fuzzy e as regras de inferência da lógica fuzzy.

A interface de defuzzyficação transforma as ações de controle fuzzy inferidas em ações de controle não-fuzzy, efetuando, posteriormente, um escalamento, de modo a compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com os valores dos universos de discurso reais das variáveis.

Após a determinação da ação de controle fuzzy é necessário que seja traduzida o estado da variável de saída fuzzy para um valor numérico, passo chamado de defuzzyficação. Apesar de não haver nenhum procedimento sistemático para a escolha da estratégia de defuzzyficação, as mais comuns incluem: o critério do máximo (MAX), que escolhe o ponto onde a função inferida tem seu máximo, a média dos máximos (MDM), que representa o valor médio dentre todos os pontos de máximo quando existe mais de um máximo, e o método do centro de área (CDA), que retorna o centro de área da função inferida.

Figura 9 - Métodos de defuzzyficação.



Fonte: Gomide, Gudwin e Tanscheit (2015).

3.10 Intouch

O software *Intouch* consiste num software do tipo HMI (Human Machine Interface). Com uma série de ferramentas disponíveis, permite monitorar e operar qualquer sistema parcialmente ou completamente automatizado, por meio de uma ou mais estações de operação (Computadores).

A monitorização ocorre por meio de telas gráficas de alta qualidade, com indicações dinâmicas do estado dos equipamentos e grandezas analisadas. Possui também ferramentas para realizar gráficos de tendência, relatórios, histórico de eventos e de processo, entre outras.

Figura 10 - Tela gráfica desenvolvida no *Intouch*.

Fonte: (Software *Intouch*)

A operação ocorre por meio de telas gráficas de alta qualidade, com possibilidade de execução de comandos e com o uso de objetos animados extremamente realistas. Estes representam com a mais alta perfeição os equipamentos de acionamento físicos, normalmente encontrados em qualquer processo, como botoeiras, chaves, entre outros equipamentos. Entre outras características, garante a segurança do processo ao permitir atribuir níveis de acesso antes de qualquer comando, assim, exige que os operadores se identifiquem, por meio de login.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Bancada NVPT

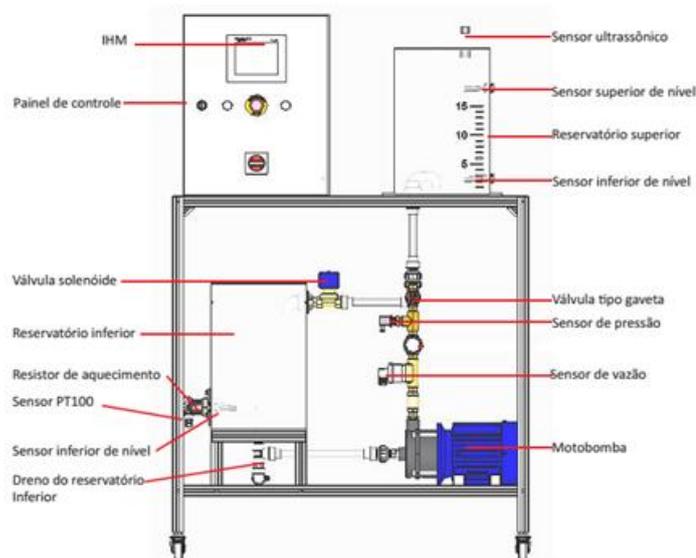
A bancada NVPT é um kit para uso didático fabricado pela *Automatus* que possibilita experiências práticas para o tratamento de variáveis analógicas através de malhas de controle (nível, vazão, pressão e temperatura).

De acordo com o manual, a bancada NVPT é composta pelos seguintes itens:

- IHM: controla o acionamento de todos os atuadores do equipamento, e permite o ajuste de alguns parâmetros do processo;
- Motobomba: faz o bombeamento da água que se encontra no reservatório inferior para o reservatório superior;
- Válvula tipo gaveta: regula o fluxo de água que é bombeado para o reservatório superior;
- Válvula de retenção: não permite que a água retorne pela bomba ao reservatório inferior quando a bomba está desligada;
- Sensor de pressão: mede a pressão existente no sistema de bombeamento;
- Sensor de vazão: mede a vazão da bomba para o reservatório superior;
- Reservatório superior: reservatório para onde a água é bombeada;
- Sensor inferior e superior de nível: sensor digital responsável por indicar nível mínimo e máximo do reservatório superior;
- Válvula solenóide: permite o escoamento da água do reservatório superior para o inferior;
- Sensor ultrassônico: sensor tipo analógico para medir o nível do reservatório superior;
- Reservatório inferior: reservatório de onde a água é succionada;
- Sensor inferior de nível: sensor digital responsável por indicar nível mínimo de água no reservatório inferior;
- Dreno do reservatório inferior: este dreno pode ser utilizado para retirar toda a água do simulador de caixa d'água;
- Resistor de aquecimento: responsável pelo aquecimento da água no reservatório inferior;
- Sensor PT100: sensor para análise da temperatura do tanque inferior;

- Painel de controle: painel que comanda o sistema no modo simulador. Contendo: um botão de emergência (S3); um botão com sinaleiro verde (S1) que aciona manualmente a bomba e indica que a bomba está ligada; um botão com sinaleiro verde (S2) que aciona manualmente a válvula e indica que a mesma está ligada; um controlador lógico programável para controlar as malhas de controle e inversor de frequência para controlar a velocidade da motobomba.

Figura 11 - Visão geral da bancada.



Fonte: Manual da bancada.

A bancada NVPT sofreu algumas melhorias realizadas em trabalhos de conclusões de cursos de alguns alunos da instituição. Nela, foram adicionados:

- Um tanque superior: a adição tem como objetivo poder trabalhar em série com o tanque já existente na bancada aumentando a ordem do processo ou em paralelo aumentando a constante de tempo do mesmo.
- Um tanque inferior: a adição tem como objetivo aumentar a capacidade de armazenagem de líquidos nos tanques de alimentação de onde são succionadas os líquidos para os tanques superiores;
- Duas válvulas com mecanismo em esfera: são válvulas de acionamento manuais que tem como objetivo alterar a configuração dos tanques superiores fazendo com que trabalhem em série, paralelo ou apenas um tanque individualmente, dependendo dos seus acionamentos;

- Uma válvula de controle contínuo: é responsável por controlar uma restrição variável na tubulação de saída do líquido dos reservatórios superiores para os reservatórios inferiores, alterando a sua abertura, ela varia a resistência à vazão e como consequência, a própria vazão. A válvula solenoide que existia anteriormente nesta posição foi recolocada na tubulação entre os dois tanques superiores.

A figura 12 abaixo mostra o novo designer da bancada NVPT.

Figura 12 - Bancada NVPT com as melhorias.



Fonte: (Autor)

4.1.1 Elementos da Bancada

4.1.1.1 Sensores

Sensores são elementos físicos que sofrem estímulos externos de variáveis físicas como nível, vazão, pressão e temperatura, transformando esses estímulos em sinais elétricos correspondentes que podem ser transformados em valores numéricos posteriormente dentro do controlador programável (CLP).

Dentre os sensores utilizados no projeto está o sensor ultrassônico XX930A1A1M12 utilizado para medição de nível no tanque superior, o sensor de vazão DS8030 para medição da vazão proveniente da sucção da motobomba, o sensor de pressão XM_XMLP010BC21V para medição da pressão no sistema de bombeamento e o sensor de temperatura PT100 para medir

a temperatura do líquido nos reservatórios inferiores. Os sensores utilizados podem ser vistos a seguir.

Figura 13 - Sensor ultrassônico XX930A1A1M12.



Fonte: Ficha de produto-OsiSense-XX_XX930A1A1M12

Figura 14 – Sensor de vazão DS8030.



Fonte: DS8030-Standard-EU-EN.

Figura 15 - Sensor de pressão XM_XMLP010BC21V.



Fonte: Ficha do Produto-OsiSense_XM_XMLP010BC21V

Figura 16 – Sensor de temperatura PT100.



Fonte: (Autor).

4.1.1.2 Atuadores

Os atuadores são dispositivos que possuem a capacidade de alterar variáveis físicas de interesse em um processo através da ação do controlador ou sistema de controle. Um exemplo é uma resistência de aquecimento capaz de aquecer um líquido alterando sua temperatura.

A motobomba é responsável pela sucção do líquido dos reservatórios inferiores aos reservatórios superiores. Ela é utilizada como atuador na malha de vazão e pressão pelo fato de poder atuar no valor da vazão e da pressão no sistema de bombeamento, através da variação de sua velocidade. A motobomba utilizada na bancada pode ser visto na figura 17 abaixo.

Figura 17 – Motobomba



Fonte: Manual da Soft-Starter.

A válvula de atuação contínua é responsável pela manipulação do fluxo de saída do líquido nos reservatórios superiores e atua diretamente no nível do último tanque superior dos dois tanques em série. A válvula pode ser observada na figura 18.

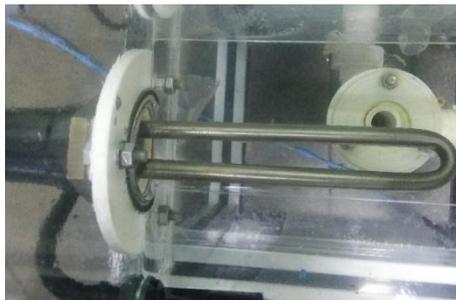
Figura 18 - Válvula de atuação contínua.



Fonte: Atuadores EMO35-24.

Como atuador na malha de temperatura é utilizada a resistência de aquecimento que pode ser observada na figura 19 abaixo. Ela tem como função aquecer o líquido presente nos reservatórios inferiores.

Figura 19 - Resistência de Aquecimento.



Fonte: (Autor).

4.1.1.3 Controlador Lógico Programável (CLP)

O CLP que compõe a bancada utilizado no projeto é o TWDLCAA40DRF da *Shneider Electric*, mostrado na figura 20.

Figura 20 - CLP TWDLCAA40DRF.



Fonte: Ficha do produto.

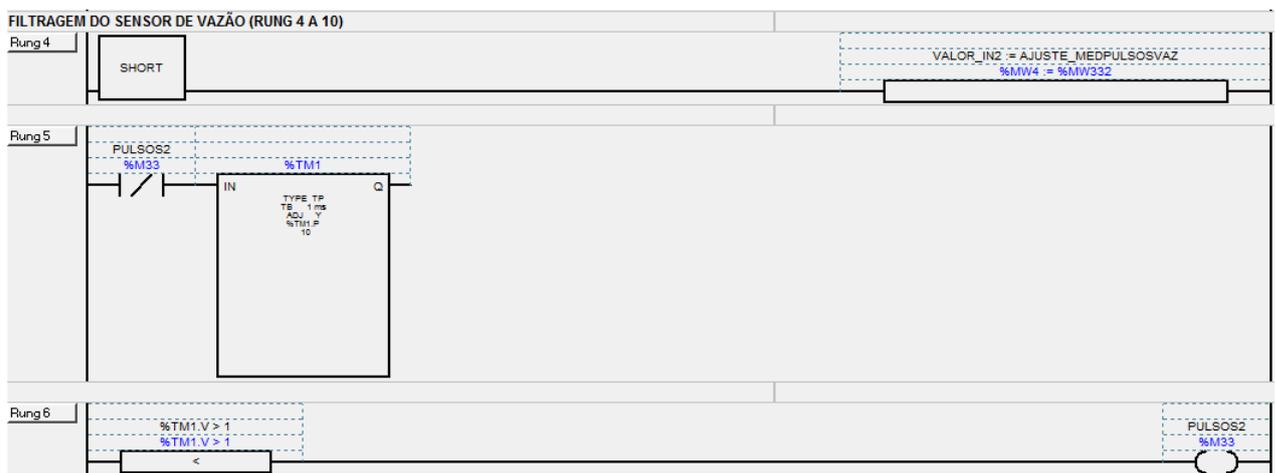
O software *Twido Suite* é um ambiente gráfico que permite programar e configurar o CLP da bancada. Ele permite o usuário programar em tres tipos de linguagem: Lista de Instrução, Linguagem Ladder e Grafcet , como dito na seção 3.4.

O CLP já possuiu uma programação em linguagem ladder, porém algumas malhas não estão funcionando adequadamente, como a malha de vazão e pressão, cujos sistemas de controle não conseguem se ajustar ao setpoint (valor desejado) do usuário, devido a ruídos presentes na leitura dos sensores de pressão e vazão, e ajuste inadequado dos controladores PID dessas malhas. Então, com a finalidade de eliminar os ruídos ocorridos na leitura desses sensores, foi desenvolvido condicionadores de sinais, que nada mais foi o desenvolvimento e a adição de um filtro na programação já existente da bancada.

O filtro desenvolvido em linguagem ladder foi um conjunto de linhas de programação que realizavam a leitura dos sensores num intervalo de 2 milisegundos e a cada 20 milisegundos é realizado a média dos valores com os 10 valores armazenados em um somatório.

Abaixo será mostrado as linhas de programação adicionadas ao programa original da bancada para a atenuação dos ruídos presentes da leitura do sensor de vazão. O mesmo procedimento é realizado para o sensor de pressão e por esse motivo não será apresentado. A programação está dividida em três partes.

Figura 21 - Programação para filtragem de sinal do sensor de vazão (Parte 1).



Fonte: (Autor).

Nessa primeira parte do programa, a primeira linha (Rung 4) é responsável por armazenar o valor do sensor de vazão que é representado pela variável AJUSTE_MEDPULSOSVAZ na variável VALOR_IN2 que será utilizada no programa. Na

segunda linha (Rung 5) é utilizado um temporizador %TM1 do tipo tp para geração de pulsos no programa.

O temporizador %TM1 gera pulsos a cada 2 milisegundos na variável PULSOS2 que reinicia a contagem do temporizador, reiniciando o ciclo de pulsos, já que é usada na entrada do temporizador com um contato normalmente fechado.

Figura 22 - Programação para filtragem de sinal do sensor de vazão (Parte 2).



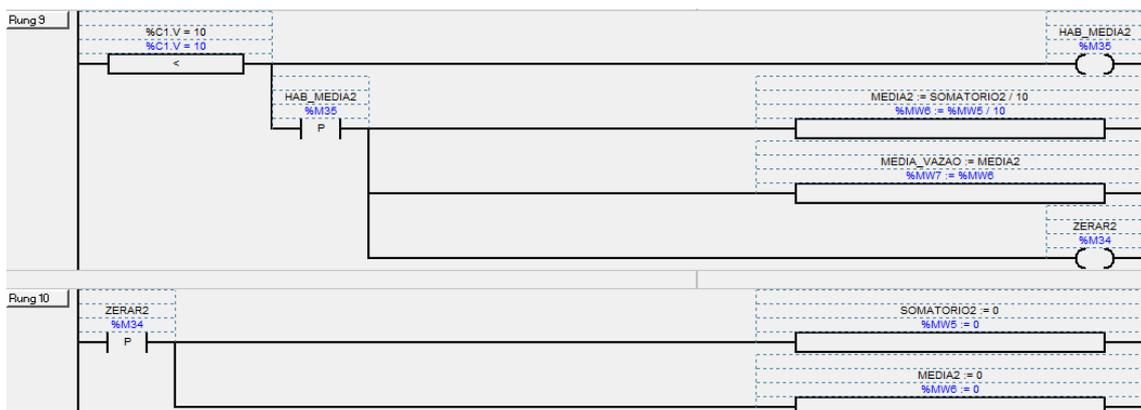
Fonte: (Autor).

Na segunda parte, na quarta linha (Rung 7) com cada pulso gerado na variável PULSOS2 é realizado um somatório do valor atual do sensor com o valor acumulado pela variável SOMATÓRIO2.

Cada vez que é realizada uma soma, ou seja, é gerado um pulso pelo temporizador, o contador %C1 realiza uma contagem.

O contador possui uma entrada R que é habilitada pela variável ZERAR2 quando a operação de média é realizada, a fim de reiniciar o processo de contagem.

Figura 23 - Programação para filtragem de sinal do sensor de vazão (Parte 3).



Fonte: (Autor).

Nessa terceira parte, na sexta linha (Rung 9) quando o valor de contagem representado pela variável %C1.V atinge o valor dez, ou seja, foi realizada a somatória de dez valores coletados pelo sensor, é acionado a variável HAB_MEDIA2, fazendo com que seu valor atinga o nível alto.

Utilizando um contato de borda de subida na variável HAB_MÉDIA2 pode se realizar o cálculo da média na variável MEDIA2 e permitir que a variável MEDIA_VAZAO receba o valor da média em um ciclo de varredura do CLP.

A variável ZERAR2 é responsável por zerar os valores das variáveis SOMATORIO2, MEDIA2 e o valor de contagem do contador %C1.

4.2 Malhas de Controle do Processo

4.2.3 Malha de controle de nível

Para o desenvolvimento do projeto foi utilizado à bancada didática NVPT para controle das malhas de nível, vazão, pressão e temperatura.

Na malha de controle de nível, o processo utiliza o sensor ultrassônico para leitura do nível no tanque, o CLP TWDLCAA40DRF da *Shneider Eletric* como controlador para aplicação do algoritmo PID desenvolvido e a válvula de controle contínuo como atuador.

A malha de nível trabalhará com os dois tanques superiores acoplados em série, onde o nível do último tanque será controlado pelo sistema de controle, os dois tanques inferiores para onde escoará o líquido liberado dos reservatórios superiores pela válvula de atuação contínua e também de onde será succionado o líquido para os reservatórios superiores através da motobomba, considerada um distúrbio para o processo. A figura 24 mostra os dos tanques superiores da bancada que podem ser utilizados em série e na figura 25 pode ser visto os dois tanques inferiores da bancada.

Figura 24 - Tanques superiores acoplados em série.



Fonte: (Autor).

Figura 25 - Tanques Inferiores.



Fonte: (Autor).

4.2.4 Malha de controle de vazão

Na malha de controle de vazão, o processo utiliza o sensor de vazão DS8030 mostrado na figura 14 para leitura da vazão no sistema de bombeamento, o CLP TWDLCAA40DRF da *Shneider Electric* como controlador para aplicação do algoritmo PID desenvolvido e a motobomba como atuador.

4.2.5 Malha de controle de pressão

Na malha de controle de pressão, o processo utiliza o sensor de pressão mostrado na figura 15 para leitura da pressão no sistema de bombeamento, o CLP TWDLCAA40DRF da *Shneider Eletric* como controlador para aplicação do algoritmo PID desenvolvido e a motobomba como atuador. Os processos de pressão e vazão possuem o mesmo atuador que é a motobomba, e por esse motivo não podem atuar simultaneamente.

4.2.6 Malha de controle de temperatura

O processo é realizado nos tanques inferiores onde está instalada a resistência de aquecimento que atua como atuador no sistema de controle e o sensor de temperatura termoresistência PT100 para a medição da temperatura do líquido.

O sistema de controle de temperatura atua somente quando os tanques inferiores estão com um nível de líquido superior ao mínimo do armazenado da bancada e todos os outros sistemas de controle desabilitados para reduzir as perdas de calor na movimentação do fluido.

4.3 Aquisição de Dados do Processo

Para a realização da identificação experimental, foi realizada a comunicação do *Matlab* com o CLP da *Shneider Eletric* através do software *Kepserverex*. Nele foram criadas as tags que representam as variáveis de importância para a identificação, a figura 26 mostra o software OPC com as tags utilizadas.

O software *Kepserverex* utiliza o protocolo de comunicação de dados OPC, permitindo a comunicação do CLP da bancada com softwares da plataforma Windows. Então, ele é utilizado tanto com a comunicação do CLP com o software *Matlab* para realização da identificação experimental das funções de transferências das malhas, como com o software *Intouch* para desenvolvimento do sistema supervisório.

Figura 26 - Software OPC *Kepserverex* para comunicação com o CLP.

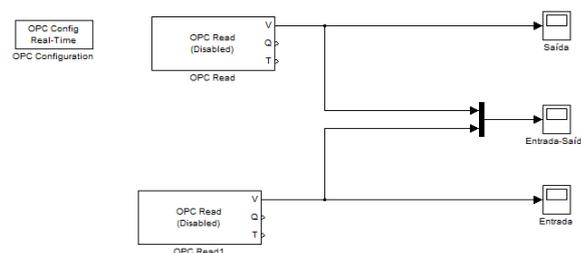
Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
AberturaValFuzzy	400451	Word	100	None	
AberturaVal	400403	Word	100	None	
AcionaTemReset	400426	Word	100	None	
BombaManual	000001	Boolean	100	None	
Emergencia	000016	Boolean	100	None	
Erromba	400401	Word	100	None	
GarhoNivel	400253	Word	100	None	
GarhoPressao	400273	Word	100	None	
GarhoVazao	400293	Word	100	None	
HabContNivel	000022	Boolean	100	None	
HabContPressao	000023	Boolean	100	None	
HabContFuzzy	000090	Boolean	100	None	
HabContTemperat	000021	Boolean	100	None	
HabContVazao	000024	Boolean	100	None	
HoteTemperatura	400203	Word	100	None	
Lim Temperatura	400204	Word	100	None	
Manipulacoeodr	000121	Boolean	100	None	
Nivel	400251	Word	100	None	
NivelMaxTq2	000006	Boolean	100	None	
NivelMinTq1	000004	Boolean	100	None	
NivelMinTq2	000005	Boolean	100	None	
Pressao	400271	Word	100	None	
SetModo	000010	Boolean	100	None	
SetNivel	400251	Word	100	None	
SetPressao	400271	Word	100	None	
SetTemperatura	400202	Word	100	None	
Setvazao	400301	Word	100	None	
SetVazaoFuzzy	400013	Word	100	None	
SetVazaoInocaf	400011	Word	100	None	
Start	000009	Boolean	100	None	
TdNivel	400257	Word	100	None	
TdPressao	400277	Word	100	None	
TdVazao	400297	Word	100	None	
Temperatura	400201	Word	100	None	
TdNivel	400255	Word	100	None	
TdPressao	400275	Word	100	None	

Fonte: (Autor).

No *Simulink do Matlab* foram obtidas as respostas temporais de nível, vazão, pressão e temperatura em malha aberta, assim como suas entradas, tais como: velocidade da bomba e abertura da válvula. Foi utilizada a biblioteca *Opctoolbox* do *Matlab* para comunicação com o software OPC, obtendo as respostas dos sensores disponíveis no CLP para serem utilizadas pelo *Matlab*.

No esquema mostrado na figura 27, o bloco OPC Read é usado para leitura da resposta temporal do processo, o bloco OPC Read1 usado para leitura do degrau de entrada aplicado no sistema, já o bloco OPC Configuration é utilizado na configuração da comunicação do *Matlab* com o software OPC. Este esquema no *Simulink* foi usado para a identificação experimental da malha de nível, vazão e pressão, mudando apenas a configuração interna dos blocos para a realização das leituras dos degraus de entrada e as respostas dos sensores correspondentes a cada malha.

Figura 27 - Esquema no *Simulink* para obtenção da resposta do sistema.



Fonte: (Autor).

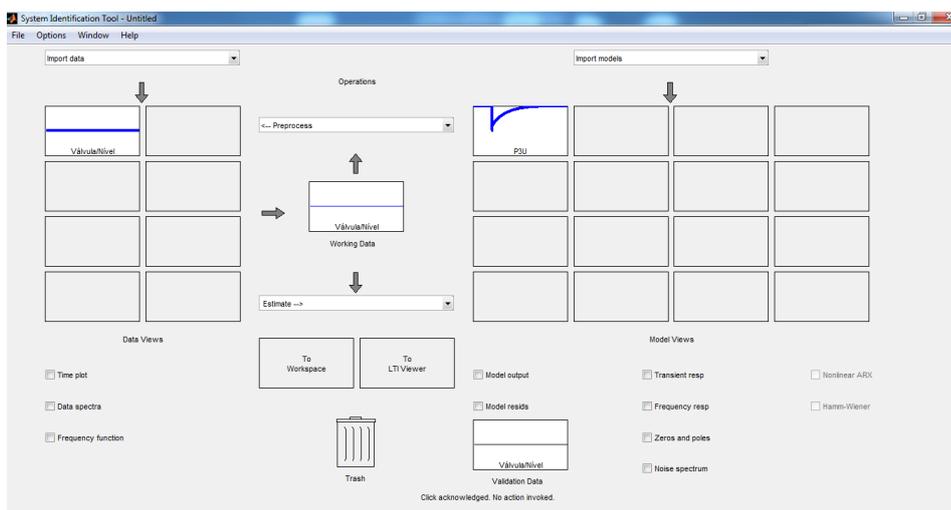
4.4 Identificação Experimental das Malhas de Controle

4.4.1 Identificação da Malha de Nível

Foram realizados testes para se obter a função de transferência da malha de nível. A malha de nível possui como atuador a válvula de atuação contínua e como distúrbio a vazão de entrada decorrente da motobomba. Portanto, para desenvolvimento da malha de controle é necessário estimar a função de transferência que relaciona a abertura da válvula e o nível do tanque, no qual atuará o controlador, e também a função de transferência que relaciona a velocidade da motobomba ao nível do tanque, no qual atuará o distúrbio.

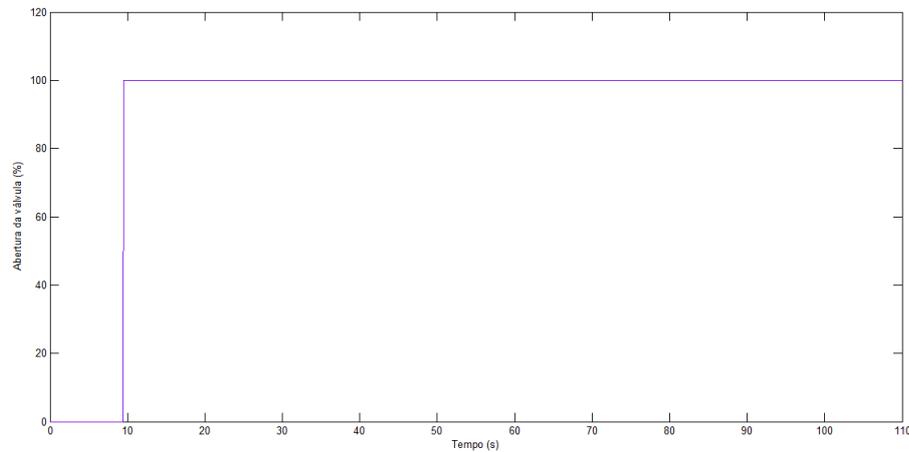
Para se obter o modelo matemático (função de transferência) que relaciona a abertura da válvula com o nível do tanque, foi utilizado o nível do tanque com valor inicial de 8 litros no estado estacionário e aplicado um degrau na abertura da válvula de 0 a 100%. Através da resposta temporal do nível, apresentado na figura 30, e o degrau aplicado na mesma, como mostra a figura 29, pôde-se obter a função de transferência do nível (litros) com relação ao valor da abertura da válvula (%) por meio do software *Matlab* e o pacote para identificação experimental *System Identification Tools*, como mostrado abaixo.

Figura 28 - Ferramenta *System Identification Tools* do software *Matlab*.



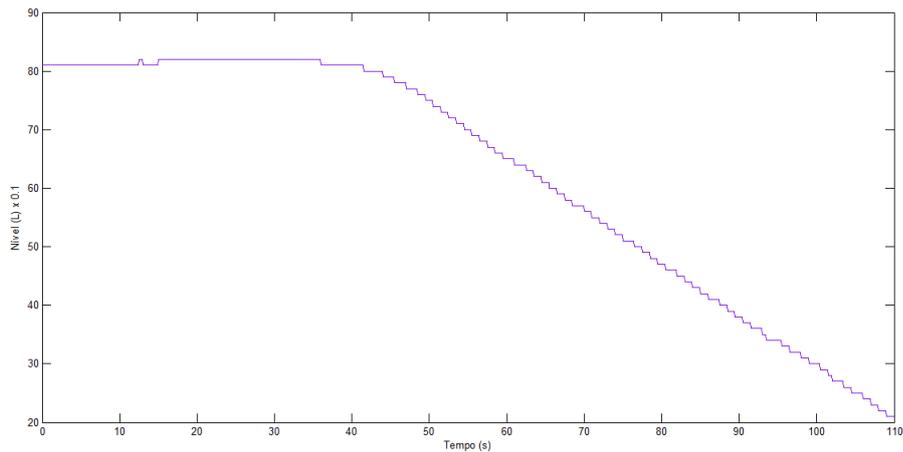
Fonte: (Autor).

Figura 29 - Degrau aplicado na abertura da válvula.



Fonte: (Autor).

Figura 30 - Resposta temporal do nível ao degrau aplicado na válvula.



Fonte: (Autor).

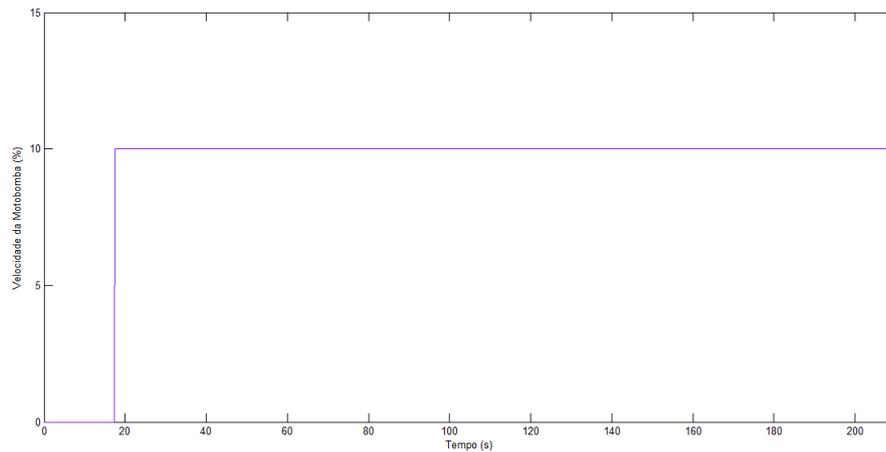
A função de transferência da malha de nível que relaciona a abertura da válvula (%) e o nível (L) obtida foi:

$$G_1 = \frac{13.52}{398700S^3 + 20090S^2 + 1887S + 1} \quad (4.1)$$

Para se obter a relação que relaciona a velocidade de motobomba (%) ao nível do tanque (litros), considerado um distúrbio no processo, foi aplicado um degrau na velocidade de atuação da motobomba de 0 a 10 %, com o tanque com 1.8 litros no estado inicial. Através da resposta temporal do nível e o degrau de entrada na velocidade da motobomba, foi obtido a função de

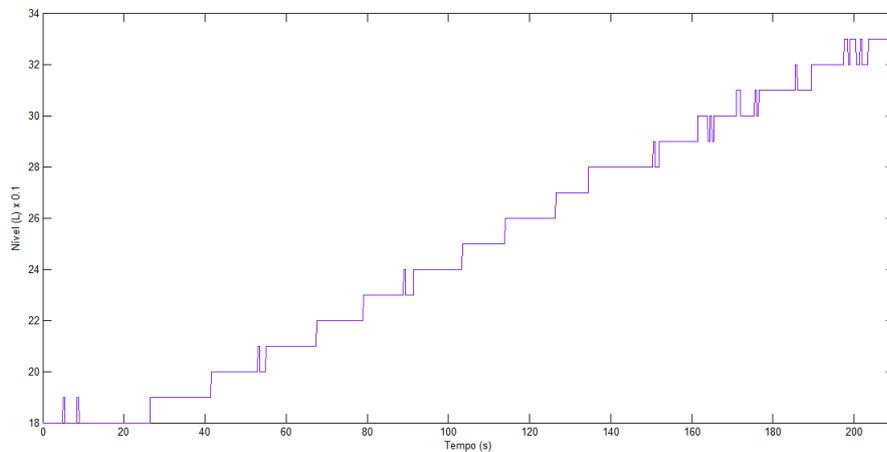
transferência do distúrbio do processo pelo mesmo pacote do *Matlab* utilizado anteriormente. As figuras 31 e 32 mostram o degrau aplicado e a resposta temporal do nível em relação ao tempo respectivamente.

Figura 31 - Degrau aplicado na velocidade da motobomba.



Fonte: (Autor).

Figura 32 - Resposta temporal do nível ao degrau aplicado na motobomba.



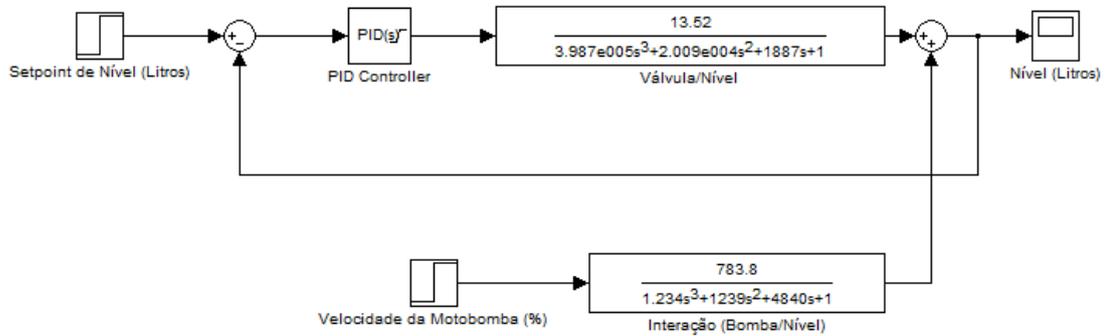
Fonte: (Autor).

A função de transferência da malha de nível que relaciona a velocidade da bomba em percentual e o nível do tanque em litros é:

$$G_2 = \frac{783.8}{1.234S^3 + 1239S^2 + 4840S + 1} \quad (4.2)$$

Portanto, através das funções de transferências obtidas, pôde-se se construir a malha de controle de nível, como mostrado na figura 33 a seguir:

Figura 33 - Malha de controle de nível.

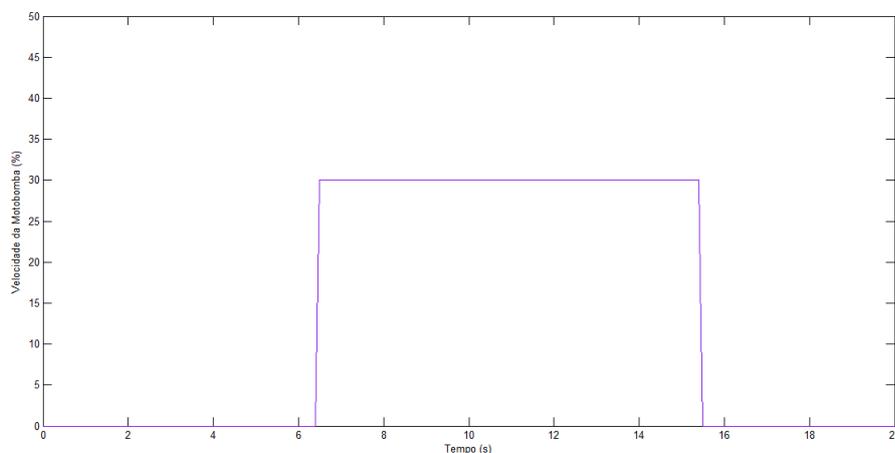


Fonte: (Autor).

4.4.2 Identificação da malha de vazão

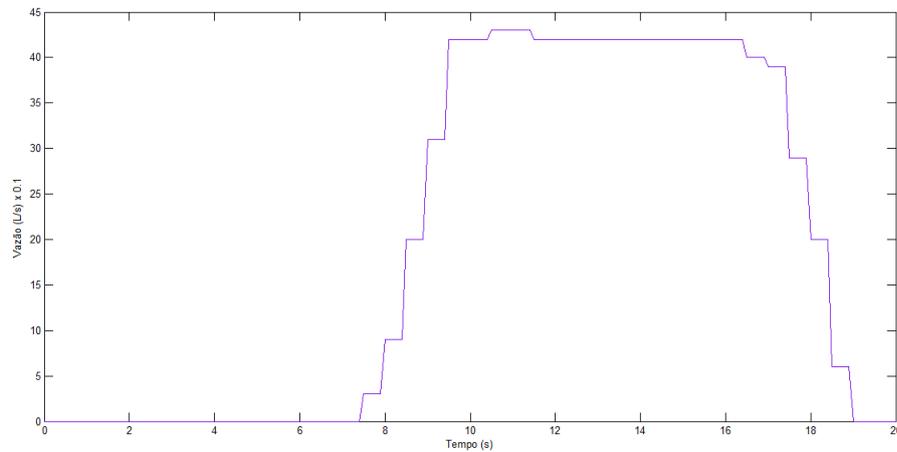
Na identificação da malha de vazão, foi aplicado um degrau no comando de velocidade da motobomba, variando-se a entrada de velocidade da motobomba de 0% para 30%. Através do gráfico da resposta temporal pôde-se obter a função de transferência da vazão (L/s) com relação ao valor da velocidade da motobomba (%). O gráfico 34 e 35 mostram o degrau aplicado na velocidade da motobomba e a resposta temporal da vazão obtidas respectivamente.

Figura 34 - Degrau aplicado na velocidade da motobomba.



Fonte: (Autor).

Figura 35 - Resposta temporal da vazão ao degrau aplicado na motobomba.



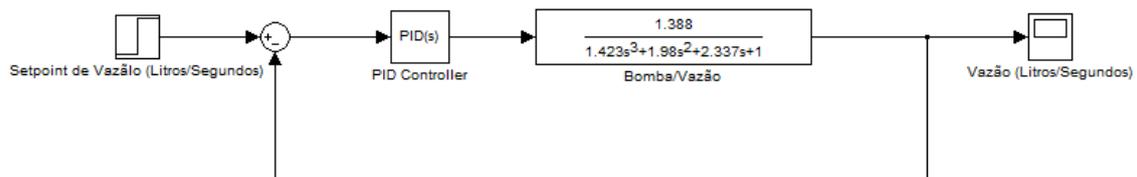
Fonte: (Autor).

A função de transferência da malha de vazão que relaciona a velocidade da motobomba (%) à vazão do sistema de bombeamento (L/s) da bancada é:

$$G_3 = \frac{1.388}{1.423S^3 + 1.98S^2 + 2.337S + 1} \quad (4.3)$$

A figura 36 mostra a malha de controle de vazão obtida experimentalmente.

Figura 36 - Malha de controle de vazão.



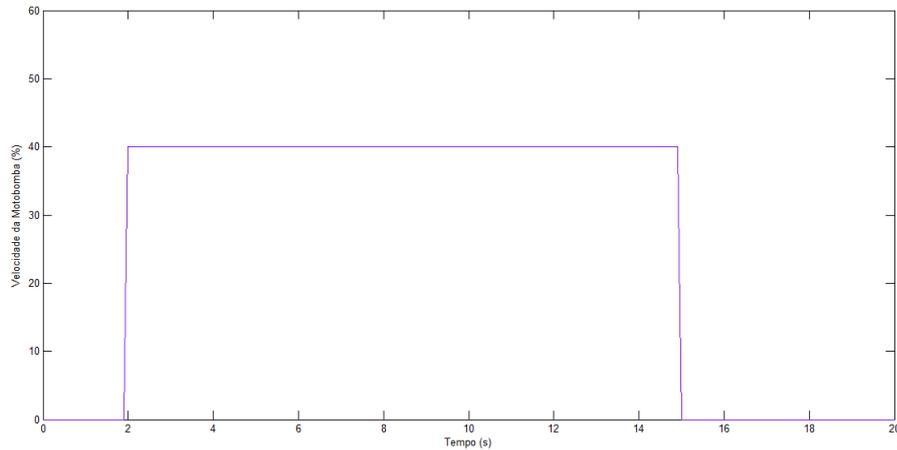
Fonte: (Autor).

4.4.3 Identificação da malha de pressão

O atuador do processo da malha de pressão, como foi explicado na seção 4.2.5, é a motobomba. Então, na identificação experimental dessa malha foi aplicado um degrau na velocidade de atuação da motobomba e registrado a resposta temporal da pressão no sistema de bombeamento.

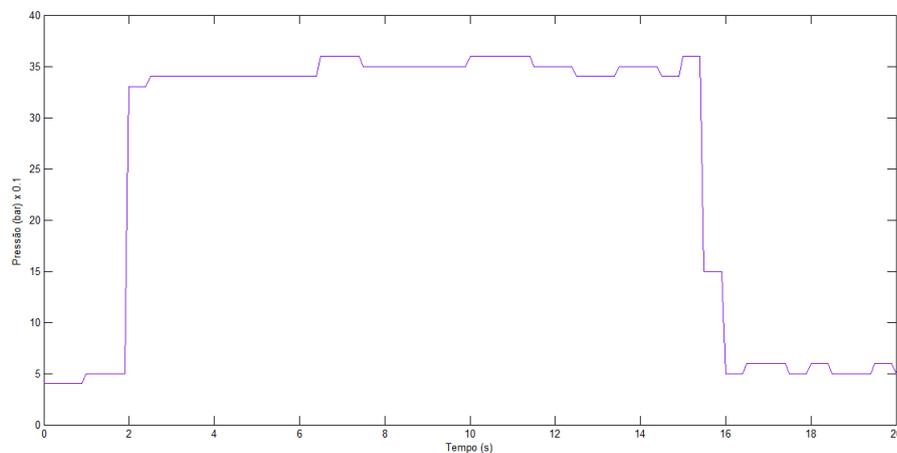
Para estimar a função de transferência que relaciona a velocidade da motobomba e a pressão no sistema de bombeamento foi variada a velocidade da motobomba de 0 a 40 % e registrada o valor da pressão.

Figura 37 - Degrau aplicado na velocidade da motobomba.



Fonte: (Autor).

Figura 38 - Resposta temporal da pressão ao degrau aplicado na motobomba.



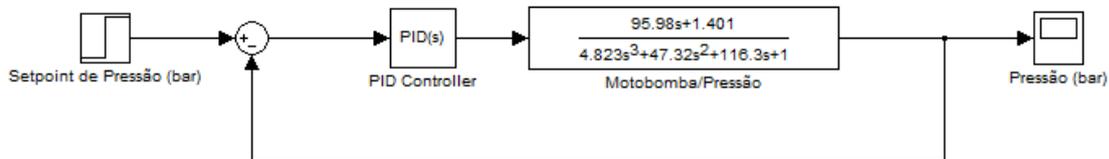
Fonte: (Autor).

A função de transferência que relaciona a velocidade da bomba (%) e a pressão no sistema de bombeamento (bar) obtida através das respostas foi:

$$G_4 = \frac{95.98S + 1.401}{4.823S^3 + 47.32S^2 + 116.3S + 1} \quad (4.4)$$

A figura 39 mostra a malha de controle de pressão obtida através do experimento realizado.

Figura 39 - Malha de controle de pressão.



Fonte: (Autor).

4.5 Sintonia dos Controladores

O projeto dos controladores PID foram realizados por meio do primeiro método de Ziegler e Nichols, apresentado na seção 3.8.1.1. Utilizando as regras da tabela 1, são determinados os parâmetros para os diferentes tipos de controladores PD, PI e PID.

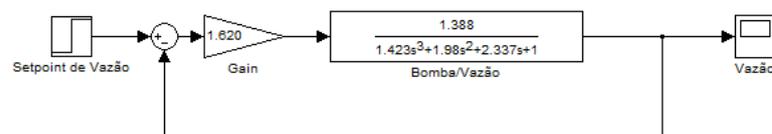
Foram realizados os ajustes dos controladores PID dos processos de vazão e pressão, já que os sistemas de controle dessas malhas não estão funcionando adequadamente, não conseguindo se ajustar ao valor desejado do usuário.

No primeiro passo do projeto foram encontrados o ganho crítico e o período crítico das oscilações dos sistemas de controle, considerando um controlador P (Proporcional) em resposta a uma entrada degrau unitário. Os testes foram realizados por meio de simulações realizadas no *Matlab* com as malhas de controle identificadas experimentalmente.

4.5.1 Sintonia do controlador da malha de vazão

Os testes foram realizados no *Matlab*, conforme o esquema da figura abaixo.

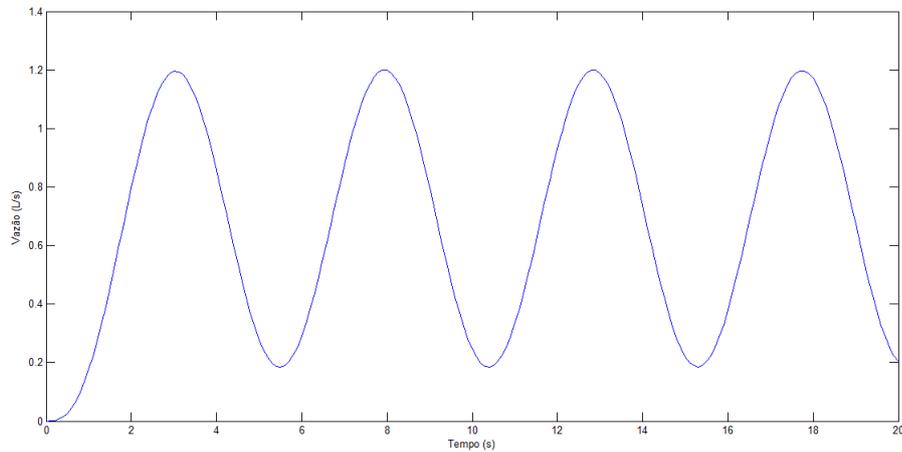
Figura 40 - Esquema para projeto do controlador de vazão.



Fonte: (Autor).

As oscilações periódicas mostradas na figura 41 são atingidas para o valor de ganho $K_u = 1.620$ e período $P_u = 4.904$ segundos.

Figura 41 - Resposta temporal oscilatória do sistema.



Fonte: (Autor).

Sendo o controlador do tipo PD:

$$G_c = K_p + K_p T_d S \quad (4.5)$$

De acordo com a tabela 1:

$$K_p = 0.6K_u \text{ e } T_d = P_u/8$$

Então:

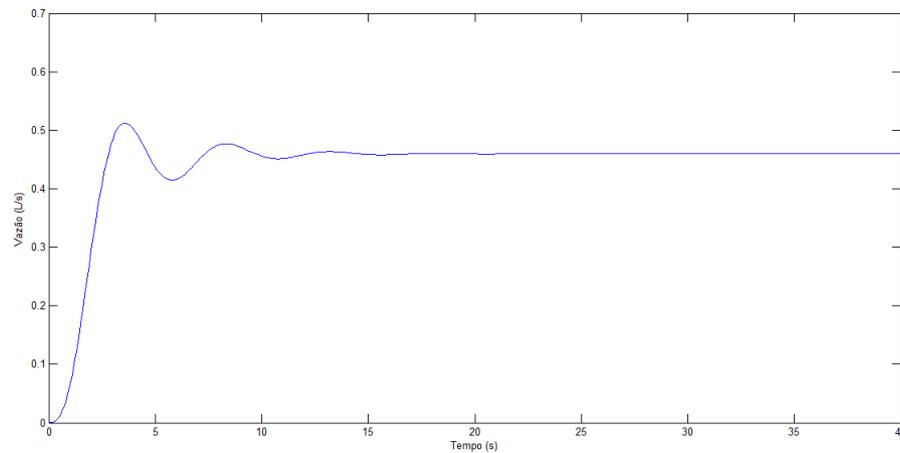
$$K_p = 0.972 \text{ e } T_d = 0.613$$

Portanto, o controlador PD tem a seguinte função de transferência:

$$G_c = 0.613 + 0.596S \quad (4.6)$$

A resposta do sistema de controle a um degrau unitário com um controlador do tipo PD será:

Figura 42 - Resposta do sistema com controlador do tipo PD.



Fonte: (Autor).

Sendo o controlador do tipo PI:

$$G_c = K_p + \frac{K_p}{T_i S} \quad (4.7)$$

De acordo com a tabela 1:

$$K_p = 0.45Ku \text{ e } 1/T_i = 1.2/Pu$$

Então:

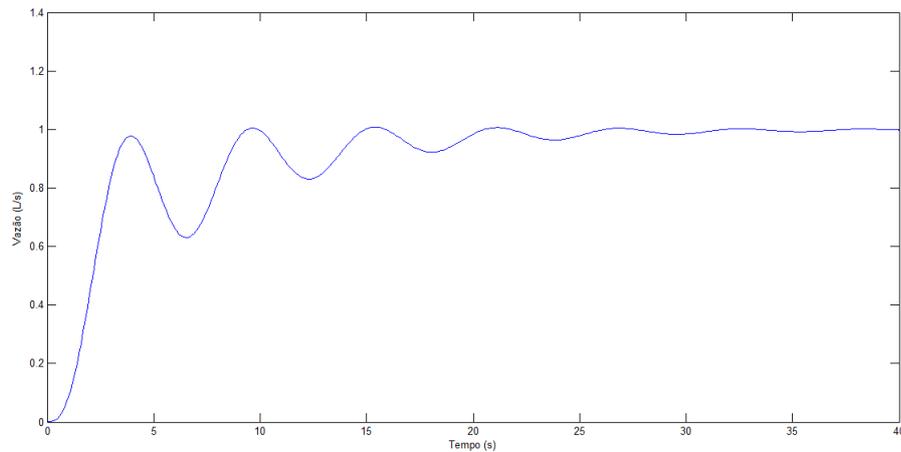
$$K_p = 0.729 \text{ e } T_i = 4.087$$

Portanto, o controlador PI tem a seguinte função de transferência:

$$G_c = 0.729 + \frac{0.178}{S} \quad (4.8)$$

A resposta do sistema de controle a um degrau unitário com um controlador do tipo PI será:

Figura 43 - Resposta do sistema com controlador do tipo PI.



Fonte: (Autor).

Sendo o controlador do tipo PID:

$$G_c = K_p + K_p T_d S + \frac{K_p}{T_i S} \quad (4.9)$$

De acordo com a tabela 1:

$$K_p = 0.45Ku, T_d = Pu/8 \text{ e } 1/T_i = 2/Pu$$

Então:

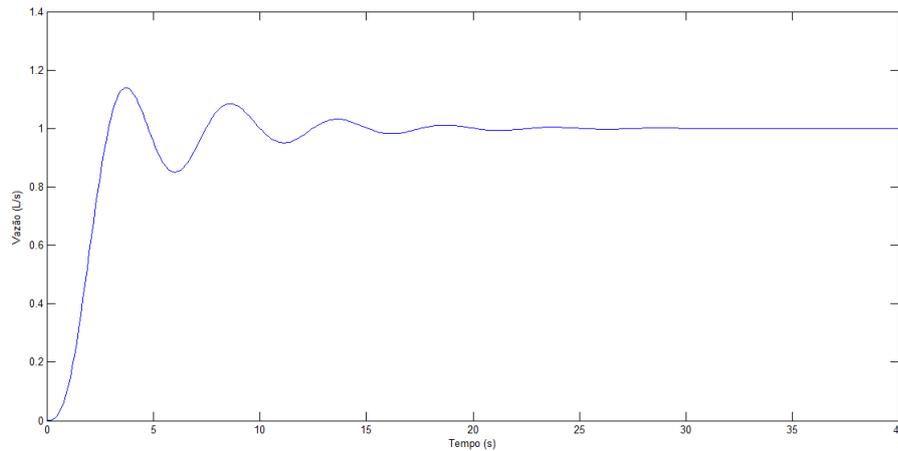
$$K_p = 0.972, T_d = 0.613 \text{ e } T_i = 2.452$$

Portanto, o controlador PID tem a seguinte função de transferência:

$$G_c = 0.972 + 0.595S + \frac{0.396}{S} \quad (4.10)$$

Cuja resposta do sistema a um degrau unitário com controlador tipo PID será:

Figura 44 - Resposta do sistema com controlador do tipo PID.



Fonte: (Autor).

Através dos índices de desempenho da resposta temporal do sistema com os respectivos controladores, mostrado na tabela 2, foi possível avaliar qual o melhor controlador para o sistema. O tipo de controlador PID (Proporcional Integral derivativo) corresponde ao melhor tipo de controlador para o sistema de controle, já que possui uma das respostas mais rápida com tempo de acomodação de 13.7 segundos e erro no estado estacionário igual a 0.

Tabela 2 - Índices de desempenho dos tipos de controladores para malha de vazão.

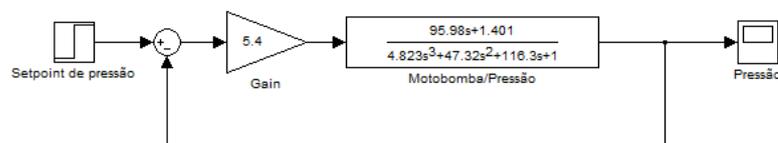
Tipo de Controlador	Tempo de acomodação	Máximo sobressinal	Erro no estado estacionário
PD	10.7 s	30.2 %	0.54
PI	25.1 s	0.8 %	0
PID	13.7 s	6.4 %	0

Fonte: (Autor).

4.5.2 Sintonia do controlador da malha de pressão

Os testes foram realizados no *Matlab*, conforme o esquema da figura abaixo:

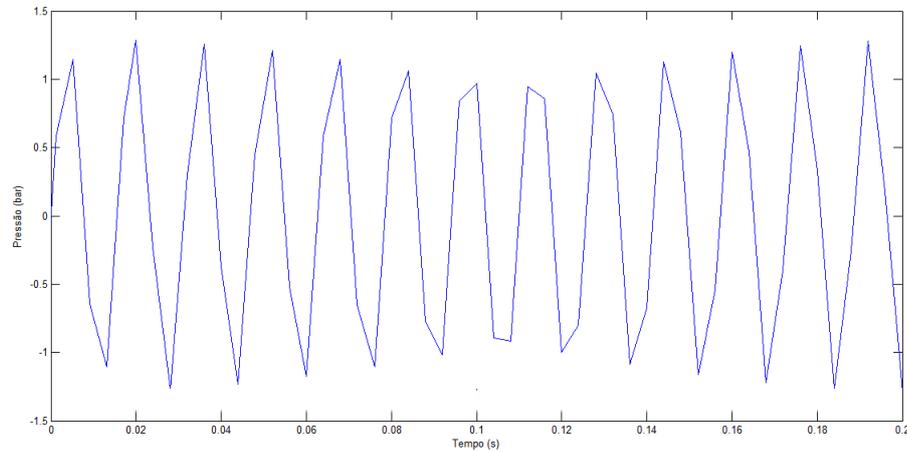
Figura 45 - Esquema para projeto do controlador de pressão.



Fonte: (Autor).

As oscilações mantidas mostradas na Figura 46 são atingidas para os valores de ganho $K_u = 5.4$ e período $P_u = 2.2 \times 10^{-2}$ segundos.

Figura 46 - Resposta temporal oscilatória do sistema.



Fonte: (Autor).

Sendo o controlador do tipo PD conforme a equação (4.5) e:

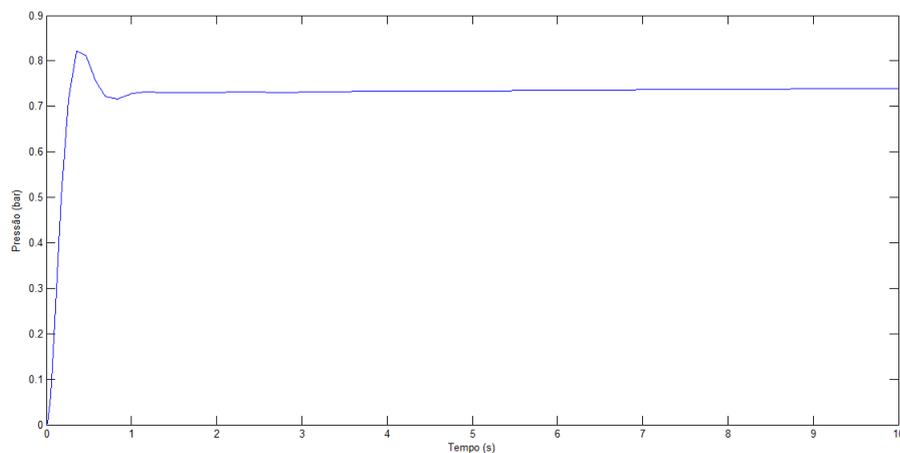
$$K_p = 3.24 \text{ e } T_d = 2.75 \times 10^{-3}$$

Portanto:

$$G_c = 3.24 + 8.91 \times 10^{-3} S \quad (4.11)$$

A resposta do sistema a um degrau unitário com controlador tipo PD simulada foi:

Figura 47 - Resposta do sistema com controlador do tipo PD.



Fonte: (Autor).

Sendo o controlador do tipo PI conforme a equação (4.7) e:

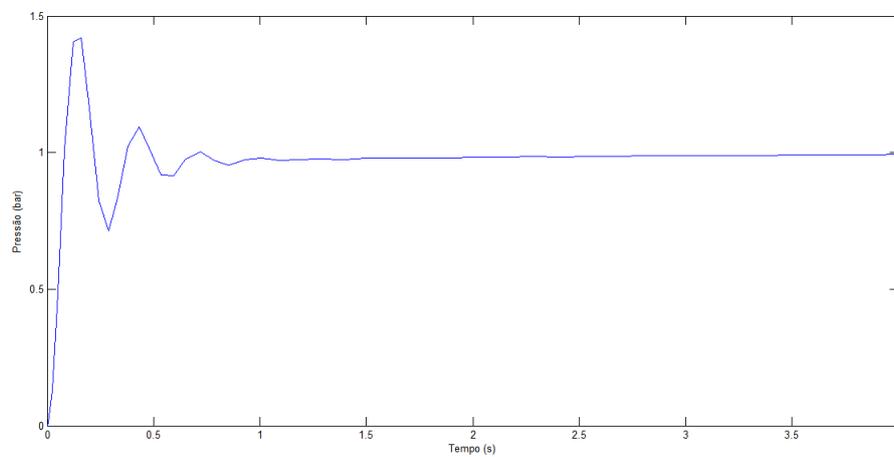
$$K_p = 2.43 \text{ e } T_i = 1.8 \times 10^{-2}$$

Então:

$$G_c = 2.43 + \frac{132.545}{s} \quad (4.12)$$

Cuja resposta do sistema a um degrau unitário com controlador tipo PI será:

Figura 48 - Resposta do sistema com controlador do tipo PI.



Fonte: (Autor).

Sendo o controlador do tipo PID conforme a equação (4.9) e:

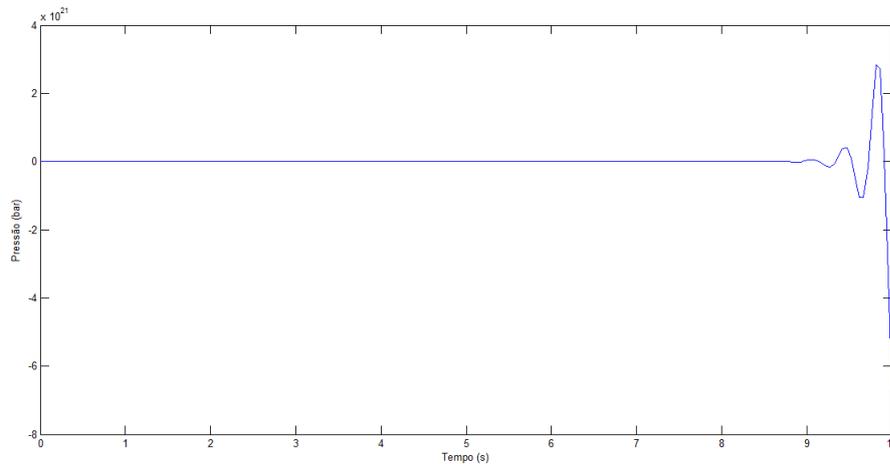
$$K_p = 3.24, T_d = 2.75 \times 10^{-3} \text{ e } T_i = 1.1 \times 10^{-2}$$

Então:

$$G_c = 3.24 + 8.91 \times 10^{-3} s + \frac{294,545}{s} \quad (4.13)$$

Cuja resposta do sistema a um degrau unitário com controlador tipo PID será:

Figura 49 - Resposta do sistema com controlador do tipo PID.



Fonte: (Autor).

Através dos índices de desempenho da resposta temporal do sistema com os respectivos controladores, mostrado na tabela 3, foi possível avaliar qual o melhor controlador para o sistema. O tipo de controlador PI (Proporcional Integrativo) corresponde ao melhor tipo de controlador para o método de sintonia utilizado, já que possui uma resposta temporal rápida com tempo de acomodação de 0.944 s e erro estacionário igual a 0, apesar do sobressinal alto. O valor de pico do sistema é de 1.42 bar, o que não representaria um valor de pressão perigoso para o processo.

A malha de pressão utilizando o controlador PID com os parâmetros obtidos seria um sistema instável e como pode ser observado na figura 49 possui uma resposta com oscilações com períodos crescentes. Devido à instabilidade desse sistema os valores de desempenho são valores indeterminados.

Tabela 3 - Índices de desempenho dos tipos de controladores para malha de pressão.

Tipo de Controlador	Tempo de acomodação	Máximo sobressinal	Erro no estado estacionário
PD	1.320 s	9.32 %	0.29
PI	0.944 s	42.40 %	0
PID	Valor indefinido	Valor indefinido	Valor indefinido

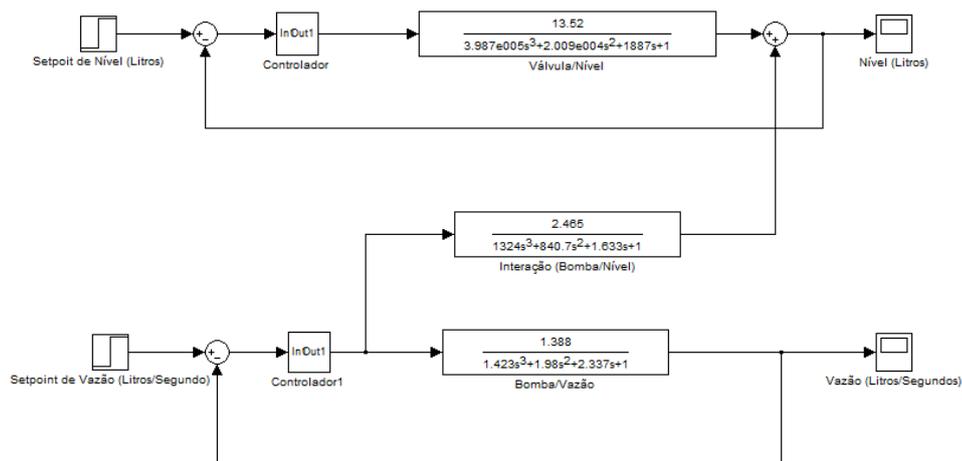
Fonte: (Autor).

4.6 Algoritmo Fuzzy

O algoritmo fuzzy desenvolvido é aplicado no funcionamento da malha de nível e vazão que possuem interações, já que o nível do tanque superior não depende inteiramente da manipulação da válvula de atuação contínua que é o atuador da malha de nível, mas da vazão de entrada do sistema de bombeamento que depende da velocidade da motobomba, atuador da malha de vazão.

Através das malhas de controle de nível e vazão identificadas e a função de transferência que relaciona a velocidade da motobomba e o nível, conforme a equação (4.2), pôde-se simular o funcionamento simultâneo das mesmas, conforme o esquema da figura 50.

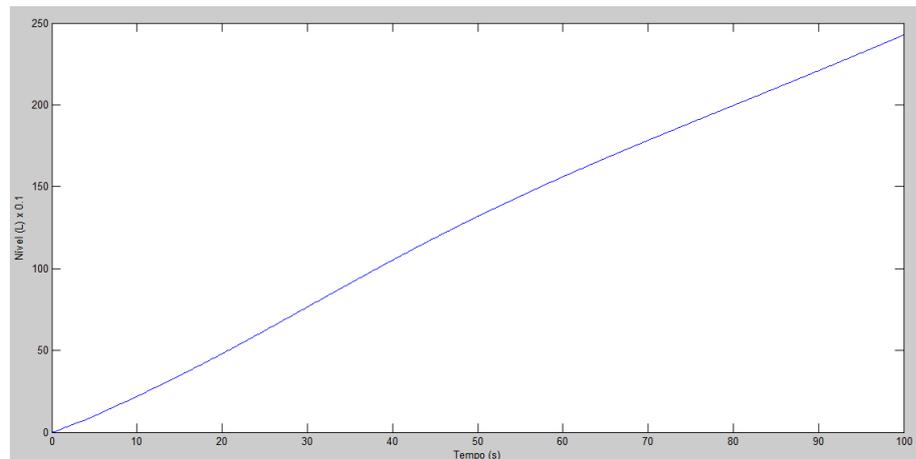
Figura 50 - Esquema para simular o funcionamento simultâneo das malhas.



Fonte: (Autor).

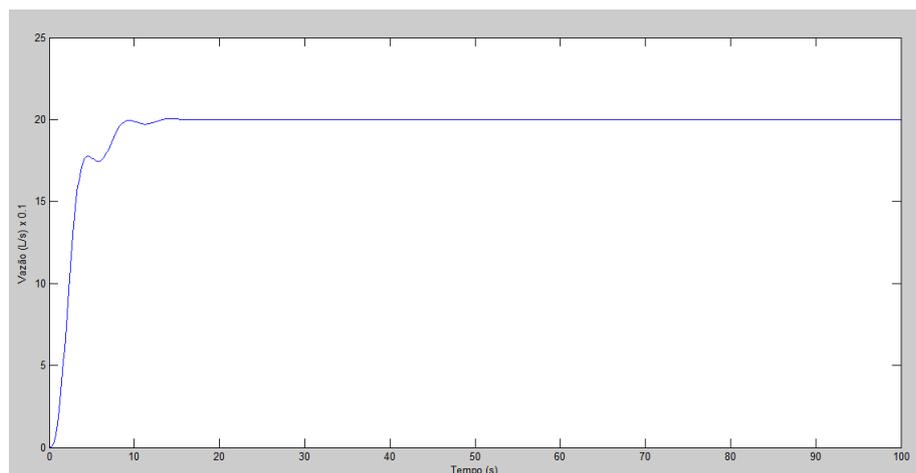
Foi simulado o funcionamento simultâneo das malhas, colocando o setpoint de nível em 9 L e 2 L/s no setpoint de vazão. As respostas obtidas podem ser vistas nas figuras 51 e 52 a seguir.

Figura 51 - Resposta da malha de nível.



Fonte: (Autor).

Figura 52 - Resposta da malha de vazão.



Fonte: (Autor).

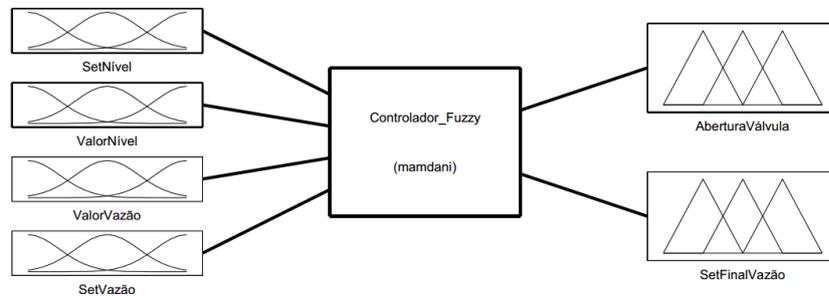
A malha de vazão funciona corretamente para qualquer valor de setpoint, pois não depende da malha de nível. Porém, a malha de nível não possui uma boa resposta, já que a válvula tem um efeito de resposta lento e a motobomba possui uma resposta de incremento muito rápido no nível do tanque.

Com o objetivo de permitir que as malhas de nível e vazão trabalhem simultaneamente, atendendo da melhor forma possível aos valores desejados do usuário (setpoints), foi desenvolvido um algoritmo fuzzy como descrito a seguir.

Como variáveis linguísticas de entrada do algoritmo fuzzy foram definidas o setpoint de nível, nível do tanque, vazão de entrada e setpoint de vazão, já como variáveis linguísticas de saída foram definidas a abertura da válvula e o setpoint de vazão final. A figura 53 mostra o

esquema do algoritmo fuzzy produzido no *Matlab* que utiliza o modelo baseado no controlador de Mamdani, com as respectivas variáveis de entradas e saídas.

Figura 53 - Variáveis de entrada e saída.



Fonte: (Autor).

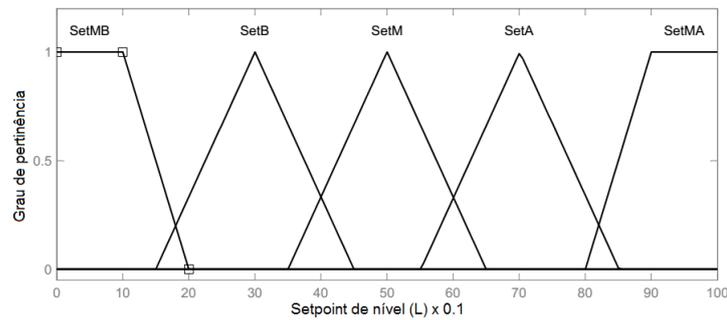
O algoritmo fuzzy utilizará, portanto, o valor de setpoint de nível e vazão do usuário, assim como o nível do tanque e a vazão de entrada proveniente da malha de vazão para determinar a abertura da válvula e o setpoint ideal da malha fechada de vazão para que os setpoint de nível e vazão do usuário possam ser obtidos, apesar da forte influência da vazão da malha de vazão no nível do tanque.

A ideia inicial seria utilizar o setpoint de nível e vazão como variáveis de saída do algoritmo fuzzy, valores que deriam ser inseridos nas simples malhas fechadas de nível e vazão para que os reais valores desejados pelo usuário sejam atendido. No entanto, o algoritmo fuzzy não conseguiu estabilizar a malha de nível devido o atuador da malha de nível, a válvula de atuação contínua, possuir um tempo de resposta lento, com relação a ação de controle tomada pelo controlador. A solução foi utilizar diretamente a abertura da válvula contínua como saída, melhorando o resultado, já que a válvula teria uma reação mais rápida.

4.6.1 Variáveis de entradas

A variável de entrada setpoint de nível, o nível desejado pelo usuário, possui cinco funções de pertinência: setpoint muito baixo (SetMB), setpoint baixo (SetB), setpoint médio (SetM), setpoint alto (SetA) e setpoint muito alto (SetMA). As funções de pertinências podem ser observadas abaixo:

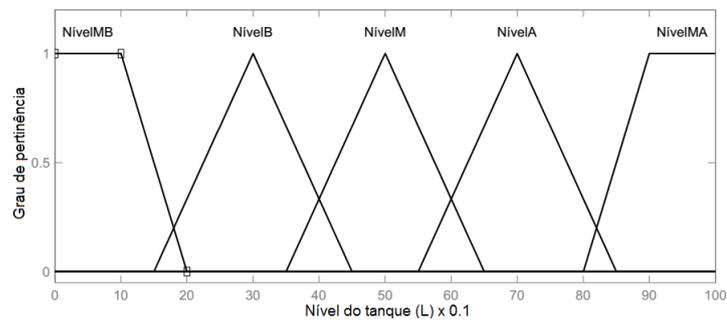
Figura 54 - Funções de pertinências da variável de entrada setpoint de nível.



Fonte: (Autor).

A variável de entrada nível do tanque, o valor de nível medido no tanque, possui cinco funções de pertinência: nível muito baixo (NívelMB), nível baixo (NívelB), nível médio (NívelM), nível alto (NívelA) e nível muito alto (NívelMA). As funções de pertinências podem ser observadas abaixo:

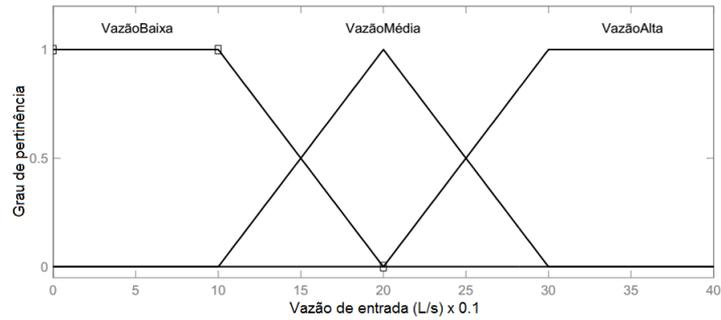
Figura 55 - Funções de pertinências da variável de entrada nível do tanque.



Fonte: (Autor).

Já a variável linguística vazão de entrada, resposta da malha fechada de vazão, possui três funções de pertinência: vazão baixa (VazãoB), vazão média (VazãoM) e vazão alta (VazãoA). As funções de pertinências podem ser observadas abaixo:

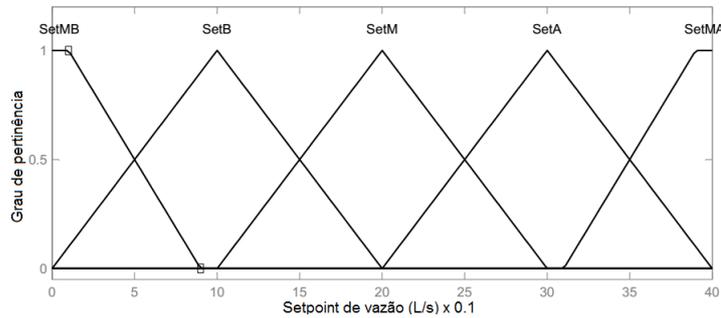
Figura 56 - Funções de pertinências da variável linguística vazão de entrada.



Fonte: (Autor).

A última variável de entrada o setpoint de vazão, o valor de vazão desejado pelo usuário, possui cinco funções de pertinências: setpoint muito baixo (SetMB), setpoint baixo (SetB), setpoint médio (SetM), setpoint alto (SetA) e setpoint muito alto (SetMA). A figura 57 mostra as funções de pertinências utilizadas.

Figura 57 - Funções de pertinências da variável de entrada setpoint de vazão.

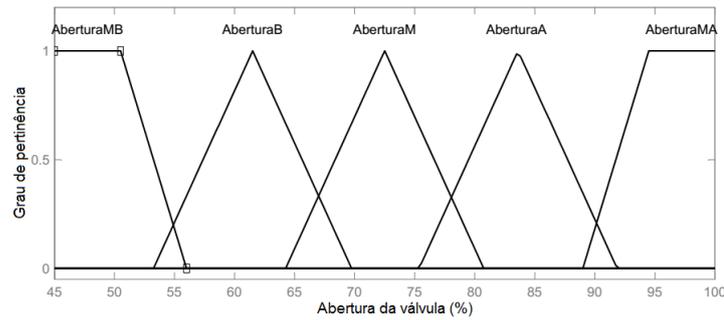


Fonte: (Autor).

4.6.2 Variáveis de saídas

Como variável de saída temos a variável linguística abertura da válvula possuindo cinco funções de pertinência no intervalo de 45 a 100% de abertura, sendo elas: abertura muito baixa (AberturaMB), abertura baixa (AberturaB), abertura média (AberturaM), abertura alta (AberturaA) e abertura muito alta (AberturaMA).

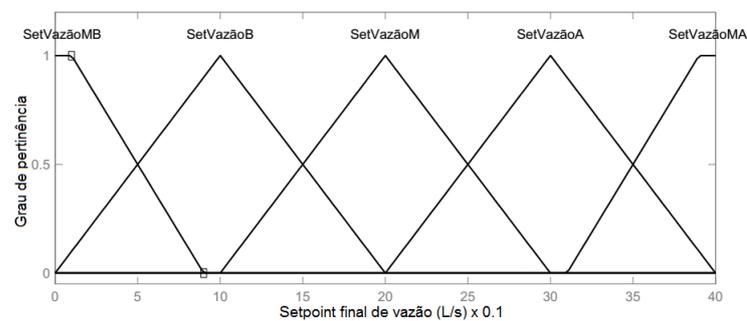
Figura 58 - Funções de pertinências da variável de saída abertura da válvula.



Fonte: (Autor).

Outra variável de saída é o setpoint final de vazão que é o valor do setpoint que será inserido na referência da malha de controle PID de vazão de modo que o setpoint de nível também seja atingido. Ela possui as cinco funções de pertinências: setpoint muito baixo (SetVazãoMB), setpoint baixo (SetVazãoB), setpoint médio (SetVazãoM), setpoint alto (SetVazãoA) e setpoint muito alto (SetVazãoMA).

Figura 59 - Funções de pertinências da variável de saída setpoint de vazão final.



Fonte: (Autor).

4.6.3 Regras do algoritmo fuzzy

São 258 regras implementadas pelo controlador fuzzy, combinando a maioria dos possíveis estados das variáveis de entrada. Nessa seção serão apresentadas algumas regras para o entendimento, mas todas as regras podem ser vistas no apêndice B.

Abaixo segue algumas regras implementadas pelo algoritmo fuzzy, mostradas na tabela 4.

Tabela 4 – Amostra de regras do algoritmo fuzzy.

If	AND	AND	AND	THEN	
SetNível	ValorNível	ValorVazão	SetVazão	AberturaVálvula	SetFinalVazão
SetM	NívelMB	VazãoB	SetMA	AberturaMB	SetVazãoMA
SetM	NívelMB	VazãoM	SetMA	AberturaMB	SetVazãoMA
SetM	NívelMB	VazãoA	SetMA	AberturaB	SetVazãoMA
SetM	NívelB	VazãoB	SetMA	AberturaB	SetVazãoMA
SetM	NívelB	VazãoM	SetMA	AberturaM	SetVazãoMA
SetM	NívelB	VazãoA	SetMA	AberturaA	SetVazãoMA
SetM	NívelM	VazãoA	SetMA	AberturaMA	SetVazãoM
SetM	NívelA	VazãoA	SetMA	AberturaMA	SetVazãoMB

Fonte: (Autor).

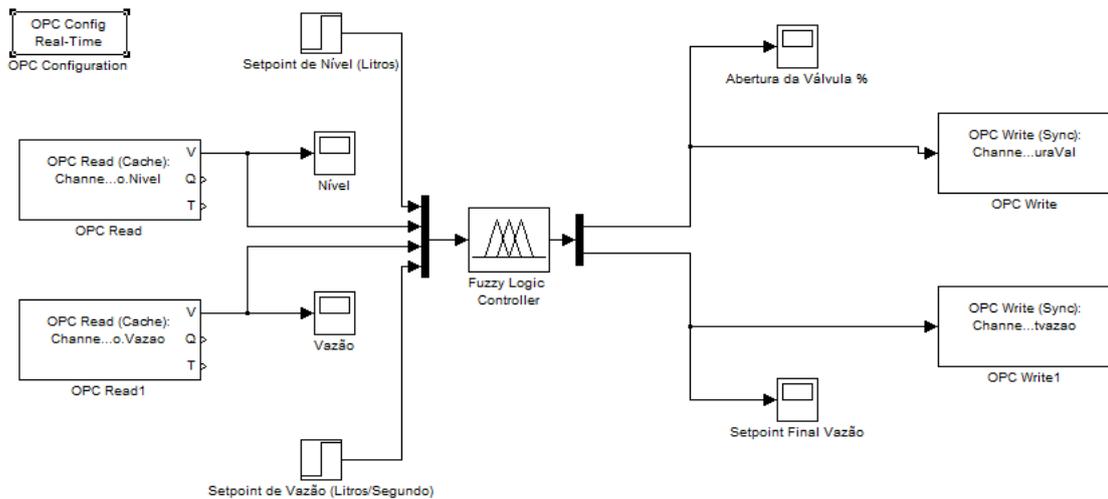
Como pode ser visto na tabela acima, caso o usuário deseje um setpoint médio de nível, o valor atual do nível do tanque esteja muito baixo, a vazão de entrada no tanque seja baixa e o setpoint de vazão desejado pelo usuário muito alto, a abertura da válvula deve ser muito baixa, pois o nível do tanque deve ser incrementado, já o setpoint de vazão deve ser o setpoint do usuário (setpoint muito alto), permitindo a vazão ser alcançada pela malha.

Já no caso em que o setpoint de nível desejado pelo usuário é médio, o nível do tanque é muito baixo, a vazão de entrada do tanque é alta e o setpoint de vazão muito alto, a abertura da válvula deve passar para o estado “abertura média”, tentando minimizar a alta vazão de entrada no tanque e o setpoint de vazão pode continuar sendo o setpoint do usuário (SetMA). Porém, caso o setpoint de nível do usuário seja médio, o nível também seja médio, a vazão seja alta e o setpoint da vazão esteja muito alto, a abertura da válvula será muito alta, pois terá que compensar a vazão de entrada alta para que o nível não seja incrementado, porque já atingiu o valor desejado, já o setpoint de vazão deverá diminuir dois estados, de muito alta para média, de modo que a válvula que possui uma resposta lenta consiga estabilizar o valor desejado pelo usuário.

Todas as outras regras criadas seguem essa linha de raciocínio, variando a abertura da válvula de atuação contínua e o setpoint final da malha de vazão de modo que o nível do tanque escolhido pelo usuário seja alcançado e a vazão possa estar em faixas próximas à escolha do usuário e siga esse valor a medida do possível.

Foram realizados ensaios na bancada para avaliar o funcionamento do algoritmo fuzzy desenvolvido, utilizando o esquema da figura 60 no *Simulink*.

Figura 60 - Esquema no *Simulink* para avaliação do controlador fuzzy.



Fonte: (Autor).

O bloco OPC Configuration tem como objetivo configurar o software *Matlab* para se comunicar com CLP através do protocolo de comunicação OPC, permitindo os blocos OPC Read e OPC Read1 acessarem os valores de nível e a vazão na bancada, e os blocos OPC Write e OPC Write1 escreverem no CLP o valor da abertura da válvula e o setpoint final de vazão, obtidos pelo algoritmo fuzzy, respectivamente.

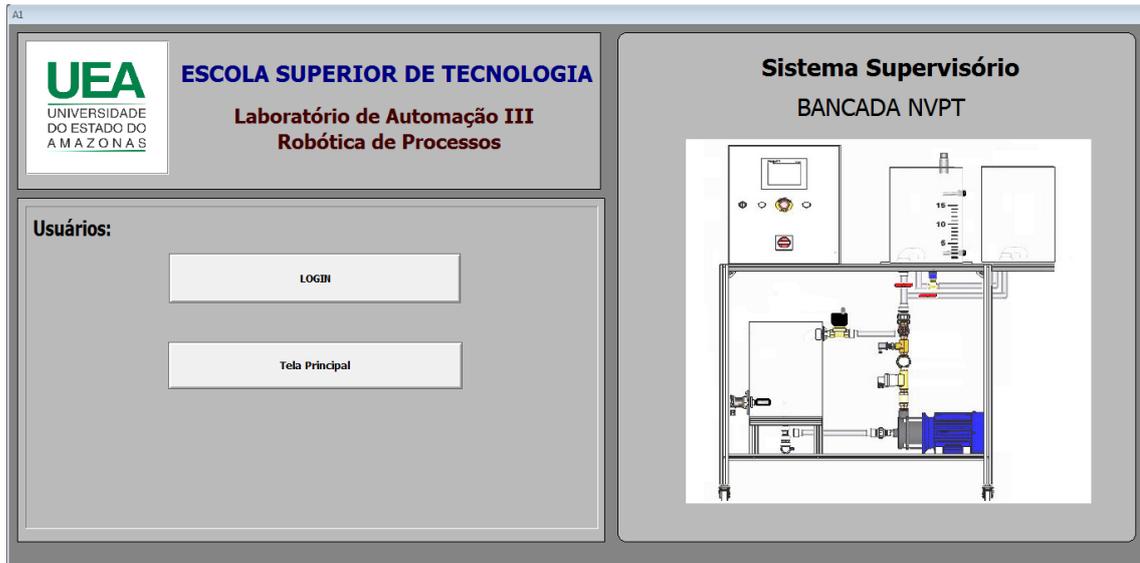
4.7 Sistema Supervisório

O software utilizado para o desenvolvimento do sistema supervisório foi o *Intouch* da fabricante Wonderware, onde foram criadas as tags necessárias para sua implementação. A lista de tags utilizadas podem ser vista no apêndice A.

O sistema supervisório desenvolvido é composto por 4 telas: tela de acesso ao usuário, tela de comandos manuais, tela de comandos automáticos e alarmes. O processo da bancada é otimizado na menor quantidade de telas possíveis com o objetivo de se assemelhar a sistemas supervisórios indústrias, onde na maioria dos casos, as telas passam a maior quantidade de informações possíveis aos operadores.

Na tela de acesso ao usuário, mostrada na figura 61, é possível a realização do login para usuários, onde a entrada do usuário habilita à utilização do botão de acesso ao supervisório.

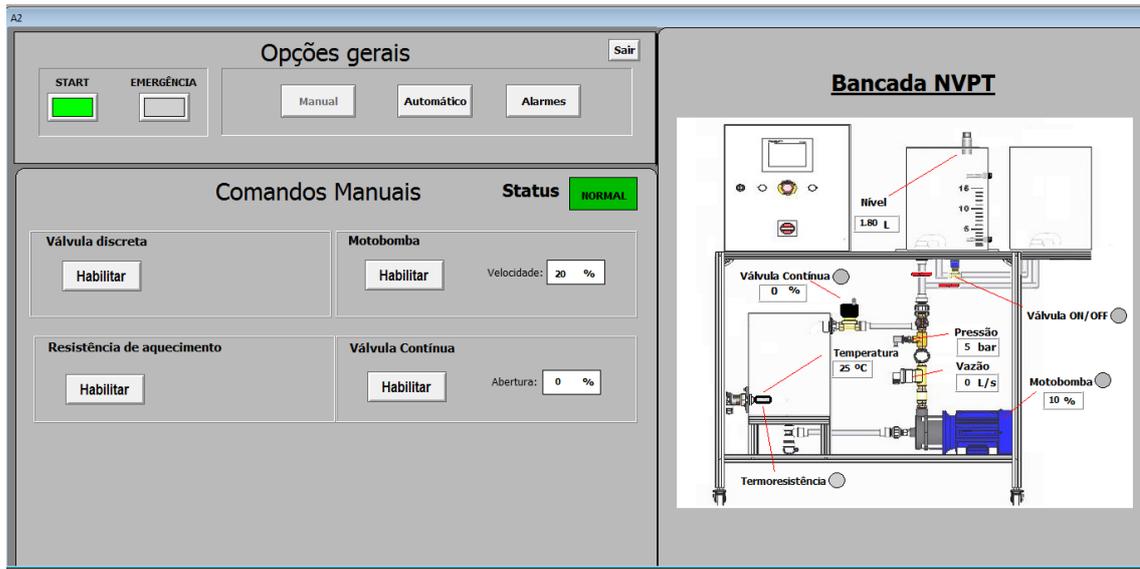
Figura 61 - Tela de acesso ao usuário.



Fonte: (Autor).

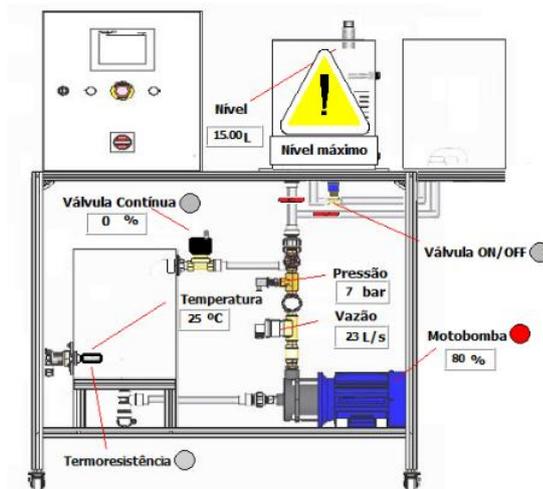
A primeira tela de acesso após o login do usuário, mostrada na figura 62, é a tela de comandos manuais. Nela, podem ser realizados os comandos manuais, como o acionamento da válvula discreta, acionamento da resistência de aquecimento, acionamento da motobomba de acordo com o percentual de velocidade escolhido e o acionamento da válvula contínua de acordo com o percentual de abertura selecionado pelo usuário. Na parte superior desta tela é possível acessar as opções gerais, que permitem a transição da tela para o modo automático e a tela alarme, e os botões de start e emergência de modo ao usuário ter maior acessibilidade. Na parte direita da tela é possível visualizar a bancada e variáveis fundamentais dos processos, como o nível no tanque superior, vazão e pressão no sistema de bombeamento, e temperatura do líquido nos reservatórios inferiores. Na mesma imagem da bancada são indicados os atuadores com seus nomes e respectivos estados, assim como pode ser indicada alguns sinais de alarmes já nesta tela, conforme a figura 63.

Figura 62 - Tela de comandos manuais.



Fonte: (Autor).

Figura 63 - Parte direita da tela de comandos manuais (bancada NVPT).



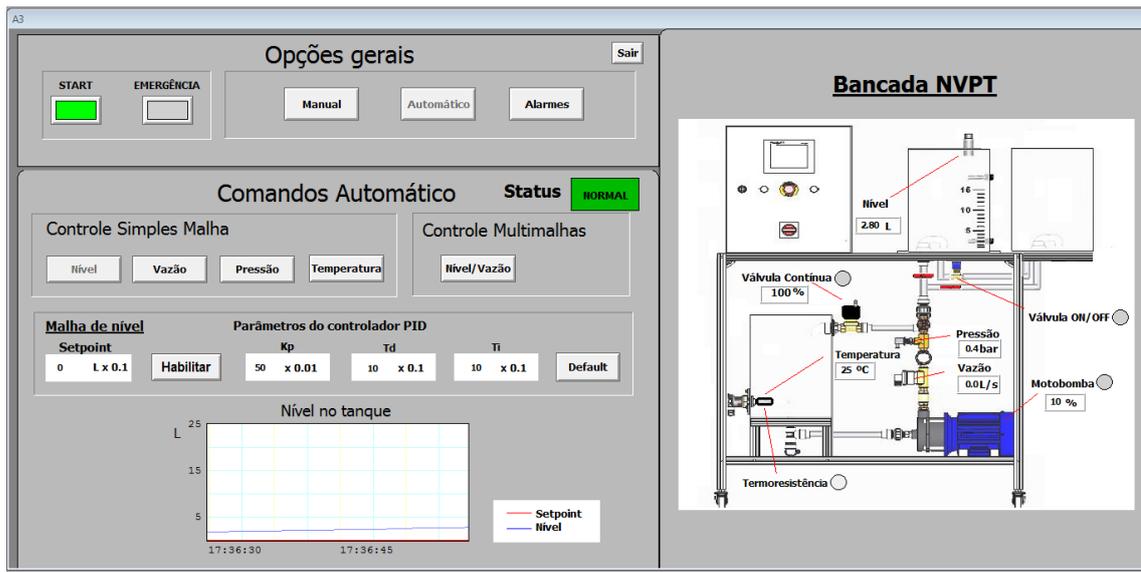
Fonte: (Autor).

Caso selecionado a tela de comandos automáticos, a parte superior da tela com as opções gerais e parte direita com a imagem da bancada e os dados do processo permanecem. Porém na parte central aparecem uma série de opções de trabalho, como trabalhar com controle simples malha utilizando a malha de nível, vazão, pressão ou temperatura, e o trabalho com o controle multimalhas com a malha de nível e vazão.

Quando selecionado o trabalho simples malha com as variáveis de nível, vazão ou pressão aparecem no centro da tela o campo para que o usuário altere o setpoint desejado da variável escolhida, o campo para seleção dos parâmetros do controlador PID, como ganho,

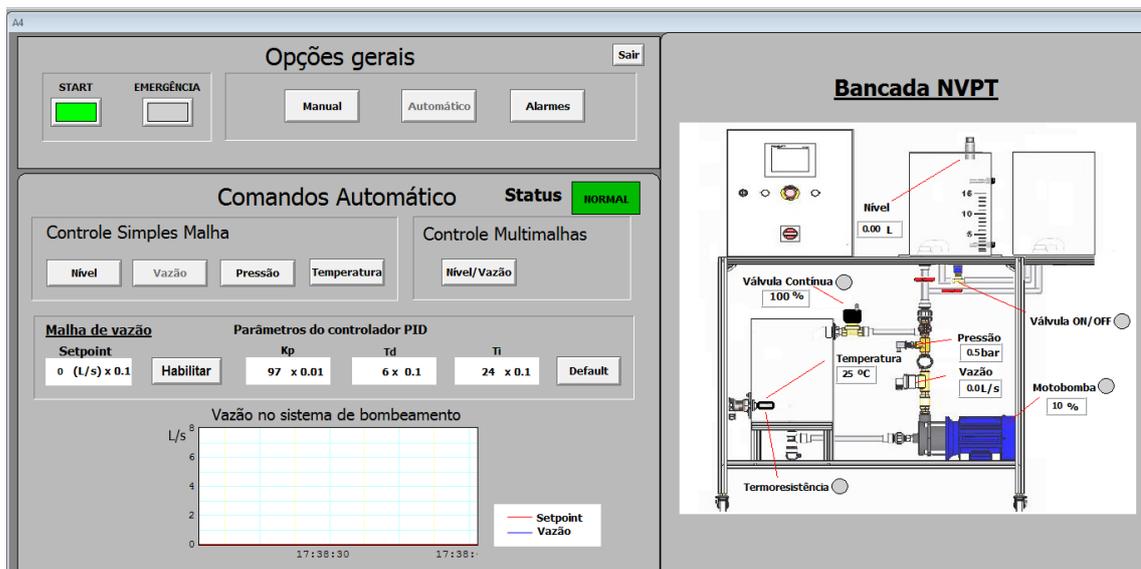
tempo derivativo e tempo integrativo, assim como o botão para resetar esses valores alterados para os valores predeterminados no projeto, com o botão default. A tela também possui um gráfico na parte inferior conforme a variável selecionada, o qual traça duas curvas, o setpoint do usuário e a resposta temporal da malha escolhida. As figuras 64, 65 e 66 mostram a tela do modo automático, caso a variável de nível, vazão e pressão sejam selecionadas, respectivamente.

Figura 64 - Tela de modo automático selecionado a malha de nível.



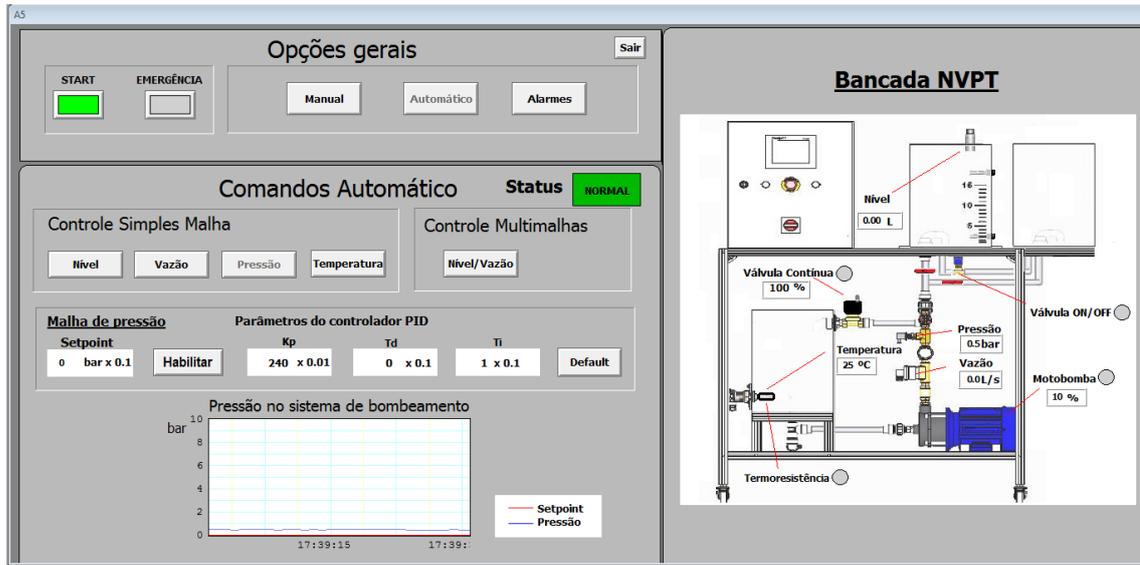
Fonte: (Autor).

Figura 65 - Tela de modo automático selecionado a malha de vazão.



Fonte: (Autor).

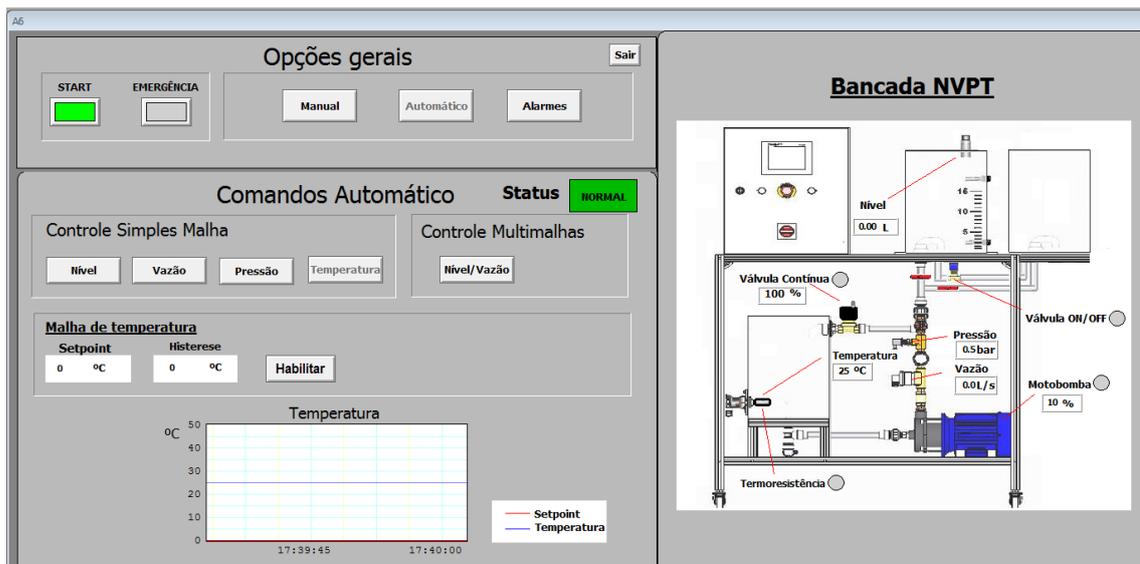
Figura 66 - Tela de modo automático selecionado a malha de pressão.



Fonte: (Autor).

Já selecionado o trabalho com a malha de temperatura no modo automático, o controle da temperatura é realizado por controle on/off com histerese, permitindo o usuário digitar o valor desejado, o valor da histerese, e visualizar o setpoint e a resposta da temperatura no decorrer do tempo através de um gráfico, como mostrado na figura 67.

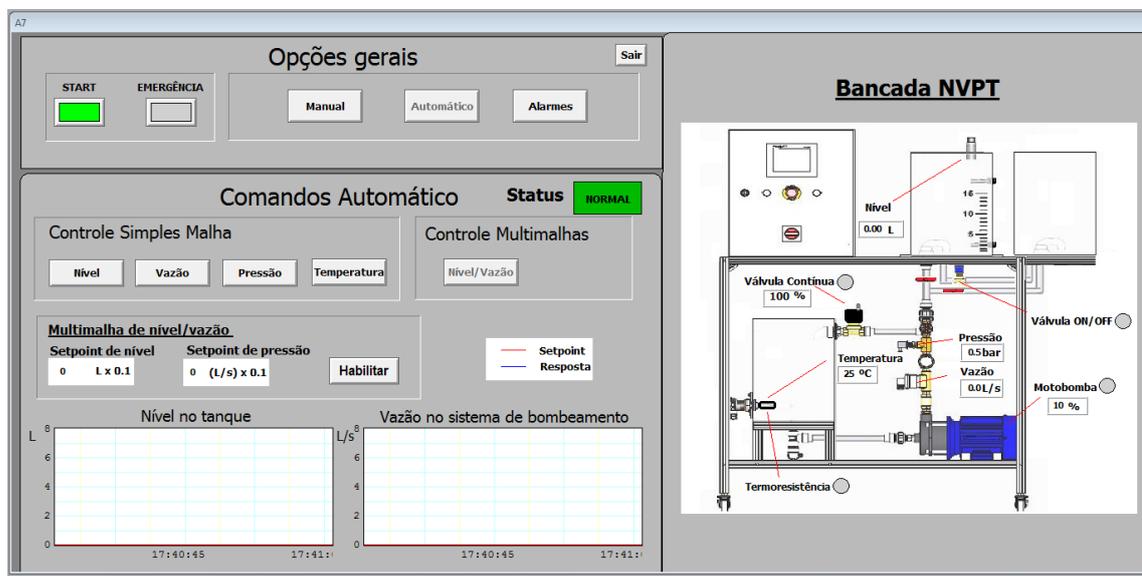
Figura 67 - Tela de modo automático selecionado a malha de temperatura.



Fonte: (Autor).

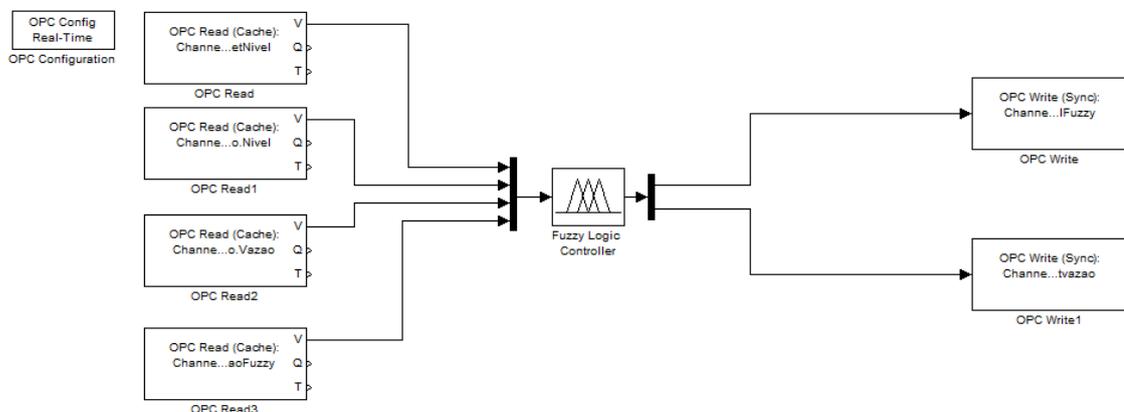
A opção de controle multimalha de nível/vazão no modo automático permite o usuário escolher um valor desejado para o nível do tanque e para a vazão do sistema de bombeamento e visualizar as respostas temporais dessas variáveis simultaneamente por meio de dois gráficos, assim como os valores desejados dos mesmos para comparação. O algoritmo fuzzy é implementado no *Matlab* através do *Simulink*, e é reproduzido simultaneamente com o sistema supervisor, conforme o esquema da figura 69, permitindo o controle multimalhas das variáveis.

Figura 68 - Tela de modo automático selecionado o controle multimalhas de nível/vazão.



Fonte: (Autor).

Figura 69 - Algoritmo fuzzy implementado no *Simulink*.



Fonte: (Autor).

Para reprodução do supervisório desenvolvido, o software *Kepserverex* precisa estar conectado ao CLP através do protocolo de comunicação OPC, para que os dados do processo possam ser lidos e escritos pela aplicação do supervisório no software *Intouch*. Para o funcionamento do controle multimalha das malhas de nível e vazão, o esquema da figura 69 no *Simulink* deve estar simulando e o controlador fuzzy desenvolvido já importado para o bloco Fuzzy Logic Controller.

Na figura 69, os blocos OPC Read e OPC Read3 acessam os valores desejados de nível e vazão pelo usuário disponíveis no CLP enviados pelo supervisório, enquanto os blocos OPC Read1 e OPC Read2 lêem os valores de nível e vazão do processo. A partir dos valores de entradas o bloco Fuzzy Logic Controller aplica os valores das variáveis de saídas obtidas pelo algoritmo fuzzy, a abertura da válvula e setpoint final de vazão respectivamente, nos blocos OPC White e OPC White1 que escrevem diretamente os valores no CLP.

E por fim, a tela de alarme tem como objetivo armazenar o histórico de algumas situações de perigo no funcionamento da bancada, como o nível máximo atingido no reservatório superior, nível mínimo atingido nos reservatórios inferiores e temperatura muito elevada nos mesmos. A tela de alarme é simples, mas mostra as principais ocorrências de periculosidade e como tomar as devidas providências, permitindo também o usuário visualizar a bancada e os dados dos processos. A tela de alarme pode ser vista na figura 70 abaixo.

Figura 70 - Tela de alarme.



Fonte: (Autor).

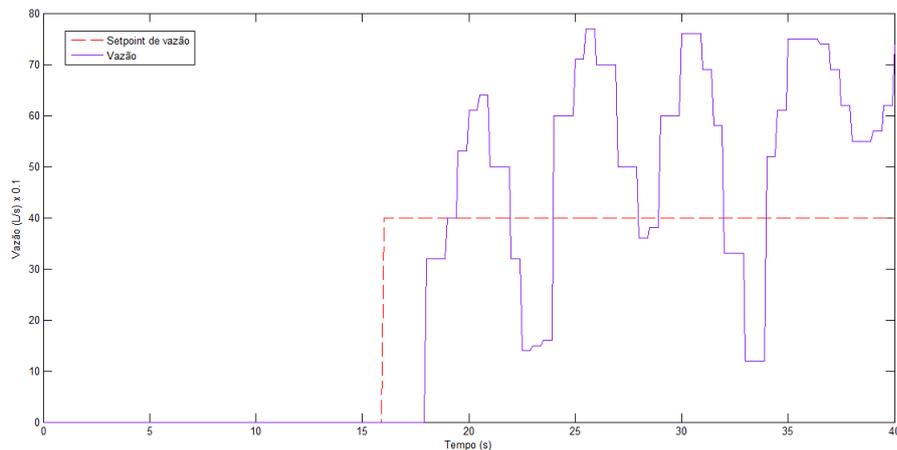
5 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos na implementação do projeto. São realizados ensaios na bancada para avaliação do projeto dos controladores PID das malhas de vazão e pressão, a fim de comparar o funcionamento das malhas antes e depois da implementação do projeto. Para o controle multimalhas das malhas de nível e vazão são apresentados as respostas temporais das mesmas dados os valores desejados pelo usuário para que o resultado seja avaliado. E por fim, são apresentados os resultados do funcionamento do sistema supervisorio desenvolvido.

5.1 Ensaios das malhas de Vazão e Pressão

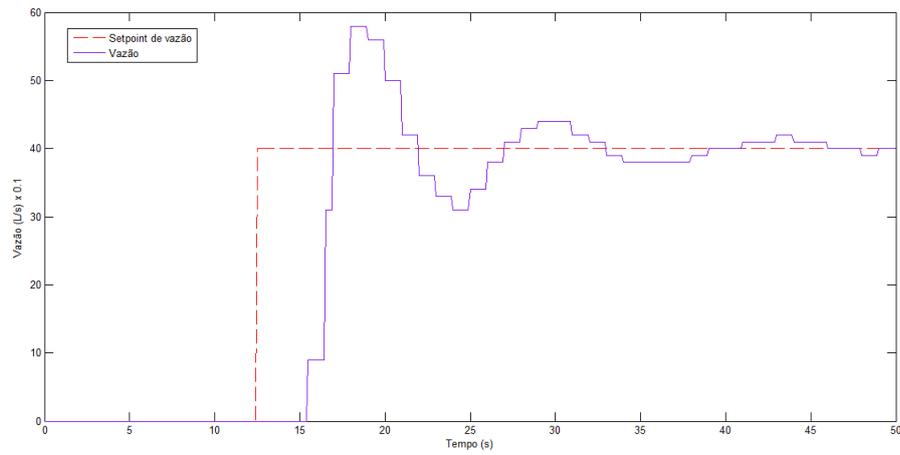
Foram realizados ensaios na malha de vazão antes da implementação do projeto, ou seja, na bancada no seu estado inicial, e depois do projeto com os parametros do controlador PID projetado. As respostas temporais para um setpoint de 4 L/s pode ser observada nas figuras a seguir.

Figura 71 - Resposta da malha de vazão antes do projeto.



Fonte: (Autor).

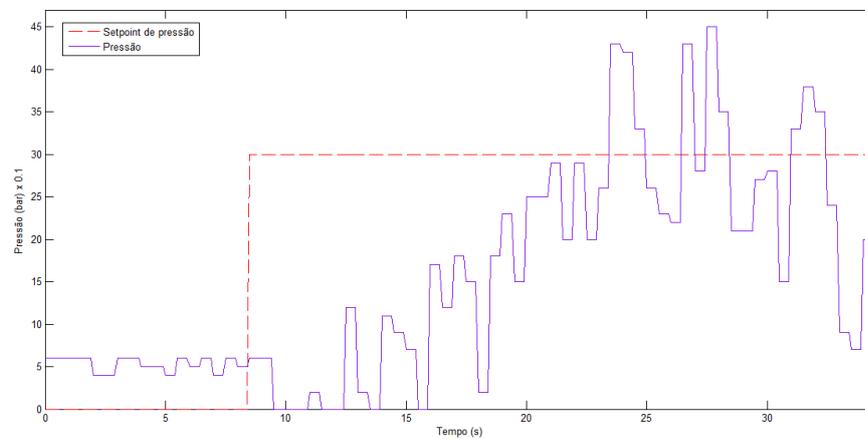
Figura 72 - Resposta da malha de vazão depois do projeto.



Fonte: (Autor).

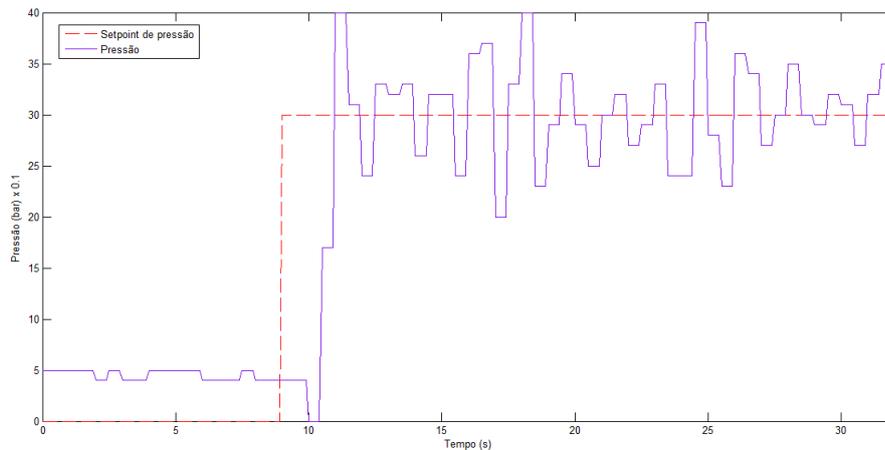
Para malha de pressão foi realizado o mesmo procedimento anterior. As respostas temporais para malha de pressão antes e depois do projeto para um setpoint de 3 bar pode ser observada nas figuras a seguir.

Figura 73 - Resposta da malha de pressão antes do projeto.



Fonte: (Autor).

Figura 74 - Resposta da malha de pressão depois do projeto.



Fonte: (Autor).

Conforme apresentado, a malha de vazão obteve uma melhora significativa, já que no seu estado anterior, não conseguia seguir o valor desejado pelo usuário. O novo resultado realiza o seguimento do setpoint e possui os índices de desempenho apresentados aproximadamente:

Tempo de subida de 4.9 segundos;

Máximo sobresinal de 45%;

Tempo de acomodação de 24.6 segundos;

Erro nulo no estado estacionário.

A malha de pressão no estado atual respondeu melhor ao setpoint do usuário, apesar de não conseguir fazer o seguimento perfeito do mesmo. Como pode ser visto na figura 73, a malha de pressão no seu estado anterior não se estabiliza, com oscilações que não ficam em torno do setpoint do usuário, já depois da implementação do projeto, a resposta também possui oscilações, porém com amplitudes menores e com o seguimento mais próximo do valor do usuário, tendo um tempo de subida menor que no estado anterior.

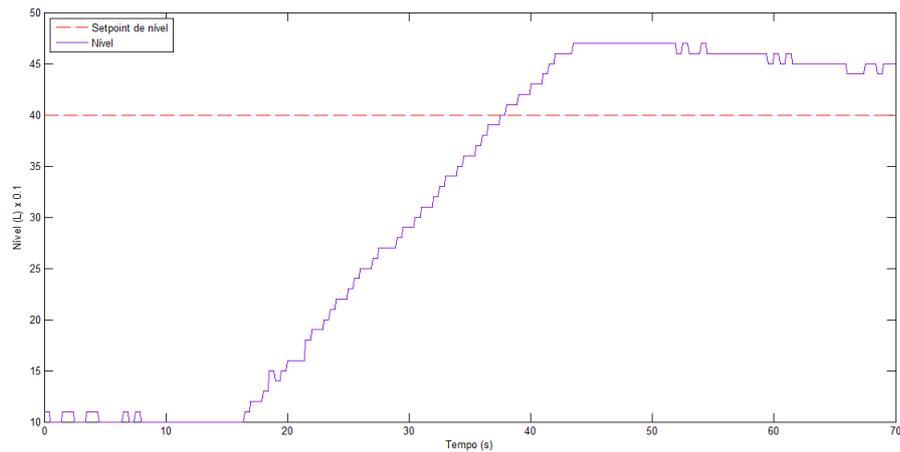
Foi constatado que o comportamento oscilatório do sistema de pressão é ocasionado pelo sensor presente na bancada, o qual apresenta ruídos mesmo sem a entrada do valor desejado pelo usuário, conforme mostrado na figura 74. Apesar da adição do filtro, o comportamento permaneceu inalterado.

5.2 Ensaios do controle multimalha de Nível e Vazão

Foram realizados testes para análise do resultado do controle multimalha das variáveis de nível e vazão. No ensaio apresentado, foi escolhido o setpoint do nível em 4 litros e da vazão

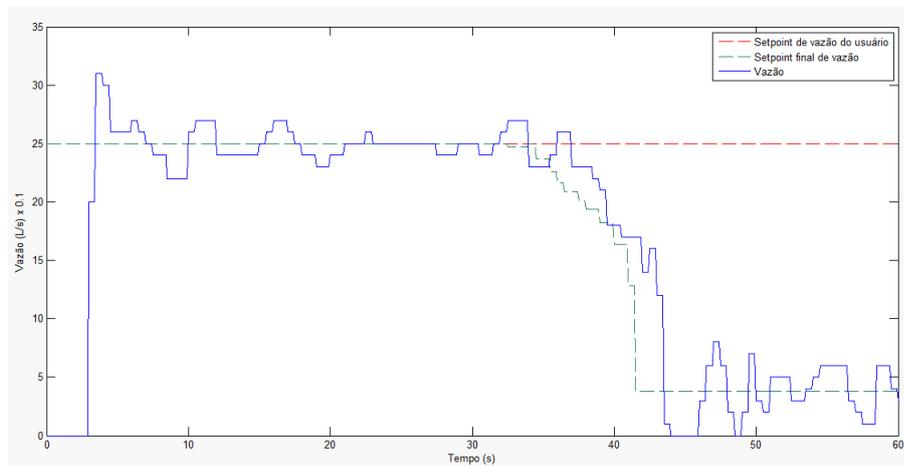
de 2.5 litros por segundos. A resposta da malha nível e o setpoint do usuário podem ser visto na figura 75; o setpoint de vazão, o setpoint final de vazão obtido pelo algoritmo fuzzy e a vazão do sistema de bombeamento podem ser visto na figura 76; e por fim a abertura da válvula que é determinada pelo algoritmo fuzzy pode ser vista na figura 77.

Figura 75 - Resposta do controle multimalha da variável de nível.



Fonte: (Autor).

Figura 76 - Resposta do controle multimalha da variável de vazão.



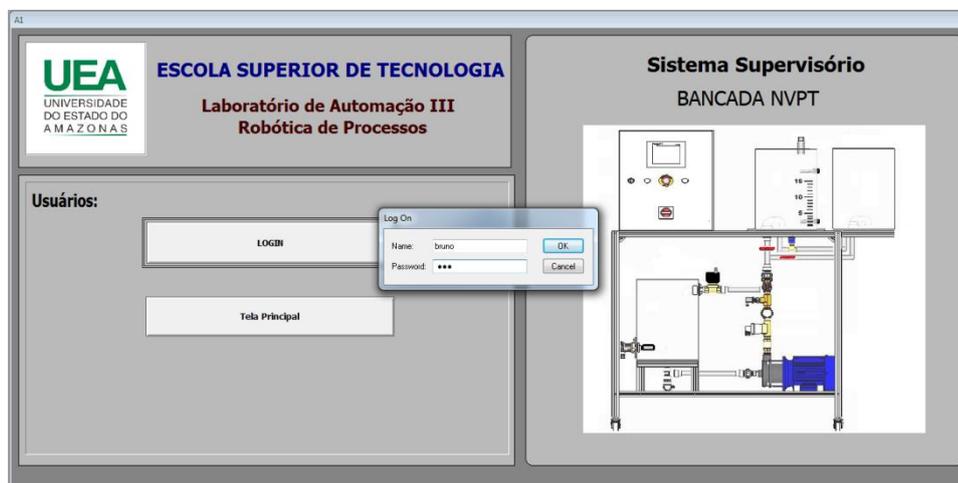
Fonte: (Autor).

5.3 Controle e monitoração da Bancada pelo Supervisório

A aplicação do sistema supervisório desenvolvido no software *Intouch* para controle simples malha e multimalha da bancada obteve bons resultados, pois possibilitou melhoras no controle e análise dos processos da bancada.

Na tela inicial, o usuário deve realizar login, garantindo a segurança do processo ao exigir que os operadores se identifiquem, por meio do nome do usuário e senha para execução de qualquer comando no supervisório. A figura 78, mostra um usuário realizando login para acesso aos comandos do supervisório.

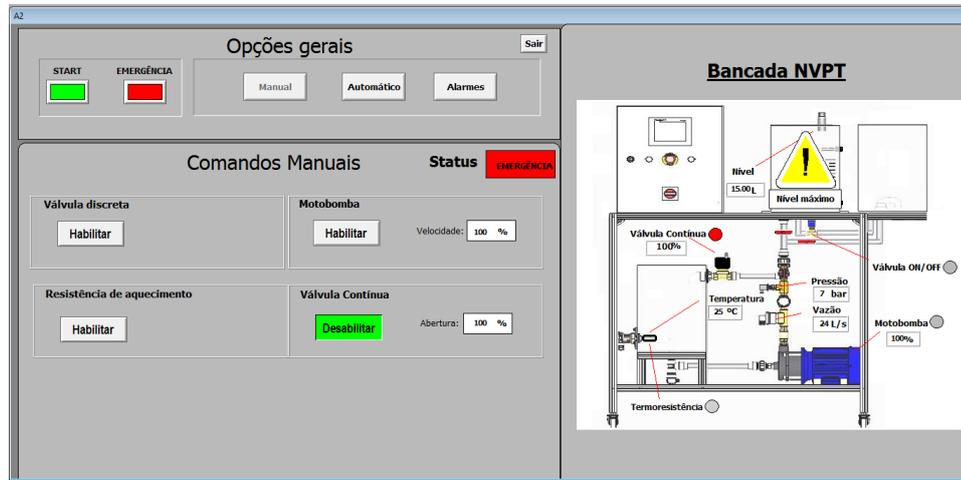
Figura 78 - Usuário realizando login para acesso ao supervisório.



Fonte: (Autor).

No controle manual o usuário pôde acionar e desacionar os atuadores da bancada de forma simples e ilustrativa, além de visualizar todas as variáveis da bancada e possíveis situações de emergência na mesma tela, possibilitando tomadas rápidas de decisões com o fácil entendimento do processo da bancada pelo usuário. A figura 79 a seguir mostra os comandos manuais da bancada, assim como a bancada no lado direito com todas as variáveis do processo e a sinalização de uma situação de risco, que é o possível transbordamento do líquido no tanque superior, pois atingiu o nível máximo para a operação em segurança.

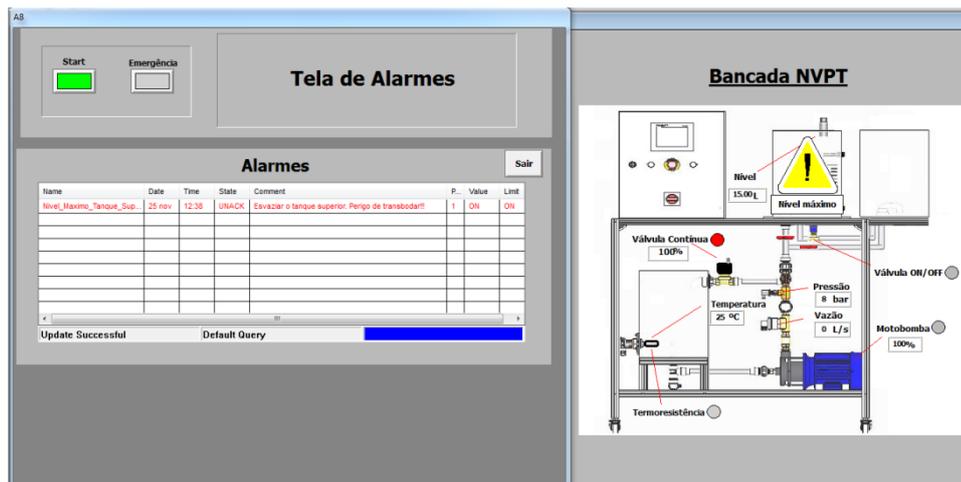
Figura 79 - Supervisório operando no modo manual.



Fonte: (Autor).

Em todas as telas de operação, no modo manual e automático, na parte superior está as opções gerais que permitem iniciar todos os processos da bancada através do botão start e colocar a operação dos processos no modo de emergência, além de acessar as telas de modo manual, automático e a tela de alarme. No caso da figura acima, o usuário tem fácil acesso a tela de alarme, na parte superior da tela, para melhor entendimento da sinalização de alarme ocorrida e possíveis soluções.

Figura 80 - Tela de alarme com sinalização de alerta.



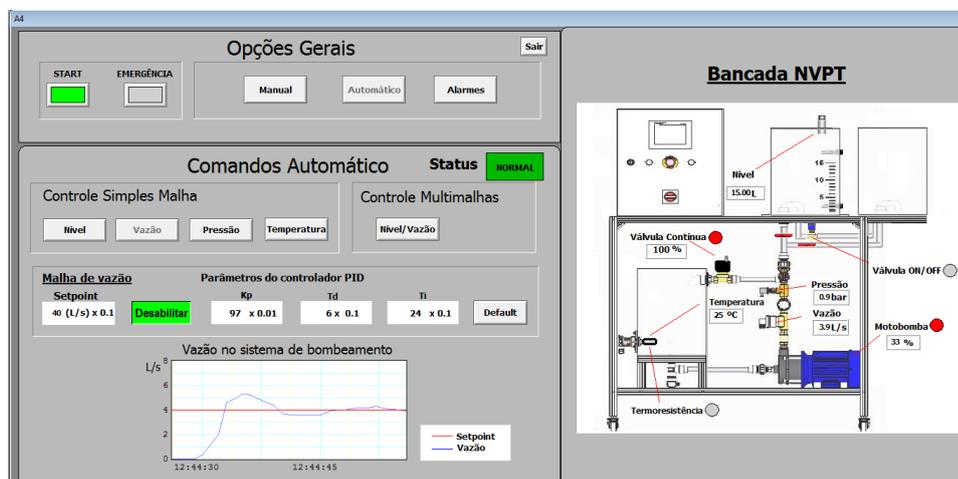
Fonte: (Autor).

O controle automático da malhas de nível, vazão e pressão do supervisório permitem que os possíveis usuários aplique o valor desejado (setpoint) e os valores dos parâmetros do

controlador PID, possibilitando a avaliação do comportamento do sistema através de gráficos para os diferentes tipos de controladores PID projetados. A utilização dessas telas aplicado ao ramo acadêmico, possibilitaria o melhor aprendizado dos alunos em disciplinas como automação e controle I, II e III, entre outras disciplinas, onde se estuda o projeto dos controladores PID e o comportamento de sistemas de controle em malha fechada.

A figura 81, mostra o controle simples malha fechada da variável de vazão habilitada, selecionado o setpoint de 4 litros por segundo e os parâmetros do controlador predefinido pelo projeto. Nela, podem ser visualizadas a resposta temporal de vazão e o valor desejado pelo usuário no gráfico na parte inferior da tela.

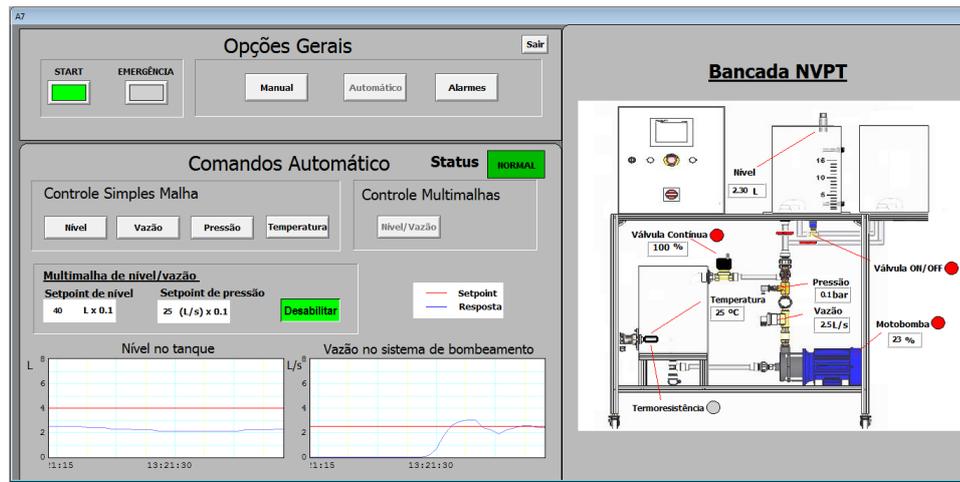
Figura 81 - Controle simples malha fechada da variável de vazão.



Fonte: (Autor).

A tela para o controle multimalha das variáveis de nível e vazão em execução pode ser vista na figura 82. A aplicação do controle multimalhas na bancada NVPT torna o processo mais complexo, como encontrado nas indústrias, onde um processo ou parte dele pode depender de uma ou mais variáveis, as quais precisam ser controladas.

Figura 82 - Controle multimalha das variáveis de nível e vazão.



Fonte: (Autor).

A bancada NVPT possui uma interface humano máquina local presente no seu painel de controle. No entanto, devido ao baixo poder de pressamento do dispositivo no qual é implementado esse IHM, a mesma não disponibiliza os gráficos dos controle simples malha de vazão e pressão pelo fato do tempo de resposta das mesmas ser muito elevado. O sistema apresenta os gráficos de nível e temperatura, pois as mesmas variam lentamente nas malhas de controle.

No IHM local podem ser realizados os controles simples malha fechada das variáveis de nível, vazão e pressão, mas apesar de possibilitar o usuário aplicar os valores desejados e os parâmetros do controlador PID das mesmas, não permitem a avaliação das respostas correspondentes a cada malha, pela ausência dos gráficos de vazão e pressão, e de não disponibilizarem os gráficos de nível e temperatura na seção de controle automático no IHM, já que só podem ser visualizados simultaneamente na seção de monitoramento, o que não é muito conveniente para estudo das malhas. O IHM desenvolvido soluciona essas problemática, como apresentado, e acrescenta a possibilidade de controle multimalha das variáveis de nível e vazão.

6 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste projeto foi o desenvolvimento e implementação de um sistema de supervisão inteligente que permita o controle simples malha e o controle multimalhas na bancada NVPT para possíveis utilizações em aulas práticas. Mas, para sua conclusão, deveriam ser realizados os ajustes das malhas de vazão e pressão, configuradas em simples malhas fechadas, cuja as respostas não correspondiam ao valor desejado pelo usuário.

Os ajustes das malhas de vazão e pressão levaram ao desenvolvimento de condicionadores de sinais, ou seja, filtros para a eliminação de ruídos presentes no processo da bancada; a obtenção dos modelos matemáticos (funções de transferências) correspondentes as malhas de vazão e pressão, e o projeto dos controladores PID das mesmas. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, pode-se avaliar que os ajustes das malhas de vazão e pressão tiveram bons resultados, melhorando o desempenho da bancada.

Para que o controle multimalha das variáveis de nível e vazão fosse possível, foi desenvolvido um algoritmo fuzzy.

O algoritmo fuzzy foi desenvolvido no software *Matlab* e integrado ao supervisorio, posteriormente. Este, possibilitou que as duas variáveis de controle, nível e vazão, fossem controladas simultaneamente, apesar da forte interação existentes entre as mesmas.

O último passo realizado no projeto foi o desenvolvimento da interface humano máquina (IHM) remota que permita o controle e monitoramento dos processos da bancada por meio de um computador. O supervisorio desenvolvido no software *Intouch* possui telas gráficas otimizadas e de fácil uso, de forma a se assemelhar aos supervisorios industriais, onde o operador humano deve entender o processo da melhor forma, tendo acesso e controle a maior quantidade de variáveis possíveis do processo numa tela. As vantagens deste supervisorio com o da IHM local são muito importantes na automação industrial.

O supervisorio desenvolvido aplicado ao ambiente acadêmico possibilita a análise do comportamento de sistemas de controle em malhas fechadas e sistemas de controle multimalha, pois permite a visualização das respostas temporais das malhas de nível, vazão e pressão para diferentes parâmetros dos controladores PID, além de realizar o controle multimalha das variáveis de nível e vazão, resultado que torna o processo mais complexo, como aos encontrados nas indústrias, onde às vezes é necessário o controle simultâneo de mais de uma variável. Portanto, o projeto concluído atendeu aos objetivos centrais propostos.

6.1 Dificuldades encontradas

Encontrou-se dificuldades na comunicação entre o software *Matlab* e o CLP da bancada para realização da identificação experimental, assim como a comunicação do software *Intouch*, com a aplicação do supervisor desenvolvido, ao CLP para envio e recebimentos dos dados do processo. Isso ocorreu devido a falta de experiência inicial com os softwares envolvidos com respeito aos protocolos de comunicação e os meios para realizá-los.

Na construção do algoritmo fuzzy, determinar as variáveis de entradas e saídas, assim como suas funções de pertinências e as regras de controle foram uma das maiores dificuldades, devido a esses fatores serem determinados pela experiência do projetista, com respeito ao comportamento do sistema a controlar.

6.2 Trabalhos futuros

Nesta seção são apresentadas propostas de trabalhos futuros, visando melhorias para as funcionalidades da bancada NVPT, integrando com o trabalho realizado neste projeto.

É necessário adicionar um sensor de limite no primeiro reservatório superior dos tanques em série, indicando nível máximo do mesmo, pois é utilizado no controle multimalha das variáveis de nível e vazão. Caso o primeiro tanque encha rapidamente, ocorre o risco de transbordar. Portanto, o sensor que indique nível máximo deve ser adicionado e inserido nas funcionalidades de alarme do sistema supervisorio, gerando mais segurança no trabalho da bancada.

O algoritmo fuzzy foi implementado no *Matlab*, mas um trabalho futuro seria implementá-lo diretamente no supervisorio, utilizando a programação que o software *Intouch* disponibiliza para a construção de suas telas e aplicação do supervisorio, essa programação é própria do software, denominada *Intouch script*.

A substituição da válvula de controle contínuo por uma mais rápida permitiria uma redução do tempo de estabilização do sistema multimalha, assim como a substituição do sensor de pressão por outro de maior qualidade permitiria uma melhor estabilização desta simples malha e iniciar estudos para aplicar um controle multimalha nível-pressão, similar ao nível-vazão implementado neste trabalho.

Também poderia se substituir o sistema de aquecimento por outro variável ou ajustar um controle por modulação da duração do pulso para aplicar um controle PID na malha de

temperatura e iniciar estudos de aplicação de controle multimalha com três variáveis simultâneas.

Uma proposta a ser considerada consiste em desenvolver metodologias que permitam o controle e monitoramento dos processos da bancada de modo remoto via internet para a coleta, gerenciamento e análise dos dados do processo, aumentando assim, a interação e a comunicação dos usuários com o processo a controlar.

7 REFERÊNCIAS

BARROS, Thiago Medeiros. **Supervisório inteligente de processos na indústria do petróleo e gás: aplicação em uma coluna de destilação simulada integrada a instrumentação real**. Dissertação (Mestrado) —Universidade Federal do Rio Grande do Norte: 2012.

BRUCE, Alcimara Libório. **Melhorias na dinâmica da bancada nível vazão pressão temperatura**. Monografia apresentada como pré-requisito para conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2015.

CARVALHO, Adelson Siqueira; SILVA, Ronald Coutinho da; NASCIMENTO, Dênis Barbosa do. **Sistema de Comunicação OPC para uma Coluna de Destilação Piloto**. 2015. Disponível em:

<http://www.w.w.aedb.br/seget/artigos08/326_Sistema%20de%20Comunicacao%20OPC%20para%20uma%20Coluna%20de%20Destilacao%20Piloto.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2016.

CASTRUCCI, Plínio de Lauro; BITTAR, Anselmo; SALES; Roberto Moura. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CHAPMAN, Stephen J. **Programação em Matlab para engenheiros**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003

GOMIDE, Fernando A. C.; GUDWIN, Ricardo R.; TANSCHKEIT, Ricardo. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2015.

GROOVER, Mikell. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

LIMA, F. de S.; CORDEIRO, L. C.; SOUZA; R. C. R. **Sistema de Monitoramento a Distância para Unidade de Célula a Combustível**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 8., 2012. Curitiba.

FICHA de produto OsiSense XX XX930A1A1M12. [S.l.].

MANUAL Burket fluid control systems flowmeter for continuous flow measurement. [S.l.].

MANUAL da soft Starter. [S.l.].

MANUAL de Software TwidoSuite. [S.l.].

MANUAL de Utilização Kit NVPT. [S.l.].

OLIVEIRA, Fabrício Guimarães de. **Sistema de controle tolerante a falhas baseado em lógica difusa aplicada ao controle de nível de líquidos em dois reservatórios**. Monografia

apresentada como pré-requisito para conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2015.

RANIERI, Fernando. **Sistema supervisorio de parâmetros de máquinas elétricas via TCP/IP e painel eletrônico de mensagens**. Dissertação (Mestrado) —Universidade de São Paulo (USP). Escola de Engenharia de São Carlos São Carlos: 2007.

RIGNEL, Diego Gabriel de Sousa; CHENCI, Gabriel Pupin; LUCAS, Carlos Alberto. **Uma introdução a lógica fuzzy**. 2015. Disponível em:

<http://www.logicafuzzy.com.br/wp-content/uploads/2013/04/uma_introducao_a_logica_fuzzy.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2011.

SILVA, Ana Paula Gonçalves da; Salvador, Marcelo. **O que são sistemas supervisórios?**. 2005. Disponível em:

<<http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/oQueSaoSistemasSupervisorios.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

SILVA, Renato Afonso Cota. **Inteligência artificial aplicada à ambientes de Engenharia de Software: Uma visão geral**. Universidade Federal de Viçosa, 2005.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DAS TAGS

Tabela 5 – Lista de Tags utilizadas.

Variáveis do Supervisório (TAG's)	Tipo de Variável	Descrição
BombaManual	I/O Discreta	Aciona a motobomba no modo manual
Emergencia	I/O Discreta	Aciona o estado de emergência
GanhoNivel	I/O Real	Ganho do controlador PID da malha de nível
GanhoPressao	I/O Real	Ganho do controlador PID da malha de pressão
GanhoVazao	I/O Real	Ganho do controlador PID da malha de vazão
HabContNivel	I/O Discreta	Habilita o controle de nível no estado automático
HabContPressao	I/O Discreta	Habilita o controle de pressão no estado automático
HabControlFuzzy	I/O Discreta	Habilita o controle do sistema multimalha das malhas de nível e vazão no estado automático
HabContTemperatura	I/O Discreta	Habilita o controle de temperatura no estado automático
HabContVazao	I/O Discreta	Habilita o controle de vazão no estado automático
HisteTemperatura	I/O Real	Valor de entrada da histerese no controle ON/OFF da temperatura no estado automático
ManuAquecedor	I/O Discreta	Aciona a resistência no modo manual
Nivel	I/O Real	Valor de nível medido pelo sensor no último tanque superior em série
NivelMaxTq2	I/O Discreta	Representa o nível máximo do tanque superior atingido, lido pelo sensor de limite do tanque
NivelMinTq1	I/O Discreta	Representa o nível mínimo do tanque inferior atingido, lido pelo sensor de limite do tanque
NivelMinTq2	I/O Discreta	Representa o nível mínimo do tanque superior atingido, lido pelo sensor de limite do tanque
Pressao	I/O Real	Valor de pressão medido pelo sensor no sistema de bombeamento
SelModo	I/O Discreta	Representa o modo manual quando o valor é zero e automático quando 1
SetNivel	I/O Real	Valor de setpoint da malha de nível, digitado pelo usuário
SetPressao	I/O Real	Valor de setpoint da malha de pressão, digitado pelo usuário
SetTemperatura	I/O Real	Valor de setpoint da malha de temperatura no controle ON/OFF, digitado pelo usuário
Setvazao	I/O Real	Valor de setpoint da malha de vazão, digitado pelo usuário
SetVazaoInicialF	I/O Real	Valor de setpoint do controle multimalha da vazão, digitado pelo usuário
Start	I/O Discreta	Habilita as operações realizadas nos modos manual e automático
TdNivel	I/O Real	Tempo derivativo do controlador PID da malha de nível
TdPressao	I/O Real	Tempo derivativo do controlador PID da malha de pressão
TdVazao	I/O Real	Tempo derivativo do controlador PID da malha de vazão
Temperatura	I/O Real	Valor de temperatura do líquido dos reservatórios inferiores medida pelo sensor
TiNivel	I/O Real	Tempo integrativo do controlador PID da malha de nível
TiPressao	I/O Real	Tempo integrativo do controlador PID da malha de pressão
TiVazao	I/O Real	Tempo integrativo do controlador PID da malha de vazão
ValContManual	I/O Discreta	Habilita o acionamento manual da válvula de atuação contínua
ValDisManual	I/O Discreta	Habilita o acionamento manual da válvula discreta
Vazao	I/O Real	Valor de vazão no sistema de bombeamento inferiores medida pelo sensor

Fonte: (Autor).

APÊNDICE B – REGRAS DO CONTROLADOR FUZZY

Tabela 6 – Regras do Controlador Fuzzy (Parte 1).

If	AND	AND	AND	THEN	
SetNível	ValorNível	ValorVazão	SetVazão	AberturaVálvula	
SetMB	NívelMB	VazãoB	SetMB	AberturaMB	SetVazãoMB
SetMB	NívelMB	VazãoB	SetB	AberturaMB	SetVazãoB
SetMB	NívelMB	VazãoB	SetM	AberturaA	SetVazãoM
SetMB	NívelMB	VazãoB	SetA	AberturaA	SetVazãoA
SetMB	NívelMB	VazãoB	SetMA	AberturaMA	SetVazãoA
SetMB	NívelMB	VazãoM	SetMB	AberturaA	SetVazãoMB
SetMB	NívelMB	VazãoM	SetB	AberturaA	SetVazãoB
SetMB	NívelMB	VazãoM	SetM	AberturaA	SetVazãoM
SetMB	NívelMB	VazãoM	SetA	AberturaMA	SetVazãoA
SetMB	NívelMB	VazãoM	SetMA	AberturaMA	SetVazãoMA
SetMB	NívelMB	VazãoA	SetMB	AberturaM	SetVazãoMB
SetMB	NívelMB	VazãoA	SetB	AberturaM	SetVazãoB
SetMB	NívelMB	VazãoA	SetM	AberturaA	SetVazãoM
SetMB	NívelMB	VazãoA	SetA	AberturaMA	SetVazãoA
SetMB	NívelMB	VazãoA	SetMA	AberturaMA	SetVazãoMA
SetMB	NívelB	VazãoB	SetMB	AberturaMA	SetVazãoMB
SetMB	NívelB	VazãoB	SetB	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoB	SetM	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoB	SetA	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoB	SetMA	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoM	SetMB	AberturaMA	SetVazãoMB
SetMB	NívelB	VazãoM	SetB	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoM	SetM	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoM	SetA	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoM	SetMA	AberturaMA	SetVazãoB
SetMB	NívelB	VazãoA	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetMB	NívelM	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetMB	NívelA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetMB	NívelMA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetB	NívelMB	VazãoB	Todas as combinações	AberturaB	Corresponde ao SetVazão
SetB	NívelMB	VazãoM	Todas as combinações	AberturaM	Corresponde ao SetVazão

Fonte: (Autor).

Tabela 7 – Regras do Controlador Fuzzy (Parte 2).

If	AND	AND	AND	THEN	
SetNível	ValorNível	ValorVazão	SetVazão	SetFinalVazão	
SetB	NívelMB	VazãoA	Todas as combinações	AberturaA	Corresponde ao SetVazão
SetB	NívelB	VazãoB	Todas as combinações	AberturaB	Corresponde ao SetVazão
SetB	NívelB	VazãoM	SetMB	AberturaM	SetVazãoMB
SetB	NívelB	VazãoM	SetB	AberturaM	SetVazãoB
SetB	NívelB	VazãoM	SetM	AberturaM	SetVazãoM
SetB	NívelB	VazãoM	SetA	AberturaM	SetVazãoA
SetB	NívelB	VazãoM	SetMA	AberturaA	SetVazãoA
SetB	NívelB	VazãoA	SetMB	AberturaMA	SetVazãoMB
SetB	NívelB	VazãoA	SetB	AberturaMA	SetVazãoB
SetB	NívelB	VazãoA	SetM	AberturaMA	SetVazãoM
SetB	NívelB	VazãoA	SetA	AberturaMA	SetVazãoM
SetB	NívelB	VazãoA	SetMA	AberturaMA	SetVazãoM
SetB	NívelM	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetB	NívelA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetB	NívelMA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetM	NívelMB	VazãoB	Todas as combinações	AberturaMB	Corresponde ao SetVazão
SetM	NívelMB	VazãoM	Todas as combinações	AberturaMB	Corresponde ao SetVazão
SetM	NívelMB	VazãoA	Todas as combinações	AberturaB	Corresponde ao SetVazão
SetM	NívelB	VazãoB	Todas as combinações	AberturaB	Corresponde ao SetVazão
SetM	NívelB	VazãoM	SetMB	AberturaB	SetMB
SetM	NívelB	VazãoM	SetB	AberturaB	SetB
SetM	NívelB	VazãoM	SetM	AberturaM	SetM
SetM	NívelB	VazãoM	SetA	AberturaM	SetA
SetM	NívelB	VazãoM	SetMA	AberturaM	SetMA
SetM	NívelB	VazãoA	Todas as combinações	AberturaA	Corresponde ao SetVazão
SetM	NívelM	VazãoA	SetMB	AberturaMA	SetVazãoMB
SetM	NívelM	VazãoA	SetB	AberturaMA	SetVazãoB
SetM	NívelM	VazãoA	SetM	AberturaMA	SetVazãoM
SetM	NívelM	VazãoA	SetMA	AberturaMA	SetVazãoM
SetM	NívelA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetM	NívelMA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB
SetA	NívelMB	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMB	Corresponde ao SetVazão
SetA	NívelB	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaB	Corresponde ao SetVazão
SetA	NívelM	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaB	Corresponde ao SetVazão
SetA	NívelA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaA	Corresponde ao SetVazão
SetA	NívelMA	Todas as combinações	Todas as combinações	AberturaMA	SetVazãoMB

Fonte: (Autor).