



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

Alcimara Libório Bruce

**MELHORIAS NA DINÂMICA DA
BANCADA NÍVEL VAZÃO PRESSÃO
TEMPERATURA**

Manaus
2015

Alcimara Libório Bruce

**MELHORIAS NA DINÂMICA DA
BANCADA NÍVEL VAZÃO PRESSÃO
TEMPERATURA**

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.

Orientador Dr. Israel Francisco Benítez Pina

Manaus
2015

Alcimara Libório Bruce

MELHORIAS NA DINÂMICA DA BANCADA NÍVEL VAZÃO PRESSÃO TEMPERATURA

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.

Aprovado em 20 de junho de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Israel Francisco Benítez Pina
Orientador

Dr. Walter Andrés Vermehren
Valenzuela
Presidente da Banca

MSc Cleto Leal
Convidado 1

Dr. Daniel Guzman del Rio
Convidado 2

Manaus
2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado saúde e força de vontade para que eu pudesse ter chegado ao presente momento, a toda a minha família por ter acreditado neste sonho, que em algumas situações acreditaram mais do que eu mesma, em especial a minha querida mãe Auxiliadora Bruce que lavou e passou minhas fardas enquanto eu estava com meu pai Walther Afonso e meu orientador Prof. Benítez na universidade durante os finais de semana para a construção deste projeto e elaboração desta monografia. Obrigada aos mestres que tive nesta graduação e em especial ao Dr Benitez pela orientação, paciência e todos os sábados, domingos e feriados que estivemos juntos no laboratório de Automação III da EST-UEA aos colegas de graduação que recorri quando me deparei com dúvidas. E por último àqueles que não acreditaram que aqui eu chegaria. Muito obrigada a todos!

*"Eu prefiro conhecer um pouco de cada coisa,
a ser muito bom em uma única;" (Israel Benítez)*

RESUMO

A engenharia de controle e automação tem como uma de suas finalidades estudar processos e assim desenvolver controles para que cada vez mais possam melhorar a eficiência dos processos. Este trabalho visa o estudo da Bancada Nível Vazão Pressão Temperatura, e propõe possíveis melhorias dentro das especificações do CLP utilizado na mesma, como transformar a estrutura de simples malhas de controle em sistemas de multi-malhas, podendo também ter a possibilidade de escolha de sistema de primeira ordem ou de segunda ordem fazendo alternância das válvulas de mecanismos em esferas estrategicamente instalados, avaliando as diferentes interações entre os sistemas e criando bases para testes em diferentes algoritmos de controle, para um aperfeiçoamento da mesma.

Para que fosse possível o controle manual e válvula de controle contínuo foram realizados estudos dos esquemas elétricos para instalar novas botoeiras e um novo software foi desenvolvido em Ladder para que melhor atendesse as novas condições da Bancada.

Com essas alterações físicas e o software transferido para o CLP, foram realizados testes e utilizando-se dos métodos de Strejc para se encontrar a função de transferência do sistema e o segundo método de Ziegler-Nichols para desenvolver a sintonia do sistema, controladores PID, constatou-se que a malha de nível está trabalhar de forma independente da malha de controle de vazão ou pressão e mesmo sofrendo a malha de vazão ou pressão causando um distúrbio no sistema de nível o controle PID é suficiente para estabilizar o sistema. Ao final do projeto a Bancada NVPT está em condições de realizar vários experimentos relacionados as disciplinas de controle atendendo as necessidades dos graduandos de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas de experimentos práticos.

Palavras-chaves: Instrumentação Industrial. Controle Automático de Multimalhas. Programação Ladder de CLPs

ABSTRACT

The control engineering and automation has as one of its purposes to study processes and thus develop controls to which increasingly can improve process efficiency. This paper is to study the level workbench Flow Pressure Temperature, and proposes improvements possible within the PLC used at the same specifications as to transform simple mesh structure control in the multi-knitting systems may also be able to select system first order or second order making alternation of mechanisms valves installed in strategically spheres, evaluating the different interactions between systems and creating bases for testing in different control algorithms, for an improvement of the same.

To make it possible manual control and continuous control valve were studies of electrical schematics to install new buttonholes and a new software was developed in Ladder to better atendense the new conditions countertop.

With these physical changes and software downloaded to the PLC, testing and using the Strejc methods were conducted to find the system transfer function and the second method to develop Ziegler-Nichols tuning system, PID controllers, It found that the level of mesh is working independently of the mesh flow control or pressure and suffering the same mesh or pressure causing a flow disturbance level PID control system is sufficient to estabilizaar the system.

At the end of the project NVPT Workbench is able to perform several experiments related disciplines control meeting the needs of the students of Control Engineering and Automation of the Universidade do Estado do Amazonas practical experiments.

Key-words:Industrial instrumentation. Automatic control MIMO. Ladder programming PLC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Determinação de T_L e T_A para aplicação no método de Strejc	20
Figura 2 – Índices de desempenho	22
Figura 3 – Curva de resposta em S	23
Figura 4 – Visão geral da Bancada	28
Figura 5 – CLP TWDLCAA40DRF	30
Figura 6 – Módulo auxiliar	31
Figura 7 – IHM HMISTU655	31
Figura 8 – Motobomba	32
Figura 9 – Vôo do Morcego	33
Figura 10 – Posicionamento do Emissor e Receptor	33
Figura 11 – Comprimento da onda após ser refletido	34
Figura 12 – Diagrama em blocos do funcionamento do sensor	34
Figura 13 – Sensores ultrassônicos usados na detecção de falhas	35
Figura 14 – Sensor XX930A1A1M12	35
Figura 15 – Sensor de vazão	36
Figura 16 – Sensor de pressão	37
Figura 17 – Curva resistência versus temperatura	39
Figura 18 – Atuador de Válvula	40
Figura 19 – Válvula e Atuador	40
Figura 20 – Válvula com mecanismo em esfera	41
Figura 21 – Configuração sistema de primeira ordem	41
Figura 22 – Configuração sistema de segunda ordem	42
Figura 23 – Configuração primeira ordem paralelo	42
Figura 24 – Os tanques superiores	43
Figura 25 – Reservatórios inferiores	43
Figura 26 – Novo design da Bancada NVPT	44
Figura 27 – Novos equipamentos instalados na Bancada NVPT	44
Figura 28 – Segundo tanque inferior	45
Figura 29 – <i>Twido suite</i>	46
Figura 30 – Início do controle ON-OFF de temperatura	46
Figura 31 – Controle automático on-off com histerese	47
Figura 32 – Controle manual de nível	47
Figura 33 – Ativa PID para controle de nível e checagem de nível	48
Figura 34 – Checagem de limites de nível no tanque superior	48
Figura 35 – Acionamento Manual automático da válvula contínua	48
Figura 36 – Acionamento manual automático dos atuadores binários	49

Figura 37 – Gráfico do teste de controle de nível	52
Figura 38 – Gráfico do lugar da raízes	53
Figura 39 – Diagrama em Blocos	54
Figura 40 – Resposta do sistema	54
Figura 41 – Oscilações mantidas	55
Figura 42 – Resposta do controle Proporcional	56
Figura 43 – Resposta ao controlador PI	56
Figura 44 – Resposta do controle PID	57
Figura 45 – Identificação experimental das mudanças de nível segundo variações na velocidade da bomba	58
Figura 46 – Diagrama em Blocos do sistema do sistema com distúrbio	59
Figura 47 – Resposta do Teste experimental	59
Figura 48 – Gráfico de lugar das raízes do teste 2	60
Figura 49 – Circuito elétrico da válvula de acionamento	63
Figura 50 – Circuito elétrico da bancada NVPT	64
Figura 51 – Inicialização	66
Figura 52 – Inicialização	67
Figura 53 – Controle de ON-OFF de temperatura parte 1	67
Figura 54 – Controle de ON-OFF de temperatura parte 2	67
Figura 55 – Controle de nível parte 1	68
Figura 56 – Controle de nível parte 2	68
Figura 57 – Controle de nível parte 3	68
Figura 58 – Controle de pressão parte 1	68
Figura 59 – Controle de pressão parte 2	69
Figura 60 – Checagem de vazão de Vazão parte 1	69
Figura 61 – Checagem de vazão de Vazão parte 2	69
Figura 62 – Checagem de vazão de Vazão parte 3	69
Figura 64 – Acionamento automático parte 1	70
Figura 63 – Checagem de vazão de Vazão parte 4	70
Figura 65 – Acionamento automático parte 2	70
Figura 66 – Acionamento automático parte 3	71
Figura 67 – Acionamento automático atuadores parte 1	71
Figura 68 – Acionamento automático atuadores parte 2	71
Figura 69 – Acionamento manual automático	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de polos múltiplos	20
Tabela 2 – Primeiro método de Ziegler Nichols	24
Tabela 3 – Segundo método de Ziegler Nichols	24
Tabela 4 – Entradas	65
Tabela 5 – Saída digitais	65
Tabela 6 – Tabela de entradas analógicas	65
Tabela 7 – Saídas analógicas	65
Tabela 8 – Marcas internas	66
Tabela 9 – Características do módulo auxiliar TM2AMM3HT	73
Tabela 10 – Especificações do HMI	74
Tabela 11 – Especificações da motobomba	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Formulação do problema	12
1.2	Motivação	13
1.3	Objetivos	13
1.4	Metodologia	14
1.5	Organização do trabalho	14
2	TRABALHOS RELACIONADOS	15
2.1	Implantação do controlador preditivo multivariável DMC em uma planta piloto	15
2.2	Controle de nível em um tanque sujeito a perturbações e mu- danças do valor de referência	16
2.3	Implementação de uma ferramenta para auxílio à sintonia de controladores PID	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Resposta dinâmica dos sistemas lineares	19
3.2	Método de Strejc	19
3.3	Estabilidade	20
3.4	Índices de desempenho	21
3.5	Regras de sintonia de Ziegler-Nichols para controle PID	22
3.5.1	Primeiro Método	23
3.5.2	Segundo Método	24
3.6	Controlador Lógico Programável	25
3.6.1	Introdução	25
3.6.2	Ciclo de varredura de um CLP	25
3.6.3	Componentes de um CLP	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Bancada NVPT	28
4.2	Esquemas elétricos	30
4.3	CLP, módulo auxiliar e IHM	30
4.4	Motobomba	31
4.5	Sensores	32
4.5.1	Sensores ultrassônicos	32
4.5.2	Vazão	36

4.5.3	Pressão	37
4.5.4	Temperatura	37
4.5.5	Válvulas	39
4.6	Tanque	42
4.7	Novo design da Bancada NVPT	43
4.8	Software	45
4.8.1	Ladder	45
4.8.2	TWIDO SUITE	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	Controle dos sistemas	50
5.2	Testes	51
6	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – ESQUEMAS ELÉTRICOS DA BANCADA NVPT	63
	APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO CLP DA BANCADA NVPT	65
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPO- NENTES	73

1 INTRODUÇÃO

Desde o início dos tempos o homem vem tentando fazer com que seus utensílios e ferramentas substituam-no no trabalho braçal, sendo seu maior sonho criar um autômato que realize todas as suas funções operárias. Para isso com o decorrer dos anos o homem tem realizado grandes avanços na área de Controle e Automação.

O termo controle, palavra de origem francesa, denota ato ou poder de exercer domínio, fiscalizar, supervisionar, manter o equilíbrio. Na escala tecnológica assume papel primordial e decisivo dentre os modelos e processos existentes, sejam eles simples, modestos, robustos ou de extrema complexidade no plano de ações.

O termo Automação num processo produtivo, tem a finalidade de facilitar esses processos, otimizando-os para que produzam com menor custo, maior quantidade, menor tempo, maior qualidade e com menor esforço ou intervenção humana.

Quando se fala em Controle e Automação fala-se em estudos de sistemas para um melhor incremento de sua eficiência, esta que tem sido uma busca constante de engenheiros desta área espalhados pelo mundo todo. Não diferentemente, este projeto relata o funcionamento da Bancada NVPT que comporta os sistemas de Nível, Vazão, Pressão e Temperatura, construída com a finalidade acadêmica e científica, na área de Engenharia de Controle e Automação para que nela fossem simulados estudos desses sistemas.

A Bancada NVPT adquirida pela Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, desenvolvida pela *Automatus®* é composta de CLP *Shneider Electric®* programado pelo software *Twido Suite®*, composta também por atuadores, válvulas, reservatórios de água, motobomba e sensores.

Após terem sido feitas as análises do funcionamento da Bancada NVPT pode-se apontar algumas limitações para os estudos de controle e automação, recorrendo aos esquemas elétricos da maquete foi possível propor soluções para as mesmas e assim abrir um leque de possibilidades para trabalhos futuros com algoritmos inteligentes como em redes neurais e *Fuzzy*.

O objetivo deste projeto é fazer melhorias na ordem dinâmica ao processo da maquete e testar novos programas de identificação e controle de multi-malhas e assim obter um melhor aproveitamento da Bancada NVPT para os estudos de controle e automação no curso de Engenharia de Controle e Automação.

1.1 Formulação do problema

A Bancada NVPT foi adquirida pela Universidade do Estado do Amazonas com o intuito acadêmico e científico para o curso Engenharia de Controle e Automação, para

que nela fossem realizados ensaios de controle utilizando os conhecimentos em Ladder e Sistemas de primeira ordem de controle.

O programa em Ladder da bancada veio no formato de simples malha fechada o que impossibilita alterações no seu funcionamento.

Fazer simulações somente para sistemas de primeira ordem é um fator limitante da bancada. Outros pontos importantes são a Bancada NVPT não possuir controle manual apenas automático. As malhas de nível, vazão e pressão utilizam o mesmo atuador impossibilitando assim o controle de multi-malhas.

Também é preciso uma nova identificação experimental das malhas de controle e de sua interação para calcular o melhor ajuste das malhas para trabalho em duas variantes simples e multi-malhas.

Visando essas necessidades da Bancada NVPT, são necessárias mudanças físicas e que um novo programa, para controle da Bancada, seja elaborado e inserido na mesma.

1.2 Motivação

Com as alterações físicas realizadas para a melhoria da ordem dinâmica e separação das malhas do processo será aberto um leque de possibilidades para trabalhos futuros com redes Neurais e Fuzzy. Desta forma se muda a abordagem de operação da Bancada NVPT para uma instalação de laboratório para testes de diferentes programas e algoritmos de controle local e de supervisão industrial que permitam o ensino e pesquisa dos estudantes e professores da especialidade.

A Bancada NVPT será capaz de realizar ensaios nas disciplinas do curso de controle e automação como Métodos Experimentais de Sistemas Dinâmicos, Instrumentação Industrial, Controle e Automação 1 e 2, Inteligência Artificial, Sistemas Supervisórios, Automação e Controle de Processos em Engenharia de Controle e Automação dentre outras. Além disso podem-se ministrar aulas práticas de disciplinas afins de outras engenharias e da pós-graduação da EST-UEA. Na parte de pesquisa se podem testar diferentes programas de CLP's e de Sistemas Supervisórios com algoritmos tradicionais e avançados relacionados com automação industrial de nível, vazão, pressão e temperatura de forma independente e inter-relacionada.

1.3 Objetivos

O objetivo central desta monografia é melhorar a Bancada NVPT para que ela possa realizar aulas práticas de diversas disciplinas no laboratório de Automação III, acrescentando a ordem dinâmica ao processo da maquete e reestruturando as malhas de controle para assim testar novos programas de identificação e controle de multi-malhas. Para que

este objetivo seja alcançado é necessário separar a malha de nível das malhas de vazão e pressão, fazer incremento de segunda ordem ao sistema e implementar o controle manual.

1.4 Metodologia

Para poder dar início ao projeto foi necessário a realização de pesquisas no meio científico, temas relacionados com o tema proposto, relacionar o presente trabalho com os já existentes considerando os pontos em comum e os pontos que os diferenciam. O referencial teórico desta monografia tem como os temas principais sintonia com controladores PID, Controle automático de multi-malhas e programação em linguagem Ladder de CLP's.

O próximo passo foi a realização das alterações necessárias para que o objetivo desta monografia fosse alcançado. A troca da válvula de duas posições por uma válvula de controle contínuo controlados por um CLP da *Shneider Eletric*® e a elaboração de novos programas em Ladder no software *Twido Suite*®, outras alterações também se fizeram importantes, como a adição novos tanques e a instalação de novas botoeiras no painel.

Após as alterações físicas e o programa devidamente funcionando na Bancada NVPT foram realizados testes onde foi identificado a malha de nível e seu comportamento diante a distúrbio.

Os controladores PID foram implementado por meio do software *MATLAB*® e a sintonia foi realizada pelo método Ziegler-Nichols.

1.5 Organização do trabalho

- O Capítulo 1 relata a introdução deste trabalho com sua problemática, a motivação, objetivos e metodologia;
- O Capítulo 2 trata dos trabalhos relacionados expondo trabalhos com pesquisas acadêmicas que tenham relação com esta monografia e fazendo um comparativo entre os trabalhos;
- O Capítulo 3 mostra o referencial teórico da monografia, as pesquisas relacionadas com o tema;
- O Capítulo 4 tem como título “Materiais e métodos” e relata a funcionalidade dos equipamentos utilizados no projeto;
- O Capítulo 5 são os resultados e discussões onde pode se observar os resultados do projeto.
- O Capítulo 6 é a conclusão da monografia.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo serão abordados alguns trabalhos científicos que se assemelham com o tema proposto nesta monografia. Tendo como objetivo encaixá-la no contexto acadêmico científico, descrevendo assim as semelhanças e diferenças com os trabalhos já publicados.

2.1 Implantação do controlador preditivo multivariável DMC em uma planta piloto

Este trabalho é uma dissertação para obtenção de mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo, e tem como objetivo implementar o controlador preditivo multivariável DMC numa planta real e compará-lo com o PID multimalha. A aplicação prática é feita na planta piloto do IFES/Serra, onde se realiza o controle da pressão e do nível por meio da velocidade da bomba e da abertura da válvula. A modelagem do processo, o cálculo da matriz de ganhos relativos para determinar o grau de acoplamento das malhas, e a sintonia dos controladores PID multimalha são apresentados. As pré-sintonias dos controladores PID são sugeridas através do simulador que compara o desempenho de vários métodos de sintonia comumente encontrados na literatura. No DMC a pré-sintonia é sugerida através de um simulador baseado em algoritmo genético. Em ambos os casos a sintonia final é ajustada manualmente de forma a melhorar o desempenho das malhas. As respostas da planta ao degrau usando os controladores PID multimalha e DMC são comparados com e sem restrições na abertura da válvula e na velocidade da bomba. Uma interface didática, desenvolvida com o software LabVIEW®, é usada para interagir com o MATLAB® e o controlador CompactRIO, permitindo uso das funções de otimização do MATLAB® na implementação do controlador DMC.

Segundo PEREIRA (2011) o controlador DMC foi melhor que o PID tendo apenas uma pequena diferença no caso irrestrito, já para os casos de restrição especificamente para a velocidade da bomba com variações de SP de nível, mostram claramente que o desempenho usando o controlador multivariável DMC é muito superior que ao PID, isto devido ao controlador DMC multivariável manipular conjuntamente entre a bomba e a válvula para controlar a pressão e o nível o que não ocorre usando O PID, onde há somente manipulação da válvula para o controle do nível. A semelhança entre este trabalho relacionado e esta monografia é a utilização do controlador PID em plantas de controle de nível e pressão usando um degrau na entrada diferenciando na não aplicação de DMC, controlador CompactRIO. Em uma planta já conhecida com todos os equipamentos de medição e controle já instalados diferente desta monografia que foi necessário a instalação de equipamentos adicionais como a válvula contínua e o controlador CompactRio possui

um link com o MATLAB® se programado com o Simulink, o que na Bancada NVPT ainda não possui comunicação CLP- MATLAB®.

2.2 Controle de nível em um tanque sujeito a perturbações e mudanças do valor de referência

Esta monografia é de obtenção de título de Engenheiro no curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Este trabalho consiste na modelagem e implementação de um sistema de controle de nível industrial, utilizando tanto as teorias de identificação de sistemas como as de controle clássico. O sistema utilizado é composto de dois recipientes de água: o tanque superior, que é o objeto dos estudos e o tanque inferior, que é apenas um reservatório de água. Há também uma bomba hidráulica (capaz de retirar água do reservatório inferior e enviá-la para o superior), duas válvulas de controle (uma proporcional e a outra *on-off*), um orifício de saída com uma mangueira reguladora e dois sensores (um de nível, interligado com o tanque superior, e outro de vazão, conectado na saída da bomba). O controle do sistema é feito por meio de um controlador lógico programável (CLP) programado em linguagem Ladder e de uma placa Arduino, responsável por gerar um sinal de controle PWM para a válvula proporcional. Após a modelagem matemática e identificação do sistema, duas formas de funcionamento são propostas e alguns tipos de controladores são projetados.

Segundo o autor Faria (2013), seria interessante diminuir a saturação da válvula proporcional, aumentando a zona linear de operação do sistema. Isso pode ser feito aumentando-se o diâmetro das válvulas e orifícios de saída do tanque principal.

As semelhanças com esta monografia é a implementação de um sistema de controle de nível a utilização de válvulas proporcional tendo os componentes da sua maquete controlados por um CLP e este tendo seus comandos em programados em Ladder e utilizando o controlador PID para ajuste do sistema quando ocorrerem perturbações. Esta monografia obteve melhores resultados com o controlador PID ao incrementar um distúrbio, comparada ao do trabalho relacionado por possuir um variador de frequência que controla velocidade da bomba.

2.3 Implementação de uma ferramenta para auxílio à sintonia de controladores PID

Esta é uma dissertação para obtenção de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais.

Este trabalho possui o desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar engenheiros e operadores na sintonia de controladores PID, e são apresentados informações sobre a sua

utilização e benefícios. Para validação deste, um sistema de controle e automação piloto para testes em laboratório foi construído. Este sistema mostra-se versátil, incorporando dois problemas de controle típicos, o controle de nível em tanques acoplados e desacoplados. Seu projeto e construção são devidamente descritos, incluindo-se os componentes de instrumentação, atuação, assim como os detalhes do *hardware* utilizado para o sistema de controle, destacando-se o algoritmo implementado - o PID Incremental com Dois Graus de Liberdade (PID-I2GL). As características dos dois processos, tanques acoplados e desacoplados, são apresentadas por meio de uma modelagem baseada em leis físicas (caixa branca). Apresentam-se também os procedimentos para o levantamento da curva característica do atuador e para estimação da resistência hidráulica da válvula do sistema piloto. Resultados experimentais de modelagem e sintonia obtidos tanto no sistema piloto, assim como em uma planta industrial são apresentados a fim de validar as funcionalidades da ferramenta de aplicação desenvolvida.

Segundo o autor Michel (2010) no que se refere aos métodos de modelagem e identificação implementados no SASC-PID, pode-se dizer que as melhorias estão associadas, principalmente, ao uso mais otimizado dos mesmos, e.g., usufruindo-se da capacidade do estimador de MQRMM de estimar vários modelos simultâneos agregando-a a um critério de análise de ordem e precisão de modelos. No caso dos métodos de projeto de controladores PID, as melhorias estão associadas à implementação de outros métodos reconhecidos, como também de uma forma de correspondê-los, o PID obteve boa resposta a variação do *setpoint*, boa resposta a presença de ruído na variável controlada, boa resposta a perturbações de carga e robustez do controlador.

Este trabalho relacionado assemelha-se com a monografia na utilização de controladores PID para o ajuste no controle de nível tendo resultados satisfatórios na presença de perturbações e utilização de tanques acoplados para formação de controle de sistemas de segunda ordem e eles se diferenciam no fato do projeto atual não trabalhar de forma desacoplada, e sim mudando a configuração das ligações de acordo com a disposição das válvulas deixando os tanques em formato de ligações em paralelo ou série.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Alguns conceitos devem ser conhecidos quando se fala em controle e automação de processos:

- **Planta:** A planta pode ser uma parte do equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de maneira integrada, com o objetivo de realizar determinada operação(OGATA, 2010). Neste trabalho adota-se como planta a Bancada NVPT;
- **Variável:** Variável de controle é a grandeza ou a condição que é medida e controlada. O sinal de controle ou variável manipulada é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada. Normalmente a variável controlada é a saída do sistema (OGATA, 2010). Este projeto possui quatro variáveis: nível, vazão, temperatura e pressão, sendo a de nível a mais importante. Duas variáveis são manipuladas: vazão de entrada pela velocidade da bomba e vazão de saída pela válvula de controle contínuo;
- **Sistema:** Um sistema é a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. Dessa maneira a palavra sistema pode ser aplicada para ser empregada para se referir a sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros (OGATA, 2010). A Bancada NVPT é formada por quatro sistemas principais para o controle das quatro variáveis nível, vazão, temperatura e pressão mas também tem sistemas auxiliares de seleção de modo de operação, acionamento manual, checagem de falhas e limites de alarme entre outros;
- **Controle:** Controle estuda como agir sobre um dado sistema de modo a obter um resultado arbitrariamente especificado (OGATA, 2010). A Bancada tem três tipos de controle: manual, controle ON-OFF com histerese em temperatura e controle contínuo com algoritmo PID nas malhas de NVPT;
- **Função de transferência:** A função de transferência de um sistema é um modelo matemático que constitui um método operacional para expressar a equação diferencial que relaciona a variável de saída à variável de entrada (OGATA, 2010). Foram identificadas experimentalmente as funções de transferências que relacionam a saída de nível com as entradas das variáveis manipuladas de vazão de entrada e de saída dos tanques superiores;
- **Diagrama:** O Diagrama em Blocos de um sistema é uma representação ilustrada das funções desempenhadas por cada um dos componentes do sistema e do fluxo de sinais existente (OGATA, 2010). A ferramenta *Simulink*® foi utilizada para

elaboração do diagrama em blocos do sistema de controle para ajuste experimental do algoritmo PID;

- **Estabilidade:** Um sistema qualquer é estável se e somente se para toda e qualquer entrada limitada, a saída correspondente também for limitada (OGATA, 2010). Foi comprovado pela simulação no MATLAB® - *Simulink* que o sistema é estável com um comportamento satisfatório do amortecimento das oscilações;

3.1 Resposta dinâmica dos sistemas lineares

A resposta de um sistema linear a uma excitação qualquer consta, em geral, de duas partes: componente natural e componente forçada da resposta. Nos sistemas ditos estáveis, a resposta natural vai-se atenuando com o passar do tempo. Por isso, no caso dos sistemas estáveis, a resposta natural é habitualmente chamada de resposta transitória. A resposta forçada, ao contrário, tem caráter permanente e, em geral, apresenta-se com o padrão do sinal de entrada, para $t > 0$ (OGATA, 2010).

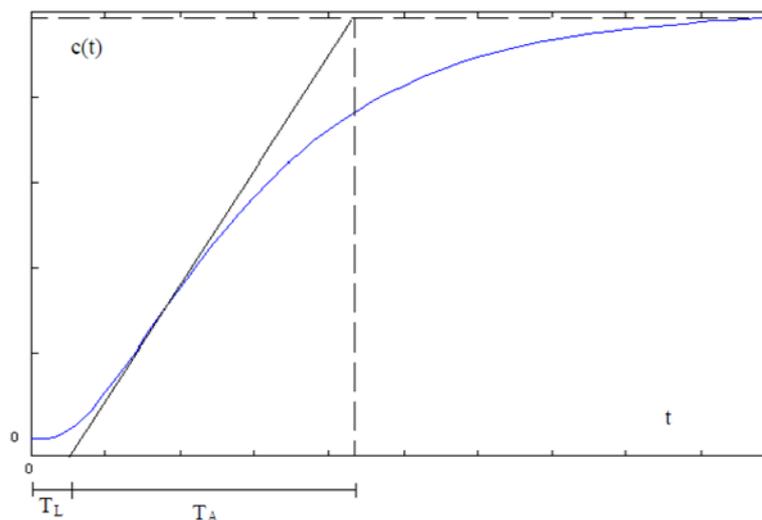
O componente forçado também é denominado resposta de regime permanente. Então, a resposta completa $Y(t)$ de um sistema estável resulta da soma de dois componentes: a resposta transitória $yTr(t)$ e a forçada $yF(t)$:

$$Y(t) = yTr(t) + yF(t) \quad (3.1)$$

3.2 Método de Strejc

O método de Strejc é utilizado para identificação de sistemas de polos múltiplos determinando os parâmetros de T_L e T_A obtidos na resposta do sistema.

Este método consiste em empregar uma linha reta sobreposta a curva do gráfico de resposta do sistema. O parâmetro T_L é obtido cortando o eixo horizontal e o valor do parâmetro T_A é obtido fazendo um corte paralelo à abcissa no ponto em que o gráfico é estável (BUENO, 2011).

Figura 1 – Determinação de T_L e T_A para aplicação no método de Strejc

Fonte: Bueno (2011)

Com os valores de T_L e T_A encontrados no gráfico mostrado na Figura 1 e por aproximação dos valores encontrados pode-se determinar o número de polos do sistema consultando a Tabela 1.

Tabela 1 – Número de polos múltiplos

Número de polos múltiplos			
n	$\frac{T_A}{\tau}$	$\frac{T_L}{\tau}$	$\frac{T_A}{T_L}$
1	3	0	0
2	2,7	0,28	0,104
3	3,7	0,8	0,22
4	4,46	1,42	0,32
5	5,12	2,1	0,41

Fonte: Métodos de Identificação

Este método amplia a identificação de sistemas de múltiplos polos, usando parâmetros de T_A e T_L obtidos no gráfico da resposta do sistema.

3.3 Estabilidade

Um sistema estável é definido como sendo um sistema com resposta limitada. Isto é se o sistema for submetido a uma excitação limitada ou a uma perturbação e a resposta for limitada em magnitude, o sistema é dito estável (OGATA, 2010).

A estabilidade relativa de um sistema pode ser definida como uma propriedade que é medida pela parte real relativa de cada raiz ou par de raízes.

Um sistema é estável, quando sujeito a uma entrada em impulso a saída tende ao valor inicial a medida que o tempo tende a infinito.

Um sistema é instável se a saída tende a infinito quando o tempo tende a infinito.

Pode-se determinar as condições de estabilidade de um sistema analisando o seu gráfico de lugar das raízes. Um sistema é considerado estável quando todos os polos de malha fechada no semiplano esquerdo do eixo imaginário s (OGATA, 2010).

3.4 Índices de desempenho

- Tempo de subida (t_r): é o intervalo de tempo em que o sinal evolui de 10% a 90% do valor final da resposta. Alguns autores adotam de 5% a 95% do valor final e em alguns casos, de 0 a 100% do valor final da resposta. Geralmente, adota-se esta última definição para o caso dos sistemas subamortecidos. Nesse caso, o tempo de subida pode ser calculado pela Equação 3.2 (MAYA, 2014):

$$t_r = \frac{\pi - \varphi}{\omega d} \quad (3.2)$$

- Tempo de atraso (t_d): é o tempo necessário para que a resposta alcance 50% do valor final pela primeira vez (MAYA, 2014).
- Instante de pico (t_p) é o tempo que decorre até o primeiro valor de pico (valor máximo) da resposta, conforme Equação 3.3 (MAYA, 2014):

$$t_p = \frac{\pi}{\omega d} \quad (3.3)$$

- Máximo sobressinal (M_p): é o máximo valor alcançado pela resposta do sistema. É geralmente apresentado em valor relativo, pode ser calculado em função do grau de amortecimento (MAYA, 2014).

$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \quad (3.4)$$

Se o valor final da resposta diferir da unidade, é habitual que se dê o máximo sobressinal, em porcentagem:

$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (3.5)$$

O máximo sobressinal pode ser calculado em função dos parâmetros α e ωd em função do grau de amortecimento ζ do sistema subamortecido:

$$M_p = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.6)$$

$$M_p = e^{\frac{-\alpha\pi}{\omega d}} \quad (3.7)$$

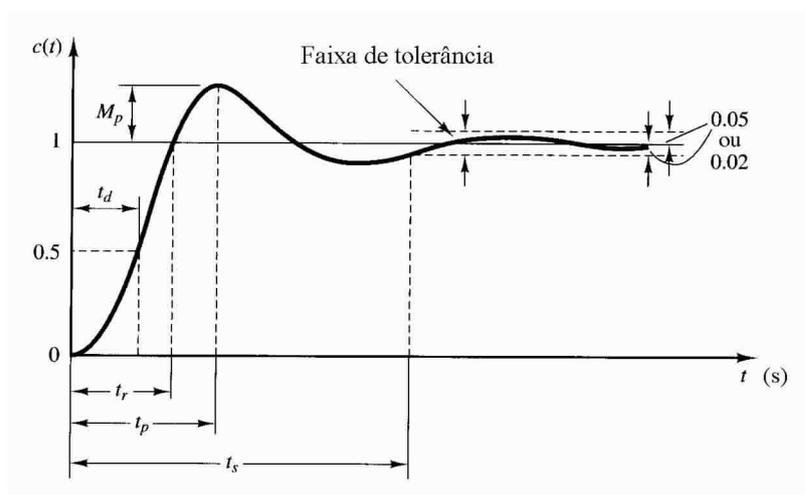
O grau de amortecimento pode também ser calculado em função de M_p :

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{(\ln M_p)^2}}} \quad (3.8)$$

- Tempo de acomodação (t_s): é o tempo necessário para que a resposta do sistema se estabilize dentro de certo percentual de seu valor final. Duas ou três percentagens de tolerância são comumente utilizadas 1% e 2% ou mesmo 5%. Para que um sistema de segunda ordem superamortecido se estabilize dentro da faixa de 2%, são necessários, aproximadamente, 4 constantes de tempo (MAYA, 2014).

$$t_{at} = 4\tau = \frac{4}{\alpha} \quad (3.9)$$

Figura 2 – Índices de desempenho



Fonte: Maya (2014)

3.5 Regras de sintonia de Ziegler-Nichols para controle PID

Se um modelo matemático da planta pode ser obtido, então é possível aplicar várias técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador que atenderão às especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Contudo, se a planta for muito complexa, de modo que seu modelo matemático não possa ser obtido facilmente, então a abordagem analítica do projeto do controlador PID não será possível. Temos então de recorrer a abordagens experimentais de sintonia de controladores PID.

Ziegler e Nichols sugerem regras para a sintonia de controladores PID baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada. Elas sugerem um conjunto de valores K_p , T_i e T_d que vão proporcionar uma operação estável do sistema. Contudo, o sistema resultante pode exibir um sobressinal máximo grande na resposta do degrau, o

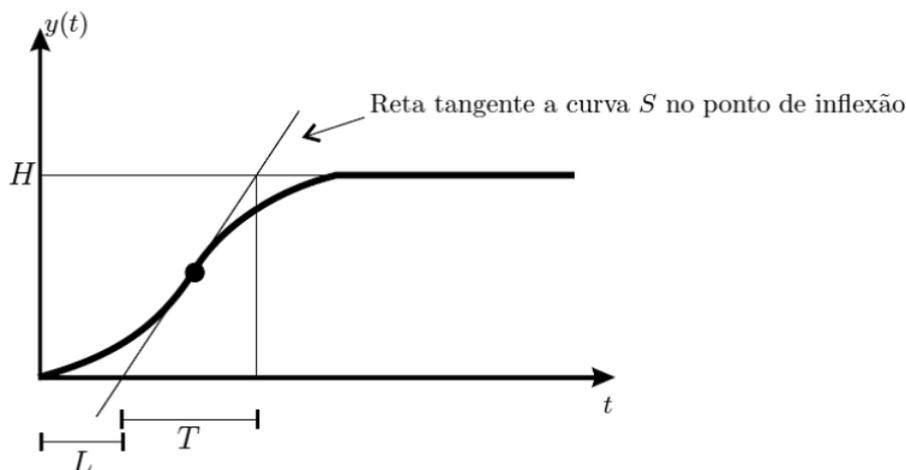
que é inaceitável. Nesse caso, precisamos fazer uma série de sintonias até que um resultado aceitável seja obtido. De fato, as regras de sintonia de Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de K_p , T_i e T_d logo na primeira tentativa.

Para sintonia de controladores PID, Ziegler e Nichols propuseram regras para a determinação de valores do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d baseadas nas características da resposta transitória de dada planta. Essa determinação dos parâmetros dos controladores PID ou de sintonia dos controladores PID pode ser feita por engenheiros de campo, por meio de experimentos com a planta. Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols. Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols (OGATA, 2010).

3.5.1 Primeiro Método

Obtendo experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, considerando que não existem integradores ou polos complexos conjugados dominantes, então a curva de resposta ao degrau unitário pode ter o aspecto de um S como mostrado na Figura 3. Esse método se aplica se a curva de resposta ao degrau de entrada tiver o aspecto de um S. Essa curva de resposta ao degrau pode ser gerada experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica da planta.

Figura 3 – Curva de resposta em S



Fonte: Ogata (2010)

A curva com o formato em S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$. A função de transferência $\frac{C(s)}{U(s)}$ pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com atraso de transporte, como o presente na Equação 3.10 (OGATA, 2010).

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (3.10)$$

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d , de acordo com a fórmula que aparece na Tabela 2.

Tabela 2 – Primeiro método de Ziegler Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Ogata (2010)

Com os valores de ganho proporcional K_p , tempo integral T_i e tempo derivativo T_d calculados a partir dos valores de atraso L e constante de Tempo T é possível encontrar a função de transferência Equação 3.11.

$$G_c(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right) \quad (3.11)$$

$$= 1,2\frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right) \quad (3.12)$$

$$= 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (3.13)$$

Portanto, o controlador PID tem um polo na origem e zeros duplos em $s = -\frac{1}{L}$.

3.5.2 Segundo Método

No segundo método, definimos primeiro $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Usando somente a ação de controle proporcional, aumenta-se K_p de 0 ao valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez. Portanto o ganho crítico K_{cr} , e o período P_{cr} correspondente são determinados experimentalmente. Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Segundo método de Ziegler Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6P_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Ogata (2010)

$$G_c(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right) \quad (3.14)$$

$$= 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5sP_{cr}} + 0,125sP_{cr} \right) \quad (3.15)$$

$$0,075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (3.16)$$

Portanto, o controlador PID tem um polo na origem e zeros duplos em $s = \frac{-4}{P_{cr}}$.

3.6 Controlador Lógico Programável

3.6.1 Introdução

São dispositivos de controle programáveis que permitem realização de atividades de controle sequenciais com muito mais flexibilidade que os sistemas convencionais. Quando foram criados eles basicamente substituíram a chamada lógica de contactores ou relés. Hoje em dia, assumem inclusive as funções de controle discreto, englobando blocos funcionais como o bloco PID.

O Controlador Lógico Programável, como todo sistema microprocessado, tem seu princípio de funcionamento baseado em um ciclo de varredura.

3.6.2 Ciclo de varredura de um CLP

- **Inicialização:** No momento em que é ligado o CLP executa uma série de operações pré-programadas, gravadas em seu Programa Monitor:
 - Verifica o funcionamento eletrônico da CPU, memórias e circuitos auxiliares;
 - Verifica a configuração interna e compara com os circuitos instalados;
 - Verifica o estado das chaves principais (RUN/STOP, PROG, etc);
 - Desativa todas as saídas;
 - Verifica a existência de um programa de usuário;
 - Emite um aviso de erro caso algum dos itens acima falhe.
- **Verificar estado das entradas:** O CLP lê o estado de cada uma das entradas, verificando se alguma foi acionada. O processo de leitura recebe o nome de Ciclo de Varredura (*scan*) e normalmente é de alguns microssegundos (*scan time*).
- **Transferir os dados para memória:** Após o Ciclo de Varredura, o CLP armazena os resultados obtidos em uma região de memória chamada de Memória Imagem das 9 Entradas e Saídas. Ela recebe este nome por ser um espelho do estado das entradas e saídas. Esta memória será consultada pelo CLP no decorrer do processamento do programa do usuário.

- **Comparar com o programa do usuário:** O CLP ao executar o programa do usuário, após consultar a Memória Imagem das Entradas, atualiza o estado da Memória Imagem das Saídas, de acordo com as instruções definidas pelo usuário em seu programa.
- **Atualizar as saídas:** O CLP escreve o valor contido na Memória das Saídas, atualizando as interfaces ou módulos de saída. Inicia - se então, um novo ciclo de varredura.

3.6.3 Componentes de um CLP

- **Fonte de alimentação:** A fonte de alimentação do CLP converte a tensão alternada da rede elétrica para uma tensão contínua, ou seja, converte a tensão da rede de 110 ou 220 VCA em +5VCC, +12VCC ou +24VCC para alimentar os circuitos eletrônicos, as entradas e as saídas.
- **Unidade de processamento:** Também chamada de CPU, é responsável pelo funcionamento lógico de todos os circuitos. Nos CLPs modulares a CPU está em uma placa (ou módulo) separada das demais, podendo-se achar combinações de CPU e Fonte de Alimentação. Nos CLPs de menor porte a CPU e os demais circuitos estão todos em único módulo. As características mais comuns são:
 - Microprocessadores ou Microcontroladores de 8 ou 16 bits;
 - Endereçamento de memória de até 1 Mega Byte;
 - Velocidades de *clock* variando de 4 a 30 MHz;
 - Manipulação de dados decimais, octais e hexadecimais.
- **Bateria:** As baterias são usadas nos CLPs para manter o circuito do Relógio em Tempo Real, reter parâmetros ou programas (em memórias do tipo RAM), mesmo em caso de corte de energia, guardar configurações de equipamentos etc. Normalmente são utilizadas baterias recarregáveis do tipo Ni-Ca ou Li. Nestes casos, incorporam-se circuitos carregadores.
- **Memória do programa supervisor:** O programa supervisor é responsável pelo gerenciamento de todas as atividades do CLP. Não pode ser modificado pelo usuário e fica normalmente em memórias do tipo PROM, EPROM, EEPROM. Ele funciona de maneira similar ao Sistema Operacional dos microcomputadores. É o Programa Monitor que permite a transferência de programas entre um microcomputador ou Terminal de Programação e o CLP, gerenciar o estado da bateria do sistema, controlar os diversos opcionais etc.

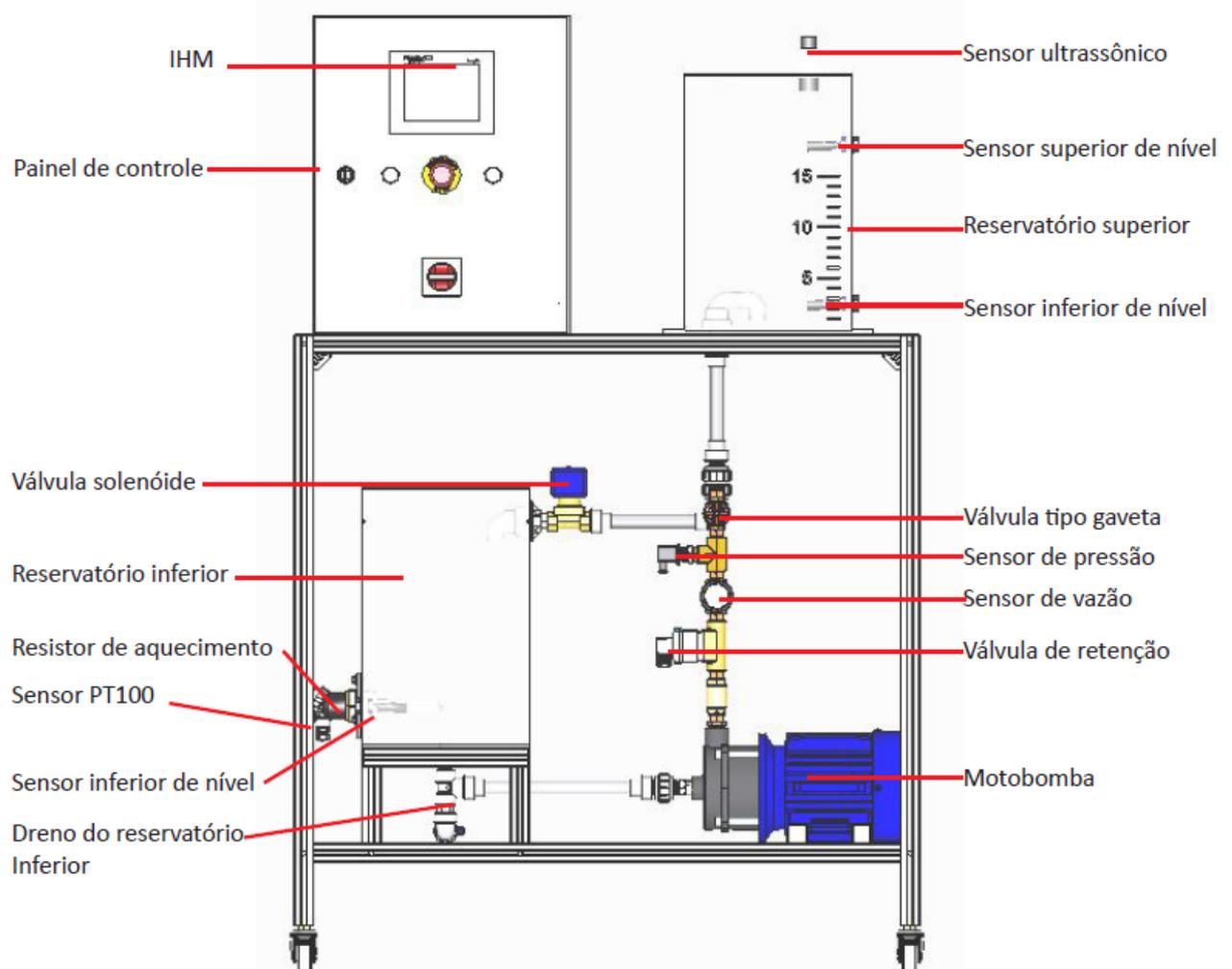
- **Memória do usuário:** É a memória que armazena o programa do usuário. Esta memória, reservada ao programa do usuário, contém alguns Kbytes de palavras-livres que serão processadas pela CPU. A cada ciclo, a CPU processa este programa, atualiza a memória de dados internos e as imagens das entradas e saídas. Constituída por memórias do tipo RAM, EEPROM ou FLASH-EPROM.
- **Memória de dados:** É a região de memória destinada a armazenar os dados do programa do usuário. Estes dados são valores de temporizadores, valores de contadores, códigos de erro, senhas de acesso, etc. São normalmente partes da memória RAM do CLP. São valores armazenados que serão consultados e ou alterados durante a execução do programa do usuário. Em alguns CLPs, utiliza-se a bateria para reter os valores desta memória no caso de uma queda de energia.
- **Memória imagem das entradas/saídas:** Sempre que a CPU executa um ciclo de leitura das entradas ou executa uma modificação nas saídas, ela armazena o estado de cada uma das entradas ou saídas em uma região de memória denominada Memória Imagem das Entradas/Saídas. Essa região de memória funciona como uma espécie de “tabela” onde a CPU irá obter informações das entradas ou saídas para tomar as decisões durante o processamento do programa do usuário.
- **Circuitos auxiliares:** São circuitos responsáveis para atuar em casos de falha do CLP. Alguns deles são:
 - *POWER ON RESET*: desliga todas as saídas assim que o equipamento é ligado, isso evita que possíveis danos venham a acontecer.
 - *POWER DOWN*: monitora a tensão de alimentação salvando o conteúdo das memórias antes que alguma queda de energia possa acontecer.
 - *WATCH DOG TIMER*: o “cão de guarda” deve ser acionado em intervalos periódicos, isso evita que o programa entre em “loop” no caso de falha do microprocessador.
- **Módulos de entradas e saídas:** Os módulos de entradas e saídas realizam a conexão física entre a CPU e o mundo externo através de circuitos de interfaceamento. Os módulos de entrada têm que ser seguros contra destruição das entradas por excesso ou alimentação de tensão indevida; e devem possuir filtros de supressão para impulsos parasitários.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Bancada NVPT

A Bancada Nível Vazão Pressão e Temperatura da *Automatus*®, construída com a finalidade acadêmica e científica, possui um CLP *Shneider Electric*® programado pelo software *Twido Suite*®. Desenvolvida para estudos práticos de formas de controle dos sistemas de temperatura, nível, vazão e pressão. A Figura 4 mostra uma visão geral da Bancada NVPT.

Figura 4 – Visão geral da Bancada



Fonte: Manual de Utilização - Kit NVPT

O painel de controle contém uma chave de seleção com a função que liga e desliga o sistema da bancada e um botão de emergência que em caso de sinistro desenergiza a

bancada trazendo assim segurança na operação da mesma. Para uma melhor visualização do sistema no painel encontram-se dois sinaleiros um que indica que o motor da bomba está energizado e o outro sinaleiro indica que a válvula está acionada.

Os principais componentes da bancada NVPT são:

- **Interface Humano Máquina (IHM):** controla acionamento automático 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, contendo:

- Botão de emergência (S3);
- Botão com sinaleiro verde (S1): aciona manualmente a bomba e indica que a bomba está ligada;
- Botão com sinaleiro verde (S2): aciona manualmente a bomba e indica que a válvula está ligada;
- Controlador lógico programável (dentro do painel de controle);
- Inversor de frequência (dentro do painel de controle).

4.2 Esquemas elétricos

O estudo da Bancada NVPT teve início com os estudos das ligações elétricas dos equipamentos, onde foi constatado que era possível instalar as novas entradas binárias, as botoeiras para selecionar entre o acionamento manual ou automático, o aquecedor e a válvula contínua, no CPL como mostra a Figura 50. Constatou-se também a possibilidade da instalação de uma válvula de acionamento contínuo como mostra a Figura 49. As Figuras encontram-se no Apêndice A.

4.3 CLP, módulo auxiliar e IHM

O CLP usado neste projeto é o TWDLCAA40DRF da *Shneider Electric*® (Figura 5 e módulo auxiliar na Figura 6). Este equipamento originalmente já compõe a bancada e possui características necessárias que atendem a nova concepção da mesma, como módulos para saídas analógica e entradas digitais suficientes disponíveis. As especificações técnicas do CLP e de seu módulo auxiliar encontram-se no Anexo A.

Figura 5 – CLP TWDLCAA40DRF



Fonte: Ficha do Produto Shneider Electric TWDLCAA40DRF

Figura 6 – Módulo auxiliar



Fonte: Datasheet do produto Schneider Electric TM2AMM3HT

A Interface Humano Máquina (IHM) é utilizada como equipamento para visualização de dados de um processo, usado para alteração de seus parâmetros e de condições de operação das máquinas. Utilizando um IHM, o operador poderá interagir com o sistema controlado. Composto por display, telas e botões para navegação ou para inserção de dados, barramentos para placas de expansão, portas de comunicação e software (ROSÁRIO, 2009)

O IHM utilizado no projeto é o HMISTU655 da *Schneider Electric*® mostrado na Figura 7.

Figura 7 – IHM HMISTU655



Fonte: Product data sheet-Magelis_STU_HMISTU655

O IHM mostrado na Figura 7 permite as funcionalidades requeridas nesta bancada ainda com a mudanças realizadas de acordo com suas especificações, que encontram-se no Anexo A(FICHA. . . ,).

4.4 Motobomba

É a bomba (Figura 8), responsável pela transferência do líquido do reservatório inferior para os tanques superiores. Para isso conta com o variador de frequência que auxilia no controle de velocidade da mesma.

Suas especificações encontram-se no Anexo A.

Figura 8 – Motobomba



Fonte: Manual da Soft-Starter

Esta bomba tem potência necessária para continuar funcionando, adequadamente na bancada após a instalação do terceiro tanque na parte superior da maquete(MANUAL..., b).

4.5 Sensores

Sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física de qualquer espécie em outro sinal que possa ser transmitido a um elemento indicador, para que este mostre o valor da grandeza que está sendo medida. Os elementos sensores são denominados transdutores quando convertem a grandeza de entrada para uma grandeza elétrica, como corrente, tensão ou resistência elétrica.

Os sensores necessários para o funcionamento da Bancada são sensores de nível, vazão, pressão e temperatura para um líquido sem corrosão, nem sólidos suspensos (água normal) nas faixas de medida das características do processo (T.KILIAN, 2000).

4.5.1 Sensores ultrassônicos

Os sensores ultrassônicos são amplamente usados na indústria para detectar a passagem de objetos em linhas de montagem, detectar a presença de pessoas ou ainda de substâncias em diversos estados e em reservatório permitindo a medida de seu nível.

Esse tipo de sensor opera com um tipo de radiação limpa não sujeita a interferência eletromagnética, e assim pode ser determinado sua aplicação. São eficientes detectando objetos de qualquer forma e a distância dependendo das especificações do sensor, seu princípio de operação é igual ao do sonar, usado pelo morcego para detectar objetos e presas durante seu vôo cego (TEIXEIRA, 2014).

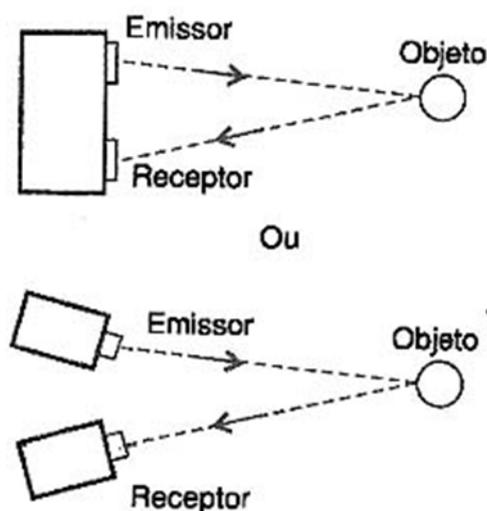
Figura 9 – Vôo do Morcego



Fonte: Teixeira (2014)

Na prática um sensor ultrassônico é formado por um emissor e um receptor, tanto fixados num mesmo conjunto como separados, dependendo do posicionamento relativo desejado, conforme a Figura 10.

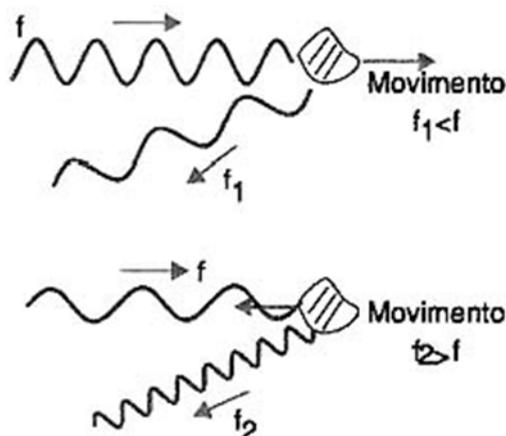
Figura 10 – Posicionamento do Emissor e Receptor



Fonte: Teixeira (2014)

É interessante observar que, por efeito Doppler, o movimento do objeto detectado pode também ser determinado por precisão. Conforme mostra a Figura 11, o comprimento de onda de um sinal refletido num objeto em movimento se altera com o esse movimento.

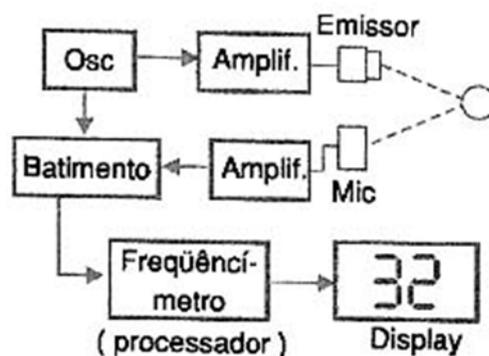
Figura 11 – Comprimento da onda após ser refletido



Fonte: Teixeira (2014)

Temos uma alteração no sentido de aumentar o comprimento de onda e, portanto diminuir a frequência se o objeto se afasta da fonte emissora. Por outro lado, o comprimento de onda diminui e portanto temos uma frequência maior para o sinal refletido, se o objeto se aproxima da fonte emissora. Levando-se em conta a velocidade do som, pode-se determinar com precisão a velocidade de aproximação ou afastamento do objeto pela medida da alteração de sua frequência, com um circuito mostrado em blocos como o da próxima Figura 12.

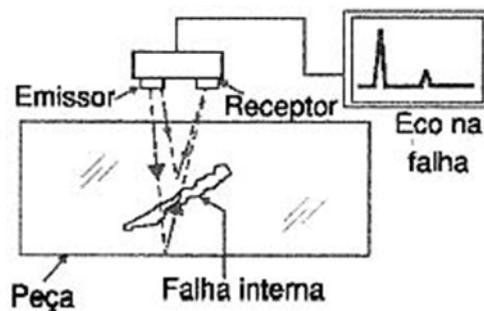
Figura 12 – Diagrama em blocos do funcionamento do sensor



Fonte: Teixeira (2014)

Como os ultrassons passam através de materiais sólidos, sofrendo alterações de velocidade com a mudança das características do meio, eles podem ser usados de forma muito eficiente para detectar falhas internas de materiais como rachaduras e bolhas, conforme mostra a próxima Figura 13 (TEIXEIRA, 2014).

Figura 13 – Sensores ultrassônicos usados na detecção de falhas



Fonte: Teixeira (2014)

O tipo de sensor usado depende do que se deseja detectar. Assim, os objetos podem ser classificados em três categorias, conforme a reflexão dos ultrassons que proporcionam:

- Superfícies planas como fluidos, caixas, folhas ou placas de plástico ou papel, vidros etc;
- Objetos cilíndricos como latas, garrafas, canos e o corpo humano;
- Pós e grãos como minerais, cereais, areia, plásticos em pó, etc;

O sensor utilizado é o *Telemecanique®* XX930A1A1M12 (Figura 14). Suas especificações técnicas encontram-se no Anexo A.

Figura 14 – Sensor XX930A1A1M12



Fonte: Ficha de produto-OsiSense-XX_XX930A1A1M12

Na maquete original este sensor está fixado a tampa do tanque superior, onde coleta dados para medição de nível. Na nova concepção de dois tanques superiores este equipamento será móvel e fará coletas de dados para medições do tanque dois ou três dependendo da necessidade do experimento.

Suas características possibilitam também que dentro de uma eventual quebra do sensor de vazão ele poderia ser usado para estimar a vazão do tanque, por meio da relação entre a diminuição do nível, o tempo e as dimensões do tanque.

A bancada também conta com três sensores binários para controles de nível. O tanque inferior possui um para checagem de nível mínimo que aciona o desligamento da motobomba

e impede assim que continue sugando água para o tanque superior quando o nível da água se encontra em estado crítico. Este sensor desempenha outro importante papel por estar instalado em um nível superior ao da resistência de aquecimento, possibilitando que esta resistência esteja sempre submersa. O tanque superior conta com dois sensores para checagem de nível, um para mínimo e outro para máximo, que envia um sinal para desligamento da motobomba impedindo que a água transborde (FICHA... ,).

4.5.2 Vazão

A vazão volumétrica é o volume de que escoa através de certa seção em dado intervalo de tempo. As unidade volumétricas mais utilizadas são m^3/s , m^3/h , l/h , l/min , GPM (galões por minuto) Nm^3/h (normal metro cúbico por hora), SCFH (normal pé cúbico por hora), entre outras (CASSIANO, 2008).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.1)$$

Variáveis:

- Q = vazão volumétrica;
- V = volume;
- t = tempo;

Figura 15 – Sensor de vazão



Fonte: DS8030-Standard-EU-EN

O sensor utilizado na maquete é o DS8030 da *Burkert*® (Figura 15). Suas especificações técnicas encontram-se no Anexo A. O medidor de vazão 8030 é construído com um módulo eletrônico SE30 associado a uma S030 (um encaixe com roda integrada a medição tipo remo). Esta conexão é feita por meio de um quarto de volta. O sistema de encaixe concebido assegura simples instalação dos dispositivos. O medidor de vazão produz um sinal de frequência, proporcional à taxa de fluxo, que pode ser facilmente transmitida e processados por um transmissor / controlador (MANUAL... , a).

4.5.3 Pressão

É a força por unidade de área que um material exerce sobre o outro. As unidades comuns são psi (lb/pol²) e Pa (N/m²). Sensores de pressão são compostos por duas partes:

- Conversão de pressão numa força ou deslocamento;
- Conversão de força ou deslocamento em sinal elétrico.

Medidas de pressão são feitas apenas para gases e líquidos. Tipos de medida de pressão:

- Pressão Gauge - diferença entre a pressão de interesse e a pressão ambiente.
- Pressão diferencial - diferença de pressão entre dois pontos distintos no circuito, onde nenhum deles está na pressão atmosférica necessariamente.
- Pressão absoluta - medida por um sensor de pressão diferencial com um dos lados em 0 psi.

Sensores de pressão mais modernos trabalham com base em um princípio chamado piezo resistência. A pressão faz com que um material conduza eletricidade a uma determinada taxa, levando a um nível específico de fluxo de carga associada com um nível específico de pressão. Esta carga é alimentada a um fio que conduz a um painel de controle e de exibição para análise humana (T.KILIAN, 2000).

Figura 16 – Sensor de pressão



Fonte:Ficha do Produto-OsiSense_XM_XMLP010BC21V

O sensor utilizado no projeto foi o XMLP010BC21V visto na Figura 16. Suas especificações técnicas encontram-se no Anexo A.

4.5.4 Temperatura

Temperatura é a medida estatística do nível de agitação entre moléculas, relacionado com o deslocamento da energia cinética de um átomo ou molécula.

O instrumento de medição de temperatura é o termômetro que indica o grau de intensidade do calor em um determinado território. A temperatura atmosférica da Terra é resultado das ondas eletromagnéticas que vêm do Sol. A variação de temperatura depende

de vários fatores, como o vento, a umidade do ar, a latitude, o ângulo de incidência do raio solar na superfície terrestre, etc.

A noção de calor é várias vezes erradamente associada a uma maior temperatura, enquanto a noção de frio está associada a uma menor. Apesar disso, o calor consiste na energia térmica que transita de um corpo com maior temperatura para outro de menor. Esse é um processo efêmero que termina quando os dois corpos em questão atingem o equilíbrio térmico.

Calor é a energia térmica em movimento, ou seja a energia cinética proveniente da movimentação dos átomos ou moléculas.

Por outro lado, a temperatura é a grandeza física usada para medir a energia cinética em questão associando um número à vibração entre moléculas. A temperatura é o sistema ou escala criada para medir a vibração molecular, ou seja, ao calor.

O sensor presente no projeto é o PT-100. Ele é um termômetro de resistência elétrica feito de platina. É chamado de termo resistor, possuindo uma resistência de aproximadamente 100Ω a 0°C . A norma DIN IEC 751 padronizou a faixa das termorresistências de -200 a 850°C .

A platina é um metal especialmente indicado para a construção de sensores de temperatura, pois, pode ser refinada até atingir elevado grau de pureza. Deste modo, o valor da resistividade consta em tabelas universais (T.KILIAN, 2000).

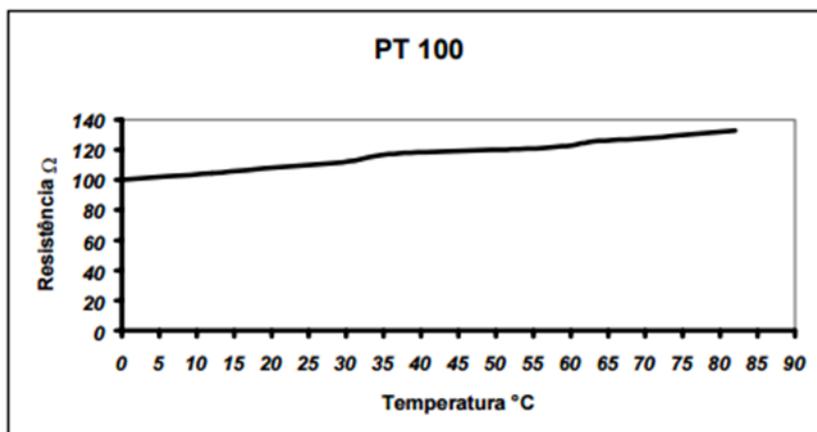
O PT-100 é considerado um sensor de alta precisão e ótima repetibilidade de leitura.

O princípio físico de funcionamento deste dispositivo é baseado numa relação linear da resistência em função da variação da temperatura, segundo a Equação 4.2:

$$R_t = R_0(1 + a\Delta t + b\Delta t^2) \quad (4.2)$$

- Onde: “R” é a resistência em função da temperatura;
- “R₀” a resistência inicial;
- “ Δt ” é a variação da temperatura;
- “a” é o coeficiente de temperatura do metal, usaremos o valor indicado pela norma DIN 43760, $\alpha=0,00385$;
- “b” pode ser considerado nulo para a platina;

Figura 17 – Curva resistência versus temperatura



Fonte: T.Kilian (2000)

Vantagens:

- Possuem maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensores;
- Com ligação adequada não existe limitação para distância de operação;
- Dispensa utilização de fiação especial para ligação;
- Se adequadamente protegido, permite utilização em qualquer ambiente;
- Têm boas características de reprodutibilidade;
- Em alguns casos substitui o termopar com grande vantagem.

Desvantagens:

- São mais caros do que os sensores utilizados nessa mesma faixa;
- Deterioram-se com mais facilidade, caso haja excesso na sua temperatura máxima de utilização;
- É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura equilibrada para indicar corretamente;
- Alto tempo de resposta.

4.5.5 Válvulas

A válvula de controle é um equipamento operado por energia que forma o elemento final em um sistema de controle de processo, onde é destinado à regulação das vazões de fluidos. Consistindo de um subconjunto de corpos internos para mudança de vazão do

sistema de processo, neste o corpo é conectado a um atuador na qual responde a um sinal transmitido por um elemento controlador.

Uma válvula de controle deve responder ao sinal de atuação do controlador, um sinal padrão é aplicado ao atuador da válvula, que o converte em uma força, movimentando a haste, em cuja extremidade inferior está o obturador, que varia a área de passagem do fluido pela válvula. O controle pode ser feito de modo contínuo ou liga-desliga. Na filosofia contínua ou analógica, a válvula pode assumir, de modo estável, as infinitas posições entre totalmente fechada e totalmente aberta. Na filosofia digital ou liga-desliga, a válvula só fica em duas posições discretas: ou totalmente fechada ou totalmente aberta. O resultado do controle é menos satisfatório que o obtido com o controle proporcional.

A válvula de controle age como uma restrição variável na tubulação do processo. Alterando a sua abertura, ela varia a resistência à vazão e como consequência, a própria vazão (RIBEIRO, 1999).

Atuador da válvula de controle utilizada neste projeto foi a VSI® EMO-35M-24 mostrada na Figura 18. Válvula e atuador são mostrados na Figura 19.

Figura 18 – Atuador de Válvula



Fonte: ATUADORES EMO35-24

Figura 19 – Válvula e Atuador



Fonte: ATUADORES EMO35-24

Com controle proporcional, o ângulo de saída varia entre 0 e 95°, com característica de abertura igual a porcentagem do sinal de controle proporcional de 2 a 10VCC. A válvula possui sistema de proteção automático e engate universal, sendo o diâmetro do corpo da válvula de ½” (15 milímetros). Outras especificações técnicas encontram-se no Anexo A.

Para termos mais de uma configuração, entre os tanques foram instaladas duas válvulas com mecanismo em esfera como o da Figura 20. Estas válvulas com mecanismo de esfera controlam o fluxo de materiais que estão sendo transportados pelo interior da tubulação.

Figura 20 – Válvula com mecanismo em esfera



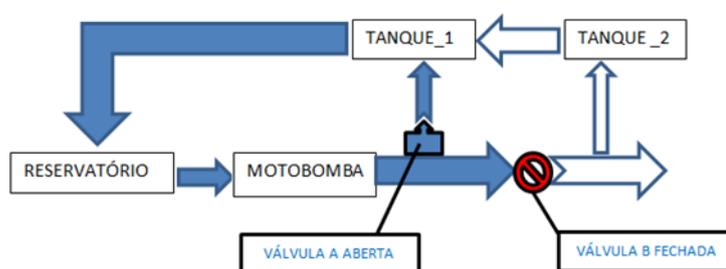
Fonte: <http://goo.gl/yE1cRO>

Seu acionamento pode ser elétrico ou manual. As válvulas instaladas na maquete são de controle manual, e tem a função de trocar o *layout* das ligações entre os tanques. Ou seja, alternado-as podemos ter os seguintes relações entre os tanques:

- Primeira configuração:

Válvula A aberta e válvula B fechada. Esta configuração dá a possibilidade de ter um dos dois tanques trabalhando como um sistema de primeira ordem;

Figura 21 – Configuração sistema de primeira ordem

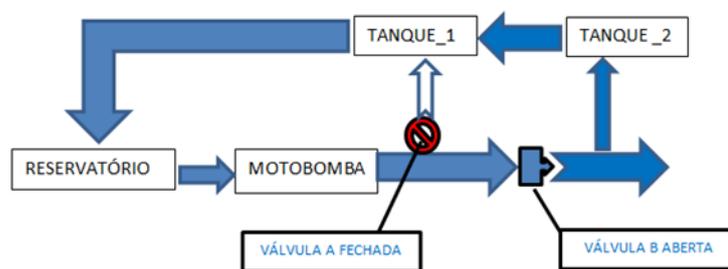


Fonte: Autor

- Segunda Configuração:

Válvula B aberta e válvula A fechada. Esta configuração dá a possibilidade de ter dois tanques em série formando um sistema de segunda ordem;

Figura 22 – Configuração sistema de segunda ordem

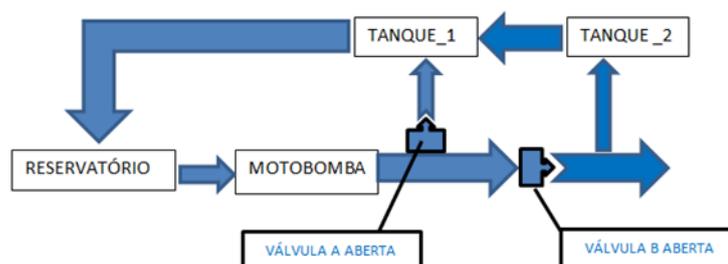


Fonte: Autor

- Terceira configuração:

Válvula A aberta e válvula B aberta. Esta configuração interliga dois tanques em paralelo de forma a compor um sistema de primeira ordem, porém com uma constante de tempo maior que a da primeira configuração.

Figura 23 – Configuração primeira ordem paralelo



Fonte: Autor

4.6 Tanque

A bancada é composta originalmente por dois tanques de água sendo um dos dois um reservatório, feitos de acrílico com dimensões de 40cm x 26cm x 26cm o que equivale no total de 27040cm³, somente sendo usado 20280cm³ o que equivale a 20,208l de água por questões de segurança. Um tanque é instalado na parte inferior e o segundo na parte superior da bancada.

Para a nova concepção da maquete fez-se necessário a instalação de um segundo tanque de água na parte superior, com as mesmas dimensões dos dois já instalados e feito do mesmo material como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Os tanques superiores



Fonte: Autor

Com a instalação do segundo tanque superior houve a necessidade da instalação de um segundo reservatório na parte inferior na Bancada como mostra a Figura 25 para que a maquete tivesse líquido suficiente para que os tanques superiores conseguissem alcançar níveis maiores do que o alcançado com apenas um reservatório.

Figura 25 – Reservatórios inferiores



Fonte: Autor

4.7 Novo design da Bancada NVPT

Após as alterações físicas na Bancada a mesma ficou no formato visto na Figura 26 apta a realização de experimentos práticos na disciplinas de controle e automação.

Figura 26 – Novo design da Bancada NVPT



Fonte: Autora

Destaque para alterações como visto na Figura 27 como segundo tanque superior, válvula de controle contínuo e as botoeiras instaladas no painel de controle.

Figura 27 – Novos equipamentos instalados na Bancada NVPT



Fonte: Autora

O acréscimo de mais um reservatório na parte inferior da Bancada foi necessário para que a bancada tivesse líquido suficiente para alimentar dois tanques como visto na Figura 28.

Figura 28 – Segundo tanque inferior



SEGUNDO
TANQUE
INFERIOR

Fonte: Autora

4.8 Software

4.8.1 Ladder

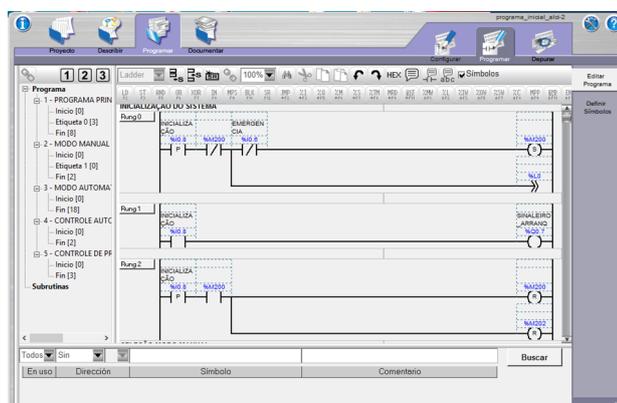
A linguagem de programação que será utilizada neste trabalho para implementação nos CLP é a linguagem Ladder. Essa é uma linguagem gráfica baseada em símbolos, semelhantes aos contatos de bobinas nos esquemas elétricos. Por sua semelhança com sistemas de controle a relés é facilmente compreendida.

A linguagem Ladder é baseada na lógica de relés e contatos dos painéis de comando tradicionais. É a linguagem mais difundida entre os engenheiros, pois a semelhança com os diagramas de comando tradicionais torna fácil o aprendizado e a modernização de sistemas de comando antigos. Além dos elementos básicos dos diagramas a relé (contatos, bobinas, etc), os diversos modelos de CLP possuem uma série de outros recursos, tais como: temporizadores, contadores, operações algébricas e lógicas, funções de controle contínuo, manipulação de memória.

A denominação Ladder vem da forma como as linhas de programa são escritas entre duas barras verticais como se fosse uma escada, de onde origina o nome Ladder que do inglês significa escada (CAMARGO, 2008).

4.8.2 TWIDO SUITE

Figura 29 – *Twido suite*



Fonte: Manual Twido Suite

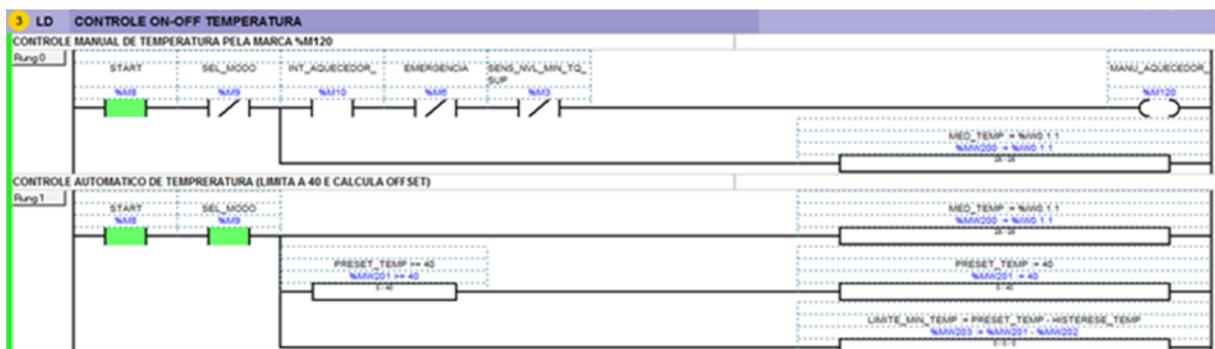
Twido Suite é um ambiente gráfico de desenvolvimento para criar, configurar e manter aplicações para controladores programáveis. Permite que o usuário insira programas de controle e em seguida transferir o programa para ser executado em um Controlador Lógico Programável (CONTROLADORES...).

Para criar programas de controle Twido pode usar as seguintes línguas de programação:

- Linguagem de listas de instruções: Uma lista de instruções do programa consiste numa série de expressões lógicas escritas como uma sequência de instruções booleanas.
- Grafcet: Twido suporta Grafcet instruções da lista, mas não Grafcet gráfico.
- Diagrama em Ladder: Um diagrama Ladder é um meio gráfico de exibir uma expressão lógica muito difundido e o escolhido neste trabalho para o desenvolvimento dos programas mostrado na Figura 29.

Para atender os novos equipamentos instalados foi necessário a elaboração de um novo programa em Ladder para o funcionamento da mesma utilizando o software *Twido Suite*. As Figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36 mostram as partes principais do programa e o programa na íntegra pode ser encontrado no Apêndice B ao final da monografia.

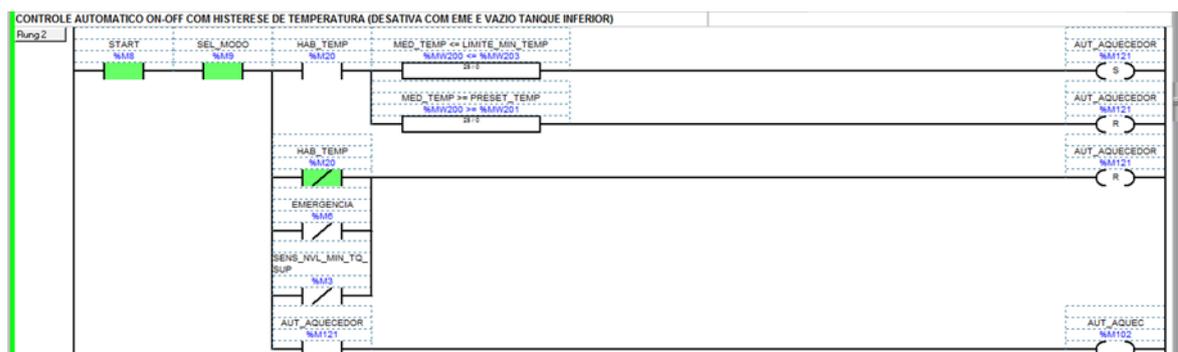
Figura 30 – Início do controle ON-OFF de temperatura



Fonte: Autora

A Figura 30 seleciona o modo manual e ativa o aquecedor. Quando o interruptor do aquecedor está ativo, a emergência não está ativo nem o nível mínimo, o valor da medição do sensor de temperatura é colocado na variável da IHM. Outra etapa mostrada na Figura 30 é o controle automático de temperatura. Ao se selecionar o modo automático, um aviso aparece na IHM e pergunta-se se o *setpoint* do IHM é maior que 40°C ou é limitado em 40°C e então calcula-se o limite mínimo de controle com histerese.

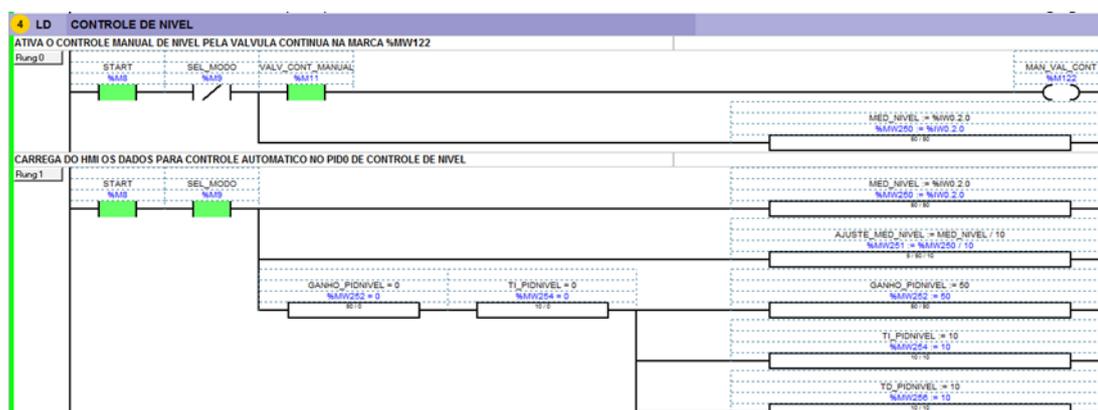
Figura 31 – Controle automático on-off com histerese



Fonte: Autora

A Figura 31 ilustra o que ocorre depois que se calcula o limite de histerese. Compara-se a medição com o limite mínimo para ativar o aquecedor e com o preset para se desativar o aquecedor. Se tem algum alarme ativado o aquecedor é desligado.

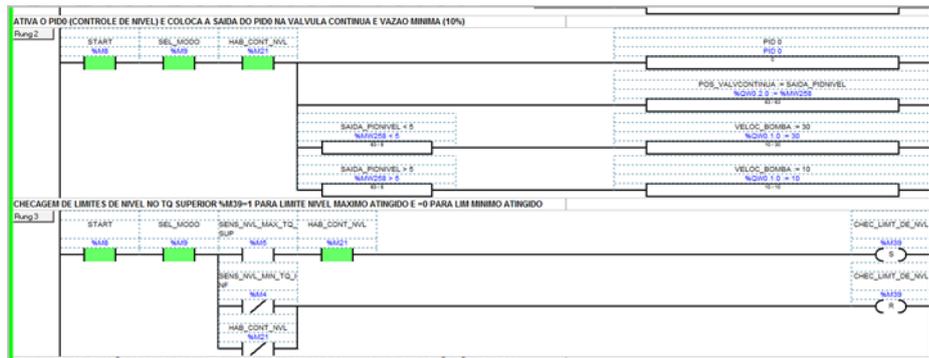
Figura 32 – Controle manual de nível



Fonte: Autora

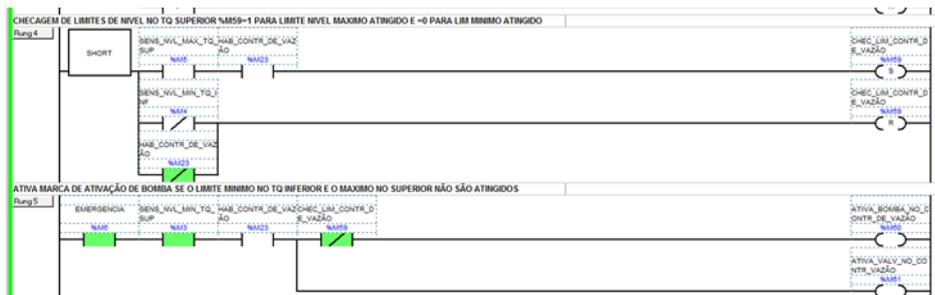
A Figura 32 ativa o controle manual de nível na seleção do modo manual, pergunta-se pelo interruptor manual da válvula contínua, ativa-se a válvula colocando o preset do IHM de nível como percentual de abertura da válvula contínua. Em automático coloca-se todos os valores dos parâmetros do PID do IHM para ativar o bloco PID0.

Figura 33 – Ativa PID para controle de nível e checagem de nível



O Bloco PID0 coloca a saída do PID na posição da válvula de controle contínuo e para diminuir o distúrbio da bomba na malha de controle de nível para grandes erros o PID coloca 30% na velocidade da bomba e para pequenos coloca 10%.

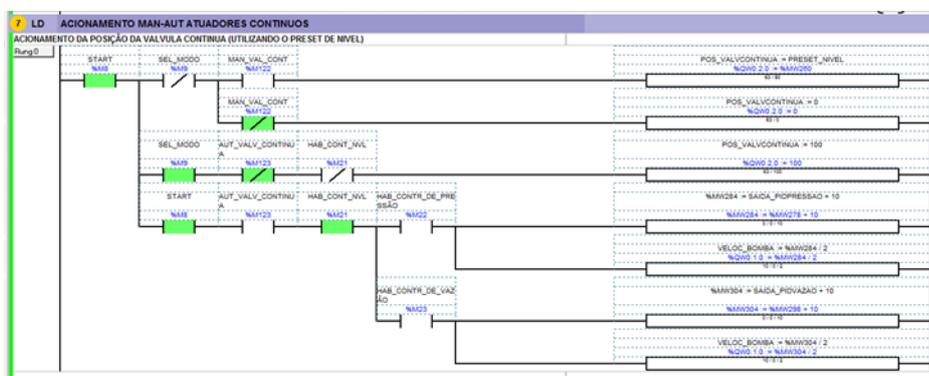
Figura 34 – Checagem de limites de nível no tanque superior



Fonte: Autora

A Figura 34 mostra parte da checagem de limite de nível dos tanques superiores e o tanque inferior para se ativar as marcas desses limites no controle de vazão. Nesta parte do programa também se realiza checagem de emergência, limite mínimo do tanque inferior para evitar que a bomba seja ligada nestas condições dentro do controle de vazão.

Figura 35 – Acionamento Manual automático da válvula contínua

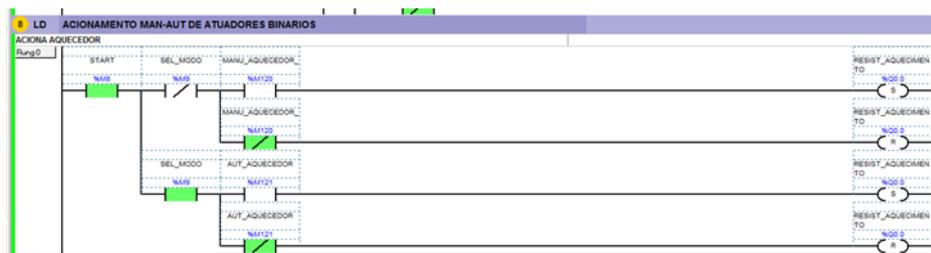


Fonte: Autora

A Figura 35 é parte do programa de acionamento da posição da válvula contínua, quando selecionado o modo manual, pergunta-se pelo interruptor da válvula contínua

para colocar o preset de nível na posição da válvula quando está ligada e quando está desligado se for colocado 0 no modo automático tem-se 3 variantes, a primeira que não está habilitado o controle de nível e se a válvula em 100% de abertura para ter o mínimo de distúrbios na malha de vazão e pressão, a segunda habilita o controle de nível e o controle de pressão juntos e calculado a média dos dois PID e a terceira variante é igual a segunda só que para nível e vazão.

Figura 36 – Acionamento manual automático dos atuadores binários



Fonte: Autor

A Figura 36 mostra a parte do programa onde está o SET e o RESET do aquecedor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Controle dos sistemas

No controle de temperatura o sensor de temperatura envia os valor medido para o CLP onde pode ser visto, o valor da temperatura atual, na tela do IHM. O usuário da maquete digita na tela do IHM os valores desejados de PRESET e HISTERESE.

Acionando o sistema de temperatura da bancada, a resistência de aquecimento é ligada de forma a aquecer o líquido presente no reservatório inferior, o líquido é aquecido até que o valor da temperatura do líquido medida pelo sensor de temperatura seja igual ao do valor de PRESET, quando isso ocorre a resistência de aquecimento é desligada. A troca de calor do líquido com o meio onde ele se encontra faz com que ocorra queda de temperatura e quando o sensor medir o valor do PRESET menos o valor de HISTERESE a resistência volta a ser acionada até mais uma vez atingir o valor de PRESET. Este controle é denominado de controle ON-OFF.

O controle de temperatura é independente dos outros controles da bancada, ou seja, ele pode permanecer ligado durante todo o processo juntamente com outro tipo de controle, mas tem interação com os outros controles, pois, quando não estão ligados a bomba e a válvula solenoide, a ação do controle de temperatura é muito mais rápida que quando tem movimentação da água entre os reservatórios devido da troca de calor.

O sensor de temperatura é uma PT100 da marca RESISTOR® com saída padronizada de 0-10volt. Pode considerar-se que tem uma constante de tempo de 3 segundos e o ganho é calculado considerando a relação entra saída do medidor.

O controle de nível mede o nível atual dos tanques superiores e permite fazer o controle desse nível através dos sensores e atuador da válvula contínua. A tela do IHM mostra o valor do nível atual enviado para o CLP pelo sensor ultrassônico presente no tanque superior o usuário digita os valores de PRESET, Kp, Ti e Td. Uma vez acionado o sistema de nível o líquido será retirado do reservatório e colocado no tanque superior pela bomba. Uma vez que o valor de PRESET atingido a válvula contínua será acionada de forma que a mesma quantidade de líquido que entre seja a mesma quantidade que saia.

O sensor contínuo de nível é um sensor ultrassônico modelo XX930A1A1M12 com saída padronizada de 0-10volt e faixa de leitura de 0.051 a 0.991 m, que tem um atraso na leitura de 25ms, pelo que a constante de tempo pode se considerar de aproximadamente 0,025 segundos.

No controle de vazão como no controle de nível a tela do IHM mostra os valores medidos pelo sensor do sistema e o usuário digita o valor da vazão desejada e os valores de Kp, Ti e Td. O controle de vazão mede a pressão e calcula a vazão do sistema e permite fazer o controle através do sensor contínuo de pressão e, segundo as características

da tubulação e a bomba utilizada, calcula-se a vazão e atuadores do sistema. O sensor de vazão mede a vazão por contagem de pulsos. O controle de vazão quando acionado, desligará automaticamente o controle de pressão, pois estes controles não podem estar ligados simultaneamente pois possuem o mesmo atuador.

O atuador do sistema é uma bomba com variação da vazão de 0 a 4,91m³/h utilizando um variador de frequência ATV12H015M2 que tem um sinal de entrada de controle de 0 a 10 volt, e entrega sinal de força para a bomba de 0 a 230volt com 60Hz e uma corrente transitória durante 60 segundos. A constante de tempo de 1 segundo.

O controle de pressão funciona de forma muito semelhante ao sistema de vazão já mencionado. O sensor de pressão é um sensor transmissor modelo XMLP010BC21V, que tem um sinal de saída de 4 a 20 mA e um intervalo de medição de pressão que vai de 0 a 100 bar, mas com uma pressão máxima admissível de 20bar. Portanto consideramos que a faixa de medição pode se considerar de 0-20bar. O sensor possui tempo de resposta da saída é menor de 5 milissegundos.

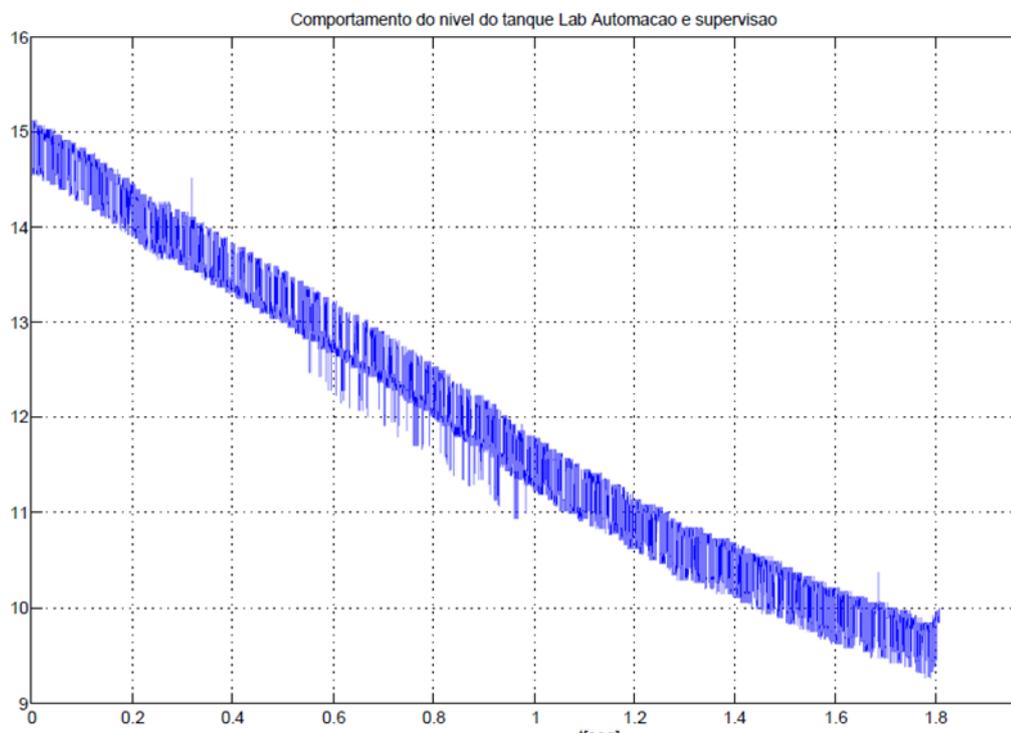
5.2 Testes

Para coleta dos dados durante a realização dos testes foi necessário recorrer aos equipamento utilizados em outra monografia em desenvolvimento na instituição de ensino.

Após os ajustes necessários do software e concluídas as instalações dos equipamentos novos na Bancada, foi realizado o teste de controle de nível mudando o valor da vazão, colocados os valores de 80% de abertura na válvula contínua e para a vazão da bomba 13%, na saída da válvula o valor é trocado para 85%.

Os dados obtidos fornecem inúmeras relações tempo/nível, de maneira experimental, realizando a leitura do sensor de ultrassônico (que mede o nível do tanque). A leitura do sensor é realizada em intervalos de tempo definidos (cerca de 81 leituras por segundo), mas a mudança do sinal de degrau que altera o comportamento da válvula e da bomba são alterados a cada 1 segundo. Assim, tem-se cerca de 81 dados de nível para cada estado da válvula e da bomba.

Figura 37 – Gráfico do teste de controle de nível



Fonte: Autor

Com os dados coletados foi possível encontrar o gráfico da Figura 37, com o software MATLAB®, Utilizando o método de Strejc foi possível encontrar os parâmetros de T_a e T_l obtidos empregando uma linha de inclinação linear de sobreposição na área de inclinação da curva como mostra a Figura 1. Pelo método de aproximação com os valores da Tabela 1 pode-se encontrar o número de polos do sistema:

Valores encontrados de T_a e T_l :

- $T_l=0,33076s$;
- $T_a=1,56918s$;

$$\frac{T_l}{T_a} = 0,21078525 \quad (5.1)$$

O valor mais próximo na Tabela 1 é o 0,22 para valores de:

$$\frac{T_a}{\tau_1} = 3,7 \quad (5.2)$$

$$\frac{T_l}{\tau_2} = 0,8 \quad (5.3)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = 0,418776s \quad (5.4)$$

Função de Transferência:

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau s)^n} \tag{5.5}$$

Onde:

K = ganho do sistema;

τ = constante de tempo;

n = número de polos;

Cálculos para encontrar o ganho:

Cálculo do incremento na saída $15,22 - 9,77 = 5,44522cm$

Cálculo do incremento na saída $85\% - 80\% = 5\%$

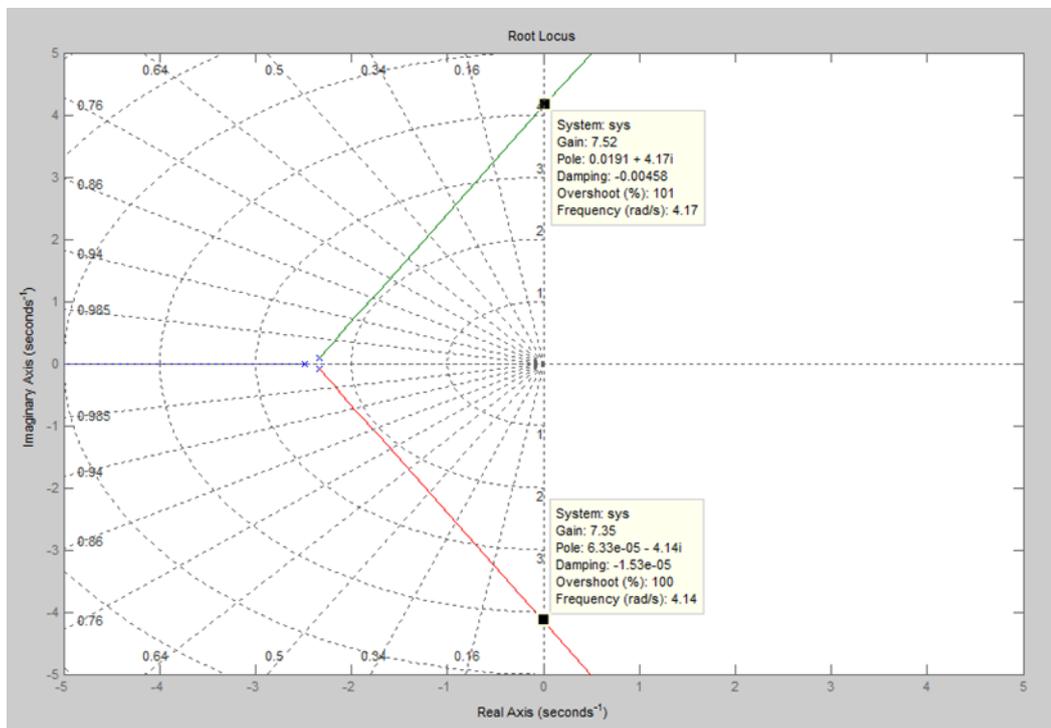
$$K = \frac{5,4452}{5} = 1,089044cm/\% \tag{5.6}$$

Substituindo os valores encontrados na função de transferência Equação 23:

$$G(s) = \frac{1,089044}{(1 + 0,418776s)^3} \tag{5.7}$$

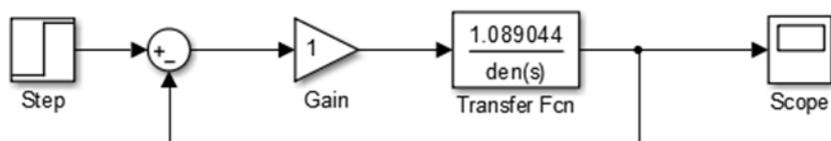
Obtendo-se o gráfico de lugar das raízes dessa função de transferência (Figura 38), observa-se que todos os polos e zeros encontram-se do lado esquerdo do semiplano s . Portanto, a função de transferência gera um sistema estável.

Figura 38 – Gráfico do lugar da raízes



Fonte: Autora

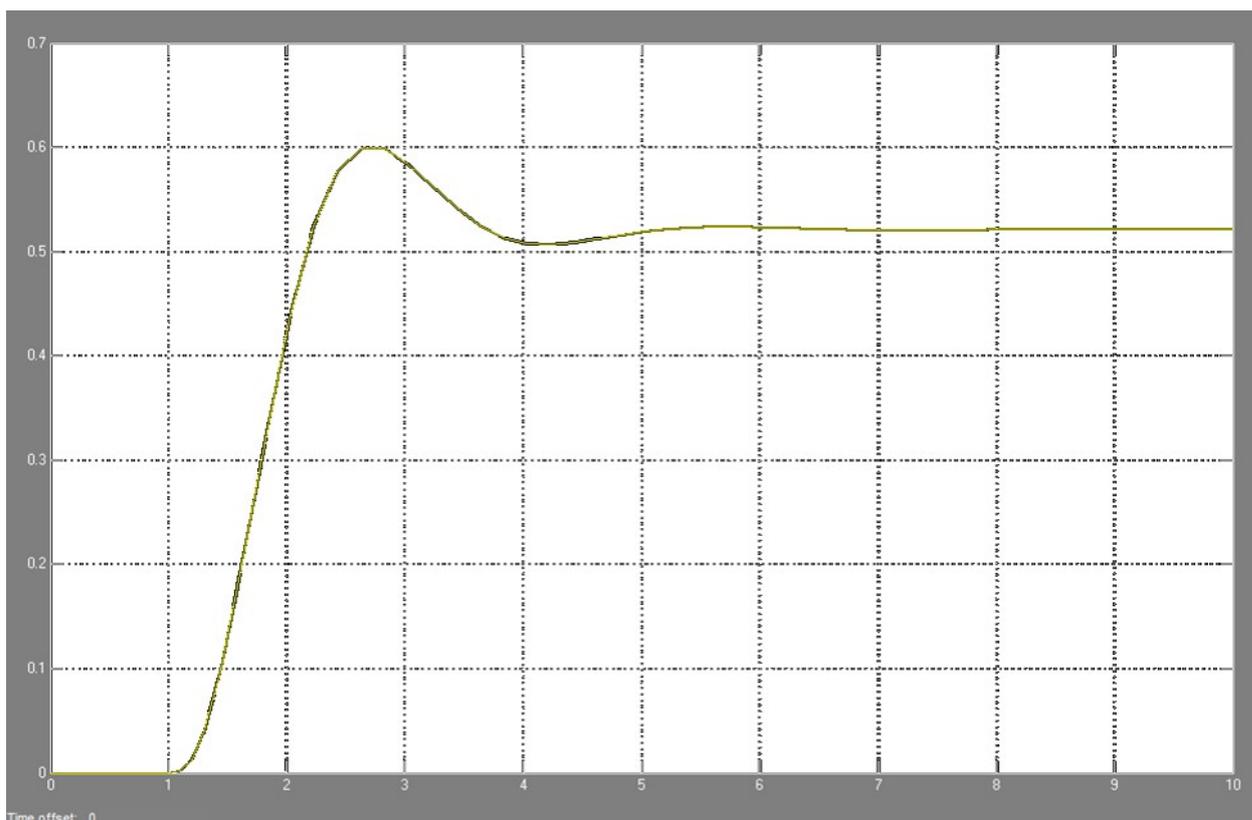
Figura 39 – Diagrama em Blocos



Fonte: Autor

Usando o Simulink do software MATLAB® foi feito diagramas em blocos colocando um degrau na função de transferência mostrada na Equação 5.7 e um controlador de ganho um, obteve-se o gráfico da resposta do sistema mostrado na da Figura 40:

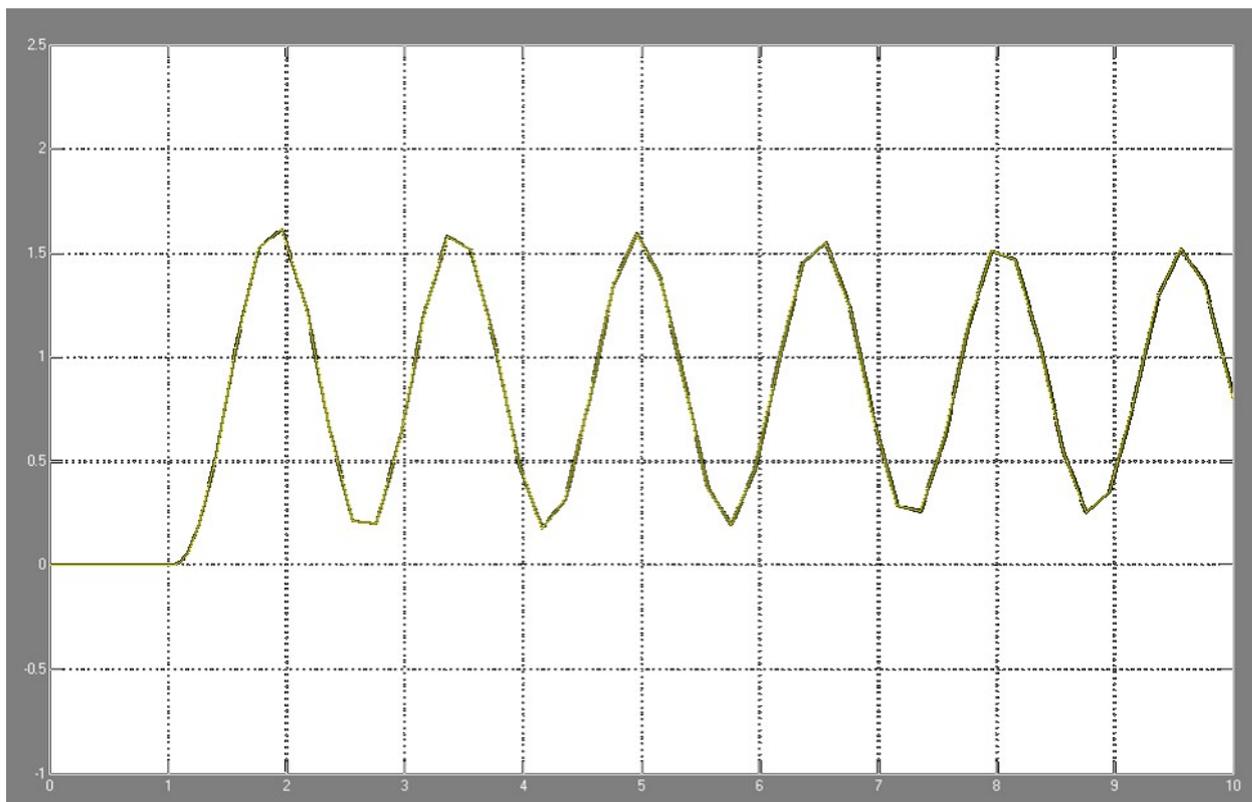
Figura 40 – Resposta do sistema



Fonte: Autor

De acordo com o Método de Ziegler-Nichols o ganho é incrementado até que oscilações mantidas sejam alcançadas como mostra a Figura 41.

Figura 41 – Oscilações mantidas



Fonte: Autor

As oscilações mantidas mostradas na Figura 41 são atingidas para o valores de ganho $K_{CR} = 7,1$ e período $P_{CR} = 1,368$;

Com os valores de ganho K_{CR} e período P_{CR} encontrados no gráfico das oscilações mantidas consulta-se a tabela do segundo método de Ziegler-Nichols Tabela 3 para se obter os parâmetros para o ganho proporcional Kp , tempo integral Ti e tempo derivativo Td :

- Controle Proporcional

Utilizando a Tabela 3 do segundo Método de Ziegler-Nichols obtêm-se o parâmetro Kp .

$$Kp = 7,1 \times 0,5 = 3,55 \quad (5.8)$$

Índices de desempenho do controle Proporcional:

Tempo de subida = 1,75s;

Tempo de acomodação = 12,2s;

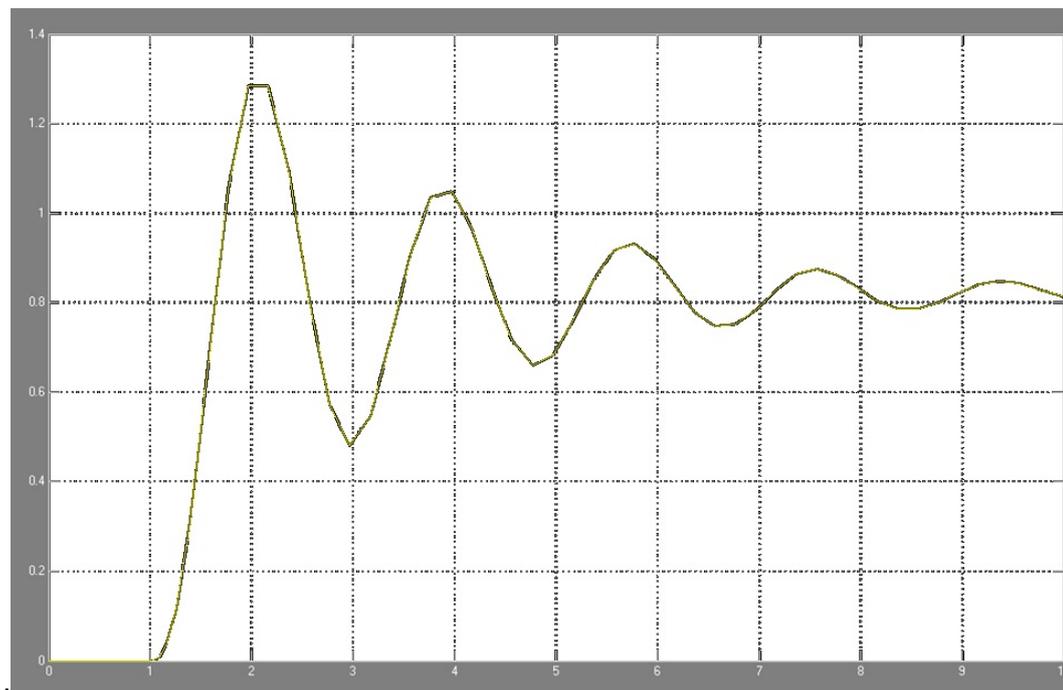
Tempo de chegada ao pico = 2s;

Sobressinal = 0,5;

- Controlador Proporcional Integral:

Utilizando a Tabela 3 do segundo Método de Ziegler-Nichols obtêm-se o parâmetro Kp e Ti .

Figura 42 – Resposta do controle Proporcional

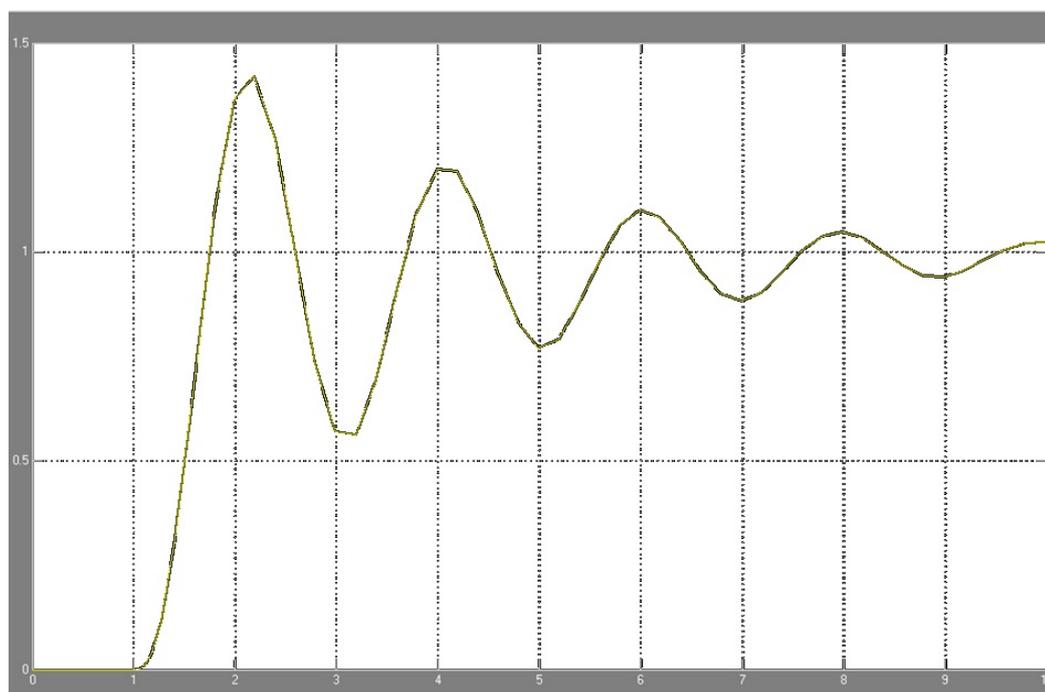


Fonte: Autor

$$Kp = 7,1 \times 0,45 = 3,195 \quad (5.9)$$

$$Ti = \frac{1}{1,2} \times 1,368 = 1,14 \quad (5.10)$$

Figura 43 – Resposta ao controlador PI



Fonte: Autor

Índices de desempenho do controlador Proporcional Integral:

Tempo de subida = 1.80s;

Tempo de acomodação = 11,56s;

Tempo de chegada ao pico = 2,3s;

Sobressinal = 0,47;

Controle Proporcional Integral Derivativo

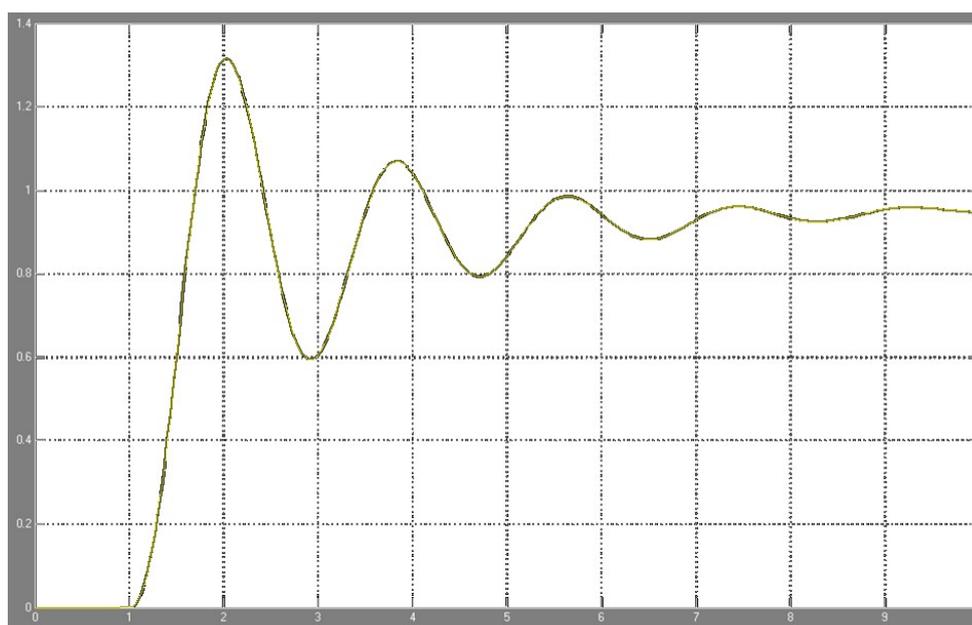
Utilizando a Tabela 3 do segundo Método de Ziegler-Nichols obtêm-se os parâmetros de K_p , T_i e T_d .

$$K_p = 0,6 \times 7,1 = 4,26 \quad (5.11)$$

$$T_i = 0,5 \times 1,368 = 0,684 \quad (5.12)$$

$$T_d = 1,25 \times 1,368 = 0,171 \quad (5.13)$$

Figura 44 – Resposta do controle PID



Fonte: Autor

Índices de desempenho do controle Proporcional Integral Derivativo

Tempo de subida = 1.56s;

Tempo de acomodação = 9,30s;

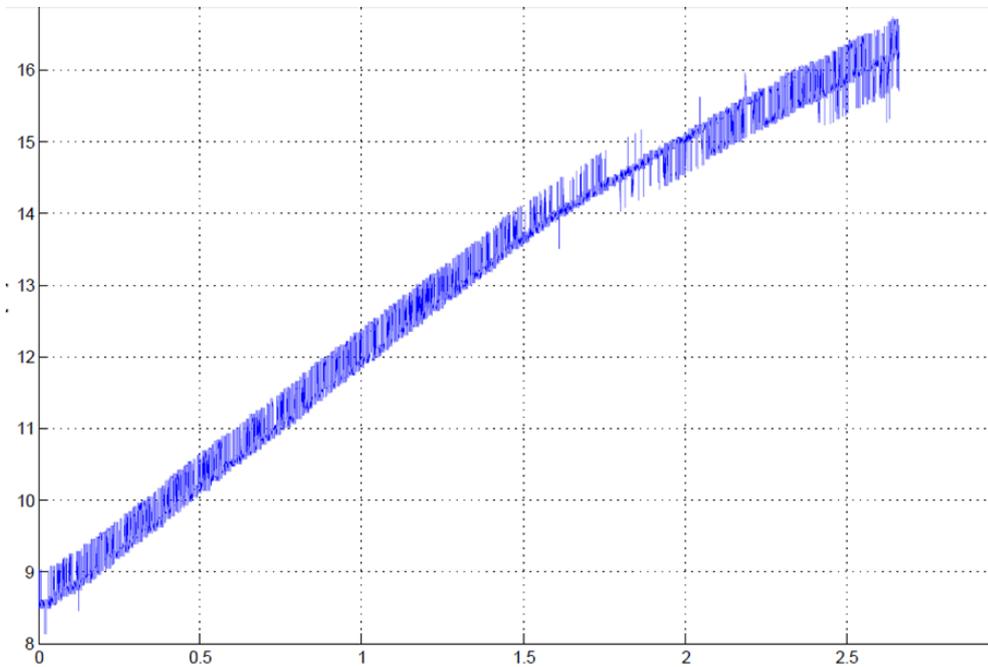
Tempo de chegada ao pico = 2s;

Sobressinal = 0,36;

Comparando os valores dos índices de desempenho dos três controles Proporcional, Proporcional Integral e Proporcional Integral Derivativos observa-se que o controle PID foi o que obteve melhores resultados ou seja foi o que em menor tempo atingiu a estabilização comparado aos outros dois controles.

Um segundo teste é realizado para Bomba em 13% e válvula mudando de 90% para 95%.

Figura 45 – Identificação experimental das mudanças de nível segundo variações na velocidade da bomba



Fonte: Autor

Com o método de Strejc é possível encontrar os parâmetros de T_a e T_l :

$$T_l = 0,1363632s;$$

$$T_a = 2,0909s;$$

$$\frac{T_l}{T_a} = 0,0652174 \quad (5.14)$$

Valor mais próximo na Tabela 1 de Strejc é o 0,104 para valores de:

$$\frac{T_a}{\tau_1} = 2,7 \quad (5.15)$$

$$\frac{T_l}{\tau_2} = 0,28 \quad (5.16)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = 1,6723199 \quad (5.17)$$

Cálculo do ganho:

$$\text{Cálculo do incremento na saída } 16,6 - 5 = 11,6$$

$$\text{Cálculo do incremento na saída } 85\% - 80\% = 5\%$$

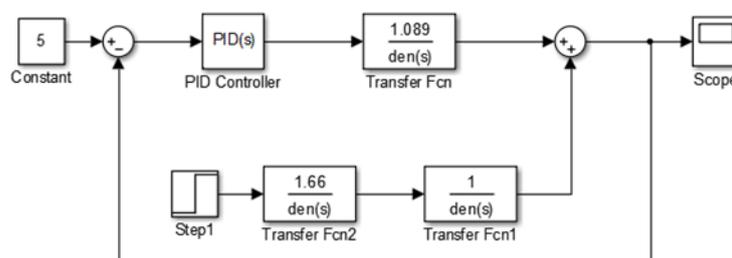
$$K = \frac{11,6}{5} = 2,32cm/\% \quad (5.18)$$

Com os valores de ganho, constante de tempo e o número de polos é possível obter a seguinte função de transferência substituindo os valores na Equação 5.19:

$$G(s) = \frac{2,32}{(1 + 1,6723199s)^2} \quad (5.19)$$

Usando o *Simulink* do software MATLAB® foram feitos diagramas em blocos com a função de transferência mostrada na Figura 46 com distúrbio, um degrau incrementado no distúrbio e o sistema recebendo um valor constante de 5, preset, o PID é composto pelos valores calculados nas Equações 5.11, 5.12 e 5.13.

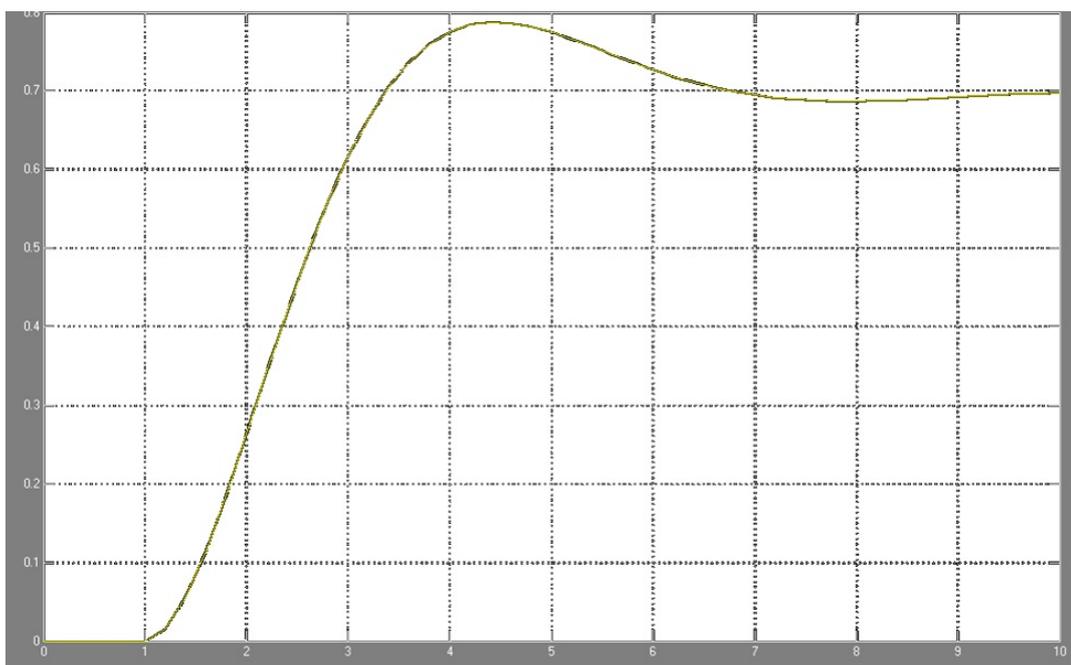
Figura 46 – Diagrama em Blocos do sistema do sistema com distúrbio



Fonte:Autor

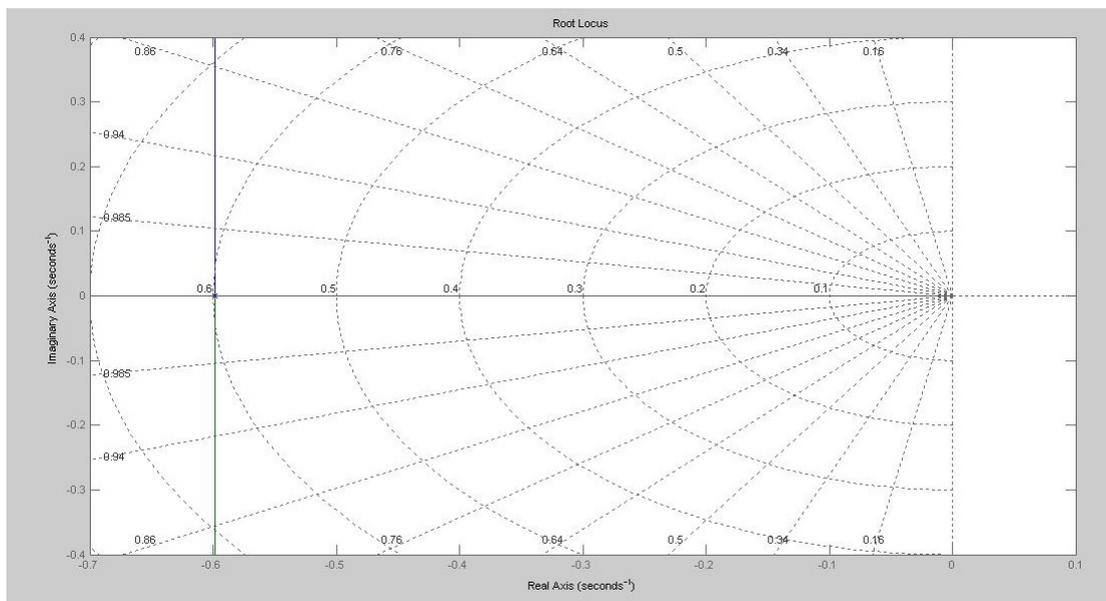
O gráfico da Figura 47 mostra a resposta ao teste experimental do comportamento do controle com ajuste calculado. Já o seu gráfico de lugar das raízes se encontra na Figura 48.

Figura 47 – Resposta do Teste experimental



Fonte: Autor

Figura 48 – Gráfico de lugar das raízes do teste 2



Fonte: Autor

Observando o gráfico da Figura 47 chega-se a conclusão que o sistema estabiliza. Isso é comprovado analisando-se o seu gráfico de lugar das raízes e verificando que todos os polos e zeros encontram-se do lado esquerdo do semiplano s . Comprovando que o PID do sistema é eficaz de acordo com o critério do Distúrbio Mínimo, as ações de controle deverão criar o mínimo de distúrbio à alimentação do agente de controle e a saída do processo. Isto requer geralmente curvas de recuperação não cíclicas. Este critério aplica-se a malhas de controle onde as ações corretivas constituem distúrbios aos processos associados.

Os índices de desempenho encontrados no sistema são:

- $t_s = 3.47s$;
- $t_{ac} = 9.57s$;
- $t_p = 4.38s$;
- $M_p = 0.78$;
- $W_d = 0.9053$;
- $\alpha = 0,07159$;
- $W_n = 9.08126$;
- $\zeta = 0,07884$;

6 CONCLUSÕES

Ao final do projeto a Bancada NVPT apresentou um novo *design*: foram instalados dois tanques, uma válvula com controle contínuo e implementados o modo manual de acionamento e sinaleiros.

Para que sejam realizados estudos de sistemas de segunda ordem, um terceiro tanque e válvulas de mecanismo em esfera foram instalados, em lugares estratégicos, de modo que possamos ter até três tipos de interação entre os tanques. A primeira dá a possibilidade de ter um dos dois tanques trabalhando como um sistema de primeira ordem. A segunda configuração dá a possibilidade de ter dois tanques em série formando um sistema de segunda ordem e a última configuração interliga dois tanques em paralelo de forma a compor um sistema de primeira ordem, porém com uma constante de tempo maior que a da primeira configuração. Com a instalação deste segundo tanque na parte superior houve a necessidade de se acrescentar mais um reservatório na parte inferior da maquete uma vez que apenas um reservatório não é o suficiente para fornecer o líquido necessário para alimentar os dois tanques superiores.

Com o estudo dos esquemas elétricos da Bancada foi possível a instalação do modo manual, que até então a Bancada NVPT não oferecia. Os módulos de saída analógicos do CLP possibilitaram o acréscimo de uma válvula de controle contínuo. Esta válvula possibilita a separação entre as malhas de nível e vazão (pressão), pois assim teriam atuadores diferentes. Após as alterações físicas da Bancada um novo programa foi elaborado e testado no *Twido Suite*, e foi transferido para o CLP da maquete.

Com as alterações realizadas e programa funcionando foram feitos testes experimentais para a identificação da nova malha de nível, e sua interação com a vazão (pressão) de entrada. Medindo o nível, implementou-se degraus na válvula de controle contínuo e logo depois na vazão. Utilizando estes dados no MATLAB®, obteve-se o gráfico da resposta aos degraus que permitiu obter as funções de transferências. Com a ferramenta *Simulink* presente no software MATLAB® foi desenvolvido o ajuste experimental do PID de nível pelo método de Ziegler-Nichols.

Não se pôde fazer identificação dos sistemas de vazão e pressão porque a Bancada não está com a comunicação via Ethernet funcionando, para que um software coletasse os dados diretamente do CLP.

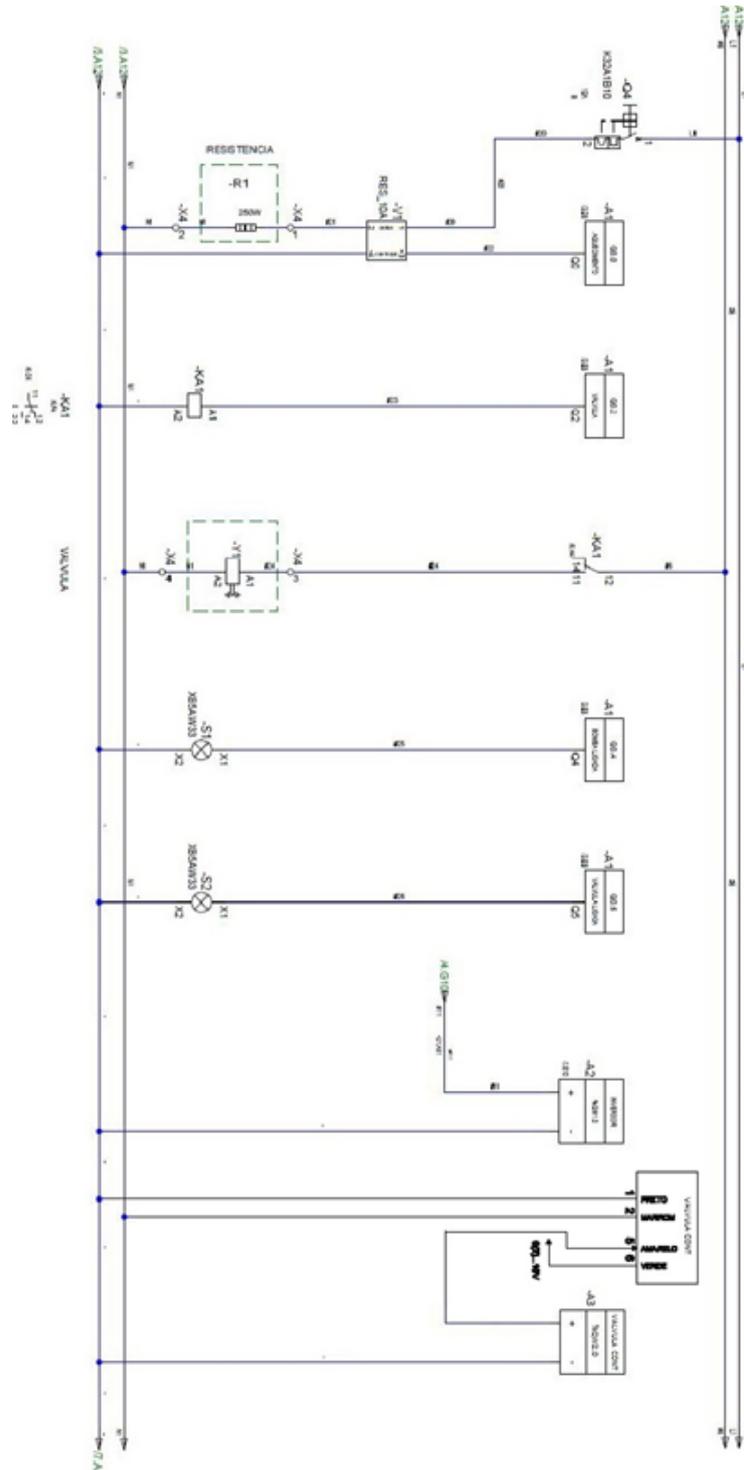
Portanto o objetivo central desta monografia foi alcançado que é fazer melhorias na Bancada NVPT para que a mesma venha a desempenhar um importante papel nas atividades práticas desenvolvidas no laboratório de Automação III da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas nas disciplinas relacionadas e trabalhos futuros com Fuzzy e redes neurais.

REFERÊNCIAS

- BUENO, A. M. *Sistemas de Controle Automáticos*. [S.l.: s.n.], 2011. 19, 20
- CAMARGO, V. L. A. *Controladores lógicos programáveis: Sistemas Discretos*. [S.l.]: São Paulo, 2008. 45
- CASSIANO, C. Medição de vazão. 2008. 36
- CONTROLADORES programables Twido Guía de referencia de software TWD USE 10AS Versión 1.0. [S.l.]. 46
- FARIA, R. de O. *CONTROLE DE NÍVEL EM UM TANQUE SUJEITO A PERTURBAÇÕES E MUDANÇAS DO VALOR DE REFERÊNCIA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. 16
- FICHA de produto OsiSense XX XX930A1A1M12. [S.l.]. 31, 36
- MANUAL Burket fluid control systems flowmeter for continuous flow measurement. [S.l.]. 36
- MANUAL da soft Starter. [S.l.]. 32
- MAYA, P. *Controle Essencial*. [S.l.]: São, 2014. 21, 22
- MICHEL, H. C. C. *Implementação de uma Ferramenta para Auxílio à Sintonia de Controladores PID*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais,, 2010. 17
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: São, 2010. 18, 19, 20, 21, 23, 24
- PEREIRA, R. P. D. A. *IMPLANTAÇÃO DO CONTROLADOR PREDITIVO MULTIVARIÁVEL DMC EM UMA PLANTA PILOTO*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011. 15
- RIBEIRO, M. A. Válvulas de controle e segurança. 1999. 40
- ROSÁRIO, J. M. *Automação Industrial*. [S.l.]: São Paulo, 2009. 31
- TEIXEIRA, T. *Sensor ultrassônico US-020*. 2014. Disponível em: <<http://tecnologia-ciencia.com.br/arduino-sensor-ultra-sonico-us-020-lcd/#sthash.KcoYP3Au.ZENMzNFV.dpbs>>. 32, 33, 34, 35
- T.KILIAN, C. *Modern Control Technology*. [S.l.]: Delmar Thomson Learning, 2000. 32, 37, 38, 39

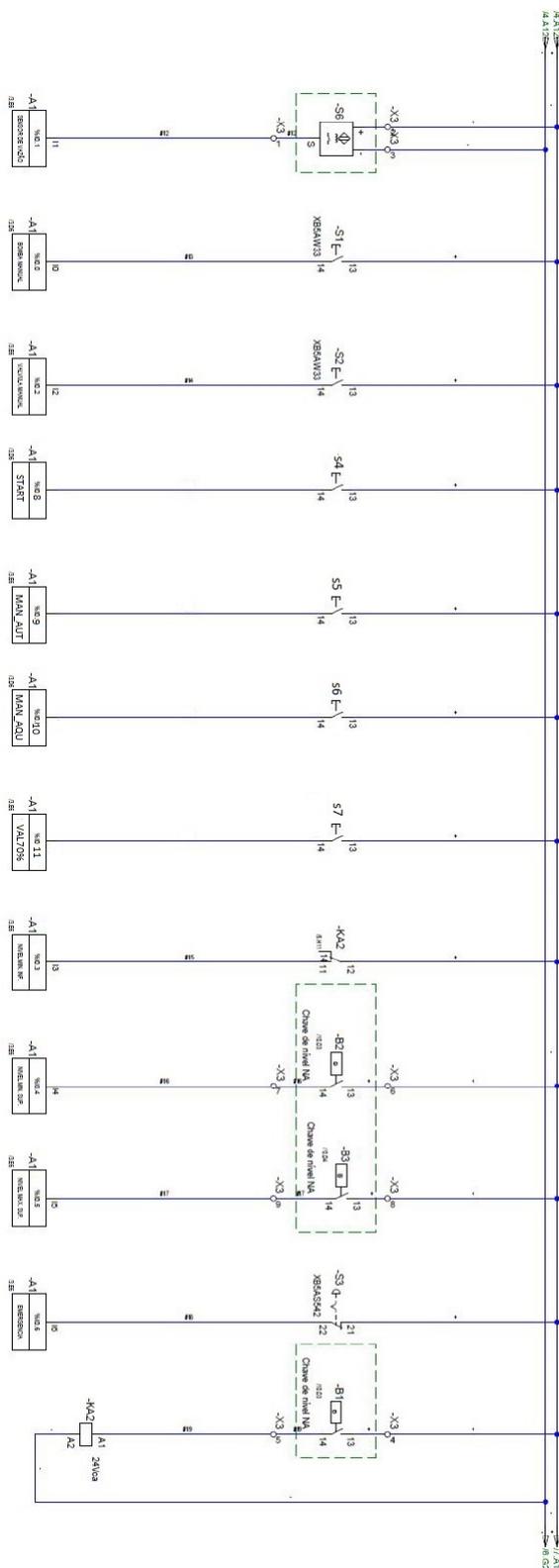
APÊNDICE A – ESQUEMAS ELÉTRICOS DA BANCADA NVPT

Figura 49 – Circuito elétrico da válvula de acionamento



Fonte: Autor

Figura 50 – Circuito elétrico da bancada NVPT



Fonte: Autor

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO CLP DA BANCADA NVPT

Tabela 4 – Entradas

Entrada	Nome
%I0.0	Botão para acionar a moto bomba manualmente
%I0.1	Sensor de vazão
%I0.2	Botão para acionar a válvula manualmente
%I0.3	Sensor de nível mínimo de fluido no reservatório tq2
%I0.4	Sensor de nível mínimo de fluido no reservatório tq1
%I0.5	Sensor de nível máximo de fluido no reservatório tq1
%I0.6	Botão para entrada de emergência
%I0.7	Saída de status do inversor
%I0.8	Inicialização
%I0.9	Seleção modo
%I0.10	Interruptor aquecedor
%I0.11	Válvula contínua manual
%I0.12	Reserva E1
%I0.13	Reserva E2

Fonte: Autora

Tabela 5 – Saída digitais

%Q0.0	Aciona o resistor de aquecimento
%Q0.2	Aciona válvula
%Q0.3	Aciona moto bomba
%Q0.4	Sinaleiro Bomba
%Q0.5	Sinaleiro válvula

Fonte: Autora

Tabela 6 – Tabela de entradas analógicas

%IW1.0	Sensor de pressão
%IW1.1	Sensor de temperatura
%IW2.0	Sensor Ultrassonico

Fonte: Autora

Tabela 7 – Saídas analógicas

%QW1.0	Velocidade da bomba
%QW2.0	Posição da válvula cont.

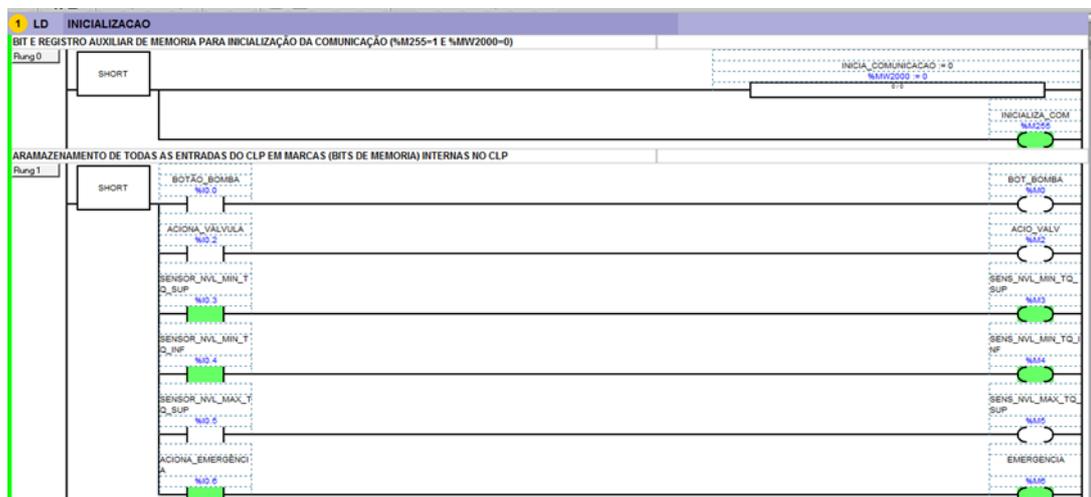
Fonte: Autora

Tabela 8 – Marcas internas

%MW200	MEDE TEMPERATURA
%MW201	PRESET DE TEMPERATURA
%MW202	HISTERESE TEMPERATURA
%MW203	LIMITE MIN TEMPERATURA
%MW250	MEDE NÍVEL
%MW251	AJUSTE MEDE NIVEL
%MW252	GANHO PID
%MW254	TI PID NÍVEL
%MW256	TD PID NÍVEL
%MW258	SAIDA PID NIVEL
%MW260	PRESET NÍVEL
%MW270	MEDE PRESSÃO
%MW272	GANHO PID PRESSÃO
%MW274	TI PID PRESSÃO
%MW276	TD PID PRESSÃO
%MW278	SAIDA PID PRESSÃO
%MW280	PRESET PID PRESSÃO
%MW290	MEDIÇÃO DE VAZÃO POR PULSOS
%MW292	GANHO PID VAZÃO
%MW294	TI PID VAZÃO
%MW296	TD PID VAZÃO
%MW298	SAIDA PID VAZÃO
%MW300	PRESET PID VAZÃO
%MW330	ARMAZENA 10 PULSOS
%MW331	CONTAGEM 10PULSOS
%MW332	AJUSTE MED PULSOS VAZÃO
%MW505	EMER E INV

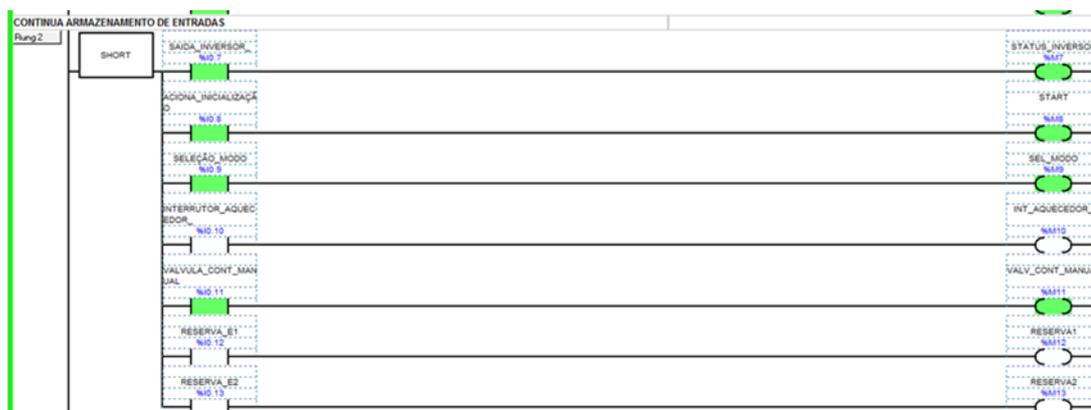
Fonte: Autora

Figura 51 – Inicialização



Fonte: Autor

Figura 52 – Inicialização



Fonte: Autor

Figura 53 – Controle de ON-OFF de temperatura parte 1



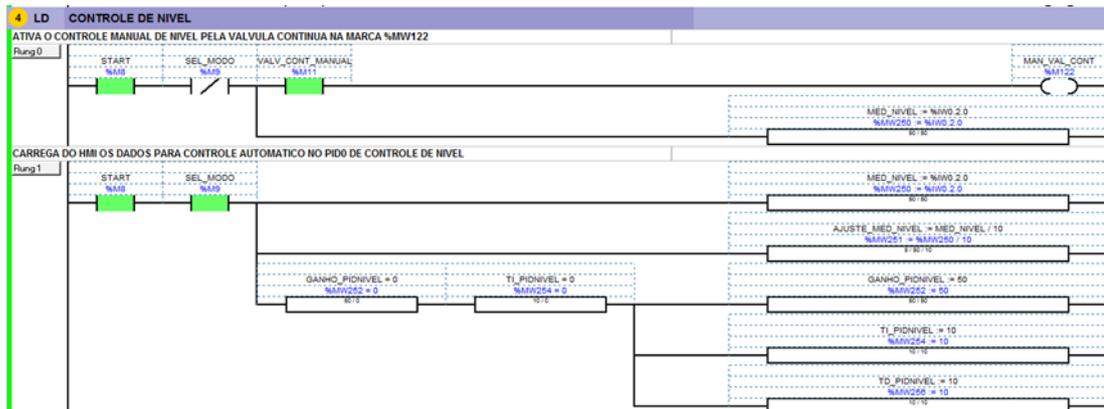
Fonte: Autora

Figura 54 – Controle de ON-OFF de temperatura parte 2



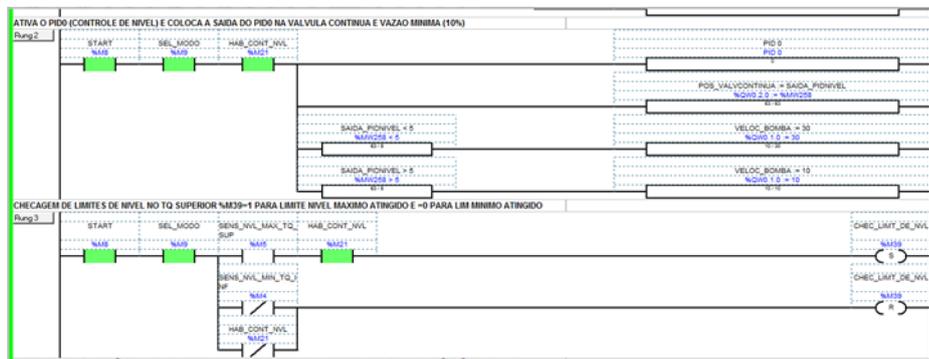
Fonte: Autora

Figura 55 – Controle de nível parte 1



Fonte: Autora

Figura 56 – Controle de nível parte 2



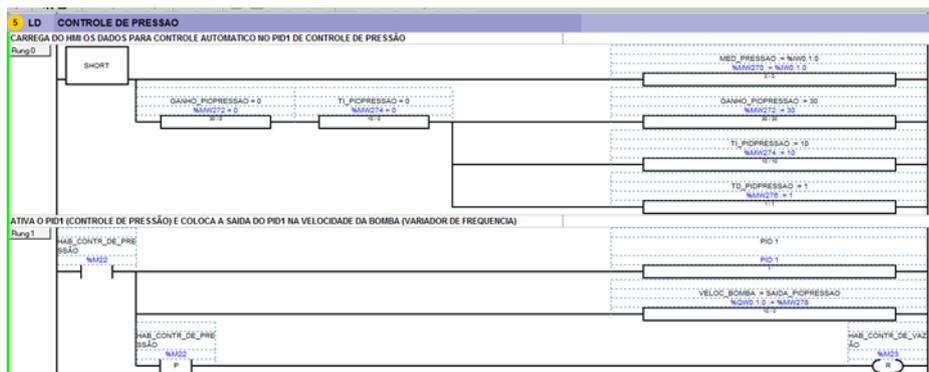
Fonte: Autora

Figura 57 – Controle de nível parte 3



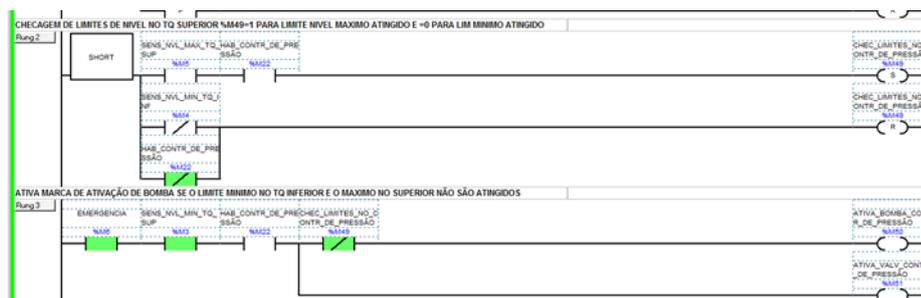
Fonte: Autora

Figura 58 – Controle de pressão parte 1



Fonte: Autora

Figura 59 – Controle de pressão parte 2



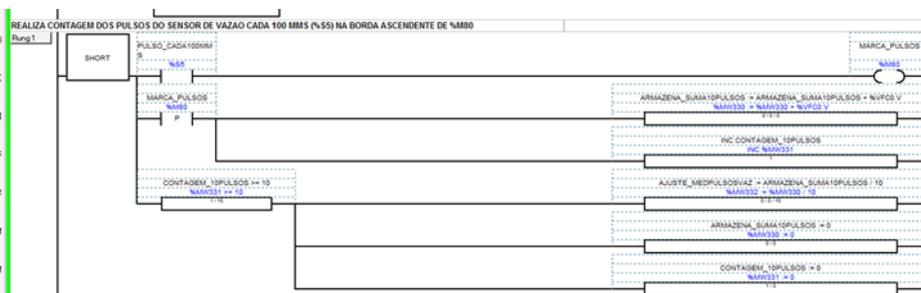
Fonte: Autora

Figura 60 – Checagem de vazão de Vazão parte 1



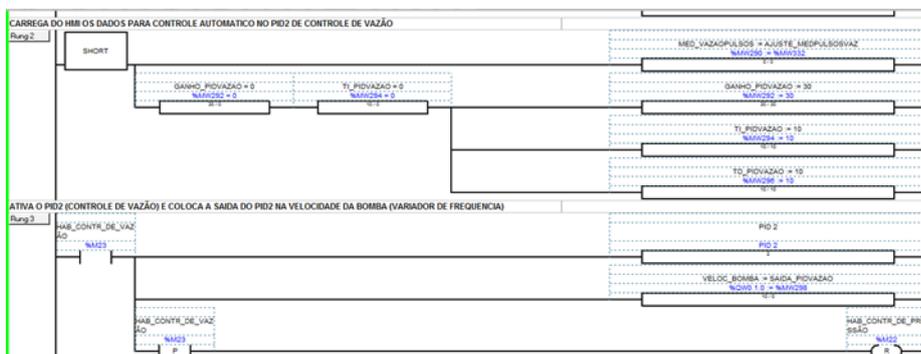
Fonte: Autoria

Figura 61 – Checagem de vazão de Vazão parte 2



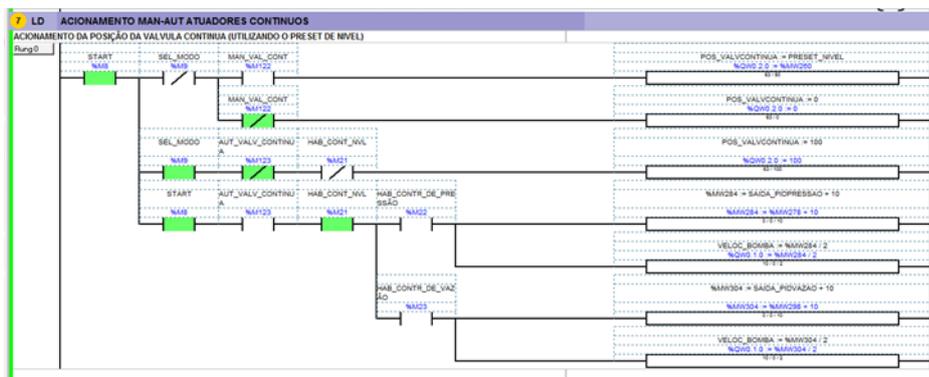
Fonte: Autora

Figura 62 – Checagem de vazão de Vazão parte 3



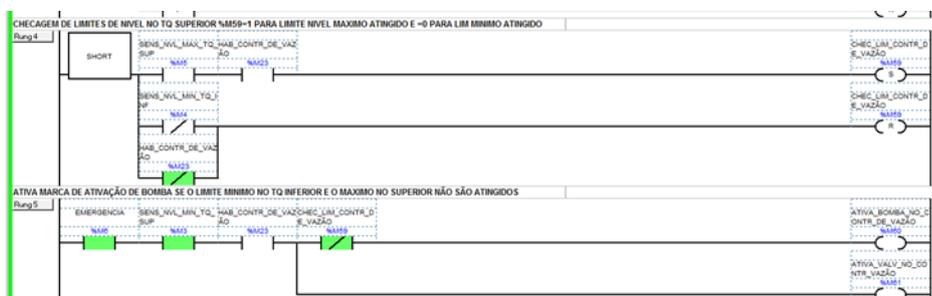
Fonte: Autora

Figura 64 – Acionamento automático parte 1



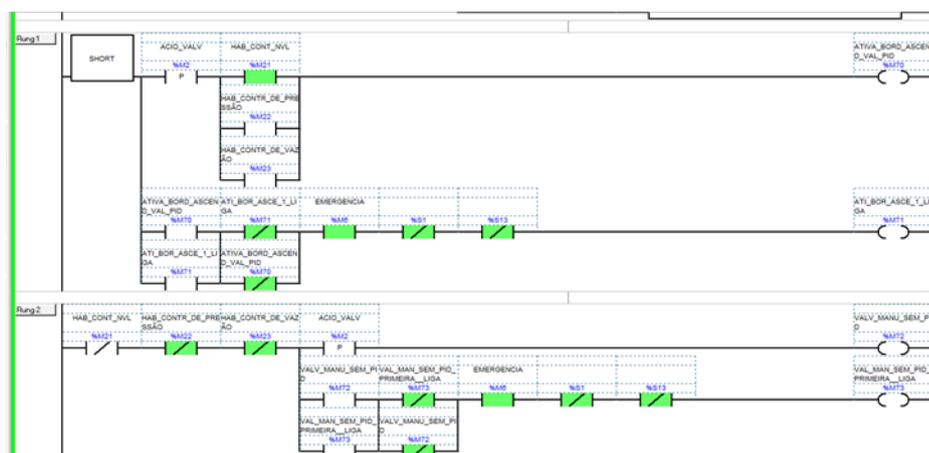
Fonte: Autora

Figura 63 – Checagem de vazão de Vazão parte 4



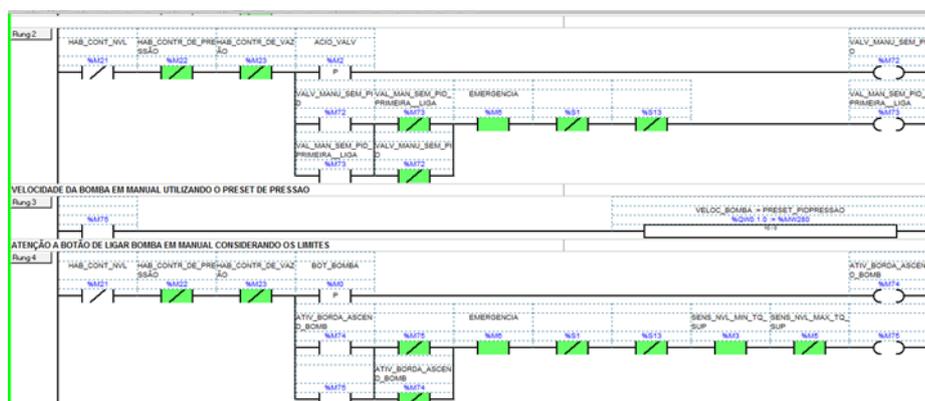
Fonte: Autora

Figura 65 – Acionamento automático parte 2



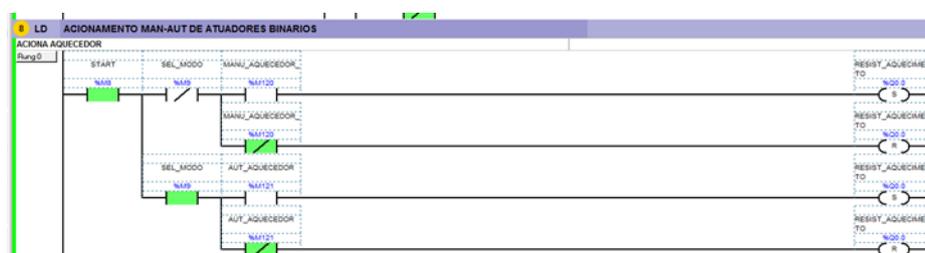
Fonte: Autora

Figura 66 – Acionamento automático parte 3



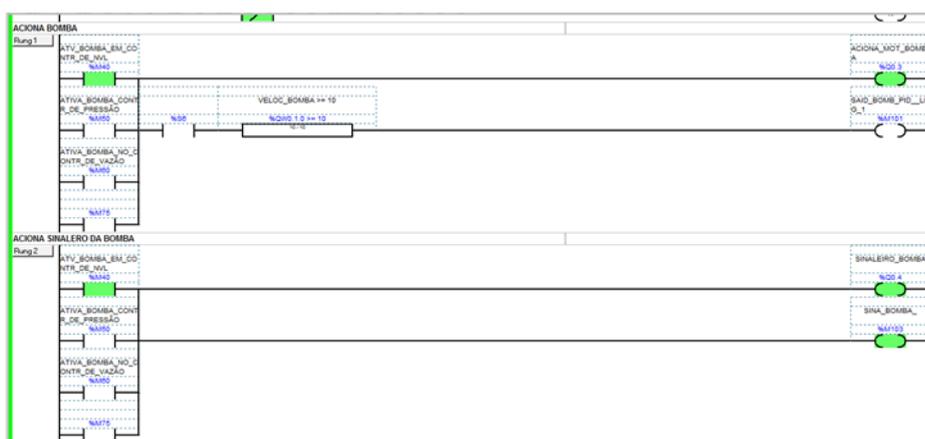
Fonte: Autora

Figura 67 – Acionamento automático atuadores parte 1



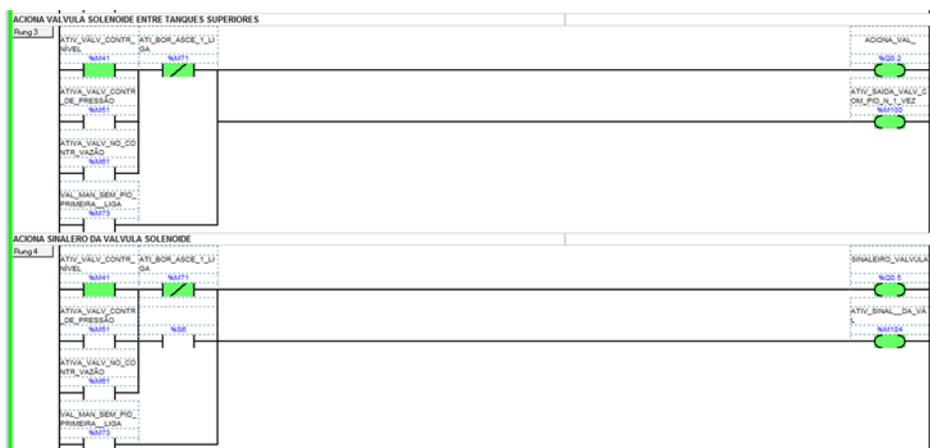
Fonte: Autora

Figura 68 – Acionamento automático atuadores parte 2



Fonte: Autora

Figura 69 – Acionamento manual automático



Fonte: Autora

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES

Especificações do CLP:

- Número de entradas: 40;
- Número de entradas discretas: 24;
- Tensão de entrada: 24V;
- Tipo de tensão: contínua (DC);
- Numero de saidas discretas: 2 saídas;
- Numero de entradas e saidas para expansão: 2 transistores e 14 relays;
- Numero de entradas e saídas em módulo de expansão: 7;
- Alimentação externa: 100 a 240V AC;
- Módulo auxiliar: TM2AMM3HT.

Especificações técnicas do módulo auxiliar TM2AMM3HT:

Tabela 9 – Características do módulo auxiliar TM2AMM3HT

Característica	Módulo Input /Output analógico
Número de entradas analógicas	2
Corrente analógica de entrada	4 a 20mA
Número de saídas analógicas	1
Corrente analógica de saída	4 a 20mA
Resolução da entrada analógica	12 bits
Resolução da saída analógica	12 bits
Tensão	24V DC
Corrente	50 mA
Tempo de estabilização	20ms

Fonte: Datasheet do produto Schneider Electric TM2AMM3HT

Especificações técnicas da IHM HMISTU655:

Tabela 10 – Especificações do HMI

Especificações do HMI	
Processador	ARM9
Frequência processador	333mhz
Acesso ao CLP	Tempo Real
Tensão	24VDC
Corrente	30 A
Potência	6,5 W

Fonte: Product data sheet-Magelis_STU_HMISTU655

Especificações técnicas da motobomba

Tabela 11 – Especificações da motobomba

Especificações da Bomba	
Consumo de Energia	0,592 KWh/h
Rendimento da Bomba	44,2 %
Rendimento do Conjunto	32,4%
Vazão	4,91 m ³ /h
Altura Manométrica	14,4 m.c.a
Rotação corrigida	3500 rpm
Diâmetro do rotor	110 mm

Fonte: Manual da Soft-Start

Especificações do Sensor ultrassônico XX930A1A1M12:

- Tipo do sensor receptor ultrassônico;
- Sistema de detecção Difusa com supressão de fundo;
- Distância de detecção de 1m de área ajustável;
- Tipo de material PMMA (polimetilmetacrilato);
- Tipo de sinal de saída Analógico + discreto;
- Função de saída analógica 0...10V;
- Tensão de alimentação nominal 15...24VCC com proteção contra curtos-circuitos (curto retardamento);
- Alcance de Trabalho assegurado é de 0,051...0,991m;
- Zona cega 0..6,4mm;

- Ângulo de feixe 10°;
- Frequência de transmissão 200KHz;
- Material Aço Inoxidável 303;
- Frequência de repetição 0,9%;
- Atraso first up 720ms;
- Resposta de atraso 25ms;
- Recuperação de atraso 25ms;
- Temperatura ambiente para funcionamento 0...50°C;

Especificações do sensor de vazão DS8030:

- Limites de medição: 0,3 a 10 m/s;
- Temperatura média: 0 a 50 ° C (32 a 122 ° F) / 0 a 80 ° C (32 a 176 ° F) -15 A 100 ° C (5 a 212 ° F);
- Máxima pressão média: PN10 (com encaixe de plástico), PN16 (com encaixe de metal), PN40 (a pedido, veja a folha de dados S030)
- Erro de medição: $\pm 1\%$ de leitura
- Linearidade: $\pm 0,5\%$
- Repetibilidade: $\pm 0,4\%$
- Temperatura ambiente: -15 a + 60 ° C
- Tensão de operação: 12-36 V DC
- Consumo de corrente: 30 mA
- Frequência: 0 a 300 Hz;

Especificações do sensor de pressão:

- Tipo do sensor de pressão: detecção em cada limiar;
- Tamanho do sensor de pressão: 10bar;

- Fluido controlado:
 - Água do mar -20...120°C;
 - Óleo hidráulico -20...120°C;
 - Gás 0...120°C;
 - Fluido corrosivo -20...120°C;
- Tensão de alimentação: 12 a 24VCC, limites de tensão 8 a 30V;
- Consumo de corrente: 20mA;
- Tipo de sinal de saída: analógico positivo discreto;
- Pressão acidental máxima admissível: 20 bar;
- Posição de funcionamento: Qualquer posição, excepto horizontal;
- Precisão de medição: + / - 1% da gama msrg;
- Precisão de repetição: +/- 0.2 %;

Dados técnicos da válvula VSI® EMO-35M-24:

- Fonte de alimentação AC/DC 24V±10%;
- Torque 35 pol-lb (4Nm);
- Tempo de abertura / fechamento 80s a 150s;
- Potência 4VA;
- Ângulo de saída 90° (95° Max.);
- Sinal de controle Floating & 2 pontos On/Off (EMO 35F)/ DC0(2)...10V (EMO-35M);
- Sinal de retorno DC0(2)...10V (EMO-35M);
- Engate universal Ø6 a 16 mm ou 5 a 11 mm;
- Proteção de sobrecarga Automático;
- Classe de proteção IP54;
- Armazenamento -10° C a 55° C 0...90% Rh;
- Nível de ruído (Max.) 40dB(A);
- Peso 600g a 700g;