



Implementação de uma Planta Didática para Uso em Práticas Experimentais

Fernanda Teodoro Magalhães

Leonardo Levy Gomes de Sá

Projeto Final de Curso

Orientadores:

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Andrea Valdman, D.Sc.

Fevereiro de 2014

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA PARA USO EM PRÁTICAS
EXPERIMENTAIS

Fernanda Teodoro Magalhães

Leonardo Levy Gomes de Sá

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química como parte dos
requisitos necessários à obtenção do Grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Heloisa Lajas Sanches, D.Sc.

Andrea Pereira Parente, Engenheira Química

Felipe Souto da Silva, Engenheiro Químico

Orientado por:

Prof.^a Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Prof.^a Andrea Valdman, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2014

Magalhães, Fernanda Teodoro e Sá, Leonardo Levy Gomes de.

Implementação de uma planta didática para uso em práticas experimentais/ Fernanda Teodoro Magalhães e Leonardo Levy Gomes de Sá. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

ix, 61p.;il

(Projeto Final de Curso) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientadores: Profa. Rossana Odette Mattos Folly e Prof.^a Andrea Valdman.

1. Controle de nível. 2. Instrumentação. 3. Plantas Experimentais. 4. Projeto

Final (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Rossana Odette Mattos Folly. 6 Andrea

Valdman . I. Implementação de uma planta didática para uso em práticas experimentais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento Fernanda:

Aos meus pais Tércio e Rose e meu irmão Felipe por todo carinho e apoio durante toda minha vida e principalmente, durante esses anos de faculdade. Pelos conselhos, pelas palavras de conforto e pela amizade.

Aos meus familiares pelo incentivo e apoio constantes.

Às minhas amigas do colégio pela amizade, força, confiança e momentos de risadas. Obrigada por sempre acreditarem em mim.

Ao meu namorado Frederico por todo amor, carinho e motivação, pela compreensão durante meus momentos de estresse e pelos ótimos conselhos.

Agradecimento Leonardo:

À Deus por iluminar meu caminho.

Aos meus pais Márcia e Rui por todo apoio, confiança e suporte durante esses cinco anos de jornada.

Ao meu irmão Alexandre pelo companheirismo e incentivo.

À minha namorada Bárbara por todo amor e incentivo em todos os momentos em que estava chateado por alguma nota. Além de todo o carinho e alegria durante esses nove anos de namoro.

Aos meus familiares por acreditarem em mim.

Aos meus sogros e cunhados por sempre estarem ao meu lado me dando força.

Aos meus amigos sejam da Escola de Química ou fora dela que me proporcionaram momentos de diversão.

Agradecemos também:

As nossas professoras orientadoras, Rossana e Andrea, pelo auxílio, disponibilidade de tempo e material, sempre com simpatia. À Heloísa Lajas Sanches, Andrea Pereira Parente e Felipe Souto da Silva por aceitarem fazer parte da banca examinadora.

Resumo de Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA PARA USO EM PRÁTICAS EXPERIMENTAIS

Fernanda Teodoro Magalhães

Leonardo Levy Gomes de Sá

Fevereiro de 2014

Orientadores: Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Andrea Valdman, D.Sc.

Este trabalho teve como objetivo implementar uma planta didática para práticas de controle, dinâmica e automação. Foi realizado um estudo complementar que permitiu automatizar a planta construída. Neste projeto a planta construída foi adaptada, automatizada e implementada para verificação da viabilidade de sua utilização como uma prática de controle, dinâmica e automação na Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ/UFRJ), como uma forma de complementar a formação de novos engenheiros químicos, apresentando na prática conceitos teóricos. A planta consiste em dois tanques em série que são alimentados por uma bomba e tendo a sua vazão de entrada controlada por uma válvula de controle. O sistema pode funcionar de forma interativa ou não, sendo todas essas opções controladas por um controlador contínuo.

Foram realizados diversos testes que permitiram ajustar a planta e concluir que a mesma pode ser utilizada em práticas.

Abstract of Monograph presented to Escola de Química as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer.

IMPLEMENTATION OF A DIDACTIC PLANT FOR USE IN EXPERIMENTAL PRACTICES

Fernanda Teodoro Magalhães

Leonardo Levy Gomes de Sá

February, 2014

Advisor: Prof.^a Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Prof.^a Andrea Valdman, D.Sc.

This work aimed to deploy a didactical plant for control, dynamics and automation practices. An additional study that allowed automatization in the plant built was performed. In this work the plant built was adapted, automated and implemented to check the feasibility of its use as a practice of control, dynamics and automation in the School of Chemistry of the Federal University of Rio de Janeiro (EQ / UFRJ), as a supplement formation for new chemical engineers, presenting theoretical concepts in practice. The plant consists of two tanks in series which are fed by a pump and having its input flow controlled by a control valve. The system can operate interactively or not, controlled by a continuous controller.

Several tests that allowed adjust plans and conclude that it can be used in practices were performed.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo	13
1.2	Estrutura Organizacional	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Modelagem e Dinâmica.....	14
2.1.1	Definições.....	14
2.1.2	Classificação de Modelos	15
2.1.3	Representação de Modelos	16
2.1.3.1	Equações de Estado	16
2.1.3.2	Função de Transferência.....	16
2.2	Controle de Processos.....	18
2.2.1	Definições.....	18
2.2.2	Estratégias de controle.....	18
2.2.3	Componentes Básicos.....	20
2.2.3.1	Sistema de medição	21
2.2.3.2	Sistema de atuação	21
2.2.3.3	Controlador.....	22
2.2.4	Modos de controle	24
2.3	Instrumentação e Automação Industrial.....	25
2.3.1	Definição	25
2.3.2	Instrumento de medição	25
2.3.3	Instrumento de atuação.....	26
2.3.4	Instrumento de controle	28
2.3.5	Sistema Supervisório	28
2.3.6	Diagrama P&I.....	29
3	METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO	31

3.1	Estrutura da planta didática	31
3.2	Desenvolvimento da interface gráfica	33
3.2.1	Base de dados	34
3.2.2	Histórico	37
3.2.3	Telas	37
3.2.3.1	Tela Inicial.....	37
3.2.3.2	Tela da Prática 1 - Curva de Calibração de Válvula.....	38
3.2.3.3	Tela da prática 2 – Modelagem do processo	39
3.2.3.4	Tela da prática 3 – Sintonia do controlador.....	41
3.3	Testes experimentais	42
3.3.1	Influência do nível do TQ1002 na vazão de saída	42
3.3.1.1	Metodologia.....	42
3.3.1.2	Resultados.....	43
3.3.1.3	Conclusão	44
3.3.2	Calibração da Válvula de Controle.....	45
3.3.2.1	Metodologia.....	45
3.3.2.2	Resultados.....	45
3.3.2.3	Conclusão	46
3.3.3	Calibração da válvula de controle através do medidor de nível.....	47
3.3.3.1	Metodologia.....	47
3.3.3.2	Resultados.....	47
3.3.3.3	Conclusão	50
3.3.4	Análise da vazão de saída e a vazão de entrada do TQ1002	50
3.3.4.1	Resultados.....	51
3.3.4.2	Conclusão	52
3.3.5	Modelagem e Sintonia do Controlador.....	52
3.3.5.1	Metodologia.....	52

3.3.5.2 Resultados.....	54
3.4 Práticas Sugeridas.....	56
3.4.1 Prática 1 – Curva de Calibração da Válvula.....	56
3.4.2 Prática 2 – Modelagem do Processo.....	57
3.4.3 Prática 3 – Sintonia do Controlador	58
4 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	59
5 BIBLIOGRAFIA	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo.....	14
Figura 2 - Representação Simbólica da Função de Transferência	16
Figura 3 - Malha de Controle Feedback [9]	19
Figura 4 - Malha de Controle FeedFoward com malha Feedback [10].....	20
Figura 5 - Malha de Controle Cascata [10]	20
Figura 6 - Sistema de medição	21
Figura 7 - Elementos de um sistema de atuação	22
Figura 8 - Elementos do instrumento controlador.....	23
Figura 9 - Equação do controlador proporcional.	24
Figura 10 - Equação do controlador proporcional integral.	24
Figura 11 - Equação do controlador proporcional integral, derivativo.	24
Figura 12 - Comparação de respostas dos tipos de modo de controle do controlador [11].	25
Figura 13 - Válvula do tipo manual [12].....	26
Figura 14 - Válvula do tipo solenóide [13]	27
Figura 15 - Válvula de controle [14].....	27
Figura 16 - Exemplo de diagrama P&I [2].....	30
Figura 17 - Estrutura da planta didática.	32
Figura 18 - Seção reta do tanque de nível	33
Figura 19 - Exemplo de parâmetros a serem preenchidos para uma entrada analógica.....	34
Figura 20 - Opção "Enable Output" na base de dados.	35
Figura 21 - Grupos configurados no histórico.	37
Figura 22 - Tela Inicial.....	38
Figura 23 - Tela da Prática 1.	39
Figura 24 - Exemplo com interação, TQ1003.....	40
Figura 25 - Exemplo sem interação, TQ1002.	41
Figura 26 - Tela da Prática 3, com modo "sem interação" ativado, loop do controlador do TQ1002 ativado e válvula solenoide aberta.	42
Figura 27 - Tanque TQ1002.....	43
Figura 28 - Gráfico da Influência da Altura de água na vazão de saída	44
Figura 29 - Gráfico de vazão média da válvula de controle.....	46
Figura 30 - Calibração ascendente da válvula de controle.....	48
Figura 31 - Calibração descendente da válvula de controle.....	48

Figura 32 - Curva de vazão da válvula.....	50
Figura 33 - Gráfico de comparação entre as vazões de entrada e saída do tanque TQ1002. ...	51
Figura 34 - Método do tempo de 63% da variação final [3]	53
Figura 35 - Curva de reação à aplicação do degrau.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do primeiro e do segundo tanque	32
Tabela 2 - Entradas Analógicas da Base de Dados	35
Tabela 3 - Entradas analógicas configuradas na base de dados	36
Tabela 4 - Entradas digitais configuradas na base de dados	36
Tabela 5 - Blocos de cálculo configurados na base de dados	36
Tabela 6 - Dados obtidos para a válvula de saída do TQ1002	43
Tabela 7 - Dados obtidos para a válvula de controle	45
Tabela 8 - Média das vazões para cada abertura da válvula de controle.....	46
Tabela 9 - Valores de vazão para cada abertura de válvula calculados através do coeficiente angular.....	49
Tabela 10 - Vazão média para cada valor de abertura	49
Tabela 11 - Dados obtidos experimentalmente	51
Tabela 12 - Correlações de Ziegler-Nichols para ajuste de um controlador PID.....	54
Tabela 13 - Parâmetros Calculados	55
Tabela 14 - Parâmetros essenciais para as práticas	59
Tabela 15 - Dados das práticas sugeridas.....	59

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes dificuldades na formação não só do engenheiro químico, mas de qualquer engenheiro, no Brasil, é o grande número de disciplinas teóricas e a falta de aplicação prática destes conceitos na grade curricular, seja esta laboratorial ou simulativa em programas computacionais. Essa insuficiência prática só é recuperada quando o aluno participa de um programa de estágio ou trainee na indústria da área relacionada a sua formação, tornando-o assim, mais apto a desenvolver-se profissionalmente.

Na engenharia química, e mais especificamente na área de Modelagem, Dinâmica, Controle e Instrumentação percebe-se ainda que tanto na graduação como na pós graduação, o Brasil ainda está um passo atrás no desenvolvimento de práticas para essa área, uma vez que dadas as grades horárias das faculdades brasileiras, é difícil encontrar programas específicos de práticas neste assunto. Cursos de pós-graduação ao redor do mundo oferecem exemplos de simulação, estudos de caso e projetos de curso [1]. Sendo assim, este trabalho ajudou a desenvolver uma planta para o desenvolvimento de práticas relacionadas a estas disciplinas.

Avaliou-se e desenvolveu-se no projeto uma planta com dois tanques de nível disponível na Escola de Química/UFRJ no Laboratório de Engenharia Química (LADEQ) [2]. No desenvolvimento deste trabalho foi realizada a configuração dos instrumentos de forma a permitir a implementação da planta. Foram realizados testes de forma a determinar as condições de operação ideais.

Neste trabalho também foram sugeridas três práticas (Curva de Calibração da Válvula, Modelagem do Processo e Sintonia do Controlador) que podem ser utilizadas nas disciplinas da Escola de Química. Essas práticas estão diretamente relacionadas a conceitos teóricos aprendidos nas disciplinas de dinâmica, controle e automação.

1.1 Objetivo

Este projeto tem como objetivo principal implementar uma planta para práticas de dinâmica, controle e instrumentação, como forma de enriquecimento do conhecimento adquirido nestas disciplinas teóricas. Este trabalho é um desenvolvimento da planta construída no laboratório da Escola de Química e a sua viabilização para o uso em práticas, também sugeridas, testadas e descritas ao longo deste trabalho.

A planta instalada consiste em dois tanques de nível em série controlados por um controlador contínuo capaz de modificar a configuração de operação de duas maneiras: com interação, onde o nível de um tanque interfere na entrada, ou sem interação, onde não há interferência do nível do tanque na entrada do mesmo.

1.2 Estrutura Organizacional

Este projeto foi dividido em tópicos para facilitar o entendimento:

- Revisão Bibliográfica: Onde os conceitos e definições que serão utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram apresentados;
- Metodologia, Resultados e Discussão: Onde são descritos todos os testes e modificações realizados para o desenvolvimento da planta, bem como a sugestão e a apresentação de três práticas plausíveis de serem implementadas neste sistema e seus resultados, além dos dados de operação da planta;
- Conclusão: Onde uma análise dos resultados obtidos foi feita chegando a um objetivo comum sobre a viabilidade da planta e sua aplicação em diversas disciplinas e a determinação das condições de operação a serem utilizadas;
- Bibliografia: Onde as fontes utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho são apresentadas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelagem e Dinâmica

2.1.1 Definições

Essencialmente, dinâmica de processos é o estudo dos estados transientes de comportamento com tempos variáveis dos processos, quando ocorrem alterações súbitas ou não nas condições de operação que afetam a eficiência e o andamento dos processos [3]. Para descrever os principais fenômenos que ocorrem em um processo, são necessários modelos matemáticos com equações que relacione as diferentes variáveis. Este estudo é conhecido como modelagem matemática de processos.

A modelagem pode ser feita de duas maneiras: modelagem fenomenológica, onde as equações de balanço (massa, energia e momento) descrevem o comportamento do processo; ou modelagem empírica, onde é gerado um modelo cuja estrutura e parâmetros são obtidos a partir de dados experimentais coletados e ajustados. A representação é feita através de equações algébricas e equações diferenciais [4].

Após a determinação do modelo do processo, conforme apresentado na Figura 1, sua simulação consiste na resolução numérica das equações, permitindo determinar os valores das variáveis de saída em diferentes condições de operação (variáveis de entrada) [4].

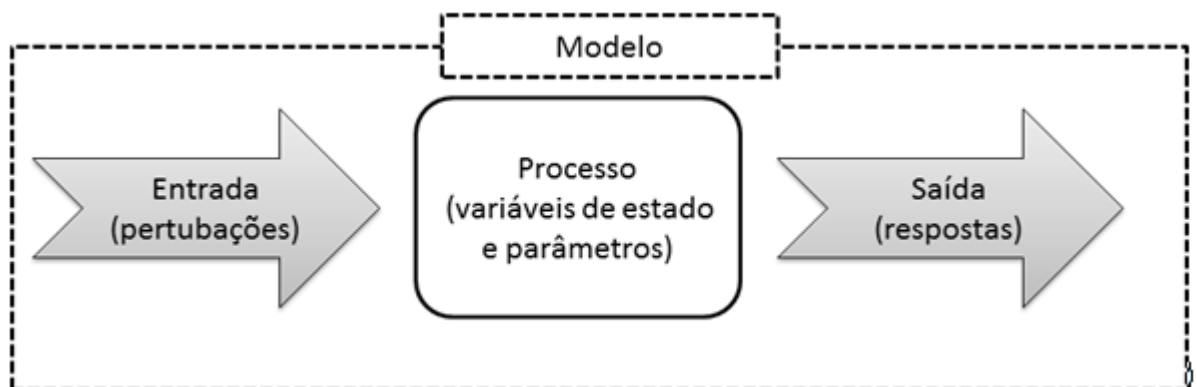


Figura 1 - Modelo

2.1.2 Classificação de Modelos

Segundo a literatura, (Seborg, Mellichamp, & Edgar, 1989) os modelos de processos podem ser classificados de diferentes formas como apresentado a seguir [5]:

- **Estático ou Dinâmico:** O modelo estático representa um processo cujo valor das variáveis não variam ao longo do tempo. O modelo é representado por um sistema de equações algébricas. No modelo dinâmico, as variáveis variam no tempo, que é a variável independente. O modelo é um sistema de equações diferenciais.
- **Determinístico ou Estocástico:** Em um modelo determinístico, é fácil calcular a saída uma vez que se conheça a variável de entrada e as condições iniciais. No caso de um modelo estocástico há termos aleatórios que tornam impossível um cálculo exato da saída.
- **Parâmetros Concentrados ou Parâmetros Distribuídos:** Nos modelos com parâmetros concentrados as propriedades do sistema são consideradas homogêneas em todo o volume de controle e as variações espaciais são desprezadas. Nos modelos com parâmetros distribuídos as variações espaciais são consideradas no comportamento das variáveis, pois há heterogeneidade nas propriedades do sistema. Eles são descritos por um número infinito de equações ordinárias ou por equações diferenciais parciais.
- **Linear ou Não-Linear:** Um modelo é linear se a(s) saída(s) depende(m) linearmente da(s) entrada(s) e possíveis perturbações. Caso contrário ele é não-linear. Um modelo linear pode ser classificados conforme sua ordem, ou seja podem ser classificados de acordo com a ordem da equação diferencial, sendo mais comuns a primeira e segunda ordem.
- **Invariantes no tempo ou Variantes no tempo:** Nos modelos invariantes no tempo, como o próprio nome diz, seus parâmetros não variam ao longo do tempo, diferente dos modelos variantes no tempo.
- **Tempo Contínuo ou Tempo Discreto:** Modelos em tempo discreto ou não contínuo descrevem a relação entre entradas e saídas em pontos de tempo discreto. Enquanto isso modelos de tempo contínuo são descritos por equações diferenciais.

2.1.3 Representação de Modelos

Como foi citado anteriormente, existem duas formas de se determinar um modelo dinâmico: fenomenológico ou empírico. Estes podem ser representados de duas maneiras: através de equações de estado ou função de transferência.

2.1.3.1 Equações de Estado

A representação em espaço de estados possui alguns conceitos que precisam ser definidos:

- **Estado:** O estado de um sistema dinâmico é o conjunto mínimo de variáveis de estado, tal que o conhecimento destas variáveis no tempo inicial (t_0), conjuntamente com as entradas em $t > t_0$, determinam totalmente o comportamento do sistema para qualquer tempo $t \geq t_0$ [6].
- **Variáveis de Estado:** As variáveis de estado de um sistema dinâmico são o conjunto mínimo de variáveis que determinam o seu estado. Cabe ressaltar que as variáveis de estado não necessariamente devem ser grandezas físicas [6].

2.1.3.2 Função de Transferência

Para a representação em função de transferência é utilizado o operador linear transformada de Laplace. Este operador é responsável pela transformação de funções contínuas ou seccionalmente contínuas de uma variável independente do tempo em funções de uma variável imaginária. Sua utilização é um artifício matemático capaz de facilitar a resolução de sistemas dinâmico lineares. Ele permite levar a resolução de equações diferenciais à resolução de equações polinomiais mais simples de resolver.

A função de transferência no domínio s tem sua representação simbólica (Diagrama de Blocos) apresentada pela Figura 2.



Figura 2 - Representação Simbólica da Função de Transferência

A equação abaixo indica o cálculo da resposta $X(s)$ para o diagrama apresentado na Figura 2.

$$X(s)=Y(s).G(s)$$

Onde $G(s)$ é a função de transferência entre as variáveis $Y(s)$ e $X(s)$, em desvios [3].

As funções de transferência são constituídas de parâmetros que podem ser calculados experimentalmente ou de forma teórica. Estes parâmetros são K , τ e t_0 . O Ganho estático (K) é uma grandeza que representa o quanto um sistema reage a uma perturbação, uma alteração no estado em que se encontra o processo, e pode ser calculada pela razão entre a variação da variável de saída, ou seja a variável medida e a variação da variável de entrada (a variável alterada).

$$K = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}}$$

A Constante de Tempo (τ) é uma grandeza que representa em quanto tempo um sistema reage a uma perturbação e está relacionada à ordem da função de transferência. Alguns métodos para o seu cálculo podem ser encontrados na literatura. O Tempo morto (t_0) é o tempo em que o sistema começa a responder a perturbação, ou seja qual o retardo do processo em relação a uma alteração em uma variável. O fator de amortecimento (ξ), descreve se o modelo é um sistema sub-amortecido ($0 < \xi < 1$), criticamente amortecido ($\xi = 1$) ou superamortecido ($\xi > 1$) [3]. As funções de transferência mais utilizadas são as de primeira e segunda ordens.

Primeira Ordem:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-t_0 s}}{\tau s + 1}$$

Segunda Ordem:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-t_0 s}}{(\zeta_1 s + 1)(\zeta_2 s + 1)} \quad \text{ou} \quad G(s) = \frac{K \cdot e^{-t_0 s}}{\zeta^2 s^2 + 2\xi\zeta s + 1}$$

Ordens Superiores:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-tos}}{(\zeta_1 s + 1)(\zeta_2 s + 1) \dots (\zeta_n s + 1)}$$

2.2 Controle de Processos

2.2.1 Definições

Controle de processos é normalmente utilizado no sentido de regulação, direcionamento ou comando. Um sistema de controle é um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular, ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema. Em Engenharia, sistema de controle adquire um sentido mais restrito, designando sistemas utilizados para controlar variáveis como por exemplo temperatura, pressão e vazão em processos químicos [7].

Alguns conceitos essenciais no estudo de controle de processos são apresentados abaixo:

- **Variável Controlada:** é a grandeza ou a condição que se deseja controlar. É necessariamente medida [8].
- **Variável manipulada:** é aquela sobre a qual o elemento de atuação atua, no sentido de se manter a variável controlada no valor desejado [8].
- **Malha Fechada:** a informação sobre a variável controlada é comparada com o valor pré-estabelecido (chamado SET POINT), gerando uma diferença (erro) que é corrigida manipulando-se uma ou mais variáveis do processo [8].
- **Distúrbio (perturbação):** qualquer evento que afeta o funcionamento do sistema de controle de forma adversa, gerando variações no processo. Pode ser gerado internamente ou externamente ao sistema de controle [7].

2.2.2 Estratégias de controle

Existem diversos tipos de estratégias de controle de processo, sendo as mais utilizadas listadas abaixo com suas definições. Estas podem ser utilizadas sozinhas ou

combinadas entre si. A malha fechada acompanha a evolução da saída de controle através da medida de uma variável a ser controlada.

Estas malhas são representadas por diagramas de blocos e nestes as funções de transferências são identificadas pela letra G, onde G_m é a função de transferência do medidor, G_c é a função de transferência do controlador, G_v é a função de transferência da válvula de controle, G_p é a função de transferência do processo e as demais são funções de transferência de variáveis que alteram o sistema.

Em malhas de realimentação o princípio de atuação consiste na tomada de decisão de correção pelo aparecimento de um desvio ou erro na variável de processo, que consiste na comparação entre a variável medida e o Set Point [3]. É chamada de malha Feedback e está representada na Figura 3.

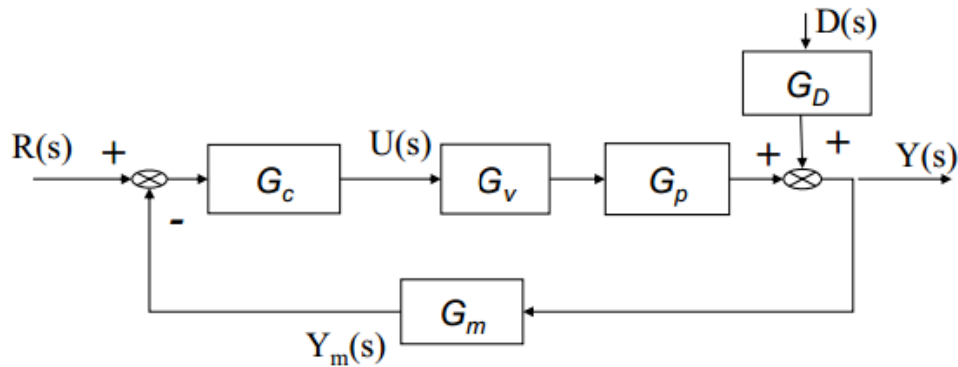


Figura 3 - Malha de Controle Feedback [9]

A Malha de Antecipação ou feedforward, tem como critério básico a tomada de decisão a partir da antecipação da ação de correção antes do efeito da perturbação. Para tal a malha mede uma variável operação que afeta a variável principal do processo e que se deseja controlar. Requer, no entanto, o conhecimento prévio do efeito da perturbação e da correção realizada pelo processo. Geralmente é utilizada em conjunto com a malha feedback, conforme apresentado na Figura 4.

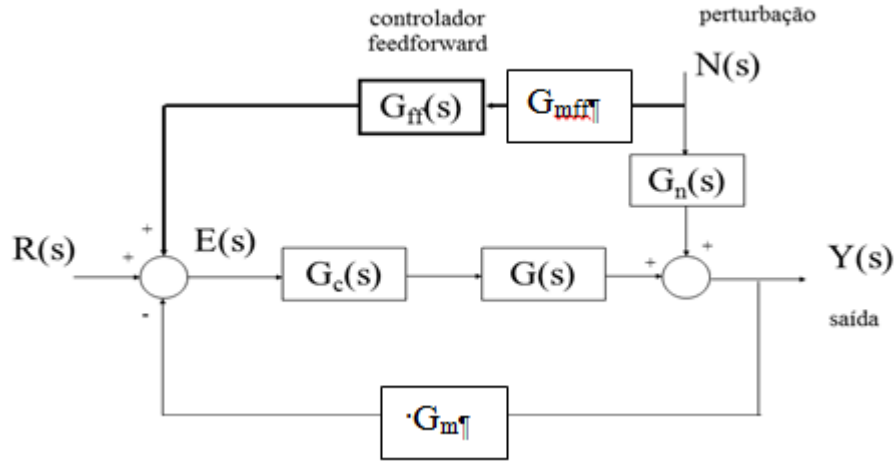


Figura 4 - Malha de Controle FeedFoward com malha Feedback [10]

A Malha Cascata é baseada essencialmente no conceito de controle de realimentação, e atua em cascata através da instrumentação adequada corrigindo variáveis intermediárias do processo, com efeito cascata sobre a variável principal que se deseja controlar. A malha é representada pela Figura 5.

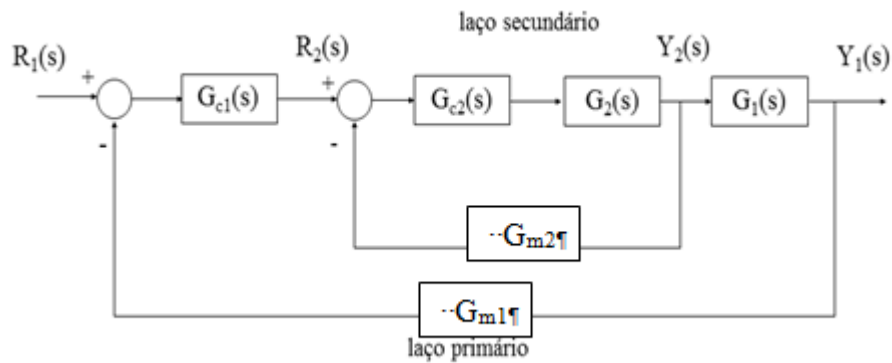


Figura 5 - Malha de Controle Cascata [10]

2.2.3 Componentes Básicos

Um sistema de controle possui três elementos principais: o sistema de medição, o sistema de atuação e o controlador.

2.2.3.1 Sistema de medição

O sistema de medição é responsável pela medição da variável controlada e é apresentado na Figura 6.

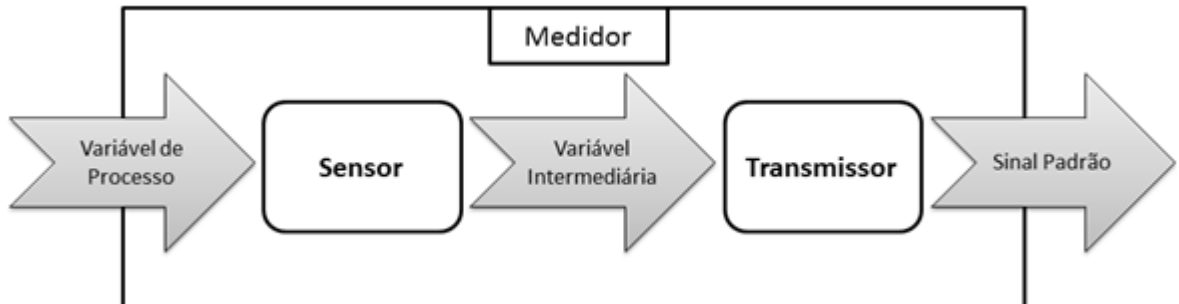


Figura 6 - Sistema de medição

No sensor é onde ocorre uma alteração física, química ou físico-química (princípio de medição) gerando a variável intermediária que é normalmente definida pelo sensor que a acompanha. Como existem diversos tipos de sensores e variáveis intermediárias é necessário um transmissor, responsável pela conversão destas variáveis em uma linguagem universal, o sinal padrão. Industrialmente existem três tipos de transmissores contínuos: o transmissor pneumático que transmite um sinal padrão entre 3-15 psi, o transmissor eletrônico que transmite sinais analógicos (4-20mA) e o transmissor digital (Fieldbus) [3].

Todos os medidores podem ser caracterizados pela sua ação direta (o aumento da variável controlada aumenta o sinal padrão) ou reversa (o aumento da variável controlada diminui o sinal padrão), ou pela função dinâmica.

2.2.3.2 Sistema de atuação

O sistema de atuação, ou elemento final de controle, é responsável pela alteração da variável manipulada, provocando perturbações no processo. Na maioria dos casos a variável manipulada é a vazão, sendo por isso, a válvula de controle o elemento final de controle mais utilizado para manipulação de processos. Seus elementos básicos estão descritos na Figura 7.



Figura 7 - Elementos de um sistema de atuação

O sinal de controle é o sinal enviado pelo controlador ao sistema de atuação (4-20mA), por ser um sinal de corrente e as válvulas serem normalmente pneumáticas, ou seja devem receber sinal em unidade de pressão é utilizado um conversor I/P que converte o sinal elétrico em pneumático (3-15 psig). Recebida a informação, a válvula tem o sinal de pressão convertido em vazão, através do atuador e do corpo [3].

Além disso, esses atuadores podem ser caracterizados pela sua ação: direta/falha fechada onde o aumento do sinal de controle aumenta a abertura e conseqüentemente a vazão, ou reversa/falha aberta onde o aumento do sinal de controle diminui a abertura e conseqüentemente a vazão. A relação entre a vazão (F) e a abertura da válvula (X_v) pode ser dada pelo escoamento (linear – $F = X_v$, igual percentagem – $F = \alpha^{(X_v-1)}$ ou raiz quadrada – $F = \sqrt{X_v}$) ou pela resposta dinâmica.

2.2.3.3 Controlador

O controlador é o centro de uma malha de controle, sendo responsável por desempenhar a função de decisão do que fazer no sistema de controle. Seus elementos estão descritos na Figura 8.

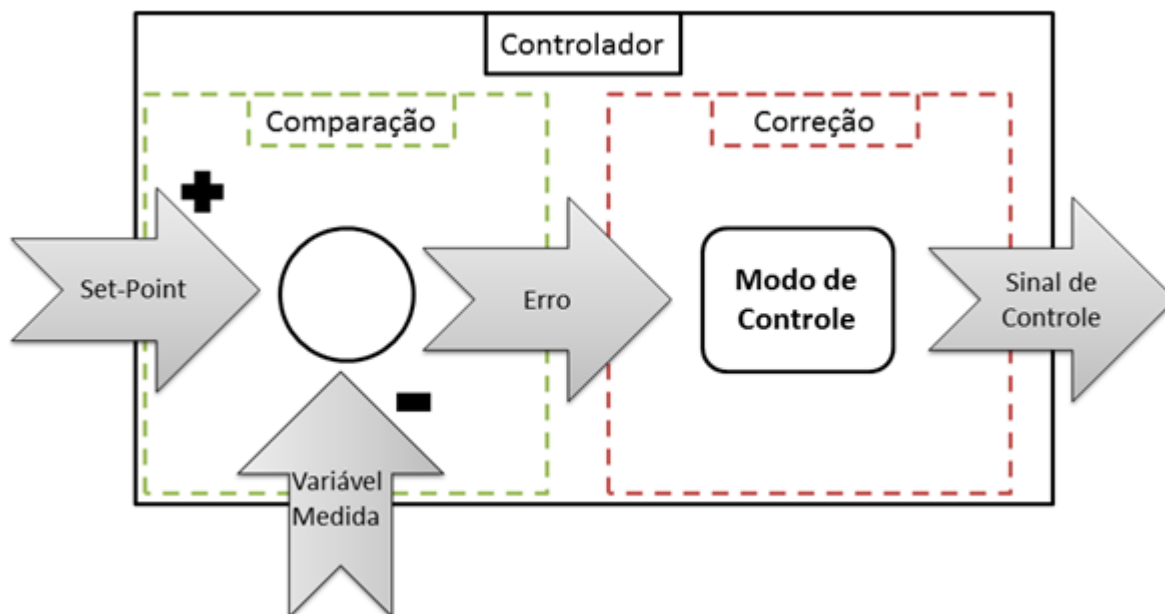


Figura 8 - Elementos do instrumento controlador

A operação do controlador de forma geral ocorre em duas etapas. A primeira etapa é a de comparação, destacada em verde na Figura 8. Nesta etapa a variável medida recebida em forma de sinal padrão (4-20mA) é comparada com um valor padrão definido que se deseja para o processo, o Set-Point, a diferença é chamada de erro. Esse erro é corrigido na etapa de correção, destacada em vermelho na Figura 8, onde através de um modo de controle é calculado um sinal de controle que será devidamente enviado ao elemento final de controle.

Os controladores também podem ser caracterizados pela sua ação: direta (o aumento da variável medida aumenta o sinal de controle) ou reversa (o aumento da variável medida diminui o sinal de controle), pelo modo de operação: automático (quem altera a saída de controle é a função de transferência do controlador) ou manual (quem altera a saída de controle é o operador) e pelo modo de controle que será descrito em mais detalhes a seguir.

2.2.4 Modos de controle

Existem três principais modos básicos de controle: o proporcional (P), o diferencial (D) e o integral (I), que podem ser utilizados sozinhos (P) ou combinados entre si (PI, PD ou PID). Os parâmetros que os compõe são: K_c , o ganho estático do controlador e τ , a constante de tempo (diferencial T_d ou integral T_i).

No modo proporcional (P) a correção gerada (SC) é proporcional ao erro (E). Este modo não zera o erro e pode gerar uma correção excessiva provocando uma instabilidade na malha [3].

$$SC(t) = K_c \cdot E(t)$$

Figura 9 - Equação do controlador proporcional.

No modo proporcional integral (PI) a correção gerada (SC) é proporcional à integral do erro (E). Este modo zera o erro, porém possui uma resposta um pouco mais lenta que o modo a seguir [3].

$$SC(t) = K_c \left[E(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(t) dt \right]$$

Figura 10 - Equação do controlador proporcional integral.

No modo proporcional integral, derivativo (PID) a correção gerada (SC) é proporcional à integral e derivada do erro (E). Este modo zera o erro e possui uma resposta mais acelerada [3].

$$SC(t) = K_c \left[E(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(t) dt + T_d \frac{dE(t)}{dt} \right]$$

Figura 11 - Equação do controlador proporcional integral, derivativo.

No modo liga-desliga (on-off) há a definição de um valor máximo e um valor mínimo. Nesse caso ao alcançar esses limites o controle é ligado ou desligado. Se comparados estes modos de controle possuem diferentes comportamentos como demonstrado na Figura 12.

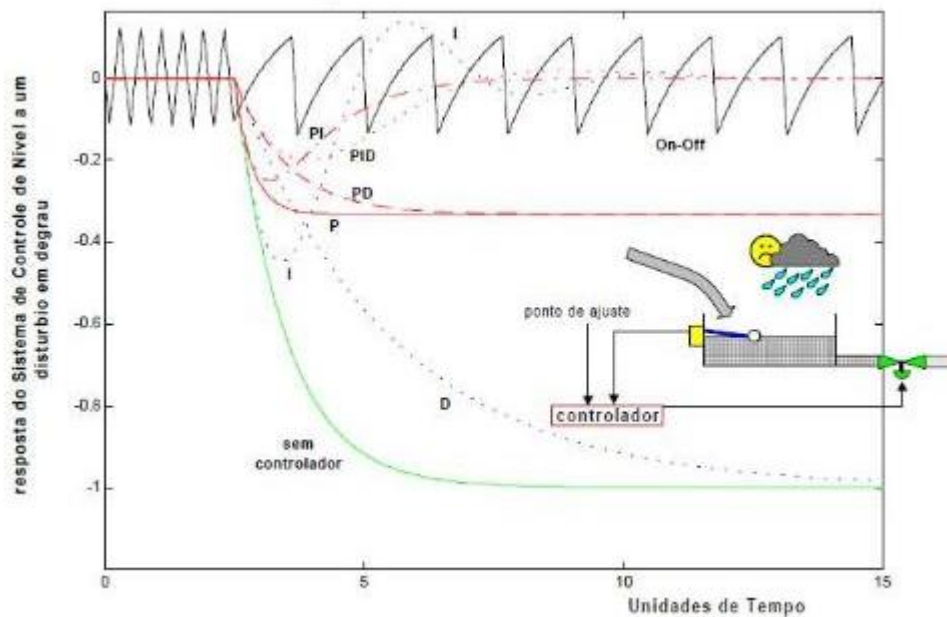


Figura 12 - Comparação de respostas dos tipos de modo de controle do controlador [11].

2.3 Instrumentação e Automação Industrial

2.3.1 Definição

Instrumentação e automação são as ciências que desenvolvem e aplicam as técnicas de controle de processos através de dispositivos adequados para o funcionamento da malha. Os instrumentos são divididos em sistemas de medição, sistema de atuação, sistema de controle e sistema supervísório.

2.3.2 Instrumento de medição

O sensor de temperatura possui dois tipos de medição: instrumentos de transferência de calor por condução, instrumentos de transferência de calor por radiação. O sensor de pressão possui três tipos principais de medição: coluna líquida, elementos elásticos ou medidores especiais.

O sensor de nível tem como princípios de medição: visor de nível, régua ou gabarito, bóia ou flutuador, deslocador, pressão hidrostática, borbulhador, célula de carga (pesagem): medição por Pressão Diferencial (Elementos Deprimogênicos), medição por Área Variável, medição através de Velocidade, medição através de Força, medição por Tensão Induzida, medição em Canais Abertos [3].

2.3.3 Instrumento de atuação

A maior parte das variáveis manipuladas são vazões portanto existem três tipos principais de instrumentos de atuação: as válvulas, as bombas e os dampers. Uma válvula industrial pode ser classificada como manual, solenóide ou de controle. A válvula manual é acionada pelo operador e não consegue receber sinal de controle elétrico e é apresentada na Figura 13.

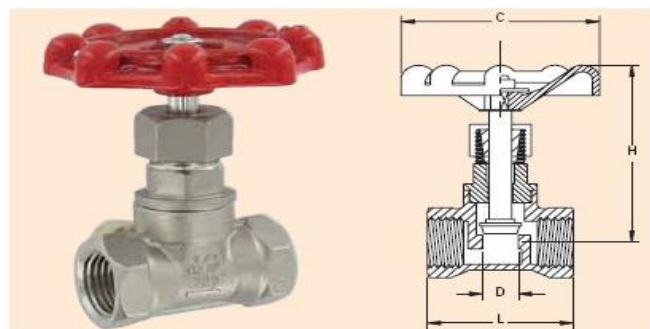


Figura 13 - Válvula do tipo manual [12]

A válvula do tipo solenóide é um instrumento que pode ser acionado à distância através de um sinal elétrico e possui apenas duas posições: totalmente aberta ou totalmente fechada e é apresentada na Figura 14.



Figura 14 - Válvula do tipo solenóide [13]

A maioria das válvulas de controle é pneumática e pode ter seus componentes descritos pela Figura 15.

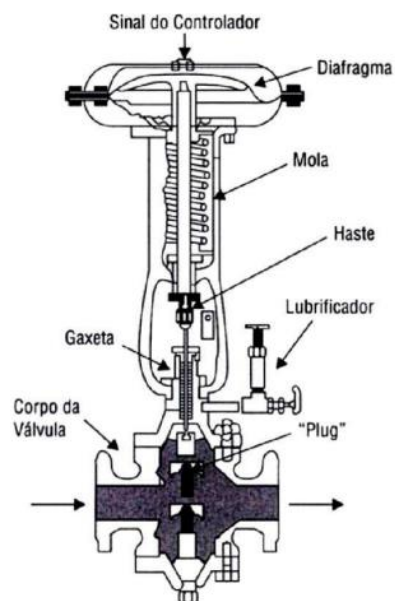


Figura 15 - Válvula de controle [14]

O sinal de controle elétrico oriundo do controlador é convertido em sinal pneumático pelo conversor. Esse sinal é recebido pelo atuador/diafragma que faz a pressão recebida nesta câmara se desloca, comprimindo ou relaxando a haste/mola, determinando o aumento ou a diminuição do fluxo de processo que escoa no corpo.

2.3.4 Instrumento de controle

O controlador é o instrumento responsável pela manipulação do instrumento final de controle. Do ponto de vista de instrumentação existem dois principais tipos de controladores: O controlador lógico programável (CLP) ou o controlador multiloop e singleloop.

O CLP é normalmente utilizado para intertravamento de segurança, este recebe um sinal discreto que através de uma lógica condicional pré-definida envia um comando ao elemento final. O controlador multiloop e singleloop é utilizado em malhas onde há controle contínuo, neste caso o sinal recebido é comparado com o valor padrão, o Set Point, e o erro é corrigido através de uma malha PID e do envio de sinal ao elemento final [3].

2.3.5 Sistema Supervisório

O sistema supervisório é um software configurável responsável por capturar e armazenar em um banco de dados, informações dos demais elementos da instrumentação. Através de uma CPU é possível monitorar e enviar comandos à distância para uma malha de controle [15]. O Sistema Supervisório é normalmente dividido nas seguintes tarefas: Núcleo de processamento, Comunicação com controladores industriais, Gerenciamento de Alarmes, Históricos e Banco de dados, lógicas de programação interna (Scripts) ou controle, interface gráfica, Relatórios, comunicação com Sistemas Externos / Corporativos, dentre outras funções.

Através de tags de identificação o sistema recebe a informação da malha e reproduz em uma tela gráfica.

Industrialmente existem alguns Sistemas Supervisórios no mercado, são eles:

- **Elipse** da Elipse Software.
- **FactoryTalk View SE** da Rockwell Automation.
- **iFIX** da General Electric.
- **InduSoft Web Studio** da InduSoft.
- **ProcessView** da SMAR.

- **ScadaBR** (open source) da MCA Sistemas.
- **SIMATIC Wincc** da Siemens.
- **Vijeo Citect** da Schneider Electric.
- **Wondeware inTouch** da Invensys.

2.3.6 Diagrama P&I

Diagrama P&I é a representação gráfica, utilizada em engenharia, dos instrumentos e dos tipos de sinais presentes no processo. Para que um fluxograma seja compreendido por todos, existem algumas padronizações na hora de sua confecção conforme as normas ABNT (NBR-8190/1983).

Para identificar o instrumento também estão descritas algumas normas. O instrumento possui uma identificação chamada de Tag. Este Tag é composto por duas ou três letras e quatro números. As letras servem para identificar o instrumento e a variável associados à função. A 1ª letra representa a variável que está sendo medida ou controlada: a 2ª e a 3ª letra representam as ações que estão sendo realizadas. Os números são separados por duas dezenas: a 1ª Dezena indica o setor em que está localizada a variável, a 2ª Dezena demonstra a ordem em que a variável aparece no fluxograma do processo [3].

Um exemplo de diagrama P&I é mostrado pela Figura 16. Neste diagrama são apresentados três tanques de nível (TQ 1001, TQ1002 e TQ1003), três medidores (LIT1001, LIT1002 e LIT1003), uma válvula de controle (LCV 1001), além de outros instrumentos.

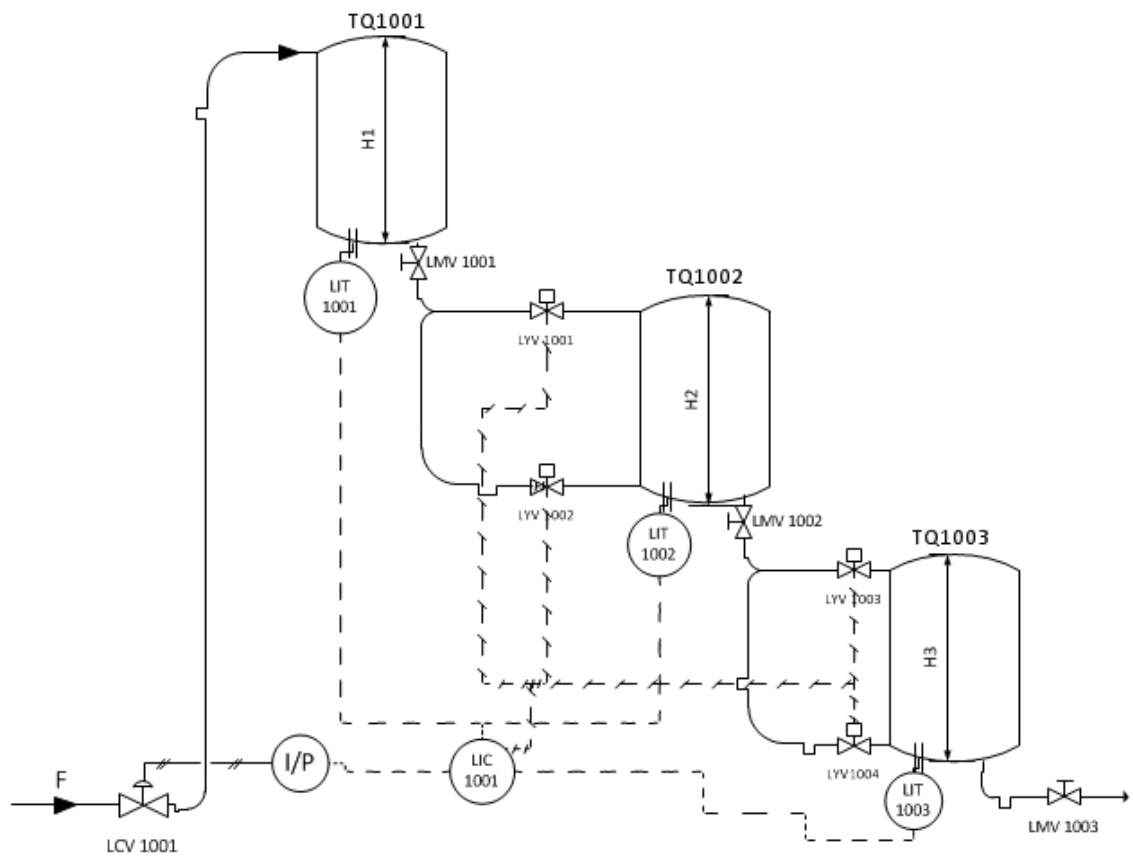


Figura 16 - Exemplo de diagrama P&I [2]

3 METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, é apresentado todo o desenvolvimento do projeto: a estrutura da planta que será utilizada nas práticas, o desenvolvimento do sistema supervisorio e a determinação de parâmetros para a realização dos experimentos. Para melhor entendimento, a metodologia será apresentada em conjunto com os resultados e a discussão.

3.1 Estrutura da planta didática

A planta didática, que será utilizada futuramente para as práticas, foi desenvolvida em trabalhos anteriores [2] e foi modificada para melhorar a dinâmica dos experimentos. Ela é composta por dois tanques de nível em série, uma bomba, uma válvula de controle, duas válvulas solenoides e uma válvula manual. A alimentação do primeiro tanque é realizada através da bomba e a vazão de entrada é controlada por uma válvula de controle.

O escoamento da água do primeiro tanque para o segundo tanque pode ocorrer de duas formas:

Pelo fundo do tanque, onde o fluido encontra resistência da coluna d'água. Esse método é denominado “com interação”.

Pelo topo do tanque, onde não há influência do nível do tanque na entrada do fluido. Esse método é denominado “sem interação”.

A seleção do método de entrada da água no segundo tanque é realizada remotamente e a atuação no processo é realizada por meio de duas válvulas solenoides. Após percorrer o segundo tanque, a água passa para um reservatório, controlada através da válvula manual, e é então, bombeada novamente para o primeiro tanque.

Em cada um dos tanques, há um medidor de nível que envia o sinal correspondente ao valor da altura da coluna de água para o controlador.

A Figura 17 exibe a estrutura montada no Laboratório de Engenharia Química (LADEQ) na Escola de Química da UFRJ.



Figura 17 - Estrutura da planta didática.

A Tabela 1 indica o TAG e as especificações de cada um dos tanques de nível.

Tabela 1 - Especificações do primeiro e do segundo tanque

	Primeiro Tanque	Segundo Tanque
TAG	TQ1002	TQ1003
Capacidade	200 L	200 L
Altura máxima	90 cm	90 cm
Altura útil	De 30 a 60 cm	De 30 a 60 cm
Diâmetro	66 cm	66 cm
Área	3421,19 cm ²	3421,19 cm ²
Válvula de entrada	Válvula de controle	Válvula Solenóide
Válvula de saída	Válvula Solenóide	Válvula Manual

A seção reta dos tanques, indicada na Figura 18, foi determinada experimentalmente e deve ser utilizada para evitar perturbação física na área curva do tanque. É recomendado, então, utilizar nas práticas somente os níveis acima de 34% e abaixo de 66%.



Figura 18 - Seção reta do tanque de nível

O controlador utilizado é um multiloop CD600 da SMAR. As válvulas solenóides são da INVENSYS e o sistema supervisório utilizado é o iFix Proficy da GE Fanuc™.

3.2 Desenvolvimento da interface gráfica

Através do software iFix™, foi configurado o sistema supervisório, que permite o monitoramento de variáveis, gráficos em tempo real ou de histórico e intervenção no processo durante as práticas.

Configurou-se uma base de dados, quatro telas utilizadas nas práticas e um histórico de armazenamento de dados. Todos são apresentados detalhadamente no presente tópico.

3.2.1 Base de dados

A base de dados funciona como uma conexão das variáveis entre o controlador e o sistema supervisor. Cada variável é definida através de um bloco. Inicialmente, ao adicionarmos uma variável na base de dados devemos definir se ele é uma entrada ou saída e se é analógica ou digital. Após a escolha do tipo de bloco, é necessária a definição de alguns parâmetros indicados nos itens abaixo.

- TAG: o símbolo que define e identifica a variável.
- Descrição: definição do significado da TAG.
- Driver: a variável pode estar conectada a uma entrada/saída física e estar conectada ao driver CD600. Caso a variável não exista fisicamente, fica definida a opção SIM.
- Endereço: definido no CONF600, indica a localização da variável no controlador.
- Unidades de engenharia: no caso dos blocos analógicos, são definidos os limites de valor que a variável pode assumir assim como sua unidade. No caso dos blocos digitais, é definido o significado da posição OPEN e da posição CLOSE.

A Figura 19 mostra, como exemplo, os parâmetros a serem preenchidos para um bloco analógico.

The screenshot shows a software window titled "Analog Input - [AM1002]". It has three tabs: "Basic", "Alarms", and "Advanced". The "Basic" tab is selected. The window contains several input fields and dropdown menus. The "Tag Name" field contains "AM1002". The "Description" field contains "MV para o tanque 2". The "Previous" and "Next" fields are empty, with up and down arrow buttons. The "Addressing" section includes a "Driver" dropdown menu set to "CD6 CD600 OPC Driver 7.11", an "I/O Address" field containing "CD600:9", and a "Signal Conditioning" dropdown menu set to "MVAL". There is also a "Hardware Options" dropdown menu. The "Scan Settings" section has a checkbox for "Process by Exception" which is unchecked, a "Scan Time" field with the value "1", and a "Phase At" field. The "Engineering Units" section has "Low Limit" set to "-2,00", "High Limit" set to "102,00", and "Units" set to "%". At the bottom of the window are three buttons: "Save", "Cancelar", and "Ajuda".

Figura 19 - Exemplo de parâmetros a serem preenchidos para uma entrada analógica.

Na aba Advanced, pode-se marcar a opção “Enable Output”, como mostrado na Figura 20, que permite escrever o valor da variável na tela do iFIX. Essa opção faz com que a variável funcione como uma saída, ou seja, o valor dela vai funcionar como uma saída do iFIX e como entrada no ponto físico.

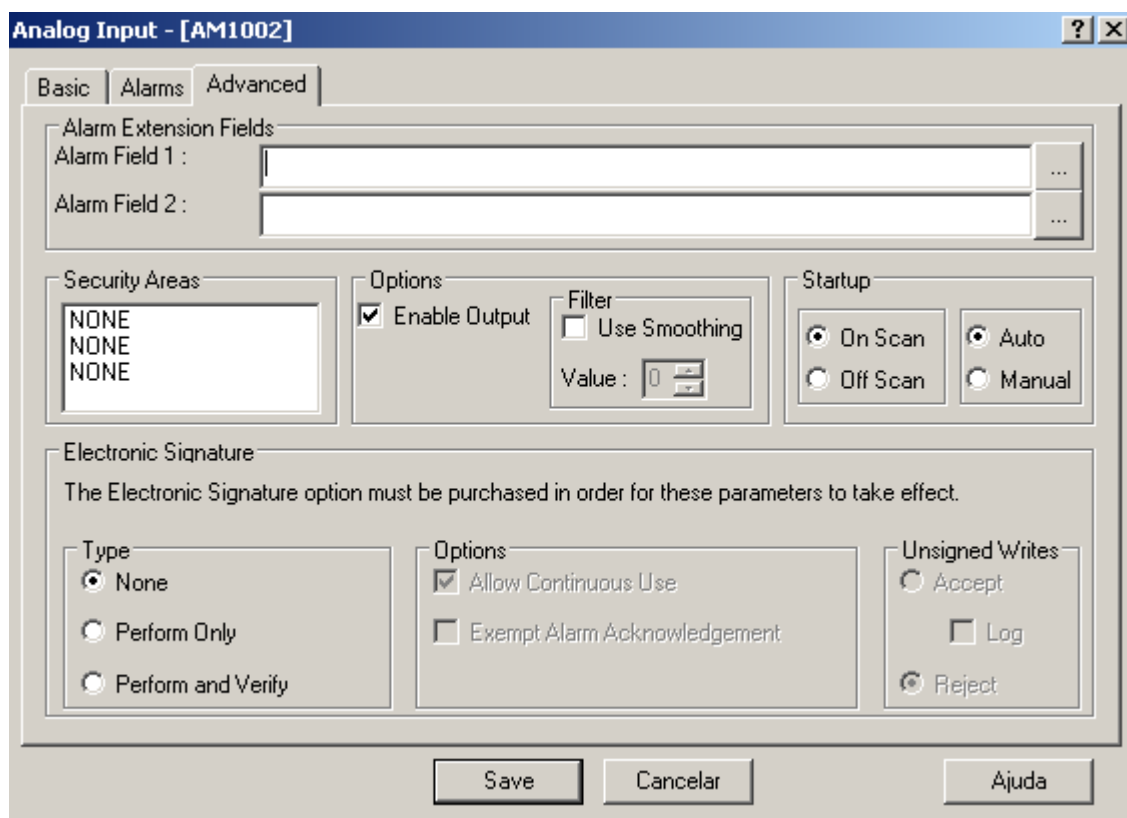


Figura 20 - Opção "Enable Output" na base de dados.

Através de todas essas ferramentas, define-se o tipo de cada variável. Não foram utilizadas as opções de saída analógica e digital. A Tabela 2 apresenta a quantidade e tipos de entradas disponíveis na base de dados criada. A entrada de cálculo (CA) é uma variável resultante de uma equação matemática entre duas outras variáveis analógicas.

Tabela 2 - Entradas Analógicas da Base de Dados

Tipo de Entrada	Descrição Em Inglês	Descrição Em Português	Número
AI	Analog Input	Entrada Analógica	15
DI	Digital Input	Entrada Digital	5
CA	Calculation	Cálculo	1

A Tabela 3, a Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam as entradas analógicas, digitais e de cálculo, respectivamente, configuradas na base de dados.

Tabela 3 - Entradas analógicas configuradas na base de dados

TAG	Descrição	Driver	Endereço	Limite Inferior	Limite Superior	Unidade	Enable Output
VCV1000	Volume de saída da válvula de controle	SIM	1	0	500	cm ³	Sim
TCV1000	Tempo de abertura da válv. de controle	SIM	2	0	200	Segundos	Sim
LIT1003	Nível TQ1003	CD6	CD600:0	0	100	%	Não
LIT1002	Nível TQ1002	CD6	CD600:1	0	100	%	Não
LCV1000	Abertura da válvula de controle	CD6	CD600:10	-2	102	%	Sim
K1003	Ganho do controlador para o TQ1003	CD6	CD600:200	0	100		Sim
TR1003	Constante de tempo integral TQ1003	CD6	CD600:201	0	1.935,55	Segundos	Sim
TD1003	Constante de tempo derivativa TQ1003	CD6	CD600:202	0	10	Segundos	Sim
K1002	Ganho do controlador para o TQ1002	CD6	CD600:204	0	100		Sim
TR1002	Constante de tempo integral TQ1002	CD6	CD600:205	0	1.911,95	Segundos	Sim
TD1002	Constante de tempo derivativa TQ1002	CD6	CD600:206	0	10	Segundos	Sim
SP1003	Set point do nível do TQ1003	CD6	CD600:4	0	100		Não
SP1002	Set point do nível do TQ1002	CD6	CD600:5	0	100		Não
AM1003	MV do TQ1003	CD6	CD600:8	-2	102	%	Sim
AM1002	MV para o TQ1002	CD6	CD600:9	-2	102	%	Sim

Tabela 4 - Entradas digitais configuradas na base de dados

TAG	Descrição	Driver	Endereço	Posição OPEN	Posição CLOSE	Enable Output
SEL1	Botão de seleção da malha de controle	CD6	CD600:15:14	TQ2	TQ3	Sim
BTL/RLOOP4	Botão de lógica 2	CD6	CD600:15:15	Sem interação	Com interação	Sim
BTA/M1002	Botão automático/manual para o TQ1002	CD6	CD600:15:9	Automático	Manual	Sim
BTA/M1003	Botão automático/manual para o TQ1003	CD6	CD600:15:8	Automático	Manual	Sim
BTA/MLOOP4	Botão de lógica 1	CD6	CD600:15:11	Fechado	Aberto	Sim

Tabela 5 - Blocos de cálculo configurados na base de dados

TAG	Descrição	Entrada A	Entrada B	Cálculo	Limite Inferior	Limite Superior	Unidade
FCV1000	Cálculo vazão saída da valv. Controle	VCV1000	TCV1000	(A/B)	0	400	cm ³ /s

3.2.2 Histórico

Para que todas as variáveis medidas fossem armazenadas, foi criado um histórico. De acordo com a necessidade de dados de cada prática, foram configurados três grupos de histórico contendo diferentes variáveis para serem armazenadas. Porém, o aluno pode resgatar dados de qualquer grupo, independente da tela utilizada ou prática realizada. Os dados são armazenados a cada segundo. A Figura 21 apresenta os grupos configurados e suas variáveis.

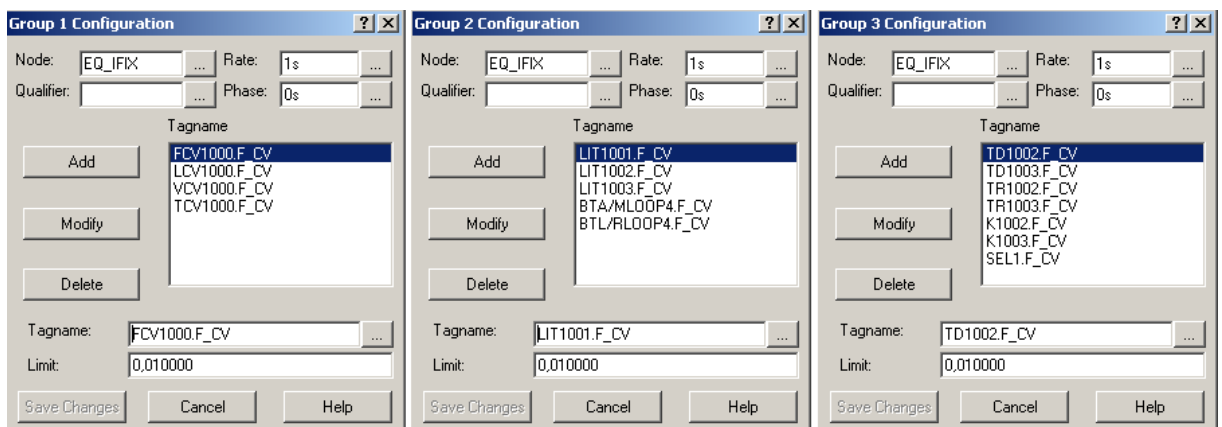


Figura 21 - Grupos configurados no histórico.

Através desse recurso, todas as variáveis são armazenadas e podem ser resgatadas posteriormente.

3.2.3 Telas

A partir das telas criadas no sistema supervisorio, o aluno é capaz de monitorar e alterar variáveis. Para funcionar como uma interface do aluno com a planta didática, foram criadas três telas correspondentes a cada uma das práticas a serem implementadas.

3.2.3.1 Tela Inicial

A tela inicial é a interface inicial das práticas com o aluno. Ela permite, através de três botões, navegar entre as telas das práticas. A Figura 22 apresenta a tela inicial.

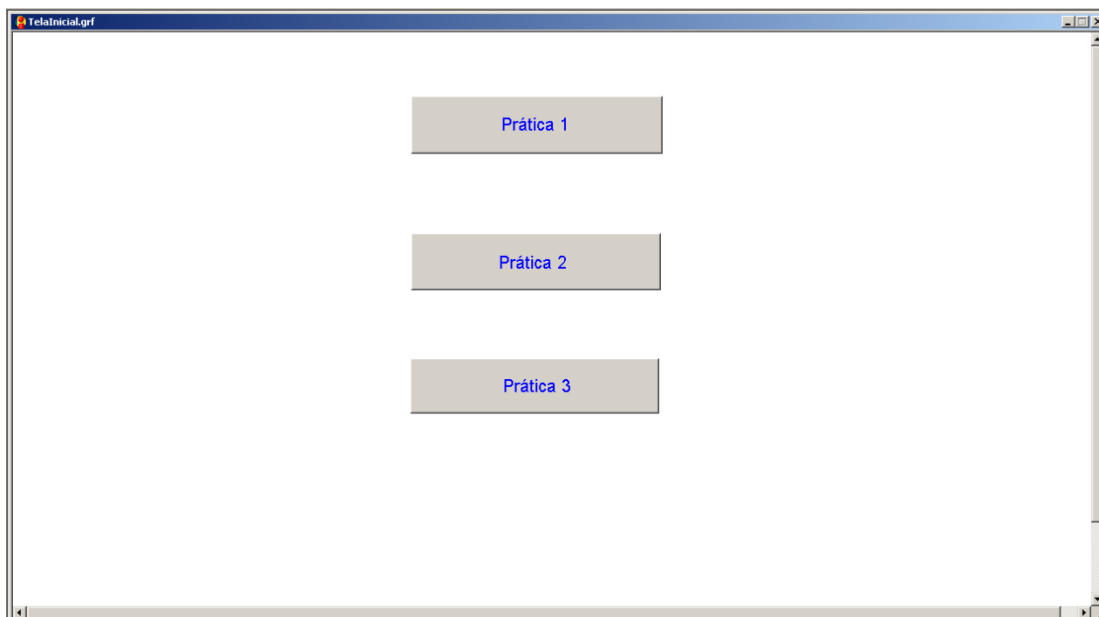


Figura 22 - Tela Inicial.

3.2.3.2 Tela da Prática 1 - Curva de Calibração de Válvula

A Tela da Prática 1, apresentada na Figura 23, é acessada através do botão “Prática 1” da Tela inicial. A finalidade da prática é relacionar a abertura da válvula de controle à sua vazão de saída, ou seja, determinar sua curva de calibração. Nessa tela, o aluno pode acompanhar seu experimento de determinação da curva, adicionando seus dados para serem armazenados e acompanhando a abertura da válvula pelo gráfico.

Na tela, é possível modificar o valor de abertura da válvula através do quadro com indicação “Xv%”.

A vazão é obtida através da proveta, para determinação do volume, e do cronômetro, para a determinação do tempo.

Para o armazenamento dos dados, o usuário vai inserir o volume, em centímetros cúbicos (obtido na proveta) e o tempo, em segundos, (necessário para atingir aquele volume, nos espaços indicados como “Volume (cm³)” e “Tempo(s)”, respectivamente. A vazão é calculada imediatamente e seu valor é mostrado no espaço “Vazão(cm³/s). Todos esses valores poderão ser recuperados através do histórico e manipulados pelos alunos.

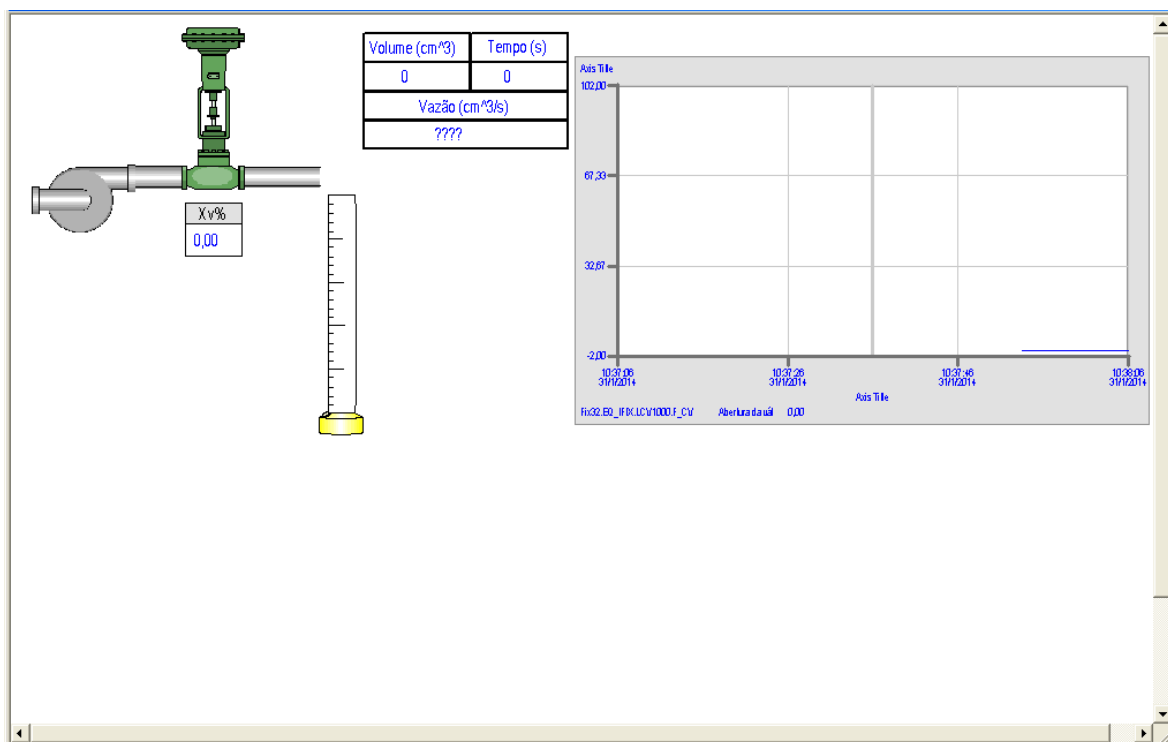


Figura 23 - Tela da Prática 1.

3.2.3.3 Tela da prática 2 – Modelagem do processo

A Tela da Prática 2 apresenta um desenho esquemático de toda a estrutura da planta assim como as variáveis a serem monitoradas. Nela, o usuário pode fazer todas as alterações do processo.

Na caixa com indicação “Xv%”, pode-se fazer a alteração da abertura da válvula de controle, basta inserir o valor desejado.

Essa tela apresenta quatro botões a serem utilizados: “TQ2/TQ3”, “Com/Sem interação”, “A/F Válvula”, e “A/M”. O botão com indicação “TQ2/TQ3” altera o loop do controlador onde a válvula está atuando, podendo ser utilizadas as variáveis medidas do TQ1002 ou do TQ1003. O botão de “Com/Sem Interação” altera o modo de atuação de “com interação” para “sem interação” ou vice-versa. Para abrir ou fechar a válvula solenoide, utiliza-se o botão “A/F Válvula”. E para finalizar, o botão “A/M” coloca o controlador correspondente ao modo de interação, no modo manual ou automático.

Dentro dos tanques, são apresentados os valores instantâneos de nível, facilitando o acompanhamento do aluno. Além disso, o comportamento dos níveis do TQ1002 e TQ1003 podem ser acompanhados através do gráfico da tela.

Para facilitar a visualização do processo, a tela só exibe o modo que está ativado (sem ou com interação) e o loop do controlador que está atuando. Ao mudar esses modos através dos botões apresentados, o desenho muda, representando o novo modo ativado. Além disso, as válvulas mudam de cor, se tornando verdes quando abertas e vermelhas quando fechadas. Como exemplo, a Figura 24 mostra quando o modo “com interação” está ativado, o loop do controlador que atua é o do TQ1003, a válvula solenóide está fechada e o controlador está em modo manual.

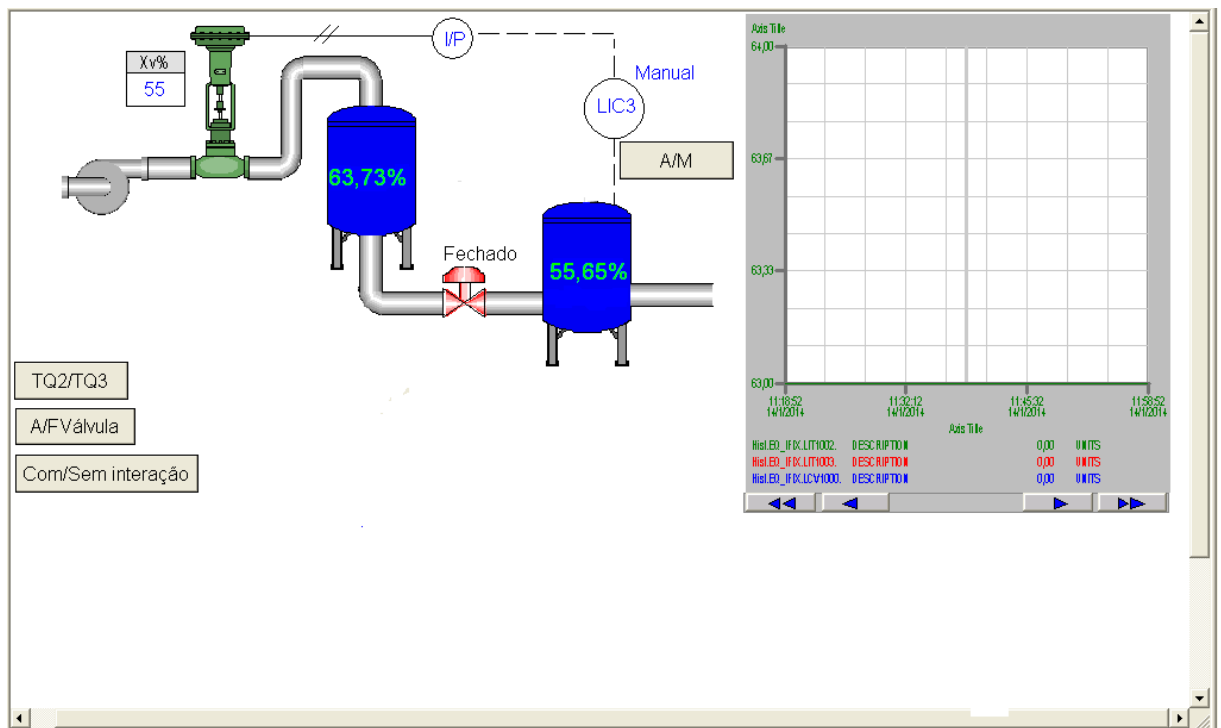


Figura 24 - Exemplo com interação, TQ1003.

Ao pressionar os botões “TQ2/TQ3”, “Com/Sem Interação” e “ A/F Válvula”, o desenho da tela passa da Figura 24 para a Figura 25 apresentada a seguir.

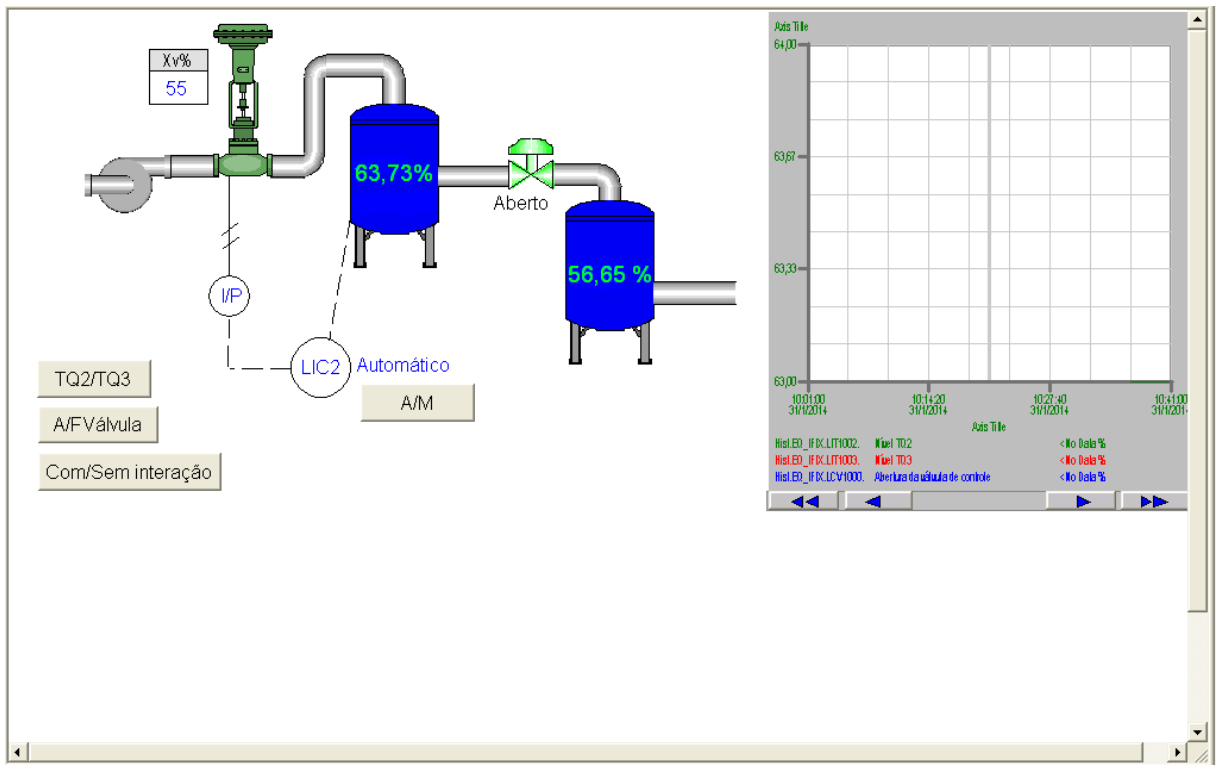


Figura 25 - Exemplo sem interação, TQ1002.

3.2.3.4 Tela da prática 3 – Sintonia do controlador

A tela da Prática 3, acessada através do botão “Prática 3” da Tela Inicial, apresenta os mesmos botões e gráfico da Tela da Prática 2. Porém, além de todo processo já exibido na outra tela, a Tela da Prática 3 mostra para o aluno o valor dos parâmetros do controlador, permitindo a visualização da influência dos mesmos nas respostas do processo. Os valores exibidos são correspondentes ao controlador do loop que está sendo utilizado.

A Figura 26 representa um exemplo da Tela da Prática 3.

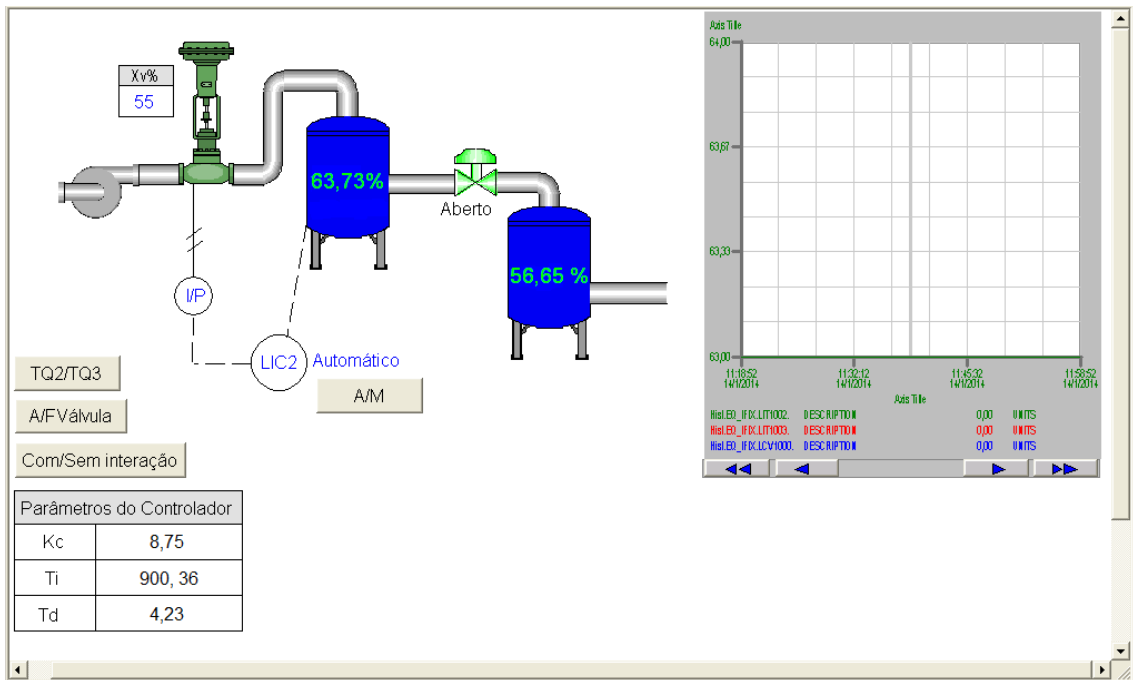


Figura 26 - Tela da Prática 3, com modo "sem interação" ativado, loop do controlador do TQ1002 ativado e válvula solenoide aberta.

3.3 Testes experimentais

Para determinação dos parâmetros ótimos para a realização das práticas, foram realizados testes experimentais.

3.3.1 Influência do nível do TQ1002 na vazão de saída

3.3.1.1 Metodologia

Materiais

- 1 proveta
- 1 cronômetro
- Tela da Prática 1

Procedimento

A válvulas solenóides de saída do TQ1002 foram definidas como válvulas A e B. A válvula A é aquela que faz o papel do processo com interação. A válvula B foi considerada a que faz o papel de sem interação. A válvula de entrada é mantida

fechada para eliminar a influência da vazão de entrada no nível do tanque. A Figura 27 indica a válvula A e a válvula B.

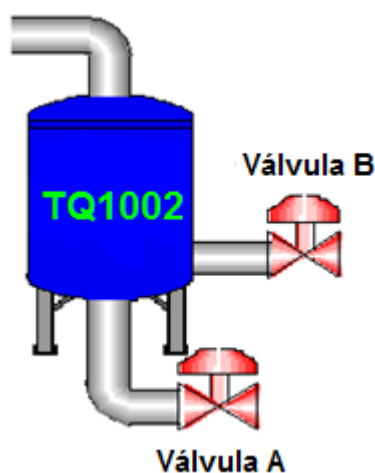


Figura 27 - Tanque TQ1002

Para medir a vazão, foi utilizada a proveta para aferir o volume de água que saía da mangueira ao abrir a válvula de saída A em um determinado espaço de tempo (medição feita com o cronômetro). Foram feitas três medições, com o nível em aproximadamente 85%, 65% e 45%. Os valores de nível variavam conforme as medições foram sendo feitas. Todos os valores dos níveis, de volume e de tempo foram anotados.

3.3.1.2 Resultados

Tabela 6 - Dados obtidos para a válvula de saída do TQ1002

Válvula A			
LIT1002	Volume (mL)	Tempo (s)	Vazão (mL/s)
85,45	175	10	17,5
82,91	170	11,15	15,2
82,8	150	9,34	16,1
67	125	11,97	10,4
66,95	105	13,22	7,9
65	95	10,38	9,2
45,75	70	13,62	5,1
45,69	70	13,78	5,1
45,6	60	12,13	4,9

Com os dados da Tabela 6, foi plotado um gráfico para a válvula A. A válvula B é de mesma dimensão que a válvula A.

O gráfico para a válvula A é apresentado na Figura 28.

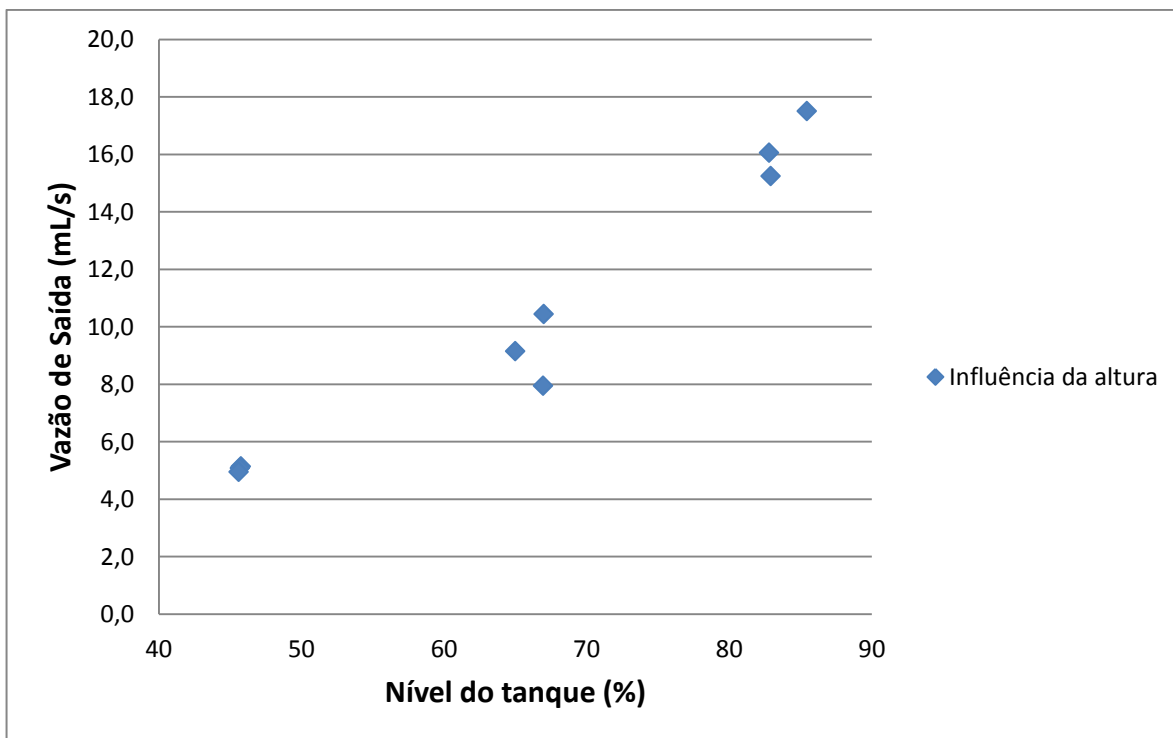


Figura 28 - Gráfico da Influência da Altura de água na vazão de saída

3.3.1.3 Conclusão

Pelo gráfico, pode-se perceber que a vazão de saída cresce de forma linear com a altura da coluna de água do tanque. Através dessas medições, é possível programar uma vazão de saída desejada colocando o tanque em um certo nível. Sabendo a faixa de vazão da válvula de controle (vazão de entrada do primeiro tanque), podemos definir o nível mínimo necessário para manter o estado estacionário inicial.

3.3.2 Calibração da Válvula de Controle

3.3.2.1 Metodologia

Materiais

- 1 proveta
- 1 cronômetro
- Tela da prática 1

Procedimento

A bomba mantém a vazão de entrada da válvula constante. Com a proveta, foi medido o volume de água que saía da válvula de controle em um certo tempo (medição feita com o cronômetro). O experimento foi iniciado com abertura da válvula em 100% e então foram realizados quatro degraus de 20%. Foram feitas duas calibrações ascendentes e duas descendentes.

3.3.2.2 Resultados

Todas as medições feitas são apresentadas na Tabela 7. A vazão foi calculada dividindo-se o volume pelo tempo.

Tabela 7 - Dados obtidos para a válvula de controle

Ascendente/Descendente	% Abertura	Volume (mL)	Tempo (s)	Vazão (mL/s)
Descendente	100	230	6,75	34,1
Descendente	80	150	5,53	27,1
Descendente	60	125	6,93	18,0
Descendente	40	105	9,87	10,6
Descendente / Ascendente	20	75	15,34	4,9
Ascendente	40	125	12,57	9,9
Ascendente	60	175	9,97	17,6
Ascendente	80	175	6,18	28,3
Ascendente/Descendente	100	200	5,53	36,2
Descendente	80	150	5,28	28,4
Descendente	60	100	5,72	17,5
Descendente	40	95	9,31	10,2
Descendente/Ascendente	20	60	11,81	5,1
Ascendente	40	155	16,1	9,6
Ascendente	60	125	7,28	17,2
Ascendente	80	155	5,59	27,7
Ascendente	100	175	4,94	35,4

Com os dados acima, foi feita a média das vazões para cada abertura, obtendo-se a Tabela 8.

Tabela 8 - Média das vazões para cada abertura da válvula de controle

Abertura (%)	Vazão média (mL/s)
0	0,0
20	5,0
40	10,1
60	17,6
80	27,9
100	35,2

A Figura 29 apresenta o gráfico de vazão média da válvula de controle.

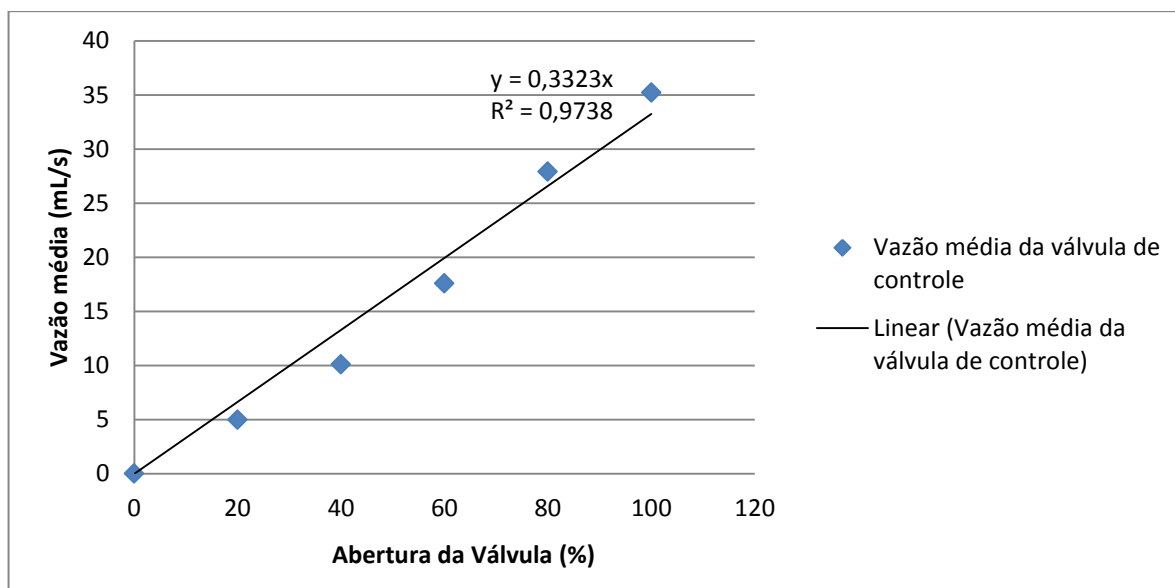


Figura 29 - Gráfico de vazão média da válvula de controle.

3.3.2.3 Conclusão

Pelo gráfico, foi possível observar que o modelo pode ser descrito de forma linear conforme se aumenta a abertura da válvula, com um coeficiente de determinação de 97% de confiança. Dentro da faixa de abertura da válvula, os limites das vazões alcançados foram aproximadamente 5 e 35 mL/s.

3.3.3 Calibração da válvula de controle através do medidor de nível

Em substituição às medidas feitas manualmente no teste anterior, este teste repete o mesmo procedimento, no entanto, levando em consideração os valores apresentados pelos medidores de nível.

3.3.3.1 Metodologia

O tanque foi enchido até aproximadamente 30% de sua capacidade para que saísse da zona curva do tanque de nível. A válvula de saída se manteve fechada durante todo o experimento. Depois disso, a válvula de controle foi aberta em 100% e foram aguardados 6 minutos. Em seguida, mudou-se para 80% de abertura, que foi mantida por 6 minutos. O mesmo se seguiu para as aberturas de 60%, 40% e 20%. Após os seis minutos aguardados com abertura de 20%, fechou-se a válvula de controle e abriu-se a válvula de saída para esvaziar um pouco o tanque de forma que não houvesse transbordamento na etapa seguinte. Após atingir um nível de aproximadamente 40%, a válvula de controle foi aberta em 20% por seis minutos e assim sucessivamente para todas as outras aberturas de válvulas: 40%, 60%, 80% e 100%.

Todos os pontos de nível do TQ1002, tempo e abertura da válvula foram recuperados através do histórico do iFix. Para a manipulação dos dados obtidos, foram ignorados o primeiro minuto e os últimos 30 segundos do intervalo de 6 minutos para desprezar as perturbações de mudança de abertura. Com os pontos restantes, foi plotado um gráfico de nível por tempo para cada abertura.

3.3.3.2 Resultados

Através dos dados, foram obtidos dois gráficos, apresentados: um para o aumento gradual dos valores da válvula de controle, a calibração ascendente, apresentado na

Figura 30 e outro para a diminuição dos valores, a calibração descendente, apresentado na Figura 31.

Para cada um dos gráficos foi encontrado o coeficiente angular, que representa a velocidade de saída de água da válvula em cada uma das aberturas. Multiplicaram-se

todos os coeficientes pela área transversal do tanque para encontrar a vazão de saída da válvula de controle.

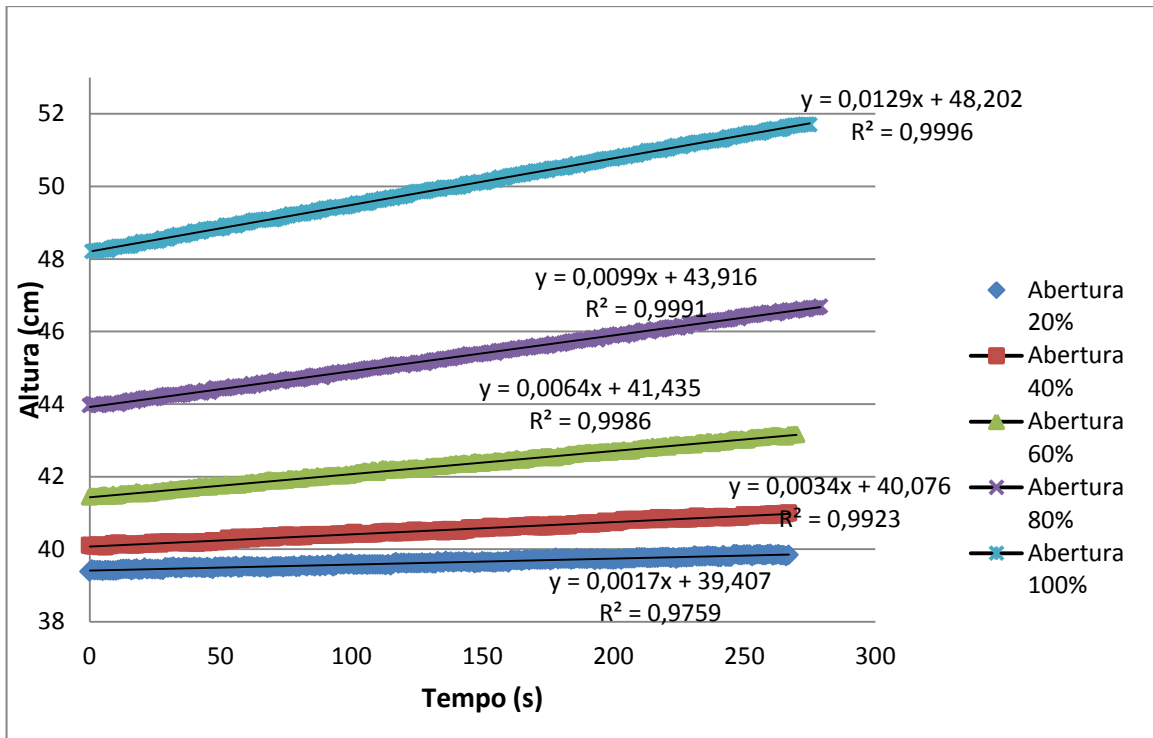


Figura 30 - Calibração ascendente da válvula de controle.

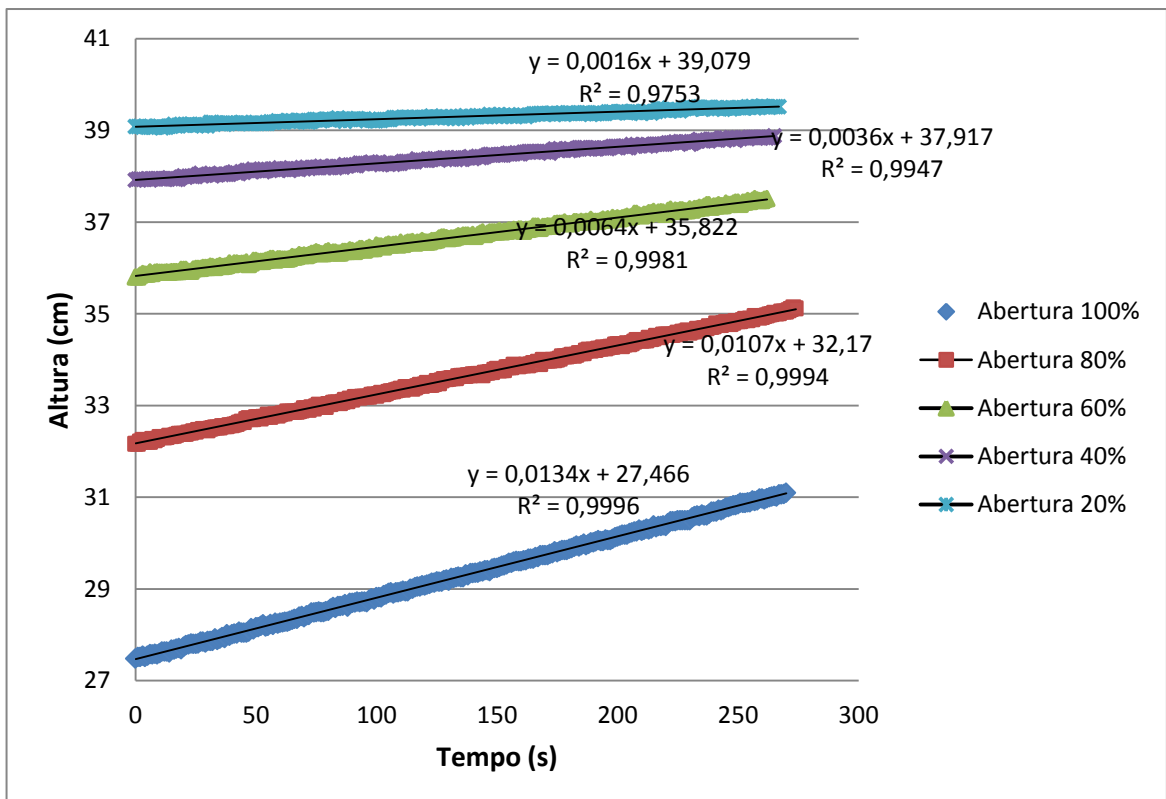


Figura 31 - Calibração descendente da válvula de controle.

Através dos gráficos, foi possível gerar Tabela 9. A vazão pode ser calculada através da multiplicação da área do tanque com o coeficiente angular. Sabendo o diâmetro do tanque, a área do tanque é calculada como sendo de 3421,19 cm².

Tabela 9 - Valores de vazão para cada abertura de válvula calculados através do coeficiente angular

Ascendente/Descendente	Abertura	Coeficiente angular das retas	Vazão (cm ³ /s)
Descendente	100%	0,0134	45,84
Descendente	80%	0,0107	36,61
Descendente	60%	0,0064	21,90
Descendente	40%	0,0036	12,32
Descendente	20%	0,0016	5,47
Ascendente	20%	0,0017	5,82
Ascendente	40%	0,0034	11,63
Ascendente	60%	0,0064	21,90
Ascendente	80%	0,0099	33,87
Ascendente	100%	0,0129	44,13

Com os valores de vazão obtidos, foi feita uma média dos valores correspondentes às aberturas de ascendente e descendente, resultando na Tabela 10.

Tabela 10 - Vazão média para cada valor de abertura

Abertura %	Vazão média
0	0,0
20	5,64
40	11,97
60	21,90
80	35,24
100	44,99

A partir da Tabela 10, foi obtida a curva de vazão da válvula por abertura, ilustrado na Figura 32.

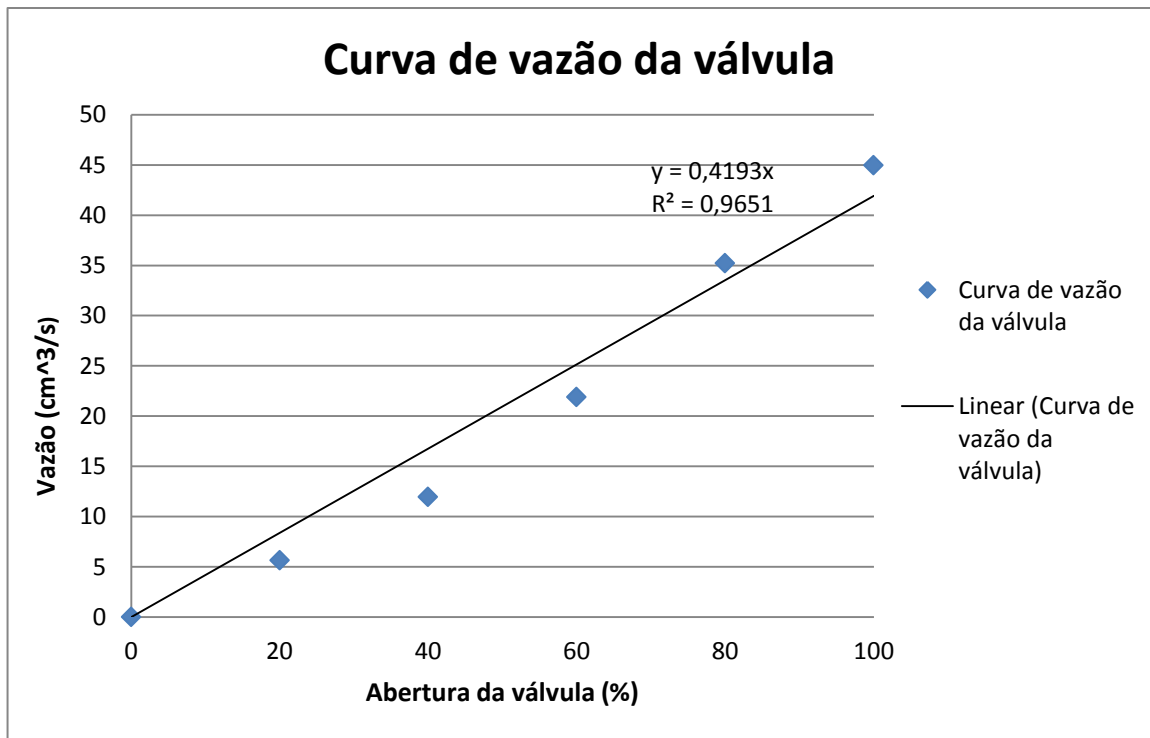


Figura 32 - Curva de vazão da válvula.

3.3.3.3 Conclusão

Pode-se observar que o comportamento da válvula de controle nos dois experimentos de calibração foi semelhante, indicando uma válvula de comportamento de igual porcentagem. Porém, ao assumir um comportamento linear, foram obtidos valores distintos para o coeficiente angular.

3.3.4 Análise da vazão de saída e a vazão de entrada do TQ1002

Sabe-se que a válvula de saída do primeiro tanque foi a nomeada válvula A e a válvula de entrada é a própria válvula de controle. Com isso, os dados obtidos na calibração da válvula A e na calibração manual da válvula de controle serão utilizados na comparação das vazões, possibilitando a obtenção de faixas de atuação para as práticas.

3.3.4.1 Resultados

A partir dos testes com as válvulas, foram obtidos os seguintes valores, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados obtidos experimentalmente

Válvula de Controle		Válvula A	
% Abertura	Vazão média	Altura Média	Vazão Média
20	4,98	83,72	16,3
40	10,10	66,32	9,2
60	17,56	45,68	5,1
80	27,89		
100	35,22		

Os valores de vazão de entrada e de saída para as diferentes aberturas de válvula e altura média são apresentados na Figura 33, para determinar a área de atuação.

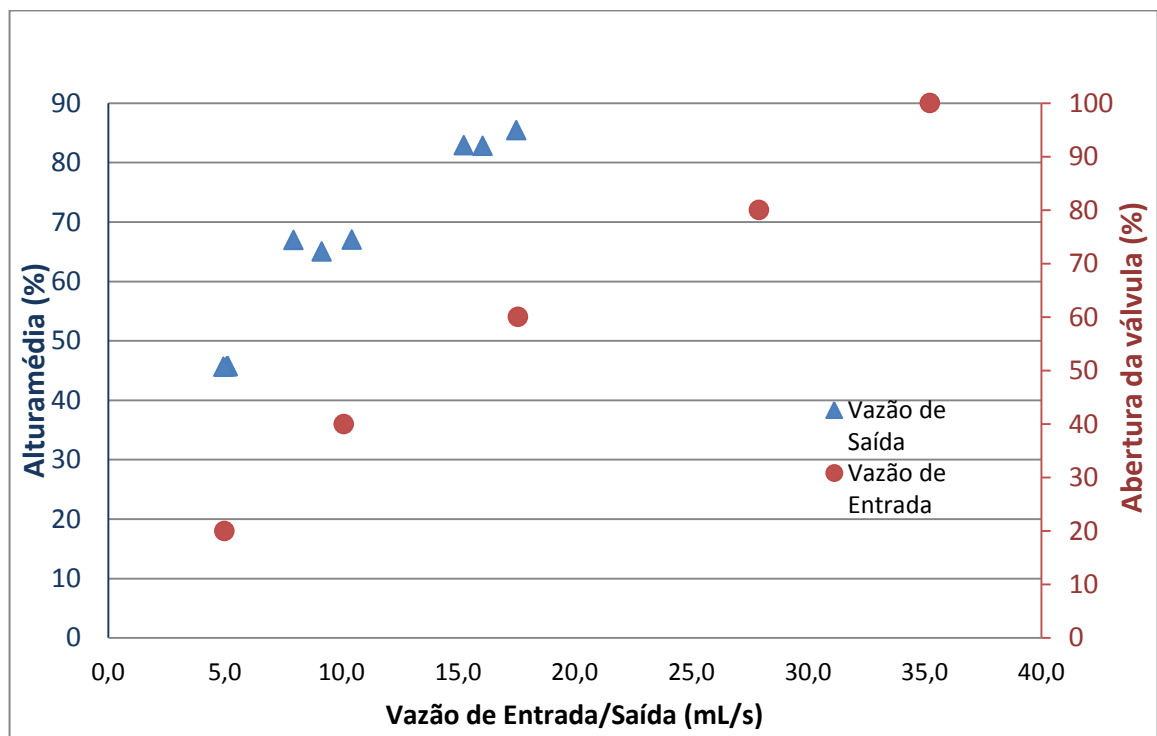


Figura 33 - Gráfico de comparação entre as vazões de entrada e saída do tanque TQ1002.

Para garantir que o processo atinja um estado estacionário, que é o desejado para o início da prática, a vazão de entrada deve ser igual a vazão de saída. Para que isso ocorra, é preciso estar na faixa de vazão entre 5 mL/s e 17 mL/s.

Determinando essa faixa, pode-se observar que um limite máximo e mínimo de nível do tanque e de abertura da válvula de controle foram definidos. Para o nível, pode-se trabalhar entre 45% e 83% e para abertura da válvula de controle, é possível trabalhar entre 20% e 60%.

Considerando que a altura máxima do tanque é de 90 cm, os valores limites mínimo e máximo de nível do tanque para se obter o estado estacionário são de 40,5 cm e 74,7 cm.

3.3.4.2 Conclusão

Para se obter o estado estacionário desejado, antes de se aplicar o degrau, precisamos trabalhar com um nível entre 45% e 83% e abertura de 20% a 60%. Dentro dessa faixa, cada nível vai ter uma abertura de válvula correspondente que permitirá o sistema entrar no estado estacionário.

3.3.5 Modelagem e Sintonia do Controlador

3.3.5.1 Metodologia

A partir dos resultados obtidos pela comparação da vazão de entrada e de saída do TQ1002, foi definida a faixa de abertura da válvula de controle e de nível do tanque que atingiu o estado estacionário. Para fazer a modelagem do processo, foi realizado o teste da curva de reação. Inicialmente, foi colocada a abertura da válvula de controle em 55% e estabilizou-se o nível do TQ1002 em aproximadamente 63,8%. Atendido o estado estacionário inicial, foi aplicado um degrau de 10% na válvula de controle e em seguida, aguardou-se um novo estado estacionário. Todos os dados de tempo, nível do tanque e abertura da válvula de controle foram recuperados pelo histórico do iFix.

A partir da curva de reação e considerando um sistema de 1ª ordem, através do balanço de massa, para o primeiro tanque foi possível determinar os parâmetros necessários para a modelagem do tanque como mostrado a seguir [3].

a) Cálculo da constante de tempo, τ

Para calcular a constante de tempo, foi utilizado o método do “tempo de 63% da variação final”. Nesse método, ela é o tempo em que a resposta, no nosso caso o nível, leva para atingir 63,2% da variação final do novo regime estacionário [3]. A Figura 34 representa o método utilizado.

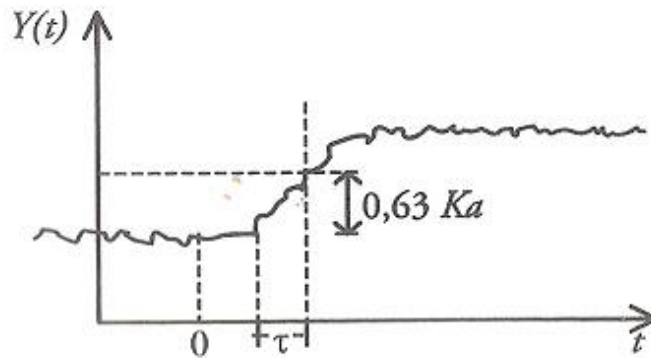


Figura 34 - Método do tempo de 63% da variação final [3]

b) Cálculo do ganho estático K

O ganho foi calculado através dos valores de variação da variável de entrada e variação da variável de saída, como mostrado na equação.

$$K = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}}$$

Com o ganho estático e a constante de tempo calculados, determinamos a função de transferência, como na equação.

$$Gp(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$$

c) Cálculo dos parâmetros do controlador

Para calcular os parâmetros do controlador do loop do TQ1002, utilizado no momento do degrau, foi utilizado o “Método da curva de reação de processo”. Proposto por Ziegler-Nichols, para encontrar K_C , T_I e T_D , são necessários alguns parâmetros da curva de reação ao degrau. São eles:

N: inclinação da tangente ao ponto de inflexão da curva;

t_0 : tempo do ponto de interseção da tangente com o eixo de t ;

A : degrau realizado na variável de entrada.

Utilizam-se, então as correlações de Ziegler-Nichols para um controlador PID, mostradas na Tabela 12, para determinar os ajustes do controlador.

Tabela 12 - Correlações de Ziegler-Nichols para ajuste de um controlador PID

Controlador	K_c	T_i	T_D
PID	$1,2 * \frac{A}{N * t_0}$	$2 * t_0$	$0,5 * t_0$

3.3.5.2 Resultados

A partir dos dados recuperados através do histórico, um gráfico foi obtido, apresentado na Figura 35. Através dele, foi possível fazer a modelagem do processo e o cálculo dos parâmetros do controlador.

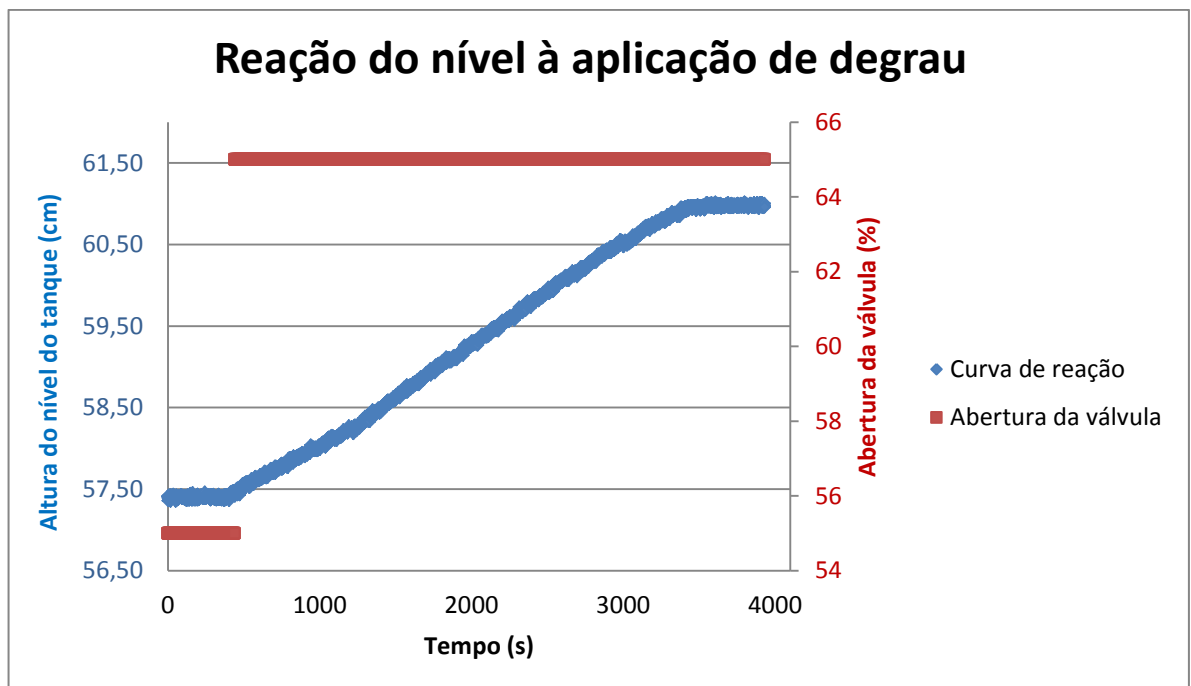


Figura 35 - Curva de reação à aplicação do degrau.

a) Cálculo do ganho de tempo, τ

O valor do nível antes da aplicação do degrau era de 57,40 cm. Após atingir o novo estado estacionário, esse valor passou para 60,98 cm. Ao atingir 63,2%, da

variação da resposta, esse valor foi de 59,66 cm. Através do gráfico, o tempo correspondente a essa resposta é de 2300 segundos. Considerando que o tempo zero, quando foi realizado o degrau era de 441 segundos, foi possível afirmar que τ é igual a 1859 segundos.

b) Cálculo do ganho estático, K

Para o cálculo do ganho estático, foi preciso saber a variação da entrada e da saída. A variável de entrada em questão é a vazão de saída da válvula de controle. Utilizando a equação de relação de vazão com abertura da válvula, obtida anteriormente na calibração manual da válvula de controle, pode-se relacionar as aberturas de 55% e 65% as vazões de 18,28 cm³/s e 21,60 cm³/s, respectivamente.

A variável de saída é o nível. Pelo próprio gráfico, identificam-se os valores iniciais e finais como sendo 57,4 cm e 60,98 cm, respectivamente.

Assim, o valor de K é igual a $\frac{60,98-57,4}{21,60-18,28}$. Com isso, encontra-se o valor de K igual a 1,07 s/cm².

Com os dois parâmetros calculados, a função de transferência é igual a

$$G_p(s) = \frac{1,07}{1859s + 1}$$

c) Cálculos dos parâmetros do controlador

Através do gráfico obtido na Figura 35, N foi calculado como sendo 0,00165, o t₀ como 150 segundos e o A como 3,92 cm³/s.

Utilizando as correlações, encontram-se os valores apresentados na Tabela 13 para o controlador do loop do TQ1002.

Tabela 13 - Parâmetros Calculados

K _c	T _i	T _d
19	300	75

3.4 Práticas Sugeridas

Ao longo do trabalho foram definidas algumas práticas que podem ser conduzidas utilizando a planta didática e as telas desenvolvidas. Cada prática sugerida descrita a seguir apresenta o procedimento detalhado, o número de alunos necessários para a realização dos experimentos, as disciplinas envolvidas e os materiais a serem utilizados.

3.4.1 Prática 1 – Curva de Calibração da Válvula

Monitorada através da “Tela da prática 1”, tem o objetivo de determinar a curva de calibração da válvula de controle, como dito anteriormente. Para realizá-la, o aluno deve medir a vazão de saída da válvula para cada abertura da mesma. Com a ajuda de uma proveta e de um cronômetro, o aluno poderá realizar todo o experimento.

A duração da prática é de aproximadamente uma hora e são necessários três alunos para a realização do experimento.

O procedimento sugerido para a Prática 1 é descrito a seguir:

- 1) Ligar todo o equipamento
- 2) Abrir a válvula de controle em 20%
- 3) Aguardar um minuto para estabilização da vazão
- 4) Medir o volume utilizando a proveta e o tempo correspondente , utilizando o cronômetro
- 5) Registrar na Tela da Prática 1 os valores obtidos de volume e tempo
- 6) Repetir o procedimento para as aberturas de 40%, 60%, 80% e 100%
- 7) Fazer duas calibrações ascendentes e duas descendentes
- 8) Recuperar os dados pelo histórico
- 9) Plotar o gráfico de vazão por abertura da válvula de controle

3.4.2 Prática 2 – Modelagem do Processo

Essa prática é monitorada através da “Tela da prática 2” e é indicada para a disciplina de Modelagem. Nela, o aluno deve aprender a determinar as funções de transferência a partir da realização do Teste de Degrau.

O nível deve estar dentro da seção reta do tanque para que a única perturbação realizada seja a da mudança da abertura de válvula. O professor deve, então, determinar qual valor de nível e abertura de válvula vai dar início ao experimento.

Em todos os parâmetros ajustados, o aluno deve aguardar o estado estacionário. Quando observado, pode-se, então, realizar um degrau na abertura da válvula. Aguarda-se um novo estado estacionário e o experimento está terminado. Todos os dados devem ser resgatados para que o aluno possa realizar a modelagem do processo.

A prática dura em torno de duas horas e meia e são necessários três alunos para a realização do experimento.

O procedimento para a realização desta prática é dada a seguir:

- 1) Ligar todo equipamento
- 2) Decidir, através da Figura 33, o valor de abertura da válvula de controle e o correspondente valor de nível do tanque para atingir o estado estacionário.
- 3) Aguardar o processo atingir o estado estacionário, acompanhando através do gráfico da Tela da Prática 2
- 4) Realizar o degrau
- 5) Aguardar novo estado estacionário
- 6) Resgatar dados do histórico
- 7) Plotar curva de reação
- 8) Realizar modelagem através da curva

3.4.3 Prática 3 – Sintonia do Controlador

Ideal para as disciplinas de Controle e Instrumentação, essa prática tem como objetivo mostrar as funções do controlador, assim como fazer com que o aluno pratique os ajustes do controlador.

Na prática 3, o experimento é o mesmo realizado na Prática 2, mas o acompanhamento é feito a partir da "Tela da Prática 3". Nesta tela, há o acompanhamento dos parâmetros do controlador. Com isso, o aluno pode aprender o efeito dos parâmetros nas curvas de reação.

São recomendadas duas horas e meia para a prática e são necessários três alunos para monitorar e controlar as variáveis através da tela.

O procedimento para a realização da prática 3 é dada a seguir:

- 1) Ligar todo equipamento
- 2) Colocar o controlador no modo manual
- 3) Decidir, através da Figura 33, o valor de abertura da válvula de controle e o correspondente valor de nível do tanque para atingir o estado estacionário.
- 4) Aguardar o processo atingir o estado estacionário, acompanhando através do gráfico da Tela da Prática 2
- 5) Realizar o degrau
- 6) Aguardar novo estado estacionário
- 7) Resgatar dados do histórico
- 8) Plotar curva de reação
- 9) Utilizar o método de Ziegler-Nichols para determinar os parâmetros do controlador
- 10) Informar os parâmetros no sistema supervisório
- 11) Passar a malha para automático
- 12) Realizar degrau no Set Point
- 13) Monitorar os resultados

4 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O trabalho apresentado atingiu o objetivo proposto, atestando a viabilidade da realização de práticas experimentais em uma planta didática com dois tanques de nível em série.

Com os testes realizados, a planta foi adequada para a realização das práticas. Foi possível determinar o comportamento da válvula de sua faixa de atuação. Foi desenvolvido o sistema supervisor que permite a interação do aluno com a planta, permitindo o monitoramento das práticas.

Através dos resultados obtidos, foi possível identificar alguns parâmetros operacionais essenciais que tornam as práticas viáveis, apresentados na Tabela 14, e que devem ser considerados ao realizar os experimentos com os alunos.

Tabela 14 - Parâmetros essenciais para as práticas

	Limite Inferior	Limite Superior
Altura útil	34%	66 %
Abertura de válvula	20%	60%
Limites de nível do TQ1002 para atingir estado estacionário	45%	83%

Além disso, os testes experimentais permitiram a sugestão de três práticas para as disciplinas de Modelagem, Instrumentação e Controle. A Tabela 15 apresenta um resumo sobre as práticas que foram propostas.

Tabela 15 - Dados das práticas sugeridas

	Prática 1 – Curva de Calibração da Válvula	Prática 2 – Modelagem do processo	Prática 3 – Sintonia do controlador
Tela de Monitoração	Tela da Prática 1	Tela da Prática 2	Tela da Prática 3
Tempo Estimado	1 hora	2 horas e meia	2 horas e meia
Número Mínimo de Alunos	3	3	3
Disciplina Associada	Controle de Processos	Modelagem e Dinâmica de Processos	Controle e Instrumentação de Processos

É sugerida a ampliação da faixa de vazão da válvula de saída, substituindo-a por uma de menor perda de carga. Além disso, propõe-se a realização de testes para

validação dos parâmetros do controlador em malha fechada, utilizando a Tela da Prática 3. A planta didática desenvolvida pode ainda ser aplicada a outras disciplinas dos cursos de Engenharia Química, como Mecânica dos Fluidos, e Engenharia de Controle e Automação, complementando os conceitos oferecidos nas disciplinas teóricas.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Edgar, T. F., Ogunnaike, B. A., & Muske, K. R. (den 14 February 2006). A global view of graduate process control education. *science direct* , ss. 1763–1774.
- [2] Almeida, J. H., Celnik, J., Correia, L. F., - *Desenvolvimento de Plantas Experimentais Automatizadas para Prática de Controle*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Rio de Janeiro. 2012
- [3] Valdman, B., Folly, R., & Salgado, A. *Dinâmica, Controle e Instrumentação de Processos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. 2008
- [4] LUYBEN, W. L. *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineering*, 2ª Edição, McGraw, Hill 1996.
- [5] Dale E., S., Thomas F., E., & Duncan A., M. *Process Dynamics and Contro*. Nova Iorque: John Wiley & Sons. 1989.
- [6] B. Wayne Bequette, *Process Dynamics – Modeling Analysis and Simulation*, Prentice-Hall International, 1998
- [7] Castrucci, P.L.; Bittar, A. e Sales, R. M. *Controle Automático*. Editora GEN/LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2011
- [8] Bojorge, N. (s.d.). *Malhas de Controle Avançado*. disponível em Departamento de Engenharia Química e de Petróleo – UFF: http://www.professores.uff.br/controldeprocessoseq/images/stories/Aula13_Introm_Malhas_Avanc_Fev2013.pdf Acesso em 23 de dezembro de 2013,
- [9] Maitelli, A. L. (s.d.). **CONTROLE AVANÇADO**
- [10] *Estratégias de Controle*. (s.d.), disponível em http://paginapessoal.utfpr.edu.br/camaral/instrumentacaoindustrial/15%20%20Estrategias%20de%20Controle%20de%20Processos.pdf/at_download/file. Acesso em 23 de dezembro de 2013

- [11] *Ações de Controle e Tipos de Controladores PID*. (s.d.). disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAASnEAC/apostila>. Acesso em 20 de dezembro de 2013.
- [12] (s.d.). disponível em <http://www.hygro-therm.com.br/informacoes.php?id=509>
Acesso em 20 de dezembro de 2013,
- [13] (s.d.). disponível em <http://www.jefferson.ind.br/produto/valvula-solenoide.html>. Acesso em 20 de dezembro de 2013.
- [14] Considine, M. D. *Process Instruments and Controls Handbook*, McGraw-Hill, Nova Iorque 1974.
- [15] *O que são Sistemas Supervisórios?* (s.d.), disponível em *Automacao Industrial*: <http://www.automacaoindustrial.info/o-que-sao-sistemas-supervisorios/>. Acesso em 02 de fevereiro de 2014