



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



FABRÍCIO MAGALHÃES SOARES

**APLICAÇÃO PRÁTICA DE MÉTODOS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID
EM UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**OURO PRETO – MG
2018**

FABRÍCIO MAGALHÃES SOARES

APLICAÇÃO PRÁTICA DE MÉTODOS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID EM
UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientadora: Karla Boaventura Pimenta Palmieri

Co-orientador: Paulo Marcos De BarrosMonteiro

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Julho/2018

S676a

Soares, Fabrício Magalhães.

Aplicação prática de métodos de sintonia de controladores PID em uma planta didática industrial [manuscrito] / Fabrício Magalhães Soares. - 2018.

98f.: il.: color; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Marcos De Barros Monteiro.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Sintonia de Controladores PID. 2. Automação Industrial. 3. Controle de Nível e Monitoramento. I. Palmieri, Karla Boaventura Pimenta. II. Monteiro, Paulo Marcos De Barros. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

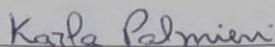
CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

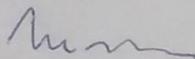
APLICAÇÃO PRÁTICA DE MÉTODOS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID EM
UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

FABRÍCIO MAGALHÃES SOARES

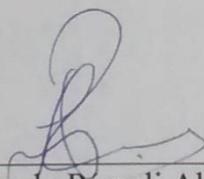
Monografia defendida e aprovada, em 17 de julho de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri - Orientadora



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Professor Convidado



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Professor Convidado

Dedico este trabalho aos meus pais

Alfreu Paulino e Maria José.

AGRADECIMENTOS

Os maiores e mais sinceros agradecimentos vão para meus pais, Maria José e Alfreu que são os responsáveis pela minha educação e pela minha formação. A toda minha família pelo apoio, motivação e confiança durante todos esses anos.

Agradeço a todos os professores da UFOP que contribuíram para meu crescimento e qualificação profissional. Em especial à professora Karla Palmieri pela orientação e por ter disponibilizado o laboratório e a planta didática para o estudo. Assim como o professor Paulo Monteiro pela orientação, sugestões e dicas essenciais ao trabalho. Agradeço também ao Fernando, técnico do Laboratório de Tecnologias Industriais da Escola de Minas, pela ajuda e ao Diego Torga e ao Henrique Soares que foram grandes colaboradores.

Agradeço aos professores Luiz Fernando Rispoli e o Agnaldo José da Rocha Reis pelo incentivo e conhecimentos compartilhados.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação e fizeram parte dessa etapa decisiva em minha vida; o meu muito obrigado.

“Só há um tempo em que é fundamental despertar. Esse tempo é agora”.

Buda

RESUMO

Uma área importante de controle e automação de processos é a sintonia dos parâmetros dos controladores PID. No presente trabalho utilizou-se uma malha de controle da planta didática presente no Laboratório de Tecnologias Industriais da Escola de Minas para o estudo de modelos de sintonia de controladores PID. O desempenho da dinâmica desse sistema foi realizado através dos métodos de sintonia de controladores PI sintonizados a partir dos métodos de resposta em frequência por Ziegler-Nichols e do modelo SIMC. Para isso, fez-se o controle de nível e monitoramento do sistema de abastecimento de um tanque. Utilizou-se o *software* SYSTEM302® da Smar responsável pela programação do Controlador Lógico Programável (CLP), do sistema supervisório e da parametrização dos instrumentos para que o processo fosse controlado e monitorado. Através deste trabalho pode-se aplicar na prática os conhecimentos de várias disciplinas que foram realizadas durante o curso de Engenharia de Controle e Automação, além disso, como este assunto e tecnologia são amplamente aplicados no ramo industrial atualmente, serve como uma ótima base de experiência para um futuro profissional de Engenharia de Controle e Automação.

Palavras chave: Sintonia de controladores PID, automação industrial, controle de nível e monitoramento.

ABSTRACT

An important area of process control and automation is one of the main PID guidelines. The present work was carried out with the objective of testing the process of PID control and data processing. The method of determining the level of syntax in relation to PI processing time was tuned using Ziegler-Nichols and SIMC model frequency response methods. To do this, he did the level control and monitoring of the tank supply system. Using Smar's SYSTEM302® software, you can also use programmable logic programming (CLP), the supervision and parameterization of instruments for the diagnostic and monitoring process. With this work one can apply in practice the knowledge of several disciplines that were carried out during the course of Control Engineering and Automation, moreover, as this subject and the technology are comprehensive in the industrial branch at present, serve as a great base of experience for a future professional of Control Engineering and Automation

Key words: PID controller tuning, industrial automation, level control and monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama em Blocos de um Sistema em Malha Aberta.	20
Figura 2.2: Diagrama em Blocos de um Sistema em Malha Fechada.	20
Figura 2.3: Símbolos de Instrumentos.	25
Figura 2.4: Sinais Utilizados em Fluxogramas.	25
Figura 2.5: Estrutura da Planta didática.	29
Figura 2.6: Conexão dos Dispositivos ao Barramento do Canal H1 da Rede fieldbus.	31
Figura 2.7: Padrão de Identificação de Cor dos Cabos.	31
Figura 2.8: Plataforma de Controle e Automação de Processos DFI302.	32
Figura 2.9: Diagrama Elétrico do DF11.	33
Figura 2.10: Diagrama Elétrico do DF21.	34
Figura 2.11: TIT- 02 Pt100.	35
Figura 2.12: LIT-01 Transmissor de Nível.	36
Figura 2.13: Chave de Nível.	37
Figura 2.14: Válvulas de Controle e os Posicionadores das Válvulas.	38
Figura 2.15: Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta.	39
Figura 2.16: Controlador Híbrido LC700.	40
Figura 2.17: Conjunto de <i>softwares</i> que formam o ProcessView.	42
Figura 2.18: Tecnologia OPC.	43
Figura 4.1: Application e Fieldbus Networks.	48
Figura 4.2: Dispositivos Conectados a Rede.	48
Figura 4.3: Blocos utilizados na estratégia de controle do nível.	50
Figura 4.4: Controle em Cascata.	51
Figura 4.5: Bloco de função PID.	52
Figura 4.6: Configuração da estratégia de controle do nível.	53
Figura 4.7: Configuração do bloco <i>Transducer</i> do transmissor de nível.	54
Figura 4.8: Configuração do bloco <i>Analog Input</i> do transmissor de nível.	55
Figura 4.9: Configuração do bloco <i>Display</i> do transmissor de nível.	56
Figura 4.10: Configuração do bloco PID do transmissor de nível.	57
Figura 4.11: Configuração do bloco <i>Transducer</i> do transmissor de temperatura.	59
Figura 4.12: Configuração do bloco <i>Analog Input</i> do transmissor de temperatura.	60
Figura 4.13: Configuração do bloco <i>Display</i> do transmissor de temperatura.	61
Figura 4.14: Configuração do bloco <i>Transducer</i> da válvula de controle.	62
Figura 4.15: Configuração do bloco <i>Display</i> da válvula de controle.	62
Figura 4.16: Configuração do bloco <i>Analog Output</i> da válvula de controle.	63

Figura 4.17: Configuração do bloco Modbus Configuration.	64
Figura 4.18: Configuração do bloco Modbus Control Master.	65
Figura 4.19: Configuração final do Syscon.	66
Figura 4.20: Configuração dos módulos no LC700.	67
Figura 4.21: Lógica de acionamento de abastecimento do tanque.	68
Figura 4.22: Lógica de acionamento do sistema de alarme.	69
Figura 4.23: Sinal luminoso do sistema de alarme.	69
Figura 4.24: Lógica do bloco RCT.	70
Figura 4.25: Tela inicial do sistema supervisorio.	74
Figura 4.26: Interface de monitoramento e controle do sistema.	74
Figura 4.27: Interface de monitoramento com o sinal de emergência acionado.	75
Figura 4.28: Representação esquemática simplificada do sistema.	76
Figura 4.29: Experimento de enchimento do tanque em malha aberta.	78
Figura 4.30: Experimento de esvaziamento do tanque em malha aberta.	79
Figura 4.31: Experimento de resposta ao degrau em malha aberta.	80
Figura 4.32: Ação de controle proporcional e integral.	81
Figura 4.33: Malha de Controle de Nível.	82
Figura 4.34: Diagrama de blocos representativo do método IMC.	83
Figura 4.35: Resposta do sistema usando o método da resposta em frequência.	85
Figura 4.36: Simulação do controle pelo método SIMC.	86
Figura 4.37: Simulação do controle pelo método de Ziegler Nichols.	86
Figura 4.38: Resposta ao degrau unitário pelo modelo SIMC.	86
Figura 4.39: Resposta ao degrau unitário pelo método SIMC.	87
Figura 4.40: Resposta ao degrau unitário pelo método da resposta em frequência.	87
Figura 4.41: Resposta ao degrau unitário pelo modelo do Ziegler-Nichols.	88
Figura 4.42: Critérios de desempenho baseados na resposta de um sistema subamortecido. ..	89
Figura 4.43: Resposta ao degrau pelo modelo SIMC.	91
Figura 4.44: Resposta ao degrau pelo método de Ziegler-Nichols.	92
Figura 4.45: Resposta ao degrau pelo método de Ziegler-Nichols.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Letras de identificação dos instrumentos da planta industrial.....	24
Tabela 4.1: Indicações para os ícones dos instrumentos na janela Fieldbus.	46
Tabela 4.2: Blocos Funcioais Modbus.	49
Tabela 4.3: Blocos Funcionais de Controle.....	50
Tabela 4.4: Pares de Parâmetros.....	52
Tabela 4.5: Tabela de sintonia SIMC PID.....	84
Tabela 4.6: Ziegler-Nichols para sintonia, 1942	85
Tabela 4.7: Critérios de desempenho	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Formulação do Problema	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Processos Contínuos	18
2.2	Instrumentação	18
2.2.1	Sistemas de Controle	18
2.2.2	Elementos de uma Malha de Controle.....	20
2.2.3	Elemento Primário.....	20
2.2.4	Indicador.....	21
2.2.5	Registrador	21
2.2.6	Transdutor.....	21
2.2.7	Transmissores	21
2.2.8	Controlador.....	21
2.2.9	Atuador	23
2.2.10	Conversor	23
2.2.11	Elemento Final de Controle.....	23
2.3	Identificação e Símbolos de Instrumentos	23
2.3.1	Letras de Identificação dos Instrumentos	24
2.3.2	Símbolos de Instrumentos	24
2.3.3	Sinais utilizados em Fluxogramas	25
2.4	Nível.....	25
2.4.1	Unidades de Medidas para Nível.....	26
2.4.2	Instrumentos Medidores de Nível	26
2.5	Temperatura	26
2.5.1	Unidades de Medidas para Temperatura	27
2.5.2	Medição da Temperatura	27
2.6	Controlador Lógico Programável (CLP)	28
2.7	Planta Didática.....	28
2.8	Rede <i>Foundation Fieldbus</i>	29

2.8.1	DFI 302 - <i>Fieldbus</i> Universal Bridge	30
2.8.2	Arquitetura da Rede Foundation Fieldbus	30
2.9	Instrumentos da Planta	34
2.9.1	SMAR TT302 Transmissor de Temperatura	34
2.9.1.1	Pt 100	35
2.9.2	SMAR LD302 Transmissor de Pressão Medidor de Nível	35
2.9.3	Chave de Nível	36
2.9.4	Válvulas de Controle	37
2.9.5	SMAR FY302 Posicionador de Válvula Fieldbus	38
2.10	Diagrama de Tubulação e Instrumentação P&ID da Planta	38
2.11	Controlador Híbrido LC 700	39
2.12	<i>Softwares</i>	40
2.12.1	SYSCON	40
2.12.2	LogicView	41
2.12.3	ProcessView	41
2.12.3.1	OPC (OLE for Process Control)	42
2.12.3.2	ProjectWorX	43
2.12.3.3	GraphWorX	43
2.12.3.4	TrendWorX	43
2.12.3.5	OPC Data Spy	44
3	METODOLOGIA	45
4	ESTUDO DE CASO	46
4.1	Programação do Syscon	46
4.2	Configurando a rede Foundation Fieldbus	47
4.3	A Lógica de Controle do Syscon	47
4.3.1	Bloco PID e Estratégia de Controle	50
4.4	Parametrização dos Blocos Funcionais	53
4.4.1	Configuração do LIT-01 (Transmissor Indicador de Nível)	53
4.4.1.1	Bloco Transducer	54
4.4.1.2	Bloco <i>Analog Input</i> (AI)	54
4.4.1.3	Bloco <i>Display</i>	55
4.4.1.4	Bloco PID	56
4.4.2	Configuração do Transmissor Indicador de Temperatura TIT-02	58
4.4.2.1	Bloco Transducer	58
4.4.2.2	Bloco Analog Input	59

4.4.2.3	Bloco <i>Display</i>	60
4.4.3	Configuração do LV-01 (Válvula de Nível)	61
4.4.3.1	Bloco Transducer	61
4.4.3.2	Bloco <i>Display</i>	62
4.4.3.3	Bloco Analog Output	63
4.4.4	Configuração do Modbus	63
4.4.4.1	Bloco Modbus Configuration - MBCF	63
4.4.4.2	Bloco <i>Modbus Control Master</i> -MBCM.....	64
4.5	A Lógica do Controlador LC700	66
4.5.1	Lógica de abastecimento	67
4.5.2	Entradas analógicas no CLP	70
4.5.3	Gerador de Lista de <i>Tags</i> (<i>Tag List for DF65</i>)	70
4.6	O Sistema Supervisório no ProcessView	71
4.6.1	Botões liga/desliga do sistema de abastecimento	71
4.6.2	Botões de controle manual/automático.....	72
4.6.3	Ligação das Variáveis do sistema supervisório.....	72
4.7	Modelo do processo	75
4.7.1	Malha de controle de Nível	76
4.7.2	Análise gráfica.....	77
4.7.2.1	Ação de controle proporcional e integral	81
4.7.3	Controlador SIMC (Skogestad IMC)	82
4.7.4	Método da Resposta em Frequência - Ziegler-Nichols	84
4.7.5	Simulação do sistema em malha fechada	85
4.7.6	Critérios de desempenho	88
4.8	Análise dos Resultados	89
4.8.1	Resultado pelo método SIMC	90
4.8.2	Resultado pelo método da resposta em frequência.....	91
5	CONCLUSÃO.....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que o desejo de controlar os processos industriais acompanha o homem desde a criação das primeiras máquinas.

Até a década de 1940, as plantas de controle eram operadas manualmente, com poucos instrumentos para realizar o controle local. A introdução da eletrônica durante as décadas de 1950 e 1960, paralelamente com os avanços de dispositivos de processamento, permitiram o desenvolvimento de processos mais elaborados que pudessem utilizar formas de controle mais precisas. Com isso, percebeu-se a necessidade de criar sistemas aplicáveis e eficientes que pudessem receber informações da planta, processá-las e atuar sobre esse mesmo processo, tudo isso sob uma supervisão visual do operador (GUTIERREZ, 2008).

Os sistemas de controle automático na indústria operam em paralelo à linha de produção e são utilizados para coordenar, monitorar, alterar e registrar as condições de máquinas, produtos e processos. Têm como principais requisitos, que devem ser atendidos simultaneamente, a minimização da intervenção humana, a manutenção de condições de segurança operacional e a garantia de respostas em tempo real (GUTIERREZ, 2008).

Para controlar as mais diversas variáveis que possam existir em um processo, é amplamente utilizado o Controlador Lógico Programável (CLP) visto que ele interpreta e controla tais variáveis de forma segura e eficaz. (LIMA, 2004). Além de controlar, há uma grande importância de supervisionar sistemas reais para que as variáveis obtidas possam ser usadas para proporcionar um melhor conhecimento sobre tal sistema. Devido a isso, é interessante que o sistema de supervisão seja o mais simples possível para que os operadores possam entender o sistema como um todo sem grandes dificuldades. (SANTOS, 2010).

1.1 Formulação do Problema

Em um ambiente industrial, a máxima produtividade depende da automatização de seus processos. Por sua vez, os processos automatizados dependem, dentre outras coisas, dos seus controladores, que para serem produtivos precisam estar bem sintonizados. Ter controladores bem sintonizados, com estratégias de autossintonia e com ferramentas que possam acompanhar seus desempenhos ao longo do tempo e com capacidade de ressintonizá-los, passa a ser um item quase que obrigatório para manter processos com alta produtividade e baixo custo, sem falar na qualidade do produto. Pesquisas no mercado sobre controladores

industriais apontam a função de sintonia e/ou autossintonia como a mais valorizada pelos usuários, ao lado do próprio algoritmo PID e das interfaces de comunicação (VanDore, 2006).

Dessa forma fica a seguinte questão, os métodos de sintonia dos controladores estão funcionando satisfatoriamente nas aplicações industriais?

1.2 Justificativa

Esta pesquisa propõe contribuir na aquisição de conhecimentos teórico e prático sobre uma planta didática industrial, para isso foi realizado um estudo de uma malha de controle de nível utilizando métodos de sintonia de controladores PID. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologias Industriais do Departamento de Engenharia de Controle e Automação da Escola de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, que possui infraestrutura capaz de proporcionar aos alunos do curso de Engenharia de Controle e Automação, um ambiente para ser usado com fins didáticos relacionados ao tema. Para desenvolvimento desse trabalho, foi tomada como base a monografia do João Ricardo Gallon da Silva no qual o autor propõe compreender melhor o processo contínuo fazendo um estudo sobre a planta didática.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo é demonstrar didaticamente, através de uma planta industrial, a operação de uma malha de controle utilizando diversos instrumentos desenvolvidos para a aplicação em controle industrial. Assim, será desenvolvido através da regra de Ziegler-Nichols e pelo método SIMC (Skogestad IMC) um controlador PID para controlar o nível de um tanque e um sistema supervisorio para monitorar e extrair dados do sistema em tempo real.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar um estudo de revisão bibliográfica acerca dos conceitos que abordam o tema utilizando-se de artigos científicos e base de dados disponíveis na literatura atual;

- Estruturar um estudo de caso sobre a criação de um sistema em uma planta didática industrial para a realização de experimentos através de métodos de sintonia de controladores PID;
- Realização de um controle de nível simulando uma etapa de um processo industrial;
- Análise de resultados e conclusão.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo se trata da introdução, o qual possui uma descrição de modo geral e a motivação que levou a realização do trabalho. Assim como o objetivo e sua estrutura. O segundo capítulo trás uma revisão bibliográfica que abrange assuntos sobre instrumentação e definições básicas das grandezas a qual os instrumentos estão relacionados, assim como noções sobre a norma ISA D 5.1 para contextualizar os leitores e deixá-los aptos à leitura de diagramas P&DI. O terceiro capítulo trás a descrição dos elementos utilizados para a realização do controle de nível e seus instrumentos como transmissores, sensores e seu Controlador Lógico Programável, além dos *softwares* utilizados para controlar e monitorar o processo. O quarto capítulo é um estudo de caso no qual há uma preparação dos *softwares*, da rede e dos métodos de sintonia de controle PID para o controle do nível do tanque e a criação do sistema supervisório, por fim, o quinto capítulo trás a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos Contínuos

São muitas vezes associados a tecnologias relativamente inflexíveis, de capital intensivo com fluxo altamente previsível. Conforme Ritzman e Krajewski (2007, p. 33) “são o extremo da produção em grande volume e padronizada com fluxos de produção em massa, sendo que a operação ocorre vinte e quatro horas por dia, para maximizar a utilização e evitar interrupções onerosas”. Normalmente operam por longos períodos de tempos e às vezes, são literalmente contínuos no sentido de que os produtos são inseparáveis e produzidos em um fluxo ininterrupto.

De acordo com Gutierrez (2008), processos contínuos são referentes a sistemas em que as variáveis precisam ser monitoradas e controladas ininterruptamente. É o caso per exemplo, de siderúrgicas, da produção de combustíveis, gás natural, produtos químicos, plásticos, papel e celulose, cimento, etc.

No sistema de produção do tipo contínuo existe uma padronização tanto dos insumos quanto dos equipamentos. Percebe-se nos processos contínuos uma padronização das variáveis de entrada de modo a facilitar que o equipamento também seja padronizado, gerando uma inflexibilidade dos mesmos. Devido a essa padronização, tanto de insumos como de maquinário, características como: pouco trabalho humano, baixa complexidade do produto, baixo valor agregado, alta velocidade de produção, pequeno número de etapas de produção e número limitado de produtos, estão presentes em processos contínuos (PEREIRA, 2009).

2.2 Instrumentação

É a ciência que aplica e desenvolve técnicas para adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas em equipamentos nos processos industriais. Segundo Correa (2002), o ramo da engenharia que trata o projeto, a manutenção, a montagem dos instrumentos para medição e para controle de variáveis como pressão, nível, temperatura, vazão, pH, umidade, velocidade, etc. nos processos industriais.

2.2.1 Sistemas de Controle

Os sistemas de controle são utilizados para o controle de variáveis de processos em sistemas industriais como, por exemplo, temperatura, pressão, vazão e nível (CARVALHO, 2000).

Segundo Ogata (1998), alguns termos utilizados em sistemas de controle são:

- I. Planta: Uma planta é uma parte de um equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina, que funciona conjuntamente, cuja finalidade é desenvolver uma dada operação;
- II. Processo: é a atividade ou operação a ser controlada;
- III. Sistemas: É uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um certo objetivo;
- IV. Variáveis de processo: a variável controlada ou variável de processo (PV - *process variable*) é a grandeza ou a condição que é medida e controlada e a variável manipulada (MV – *manipulated variable*) é a grandeza ou a condição variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada;
- V. Distúrbio: um distúrbio ou perturbação é caracterizado por um sinal que vai de alguma maneira alterar o valor da variável de saída de um sistema;
- VI. Set Point (SP): É um valor desejado estabelecido previamente como referência de ponto de controle no qual o valor controlado deve permanecer;
- VII. Ganho: Representa o valor resultante do quociente entre a taxa de mudança na saída e a taxa de mudança na entrada que a causou. Ambas, a entrada e a saída devem ser expressas na mesma unidade;
- VIII. Desvio: Representa o valor resultante da diferença entre o valor desejado e o valor da variável controlada;
- IX. Controle com retroação: se refere a operação que irá compensar o distúrbio e agir no processo de maneira a manter o sinal de saída da forma desejada.

Os sistemas de controle podem ser de dois tipos (OGATA, 1998):

- I. Sistema de controle em malha aberta: ajustar o valor da entrada com base exclusivamente na referência. a saída não tem efeito na ação de controle, não é medida e nem realimentada para comparação com a entrada.
Observa-se na figura 2.1 a representação de um diagrama em bloco de um sistema em malha aberta.

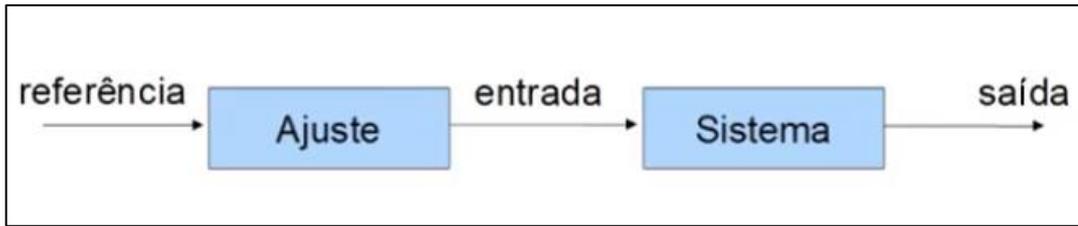


Figura 2.1: Diagrama em Blocos de um Sistema em Malha Aberta.

FONTE: (OGATA, 1998).

- II. Sistema de controle em malha fechada: a saída é realimentada e comparada com a referência produzindo o sinal de erro que é introduzido no controlador (para ajustar a entrada do sistema) e que, por sua vez, gera um sinal de controle que atua no processo de forma a reduzir o erro e manter a saída em um valor desejado. Assim, a referência (SP, *set-point*) e o desvio (sinal de erro) entre estes dois sinais é utilizado no controlador para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo. Observa-se na figura 2.2 a representação de um diagrama em bloco de um sistema malha fechada.

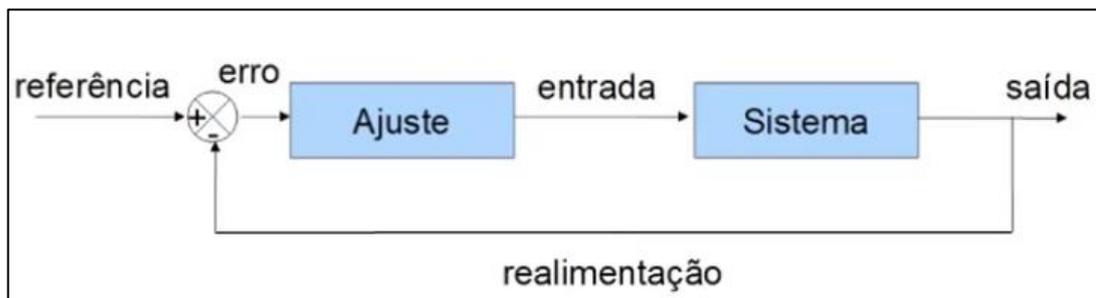


Figura 2.2: Diagrama em Blocos de um Sistema em Malha Fechada.

FONTE: (OGATA, 1998).

2.2.2 Elementos de uma Malha de Controle

Segundo Alves (2005), alguns dos instrumentos mais encontrados numa malha de controle são o elemento primário, indicador, registrador, transdutor, transmissor, controlador, conversor e elemento final de controle.

2.2.3 Elemento Primário

O elemento primário representa o sensor da variável de processo (ALVES, 2005). A planta possui uma termorresistência Pt-100 como elemento primário.

2.2.4 Indicador

Instrumento que dispõe de um ponteiro e de uma escala graduada na qual se lê o valor da variável. Podem ser digitais que mostram a variável em forma numérica (GONÇALVES, 2003).

2.2.5 Registrador

Instrumento que registra a variável através de um traço contínuo ou por pontos em um gráfico (GONÇALVES, 2003).

2.2.6 Transdutor

É um instrumento que recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas, modifica, quando necessário, estas informações e fornece um sinal de saída resultante. Dependendo da sua aplicação, pode ser elemento primário, um transmissor ou outro dispositivo (GONÇALVES, 2003).

2.2.7 Transmissores

O transmissor é o dispositivo que, através do elemento primário, sente a variável de processo e transmite uma saída proporcional ao valor da variável de processo (ALVES, 2005).

Os transmissores de pressão podem ser classificados em pneumáticos ou eletrônicos. A saída desses sensores é tratada e amplificada por um circuito eletrônico para gerar o sinal padronizado (CORREA, 2002).

2.2.8 Controlador

O controlador é um dispositivo que mantém a variável de processo num valor pré-determinado (ALVES, 2005). É um instrumento que compara o valor da variável de processo com o *set-point* (SP) e exerce uma ação corretiva na variável manipulada (MV) (BEGA, 2011).

O controlador tem um sinal de saída que pode ser variado para manter a variável controlada (PV) dentro de um limite específico ou para alterá-la de um valor previamente estabelecido (BEGA, 2011).

As ações de controle básicas usadas em controladores industriais são as ações de controle: proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativa (PD) e proporcional-integral-derivativa (PID).

- I. A ação de controle proporcional (P) atua no processo fazendo com que a ação na saída do controlador seja proporcional ao sinal de erro na entrada desse. Desta forma, quanto maior for o erro na entrada do controlador, maior será o sinal de correção na saída dele. O sinal de erro pode ser definido como o *set-point* menos a variável de processo ($e(t)=SP-PV$) (CAMPOS, 2006).
- II. A ação de controle proporcional-integral (PI) gera na saída do controlador uma ação proporcional ao erro e proporcional à integral do erro. A função da ação do termo integral é eliminar o erro em regime permanente. Em geral esse controlador apresenta baixo sobressinal e tempo de subida e estabilidade elevado (OGATA, 1998).
- III. A ação de controle derivativa tem como finalidade antecipar a ação de controle, atuando na variação do erro conforme o tempo. Deve ser empregada em processos lentos onde o tempo de retorno ao *set-point* (SP) seja demorado e a ação derivativa antecipe esse acontecimento. A ação derivativa nunca é usada isoladamente, sendo combinada com a ação proporcional (PD) ou com as ações proporcional e integral juntas (PID). O tempo derivativo do controlador (T_d ou *rate*) pode ser utilizado em segundos ou minutos, de acordo com a especificação do fabricante do controlador (CAMPOS, 2006).
- IV. O controlador PID é uma operação em conjunto do controle proporcional (P), do controle integral (I) e do controle derivativo (D). O controle proporcional produz em sua saída um sinal de controle que é proporcional ao erro sendo esta proporcionalidade de ganho representada por uma constante k_p que define o ganho do controlador. Já o controle integral produz em sua saída um sinal proporcional à integral do erro e o valor do ganho integral é dado pela constante K_i . Este tipo de controlador minimiza os erros de regime permanente do sistema, entretanto sua ação de resposta é lenta. Por fim, o controle derivativo produz em sua saída a derivada do erro e o valor do ganho derivativo é dado pela constante K_d . Este tipo de controlador proporciona uma ação bastante rápida sempre que ocorrerem variações na saída, entretanto não minimiza os erros em regime permanente (SANTOS, 2010).

2.2.9 Atuador

Dispositivo que, recebendo o comando do sistema de controle, o converte em uma ação física no sentido de alterar a variável manipulada (GUTIERREZ, 2008).

2.2.10 Conversor

O conversor é um instrumento que converte um sinal de entrada padronizado, vindo do controlador, em um sinal de saída de outro tipo, por exemplo, o sinal de 4 a 20 mA (BEGA, 2011).

2.2.11 Elemento Final de Controle

O elemento final de controle é um equipamento que recebe o sinal do controlador e atua sobre o agente de controle (BEGA, 2011).

2.3 Identificação e Símbolos de Instrumentos

Segundo Ribeiro (1999), a normalização dos símbolos dos instrumentos de medição e controle do processo veio para tornar possível e mais eficiente a comunicação do pessoal envolvido nas diferentes áreas que envolvem uma planta (projeto, operação, manutenção, processo). Isso torna simples a identificação de instrumentos mesmo para pessoas que não são especialistas em instrumentação.

O que se pode ressaltar é que quando se tem um código que representa uma malha, sua primeira letra diz respeito à variável que é medida e não de acordo com a variável manipulada. Por exemplo, está presente no fluxograma da planta didática o símbolo LIT 01. Ao analisar a tabela, é constatado que este símbolo representa o instrumento que é conhecido por Transmissor com Indicador local de Nível e 01 diz respeito à localização do instrumento na planta que é no tanque 01. Vale notar que a ISA adotou a língua inglesa para nomear cada letra (GALLON, 2012).

Segundo Bega (2006), a simbologia mais utilizada mundialmente nessa área é a padronizada na norma D 5.1 da ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*).

2.3.1 Letras de Identificação dos Instrumentos

Observa-se na tabela 2.1 as letras de identificação da planta industrial.

Tabela 2.1: Letras de identificação dos instrumentos da planta industrial.

	Primeira Letra		Letras Sucessivas		
	Variável Medida	Letra de Modificação	Função de leitura passiva	Função de saída	Letra de modificação
A	Analísador	Alarme	Alarme		
B	Queimador	Botão pressão		Controlador	
C	Condutibilidade elétrica				
D	Densidade ou peso específico	Diferencial			
E	Tensão (fem)		Elemento primário		
F	Vazão	Relação			
G	Medida dimensional		Visor		
H	Comando manual	Entrada manual			Alto
I	Corrente elétrica		Indicação/indicador		
J	Potência	Varredura			
K	Tempo ou programa		Cálculos em sistemas digitais		
L	Nível		Lâmpada piloto		Baixo
M	Umidade		Média		Médio ou intermediário
N	Vazão Molar				
O	Orifício ou restrição				
P	Pressão	Percentual	Tomada de impulso		
Q	Quantidade	Integração			
R	Remoto		Registrador		
S	Velocidade ou frequência	Velocidade/chave e de segurança		Interruptor ou chave	
T	Temperatura			Transmissão/Transmissor	
U	Multivariável		Cálculo feito por computador	Multifunção	Multifunção
V	Vibração			Válvula	
W	Peso ou força		Poço		
X ou Y	Escolha do usuário		solenóide/conversor de sinal	Relé ou computador	
Z	Posição/descolamento			Elemento final de controle	

Fonte: (GONÇALVES, 2003).

2.3.2 Símbolos de Instrumentos

Observa-se na Figura 2.3 a identificação dos símbolos dos instrumentos presentes na planta didática.

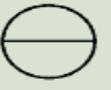
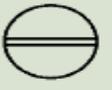
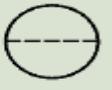
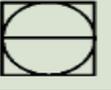
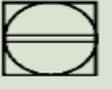
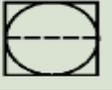
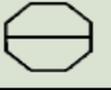
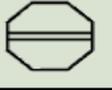
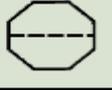
Instrumentos	Painel principal acessível ao operador	Montado no campo	Painel auxiliar acessível ao operador	Painel auxiliar não-acessível ao operador
Instrumentos discretos				
Instrumentos compartilhados				
Computador de processo				
Controlador lógico programável				

Figura 2.3: Símbolos de Instrumentos.

FONTE: (GONÇALVES, 2003).

2.3.3 Sinais utilizados em Fluxogramas

Observa-se na Figura 2.4 os sinais utilizados em fluxogramas presentes na planta didática.

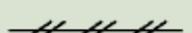
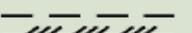
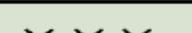
	Suprimento ou impulso		Sinal não-definido
	Sinal pneumático		Sinal elétrico
	Sinal hidráulico		Tubo capilar
	Sinal eletromagnético ou sônico guiado		Sinal eletromagnético ou sônico não-guiado
	Ligação por software		Ligação mecânica
	Sinal binário pneumático		Sinal binário elétrico

Figura 2.4: Sinais Utilizados em Fluxogramas.

FONTE: (GONÇALVES, 2003).

2.4 Nível

É definido como a determinação da posição de uma interface entre dois meios. Pode ser considerada a medição da altura do líquido ou sólido em um vaso ou tanque. Segundo Gonçalves (2003), é uma das variáveis mais comuns no ambiente industrial de processos contínuos. Com sua medição, torna-se possível avaliar o volume estocado de materiais

(líquidos ou sólidos) em tanques de armazenamento e ainda, quando controlada mantém a segurança do sistema não deixando produtos dos tanques transbordarem.

2.4.1 Unidades de Medidas para Nível

Para as medidas de nível é comum usar a unidade de comprimento ou pode ser convertido em volume diretamente em casos de reservatórios regulares, ou linearizado para outros casos. Pode-se representar também fazendo uma proporção entre o volume ocupado e o volume total, variando de 0 a 100%.

2.4.2 Instrumentos Medidores de Nível

Segundo Bega (2006), podem ser classificados de acordo com a forma de que medem o nível, em instrumentos de medida direta e inferencial. E ainda, também são classificados quanto à função que o instrumento desempenha na malha, classificando-os nesse caso como: indicadores, transmissores, controladores e chaves de nível.

Cassiolato (2005) classifica os tipos básicos de medição de nível como:

- I. Direto: a medição direta pode ser feita medido-se diretamente a distância entre o nível do produto e um referencial previamente definido. Neste tipo de medição pode-se utilizar a observação visual, como por exemplo, régua, gabaritos, visores de nível, bóia ou flutuador, ou até mesmo através da reflexão de ondas ultra-sônicas pela superfície do produto;
- II. Indireto: na medição indireta, o nível é medido indiretamente em função de grandezas físicas a ele relacionadas, como por exemplo, pressão (manômetros de tubo em U, níveis de borbulhador, níveis de diafragma, células de pressão diferencial e etc.), empuxo (níveis de deslocador) e propriedades elétricas (níveis capacitivos, detector de nível condutivo, níveis radioativos, níveis ultra-sônicos, detector de nível de lâminas vibrantes);
- III. Descontínuo: Na medição descontínua, tem-se apenas a indicação apenas quando o nível atinge certos pontos especificados, como por exemplo, condições de alarmes de nível alto ou baixo.

2.5 Temperatura

A temperatura é uma grandeza física que mede o estado de agitação das partículas de um corpo, caracterizando o seu estado térmico. Segundo Gonçalves (2003), todo corpo é

composto por moléculas que estão em constante movimento, quanto mais rápido este movimento, mais quente estará o corpo. Quando o grau de agitação é pequeno, o corpo estará mais frio. O grau de agitação térmica molecular não pode ser medida diretamente, por isso a medida da temperatura é feita indiretamente medindo-se grandezas físicas que variam com ela, por exemplo, pressão e volume.

2.5.1 Unidades de Medidas para Temperatura

As escalas mais utilizadas por utilizadas por cientistas e engenheiros são Celsius, Fahrenheit e Kevin. A escala Celsius tem como pontos de referência as temperaturas de congelamento da água sob pressão normal 0°C e a de ebulição da água sob pressão normal 100°C. Esse intervalo entre os dois pontos é dividido em cem partes iguais e cada uma representa o chamado grau Celsius (°C).

A escala Fahrenheit tem como pontos de referência as temperaturas de congelamento da água sob pressão normal 32 (°F) e a de ebulição da água sob pressão normal 212 (°F). O intervalo entre esses dois pontos é dividido em 180 partes iguais e cada uma delas é chama de grau Fahrenheit (°F).

A escala Kelvin é chamada escala absoluta, é baseada na menor temperatura que um corpo poderia atingir, que é aproximadamente - 273°C (zero absoluto). A partir desse ponto, foi determinado o ponto zero da escala. Nela, referência as temperaturas de congelamento da água sob pressão normal é de 273 K e a de ebulição da água sob pressão normal 373 K.

A relação entre as temperaturas Celsius, Fahrenheit e Kevin são representadas pela equação 1:

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9} = \frac{K - 273}{5} \quad (1)$$

Onde, C é o valor da temperatura em graus Celsius (°C), F em graus Fahrenheit (°F). e K em Kelvin.

2.5.2 Medição da Temperatura

A temperatura é uma das variáveis de processo mais importantes e sua medição e controle é fundamental numa vasta gama de aplicações, que abrange desde processos físicos e químicos até a proteção de equipamentos (BEGA, 2011).

Existem vários instrumentos que leem temperatura no ramo industrial, tais como: termômetros, termopares e termorresistências, e ainda, instrumentos de segurança, como termostato. Os sensores mais utilizados no ramo da indústria na medição da temperatura são os termopares e as termorresistências.

2.6 Controlador Lógico Programável (CLP)

Um Controlador Lógico Programável, conhecido também pela expressão inglesa PLC (*Programmable Logic Controller*), é um computador industrial utilizado no controle e automação de processos. Diferente dos computadores convencionais os CLPs são mais robustos, pois estão expostos a diversas condições adversas presente no ambiente industrial, como poeira, umidade e calor. O CLP utiliza uma memória programável para armazenar programas elaborados pelo usuário, tendo como objetivo controlar o estado das variáveis de saída baseado no estado das variáveis de entrada.

A estrutura física do CLP é constituída pela fonte de alimentação, processador, memórias, terminais de entrada e saída e terminal de programação e supervisão. Esses elementos podem ser configurados em dois tipos distintos de estrutura física. No tipo compacto, todas as partes são colocadas na mesma estrutura. Essa montagem resulta em um controlador de pequeno porte, adequado para atender as aplicações industriais mais comuns. O outro tipo de estrutura é o CLP modular. Cada elemento é construído em um módulo distinto, que são montados em *racks* formando uma configuração de médio ou grande porte (RADUAN, 2014).

2.7 Planta Didática

A planta didática está localizada no Laboratório de Tecnologias Industriais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), tem como objetivo demonstrar didaticamente a operação das diversas malhas de controle utilizando os mesmos equipamentos e ferramentas de configuração em *software*, desenvolvidos para aplicação em controle industrial. Ela utiliza o protocolo de rede Foundation Fieldbus, é composta por componentes elétricos tais como os transmissores, possui um Controlador Lógico Programável (CLP) da marca Smar, o que acarreta na utilização dos seus próprios *softwares* que englobam as áreas de programação do CLP e da sua comunicação com todos os instrumentos e ainda, um *software* destinado à confecção e programação do sistema supervisor. O CLP é o modelo LC700 que é bem aplicado para sistemas de processos contínuos e o *software* é o SYSTEM302. Os transmissores utilizados nesse projeto são da série LD302 para as grandezas

pressão, vazão e nível e o modelo TT302 exclusivo para temperatura e para a comunicação dos equipamentos uma ponte universal *fieldbus* (DFI302).

Observa-se pela figura 2.5 a planta didática industrial que está localizada no Laboratório de Tecnologias Industriais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).



Figura 2.5: Estrutura da Planta didática.

2.8 Rede *Foundation Fieldbus*

A rede *Foundation Fieldbus* (FF) é um sistema de comunicação digital, serial e bidirecional, que funciona como uma rede local para instrumentos usados em processos e automação industrial, com capacidade embutida para distribuir o controle de aplicação através da rede industrial. Ela também pode ser interligada a redes TCP/IP/Ethernet, com o intuito de configuração remota de dispositivos. A estratégia de controle distribuído ao longo dos dispositivos de campo é possível porque todos os dispositivos possuem microprocessadores e memória com várias funções, inclusive a estratégia de controle PID, e alguns fabricantes já disponibilizam controle fuzzy e outros tipos de estratégias de controle. Graças a todas essas novas possibilidades, o conceito de gerenciamento de processos atualmente permite novas tarefas de automação, como: novas configurações, diagnósticos de desempenho em tempo real e manutenção de registros e ferramentas (SANTOS, 2008).

2.8.1 DFI 302 - *Fieldbus Universal Bridge*

O DFI302 - Fieldbus Universal Bridge é um equipamento com barramento energizado ou não, utilizado para conectar segmentos FIELDBUS de diferentes velocidades (e/ou níveis físicos como fios, fibras ópticas, rádio, etc.) funciona como um controlador e sistema host de uma rede FF e se apresenta extremamente flexível e modular. É um elemento chave na arquitetura distribuída dos Sistemas de Controle de Campo, pois combina poderosas características de comunicação com acesso direto de entradas e saídas e controle avançado para aplicações contínuas e discretas.

Na configuração da estratégia de controle ou monitoração de uma rede Fieldbus são utilizados os chamados Blocos Funcionais. Estes representam as funções básicas de automação. Cada bloco processa parâmetros de entrada conforme um algoritmo específico e um conjunto interno de parâmetros de controle produzindo parâmetros de saída utilizados dentro da mesma aplicação ou por outras aplicações. Isto permite que toda a estratégia (para o DFI302 e instrumentos de campo) possa ser completamente configurada por um único aplicativo. O DFI302 trabalha junto com o Syscon, *software* de configuração e manutenção para se utilizar à característica de operação *plug- 'n'-play* podendo então, detectar, identificar e atribuir os endereços aos dispositivos conectados, removidos ou que tenham tido problemas.

2.8.2 Arquitetura da Rede Foundation Fieldbus

Uma rede fieldbus admite dois níveis físicos em sua arquitetura. O nível H1 e o nível HSE. O primeiro opera com velocidade de 31,25 Kbit/s e efetua a conexão entre os equipamentos encontrados no chão de fábrica (atuadores, sensores e dispositivos de entrada e saída I/O). O nível superior ao H1, conhecido como HSE (*High Speed Ethernet*) opera a uma taxa de 100 Mbits/s, e é quem liga o nível H1 às estações de operação, aos controladores mais rápidos como CLP's além de permitir a conexão entre diferentes níveis H1. Há um dispositivo responsável pela ligação entre os dois níveis H1 e HSE que é conhecido como *Linking Device* e desempenha o papel de ponte entre os mesmos.

Observa-se pela figura 2.6 o diagrama elétrico da conexão dos dispositivos da planta industrial presente neste trabalho.

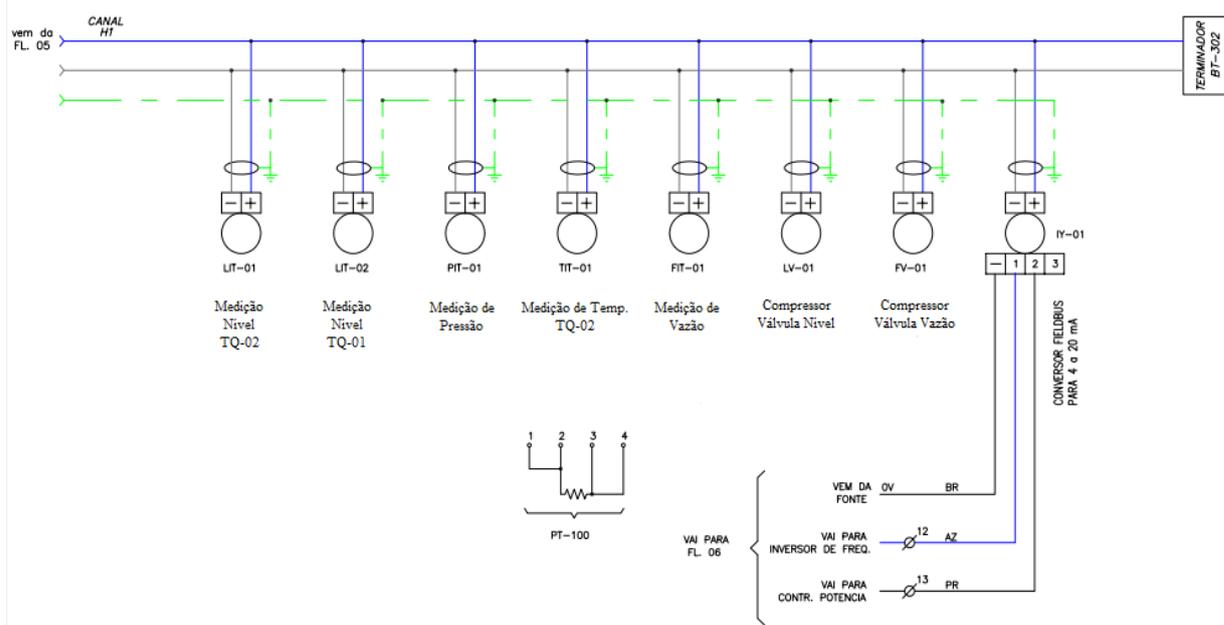


Figura 2.6: Conexão dos Dispositivos ao Barramento do Canal H1 da Rede fieldbus.

Observa-se pela figura 2.7 o padrão de identificação de cor dos cabos que compõem o sistema elétrico da planta industrial utilizada neste trabalho.

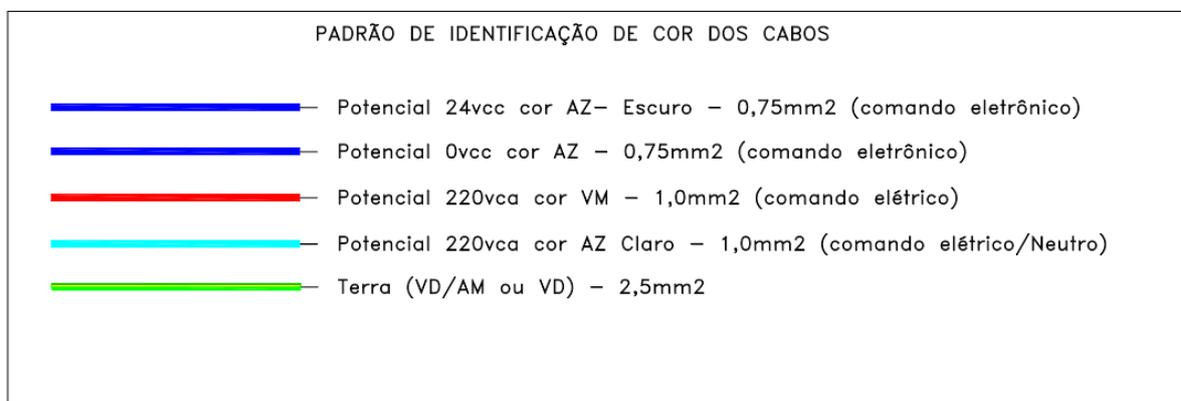


Figura 2.7: Padrão de Identificação de Cor dos Cabos.

DFI302 é um equipamento modular multifunção. A planta didática possui uma plataforma de controle e automação de processos como pode ser observado na figura 2.8:

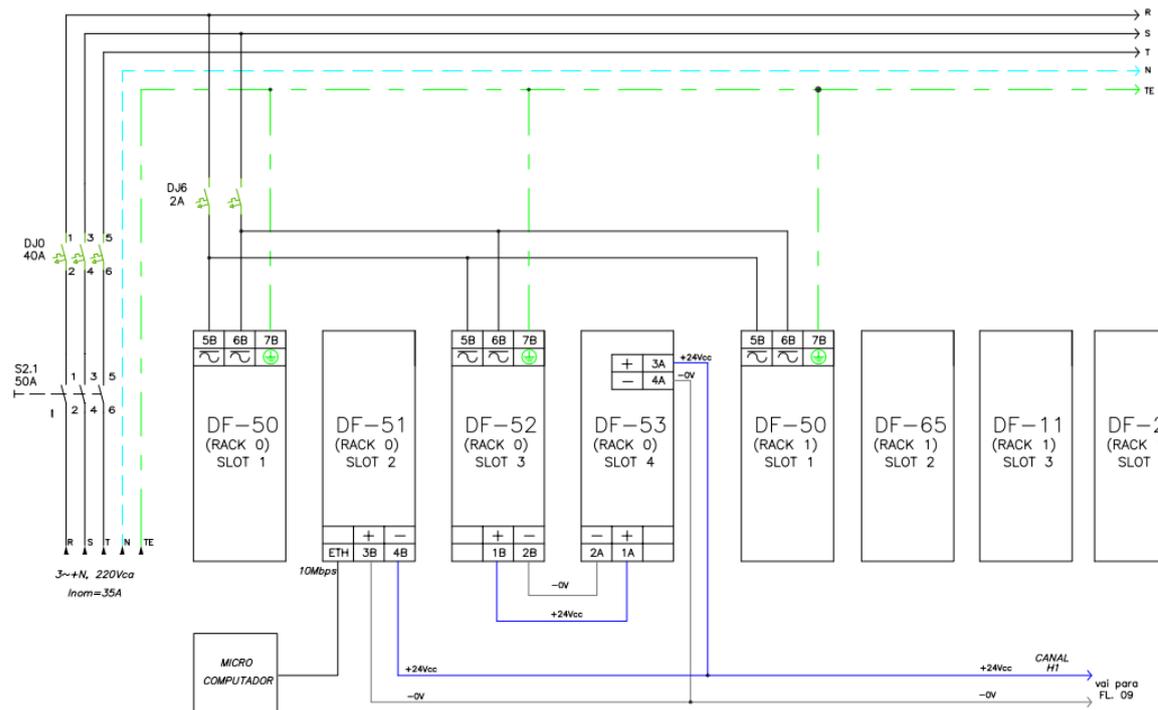


Figura 2.8: Plataforma de Controle e Automação de Processos DFI302.

- I. DF50 - Fonte de 5 e 24 VDC para o *backplane*: esta fonte de alimentação redundante trabalha independente ou em conjunto com outro módulo fonte de alimentação redundante para garantir um fornecimento constante de energia para a aplicação. Quando duas fontes de alimentação são usadas em redundância, no caso de falha de uma delas, a outra assume automaticamente o fornecimento de potência;
- II. DF51 - Módulo controlador *FF*: é um módulo controlador da plataforma DFI302 com capacidade de conectar equipamentos *Fieldbus* no barramento H1, executando a função de LAS (Link Active Scheduler) da rede. Através do uso conjunto com o DF65 (módulo co-processador), é possível programar a lógica via linguagem Ladder e também interagir com todos os outros módulos do sistema DFI302;
- III. DF52 - Fonte 24VDC para *fieldbus*: essa fonte é um equipamento de segurança não intrínseco com uma entrada AC universal (90 a 264 Vac, 47 a 63 Hz ou 127 a 135 Vdc) e uma saída de 24Vdc isolada, com proteção contra sobrecorrente e curto-circuito, além de indicação de falha, apropriada para alimentar os elementos do fieldbus;
- IV. DF53 - Impedância para *fieldbus*: a função de uma impedância é implementar um circuito de saída na qual a impedância seja maior que 3 K Ω e, em paralelo com dois terminadores de 100 $\Omega \pm 2\%$ cada, resulte em uma impedância de linha de

aproximadamente 50Ω , o que fornece uma impedância de linha puramente resistiva para uma ampla faixa de frequências;

- V. DF65 - Co Processador Lógico: O co-processador lógico DF65 é conectado ao DF51 (controlador da plataforma de automação DFI302) para adicionar a este maiores capacidades de controle discreto. A lógica ladder e blocos funcionais do co-processador auxiliam e aceleram o controle de um sistema Fieldbus. Esta conexão permite que o DF65 e o DF51 troquem dados entre si, permitindo inclusive que o usuário monitore o controle simultaneamente os *softwares* LogicView e Syscon usados na programação;
- VI. DF11 - Entradas digitais: este módulo possui 2 grupos de 8 entradas isoladas de 24Vdc e detecta uma tensão DC de entrada e a converte em um sinal lógico verdadeiro (*ON*) ou falso (*OFF*).

Observa-se pela figura 2.9 o diagrama elétrico do módulo de entradas digitais DF11 da planta industrial presente neste trabalho;

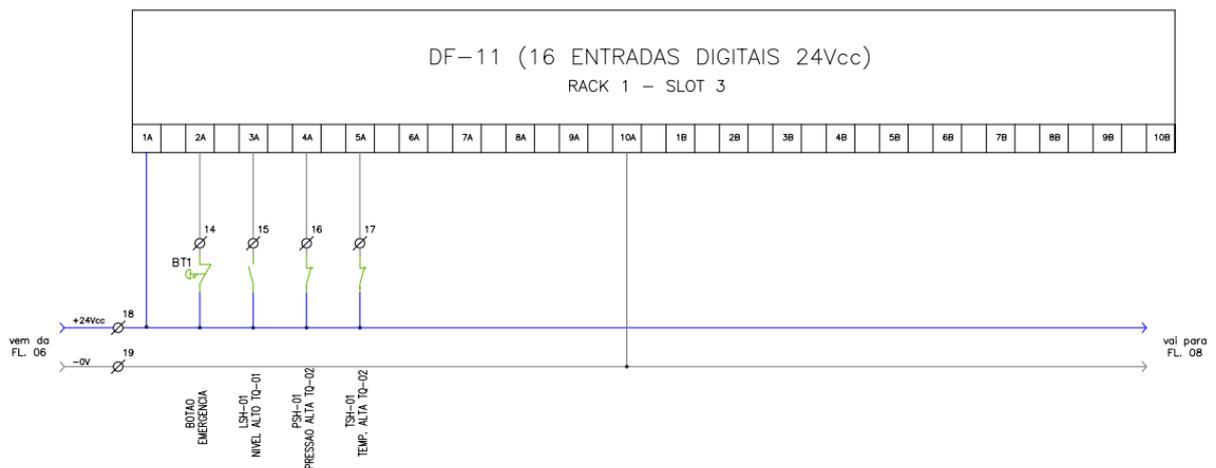


Figura 2.9: Diagrama Elétrico do DF11.

- VII. DF21 - Saídas digitais: Este módulo é projetado com transistores NPN com coletor em aberto que são capazes de acionar relés, lâmpadas incandescente, solenóides e outras cargas com até 0,5A por saída. Ele possui um grupo de 16 saídas com coletor em aberto isoladas opticamente.

Observa-se pela figura 2.10 o diagrama elétrico do módulo de saída digital DF21 da planta industrial utilizada neste trabalho.

2.9.1.1 Pt 100

De acordo com Bega (2006), este sensor recebe esse nome por possuir elemento de platina e resistência padronizada de 100Ω a 0°C , o Pt 100 é o termorresistor mais empregado em todo o mundo, devido à sua estabilidade, repetibilidade, precisão e ampla faixa de operação.

O Pt 100, como qualquer termorresistor, trabalha associado a circuitos que convertem a sua variação de resistência em leitura de temperatura e/ou sinal padronizado, além de garantir que a corrente no sensor seja mínima para que não haja auto-aquecimento (GALLON, 2012).

A planta de instrumentação e controle de processo contínuo possui dois Pt100, um ligado ao transmissor de *tag* TIT- 02 que é responsável pela medição da temperatura da água no tanque de abastecimento, como pode ser observado na figura 2.11, e outro transmissor da mesma série com o *tag* TIT-01, ligado ao vaso de pressão.



Figura 2.11: TIT- 02 Pt100.

2.9.2 SMAR LD302 Transmissor de Pressão Medidor de Nível

É um sensor que ajuda medir com precisão os níveis de pressão presentes em reservatórios com líquidos ou tanques, evitando com que as alterações de pressão afetem as características dos fluidos presentes. Basicamente, o funcionamento do transmissor de nível trabalha com a condutividade do líquido que está sobre seu controle, utilizando de correntes elétricas de circuitos eletrônicos de sensibilidade variada, é feito o controle de saída e entrada de líquidos,

condicionando a conexão entre os líquidos controlados e medindo os níveis dentro dos tanques ou reservatórios.

Na planta didática estão presentes dois transmissores indicadores de nível do tipo capacitivo, que fornecem o valor do nível do tanque de abastecimento, o qual possui *tag* LIT-01 e outro para medir o nível do vaso de pressão com *tag* LIT-02.

Observa-se pela figura 2.12 o transmissor de nível do tanque de abastecimento.



Figura 2.12: LIT-01 Transmissor de Nível.

2.9.3 Chave de Nível

Segundo Bega (2006), as chaves de nível são elementos usados para atuarem em certos pontos de nível previamente determinados. Quando esses pontos são alcançados pelo elemento que está sendo medido, por exemplo, a água, ocorre o desencadeamento de ações necessárias para o bom funcionamento ou para a segurança do sistema. Assim, uma chave de nível pode ligar ou desligar uma bomba, acionar um alarme ou dá início a uma sequência de operações automáticas.

Possuem como saída somente um dos dois possíveis estados: energizado/desenergizado para sistemas elétricos ou pressurizado/despressurizado para sistemas pneumáticos. São compostos basicamente por duas partes: detector de nível e circuito de saída. O primeiro é encarregado de passar ao segundo a informação da ausência ou presença do nível e o segundo, encarregado de mudar o estado de saída da chave dependendo desta informação recebida (GALLON,

2012). A planta didática possui uma chave de nível no tanque de abastecimento para trazer a informação de tanque cheio à unidade de controle.

Observe-se pela figura 2.13 a chave de nível do tanque de abastecimento.



Figura 2.13: Chave de Nível.

2.9.4 Válvulas de Controle

São os elementos utilizados para comando dos atuadores, exercendo função preponderante dentro dos circuitos fluídicos e são classificadas conforme suas funções. Tem a finalidade de provocar uma obstrução na tubulação para permitir o controle da vazão. De todas as aplicações que elas possuem a mais importante se relaciona com o controle automático e contínuo do processo. Na planta industrial presente neste trabalho existem duas válvulas de controle que utiliza atuador pneumático do tipo mola e diafragma. Funciona através de um diafragma flexível, sobre o qual age uma pressão de carga variável em oposição à força produzida por uma mola. Pode ter dois modos de ação:

- I. **Ação Direta:** o aumento da pressão empurra a haste para baixo, enquanto a mola força a haste para cima;
- II. **Ação Reversa:** o aumento da pressão de puxa a haste para cima, enquanto a mola força a haste para baixo.

2.9.5 SMAR FY302 Posicionador de Válvula Fieldbus

Serve de interface entre a rede Fieldbus e válvulas pneumáticas. Seu princípio de medição utiliza-se de um sensor de efeito Hall para inferir a abertura da válvula e de um diferencial de pressão para posicioná-la na abertura desejada (RIBEIRO, 2012). A planta didática possui dois posicionadores de válvula FY302, como pode ser observado na figura 2.14.



Figura 2.14: Válvulas de Controle e os Posicionadores das Válvulas.

2.10 Diagrama de Tubulação e Instrumentação P&ID da Planta

Observa-se pela figura 2.15 o diagrama de tubulação e instrumentação da planta industrial de instrumentação e controle de processo contínuo utilizada neste trabalho.

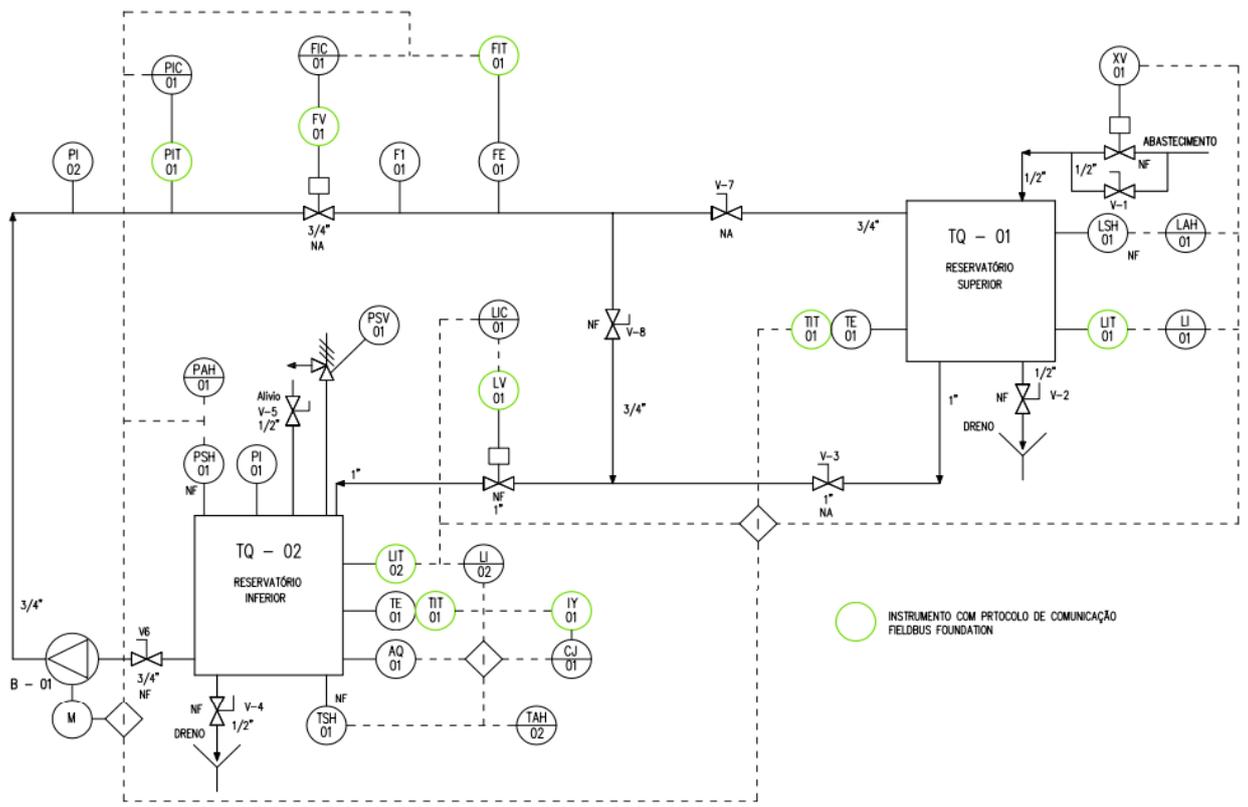


Figura 2.15: Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta.

2.11 Controlador Híbrido LC 700

O LC 700 é o CLP da planta didática industrial. É um elemento de controle discreto que também possui suas configurações associadas a pontos OPC para que sejam monitoradas pelo sistema supervisor. Sua programação é feita no *software* LogicView. O controlador presente na planta didática é constituído pelo módulo de entradas digitais DF11, pelo módulo de saídas digitais DF21 e o módulo processador DF65. Um fato interessante é que este controlador não possui módulos para entrada e saída analógicas. Toda a manipulação dos dados analógicos é feita pela rede Foundation Fieldbus que capta esses valores através dos transmissores e repassa ao DF65 por um cabo de conexão serial.

Observa-se pela figura 2.16 o controlador Híbrido LC700.



Figura 2.16: Controlador Híbrido LC700.

2.12 Softwares

As configurações do controle da planta didática presente neste trabalho são gerenciadas pelo Studio 302, uma ferramenta que integra todos os aplicativos disponíveis no sistema de automação industrial da Smar, o System302. Foram utilizados três *softwares* do System302 para realizar a configuração dos dispositivos e implementação da estratégia de controle: Syscon, LogicView e ProcessView.

2.12.1 SYSCON

O Syscon, System Configurator, é uma ferramenta de *software* desenvolvida para configurar, supervisionar e operar a linha de equipamentos da Smar utilizando controladores para realizar a comunicação via rede Fieldbus Foundation. Executa toda a comunicação e leitura de dados via OPC (OLE for Process Control).

É no Syscon que são selecionados todos os dispositivos Fieldbus que irão compor a rede e que estejam ligados fisicamente ao barramento, sendo acrescentado aos dispositivos todos os blocos funcionais necessários e a configuração adequada para a implementação da estratégia de controle. Cada dispositivo possui, para identificação: uma *tag* (usada para identificá-lo na comunicação); um ID (número imutável de cada dispositivo), e um *adress* (endereço do dispositivo na rede), assim todos os *tags*, ID e *adress* de uma configuração tornam-se disponíveis para o ProcessView via *Tag Browser*.

2.12.2 LogicView

É responsável pela programação do Controlador Lógico Programável. Tem o propósito de prover a conexão entre a linguagem padrão de diagramas tipo *Ladder* IEC 61131-3 (lógica *ladder* a relés) e as estratégias de controle, configuradas através da linguagem de blocos funcionais no Syscon. Esta linguagem é a mais utilizada em lógica por ser completamente gráfica, ideal para controle de máquinas.

Um diagrama de lógica é uma interface gráfica de linguagem de programação que é usada para desenvolver algoritmos para CLPs. Ele permite escrever programas usando símbolos gráficos em vez de texto. Estes símbolos gráficos são dispostos sequencialmente no diagrama formando uma rede de dispositivos que compõem o sistema. Como a maioria das linguagens gráficas, a lógica Ladder, um exemplo de linguagem gráfica tipicamente utilizada em estratégias de controle discreto, tem sua própria gramática e regras de sintaxe que ditam como seus elementos de linguagem devem ser arranjados (SANTOS, 2010).

2.12.3 ProcessView

O ProcessView é um *software* da SMAR que é um componente do sistema de Automação e Controle System 302. É um conjunto de módulos que inclui aplicações para visualizar e operar o processo, visualizar alarmes, análise de tendências, relatórios, etc. Todo módulo de *software* no *ProcessView* é projetado para também ser capaz de operar como um produto individual, podendo ser substituído individualmente por uma aplicação de outro fabricante (SMAR, 2011).

É uma família de soluções de *softwares* baseadas nas arquiteturas OPC (OLE for Process Control) e cliente/servidor destinadas a interface Homem-Máquina (IHM) bem como supervisão de controle de processos (SMAR, 2005).

Observa-se através da figura 2.17 os diferentes *softwares* que o ProcessView é formado.

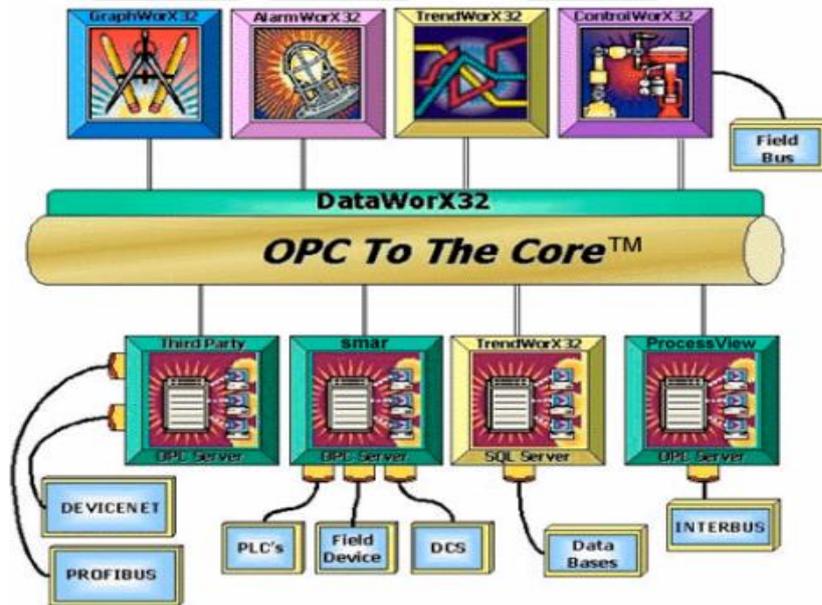


Figura 2.17: Conjunto de *softwares* que formam o ProcessView.

Fonte: (SMAR, 2005).

2.12.3.1 OPC (OLE for Process Control)

O OPC (OLE for Process Control) é o modo mais comum de se conectar fontes de dados como equipamentos e bancos de dados com aplicações cliente IHM. Ele otimiza a interface entre aplicações cliente servidor fornecendo um mecanismo padrão para comunicar dados de uma fonte de dados para qualquer aplicação cliente. Em outras palavras o OPC é uma ferramenta “*plug and play*” para IHM e automação. Para tanto faz uso de um protocolo universalmente aceito e conhecido para envio de dados entre fontes de dados (Servidores) e aplicações (Clientes), eliminando tanto quando possível o uso de “*drivers*” e conversores, geralmente proprietários, criando uma dependência entre o usuário e o fornecedor daquele sistema propretário muitas vezes custosa e ineficiente (SMAR, 2005).

No caso da arquitetura tradicional, servidores ou equipamentos têm interfaces/*drives* diferentes para cada aplicação cliente. Embora o protocolo de um equipamento ou servidos não possa mudar, a arquitetura das diferentes aplicações clientes é diferente. Se o protocolo do equipamento ou servidor é alterado ou atualizado, então a aplicação cliente também precisa ser modificada. A arquitetura do OPC foi introduzida para superar este problema. Neste caso, um equipamento/servidor terá somente um driver padrão que é o OPC-compliant (Servidor) e todos os pacotes clientes podem ser conectados a ele com os proprios clientes que são OPC-compliant (Cliente).

Observa-se pela figura 2.18 a estrutura da tecnologia OPC:

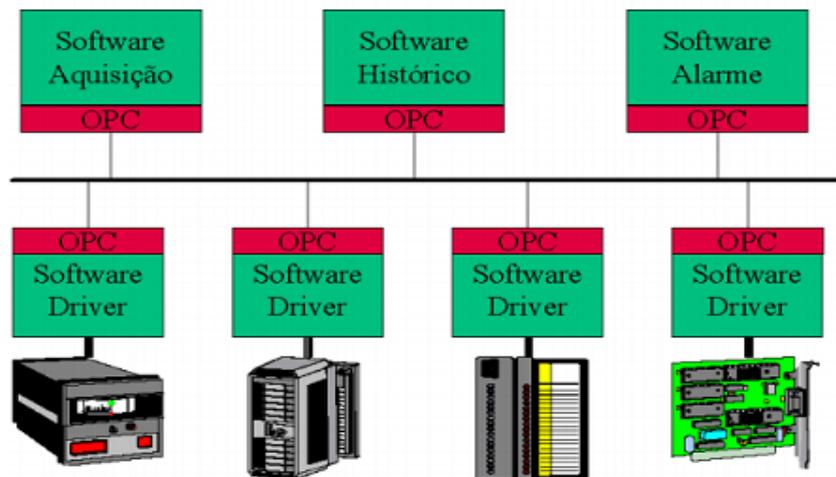


Figura 2.18: Tecnologia OPC.

Fonte: (SMAR, 2005).

2.12.3.2 ProjectWorX

É um gerenciador de projetos que possibilita o acesso via interface única a qualquer aplicativo do pacote ProcessView. Ele é responsável por unificar o acesso e criação de todos os tipos de arquivos que são utilizados para controle e supervisão do processo o que facilita a organização e documentação de um projeto. Reúne em um arquivo único de Pack todas as telas tanto de supervisão como seus arquivos componentes, incluindo a base de dados para que backups sejam facilitados e aumentar a confiabilidade das informações.

2.12.3.3 GraphWorX

É um cliente OPC destinado a interface Homem-Máquina (IHM) e trás ferramentas destinadas a criação de gráficos animados. É através dele que são criadas as telas para a visualização e monitoramento do processo para o operador.

2.12.3.4 TrendWorX

É um cliente OPC destinado a coleção de dados em tempo real, bem como seu armazenamento em banco de Dados Relacional. Permite a exibição nos modos tempo real, *Persistent* e Histórico. Também tem a capacidade de gerar relatórios e ferramentas de análise a partir de dados armazenados.

2.12.3.5 OPC Data Spy

Permite ao usuário monitorar um número ilimitado de pontos OPC, utilizando o Data Spy, com isso o usuário pode visualizar esses dados de qualquer servidor OPC, seja de eventos ou histórico, local ou na rede, bem como escrever valores e manipula-los conforme seja necessário.

3 METODOLOGIA

Todos os processos para o estudo da malha de controle de nível e o sistema de supervisão foram realizados na planta didática presente no Laboratório de Tecnologias Industriais do Departamento de Engenharia de Controle e Automação da Escola de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. A metodologia deste trabalho foi desenvolvida através das seguintes etapas:

- I. Configuração da Rede: foi realizada através do protocolo de comunicação Foundation Fieldbus;
- II. Configuração dos instrumentos: foram configurados pela área *Fieldbus Networks* do *software Syscon* através do DFI302 - *Fieldbus Universal Bridge*;
- III. Configuração da estratégia de controle: foi desenvolvida na área *Application* do *software Syscon* realizando conexões entre os blocos funcionais do sistema;
- IV. Desenvolvimento da lógica de programação: foi realizada uma lógica no controlador LC700 utilizando diagramas tipo *Ladder* IEC 61131-3 (lógica *ladder* a relés);
- V. Criação do sistema supervisor: foram criadas interfaces através do *software GraphWorX* do *ProcessView* para o monitoramento a partir dos dados obtidos pela planta em tempo real;
- VI. Experimento do sistema em malha aberta: foram realizados experimentos de enchimento, esvaziamento e com variação da abertura da válvula de controle, para observar a dinâmica do sistema em malha aberta;
- VII. Sintonia em malha fechada: foram selecionados os métodos da resposta em frequência (Ziegler-Nichols) e do controlador SIMC para obter os modelos matemáticos do controlador PI;
- VIII. Simulação dos resultados: Os resultados obtidos pelos métodos de sintonia em malha fechada foram simulados com o auxílio do aplicativo Simulink[®]/Matlab[®];
- IX. Verificação dos resultados obtidos: foram observados os critérios de desempenho através da análise gráfica do sistema em tempo real.

4 ESTUDO DE CASO

Para este trabalho a planta didática industrial não terá todos os seus equipamentos utilizados. Pretende-se utilizar para a malha de controle de nível do tanque de abastecimento e o monitoramento do sistema, uma válvula solenoide, um transmissor de temperatura ligado a um pt 100, um transmissor de pressão medidor de nível e uma válvula de controle. Nos próximos capítulos seguirão os passos para a realização de um controle de nível e do sistema supervisorio utilizando os *softwares* do Studio 302.

4.1 Programação do Syscon

O *software* Syscon será configurado para atender ao objetivo deste trabalho. Ele é responsável pela programação da rede de comunicação, a Foundation Fieldbus. Os transmissores, a rede fieldbus e a estratégia de controle serão adaptados de acordo com a finalidade do projeto.

Para configurar uma lógica na planta industrial, o primeiro passo é verificar se os instrumentos estão sendo utilizados em algum projeto antigo. Sendo assim é preciso limpar a memória dos transmissores que serão utilizados para configurar um novo projeto. O Syscon indica ao usuário quais instrumentos incluídos no projeto de configuração que não estão associados a equipamentos físicos na planta ou que não estão comunicando corretamente com a rede.

Após abrir o Syscon com a lógica antiga, basta colocar no modo *on-line* (*On-line Mode*) para que o software estabeleça a comunicação com os instrumentos, como mostra a tabela 4.1.

Tabela 4.1: Indicações para os ícones dos instrumentos na janela Fieldbus.

	Indica que o instrumento está operando corretamente.
	Indica que o instrumento não está conectado à planta ou existe falha de comunicação.
	Indica que o instrumento está comunicando com a planta, porém ele não foi configurado corretamente. Será necessário comissionar o instrumento.

Fonte: (SMAR, 2005).

Definidos os transmissores que serão utilizados, faz-se o decomissionamento desses transmissores, que seria "apagar" os seus antigos parâmetros e cria-se uma nova *bridge*.

4.2 Configurando a rede Foundation Fieldbus

Neste capítulo, a rede Foundation Fieldbus será configurada objetivando a criação do sistema de controle do processo usando *software* configurador Syscon. No caso deste trabalho realizado na planta didática, o programa se comunica com os equipamentos do nível H1 da rede. A comunicação pode ser feita através de uma interface Foundation Fieldbus (PCI) ou de um *Linking Device*. A planta utiliza o *Linking Device* em que a comunicação é via Ethernet e o instrumento que faz esta ponte é o componente *DFI302, Ponte Universal* Fieldbus presente no sistema *System 302* da empresa SMAR. Aqui, os transmissores, a rede fieldbus e a estratégia de controle serão adaptados de acordo com o objetivo do trabalho. O controlador LC700 da planta didática não possui módulos para entrada e saída analógica. Toda a captação e envio de dados analógicos é feita pela rede de comunicação Foundation Fieldbus.

4.3 A Lógica de Controle do Syscon

No programa configurador, a rede foi configurada, assim como os dispositivos e a estratégia de controle presentes nela. Esta ferramenta permite a criação de estratégias em modo *off-line*, ou seja, as informações são armazenadas em uma base de dados. A idéia é que, em um momento inicial a configuração seja *off-line* para que, depois de pronta, seja carregada (*Download*), onde as informações serão armazenadas nos instrumentos. A partir daí, a ferramenta também permite alterações em modo on-line. Por razões de segurança, somente algumas alterações podem ser realizadas em modo on-line como mudanças de parâmetros.

Os aspectos físicos e lógicos da aplicação estão insclusos da etapa de configuração *off-line*. Inicialmente o programa configurador cria a rede fieldbus. A partir daí a configuração se divide em duas partes: configuração da *Application* e da *Fieldbus Networks*.

Observe pela figura 4.1 a divisão da criação da configuração inicial:

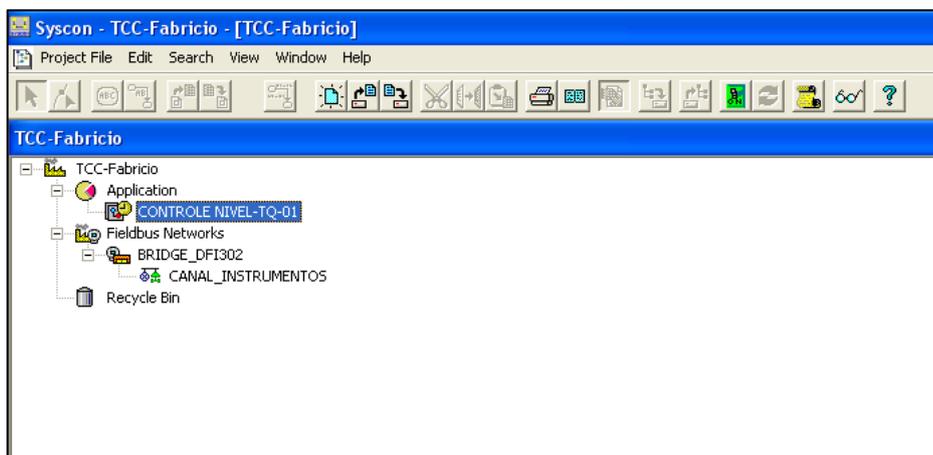


Figura 4.1: Application e Fieldbus Networks.

Na área *Fieldbus Networks*: É onde se configura a rede fisicamente. Nesta etapa serão selecionados os instrumentos que farão parte da aplicação. Assim cada instrumento recebe um nome (*tag*). Este *tag* será associado a um número de identificação do dispositivo (*ID*). Para que o instrumento possa ser identificado através do seu *tag*. Depois de adicionados todos os dispositivos os blocos funcionais foram implementados de acordo com a necessidade de aplicação de cada instrumento. No Fieldbus Networks, foram adicionados os dispositivos LIT-01 (Transmissor Indicador de Nível), o TIT-02 (Transmissor Indicador de Temperatura) e o LV-01 (Válvula de Nível), que é a válvula de controle que controla o fluxo de água da saída do tanque de abastecimento.

Observe-se pela figura 4.2 os dispositivos conectados na BRIDGE DFI302:

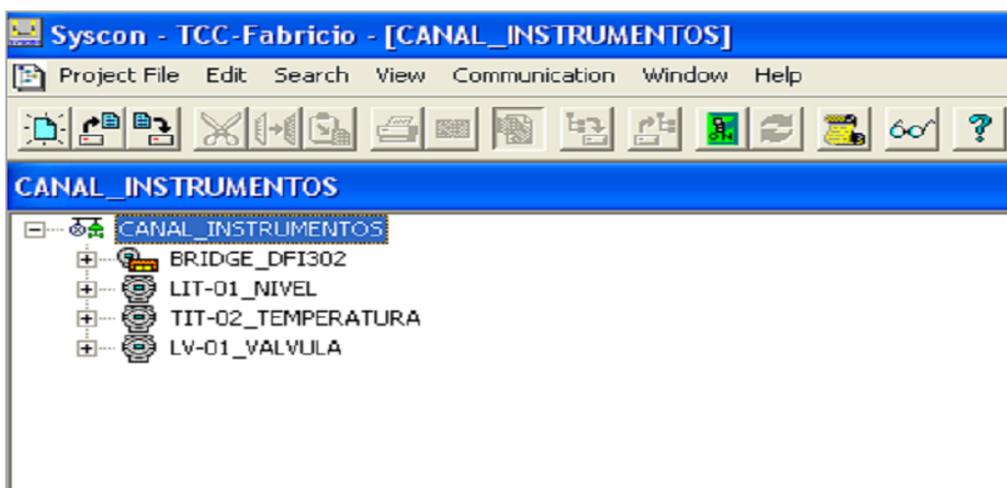


Figura 4.2: Dispositivos Conectados a Rede.

Na área *Application*: é realizada a criação da estratégia de controle propriamente dita, ou seja, a modelagem lógica do sistema. Nela os blocos funcionais que contém as entradas e saídas são “arrastados” da área física para a lógica. Assim, as conexões são feitas e as estratégias implementadas.

Para trabalhar com as variáveis analógicas no CLP, deve-se inserir o bloco MBCM (*Modbus Control Master*) e conectá-lo aos blocos de entradas e saídas analógicas. Para que ocorra a comunicação entre o co-processador da planta (DF-65) e o módulo controlador da plataforma DFI302 (DF51) é preciso adicionar blocos Modbus que controle a comunicação, monitoração e troca de dados entre o DF65 e o DF51. Para tal utilizam-se os blocos Modbus disponíveis no sistema DFI302. A variável analógica do instrumento vai ser processada no LogicView, que é utilizado para programação do CLP.

Observe-se pela tabela 4.2 os blocos Modbus utilizados neste trabalho:

Tabela 4.2: Blocos Funcionais Modbus.

Blocos Funcionais MODBUS	Descrição
MBCF	CONFIGURAÇÃO MODBUS: Este bloco transdutor é usado para configurar as características gerais relacionadas ao <i>gateway</i> Modbus.
MBCM	CONTROLE MODBUS MESTRE: Quando o equipamento está trabalhando como uma porta entre Foundation Fieldbus e Modbus (equipamento mestre), este bloco pode ser usado para trocar dados de controle entre ambos os protocolos.

Fonte: (SMAR, 2012).

Neste trabalho, foram criados os blocos: entrada analógica do transmissor de nível e do transmissor de temperatura, PID do nível e saída analógica da válvula de controle.

Observe-se pela figura 4.3 os blocos funcionais utilizados na estratégia de controle de nível realizada neste trabalho.

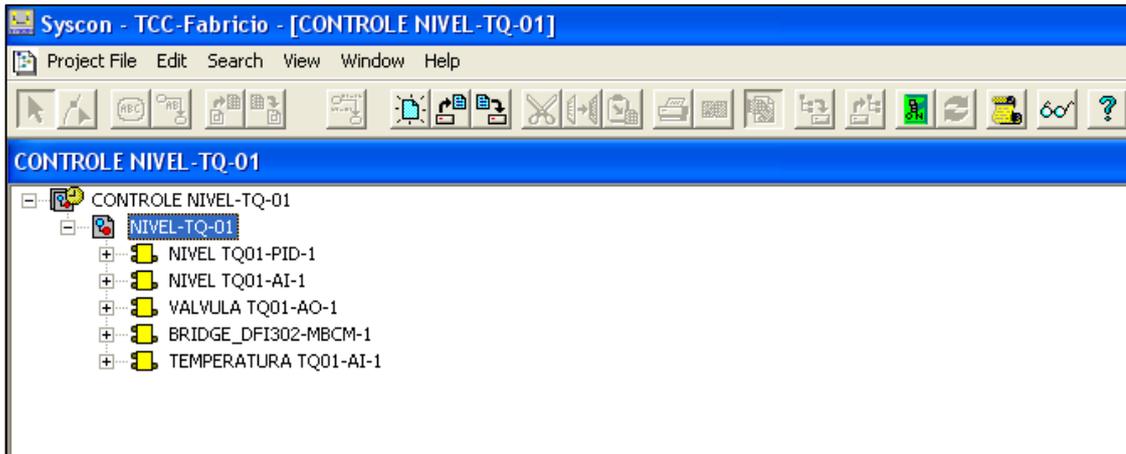


Figura 4.3: Blocos utilizados na estratégia de controle do nível.

O controle PID utilizado é projetado no próprio transmissor da variável a ser controlada, e uma lógica na qual interligam-se esses mesmos blocos dos transmissores utilizados, definindo a estratégia de controle.

4.3.1 Bloco PID e Estratégia de Controle

Para a realização da estratégia de controle existe uma grande quantidade de blocos funcionais que podem ser utilizados. O bloco PID é o principal deste trabalho, pois é através dele que o controle de nível será realizado. O sistema possui três diferentes tipos de blocos, o controle PID, o PID otimizado e o PID avançado.

Observa-se pela tabela 4.3 a descrição dos diferentes tipos de PID

Tabela 4.3: Blocos Funcionais de Controle.

Blocos Funcionais de Controle	Descrição
PID	CONTROLE PID: este bloco padrão tem diversas características, como tratamento de <i>setpoint</i> (limitação de valor e taxa), filtro e alarme PV, feedforward, saída rastreada e outros.
EPID	PID OTIMIZADO: Tem todas as características do PID, mais opção de transferência suave ou com impacto padrão de modo "manual" para um modo "automático" e bias.
APID	PID AVANÇADO: Tem as características do PID, mais opção de transferência suave ou com impacto padrão de modo "manual" para um modo "automático", bias, ganho adaptativo, amostragem PI, zona morta de erro, tratamento especial para erro, ISA ou algoritmo paralelo.

Fonte: (SMAR, 2012).

O bloco oferece alguns algoritmos de controle que usam os termos proporcional, integral e derivativo. Neste algoritmo, o ganho é aplicado a todos os termos do PID, o proporcional e o integral atuam sobre o erro, e o derivativo atua sobre o valor da variável de processo (pv). Portanto, mudanças no *setpoint* (sp) não causarão impactos na saída devido o termo derivativo, quando o bloco estiver no modo automático. Tão logo exista um erro, a função PID integrará o erro, o qual move a saída para corrigir o erro. Os blocos PID podem ser usados em cascata, quando a diferença nas constantes de tempo de processo de uma medição de processo primária ou secundária faz-se necessária ou desejável (SMAR, 2012).

- Constantes PID: *GAIN* (Kp), *RESET* (Tr), e *RATE* (Td) são as constantes de sintonia para os termos P, I e D, respectivamente. Ganho é um número adimensional. *RESET* e *RATE* são constantes de tempo expressas em segundos. A interface humana para estes parâmetros deve estar disponível para mostrar as preferências do usuário;
- Controle em Cascata: Em uma cascata, o bloco de controle superior fornece um valor e status de saída, que se torna a entrada da cascata para o bloco inferior. O bloco inferior na cascata fornece um valor de saída de retorno, o qual é comunicado com o bloco superior como entrada calculada anteriormente.

Observa-se pela figura 4.4 o processo de inicialização em cascata:

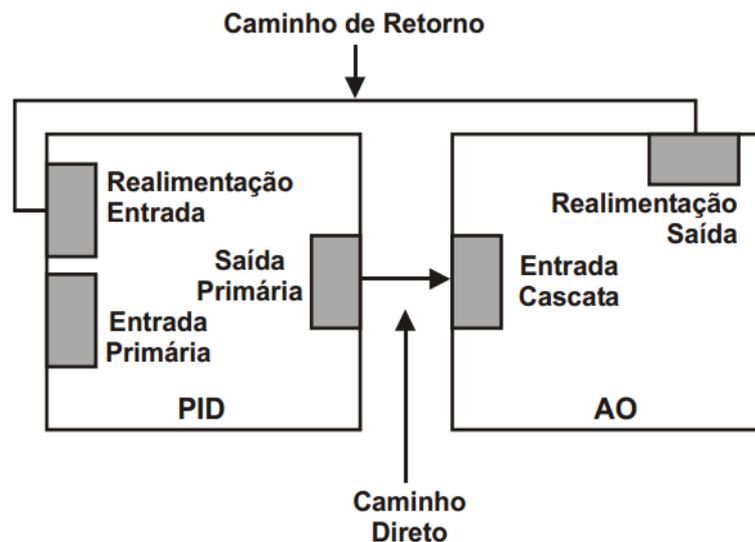


Figura 4.4: Controle em Cascata.

Fonte: (SMAR, 2012).

Há um par de ligações entre parâmetros de entrada e saída envolvidos em cada uma das formas diferentes de cascata, como mostrado na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Pares de Parâmetros.

Modo	Caminho Direto	Caminho de Retorno
Cas	CAS_IN	BKCAL_OUT
RCas	RCAS_IN	RCAS_OUT
ROut	ROUT_IN	ROUT_OUT

Fonte: (SMAR, 2012).

Na estratégia de controle deste trabalho, no bloco de função PID, foi utilizado o parâmetro de modo Cascade (Cas) ligando o *setpoint* que vem do bloco através de um *link* (pela entrada CAS_IN). O algoritmo calcula a saída do bloco baseando-se neste *setpoint*. Para concluir este modo, o algoritmo usa a entrada CAS_IN e saída BKCAL_OUT para estabelecer a cascata com o bloco superior, em um caminho sem saltos (*bumpless*).

Observe-se pela figura 4.5 a estrutura do bloco de função PID utilizado na estratégia de controle de nível.

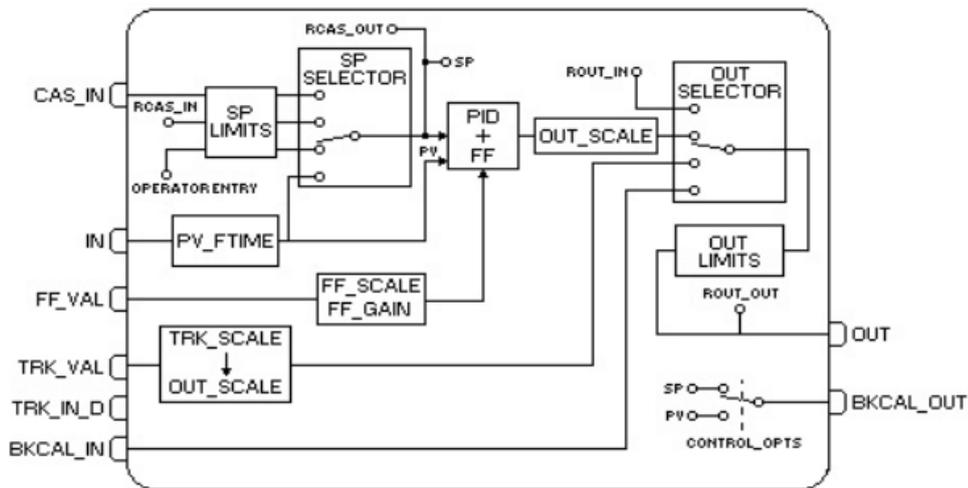


Figura 4.5: Bloco de função PID.

Fonte: (SMAR, 2012).

Observa-se pela figura 4.6 as ligações da estratégia do controle de nível utilizada no projeto.

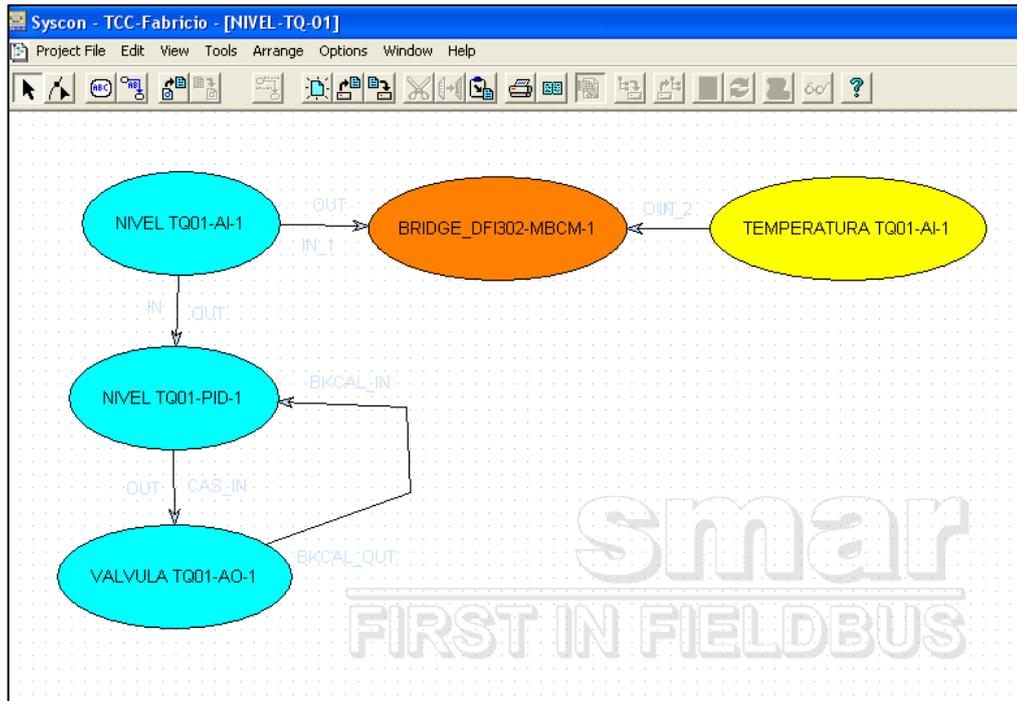


Figura 4.6: Configuração da estratégia de controle do nível.

4.4 Parametrização dos Blocos Funcionais

Para a configuração dos blocos funcionais foi utilizada a opção *Off-line Characterization* no modo Syscon *off-line*. Os parâmetros também podem ser acessados no modo *On-line Characterization* após ser estabelecida a comunicação com os instrumentos. Neste trabalho, foram configurados os blocos do LIT-01 (Transmissor Indicador de Nível), o TIT-02 (Transmissor Indicador de Temperatura) e o LV-01 (Válvula de Nível) e da Configuração do Modbus.

4.4.1 Configuração do LIT-01 (Transmissor Indicador de Nível)

O transmissor de nível já vem com alguns blocos por sua configuração *default*. Eles são: bloco *Resource*, bloco *Transducer*, bloco *Display* e bloco *Diagnostics Transducer*. Porém, outros blocos ainda são necessários e devem ser inseridos na configuração do transmissor. Para que o transmissor de nível atenda o objetivo deste trabalho, serão inseridos os blocos *Analog Input* (entrada analógica) e o bloco PID. O transdutor faz a leitura do sensor e torna-a disponível para o bloco AI através do parâmetro PRIMARY_VALUE. A Unidade de Engenharia e a faixa do valor (PRIMARY_VALUE_RANGE) são selecionadas no XD_SCALE no bloco AI.

4.4.1.1 Bloco Transducer

Para este bloco, o único parâmetro que deve ser alterado é o `MODE_BLK.TARGET` colocando-o em Auto (automático). O bloco transdutor roda junto com o bloco AI, ele vai para AUTO somente se o modo do bloco AI já estiver em AUTO.

- `MODE_BLK`: mostra o estado de operação dos blocos no momento da operação, os quais podem ser: Auto (automático), Man (manual), OOS (fora de serviço - *out of service*).

Observa-se na figura 4.7 as funcionalidades do bloco transducer:

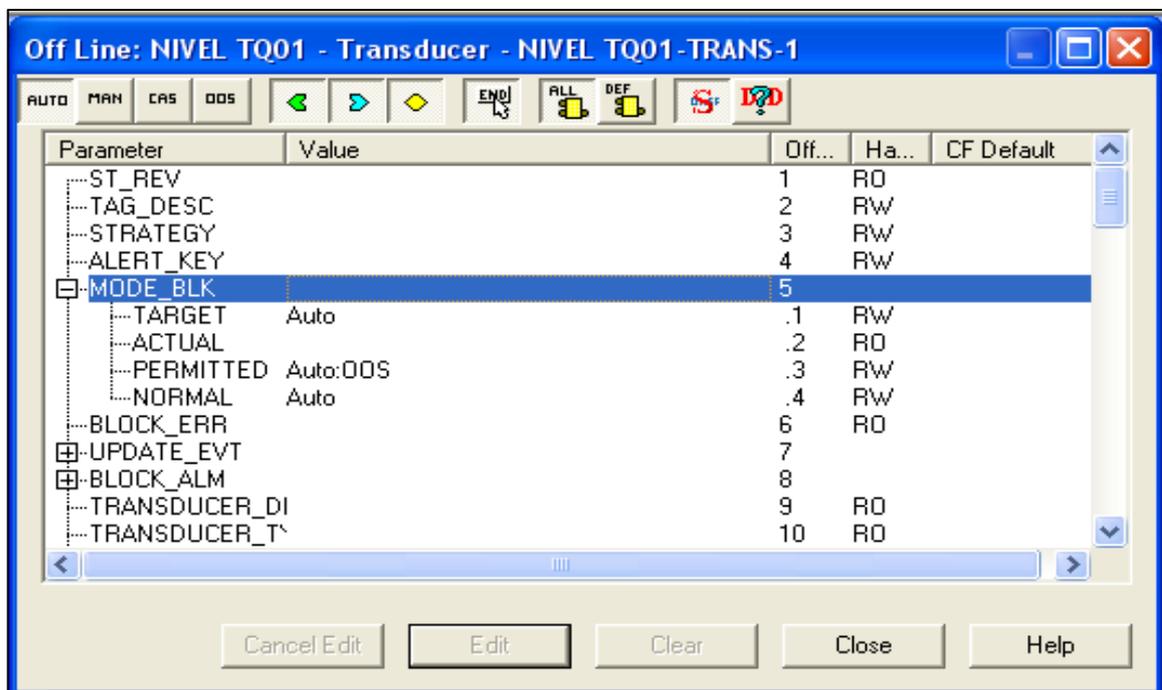


Figura 4.7: Configuração do bloco *Transducer* do transmissor de nível.

4.4.1.2 Bloco Analog Input (AI)

Este bloco obtém a entrada de dados analógica de um sinal de entrada analógico e torna-o disponível para outros blocos funcionais. Esta, posteriormente, será repassada ao CLP caso queira ser controlada ou para o sistema supervisor caso o operador queira monitorá-la. Portanto, os parâmetros a serem modificados serão: `MODE_BLK`, `XD_SCALE`, `OUT_SCALE`, `CHANNEL` e `L_TYPE`. `XD_SCALE`: é a escala da variável captada pelo transdutor, neste caso a unidade é mmH2O e aqui, informa-se a capacidade máxima da mesma (volume máximo do tanque), que no caso são 500 mmH2O.

- OUT_SCALE: é a unidade que a variável analógica será trabalhada, que no caso será em litros, informa-se a capacidade máxima da mesma (volume máximo do tanque) que são 150 litros;
- CHANNEL: é o canal que da rede comunicação Foundation Fieldbus com o CLP. Como a planta utiliza somente uma rede, este canal sempre será igual a 1;
- L_TYPE: tipo da leitura feita pelo sensor. No caso do nível a medição é indireta, pois o sensor é de pressão diferencial, ou seja, o transmissor capta o valor em pressão e faz a conversão em litros.

Observa-se pela figura 4.8 as funcionalidades do bloco *Analog Input* do transmissor de nível.

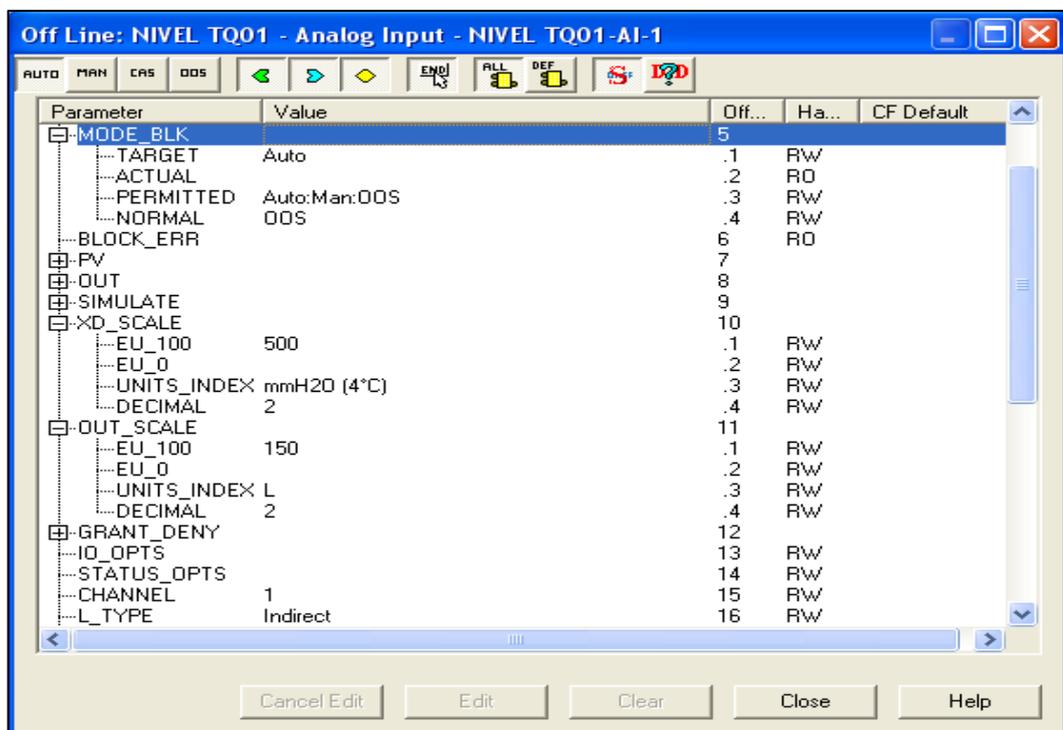


Figura 4.8: Configuração do bloco *Analog Input* do transmissor de nível.

4.4.1.3 Bloco *Display*

Este bloco é responsável pela escrita no *display* do transmissor. Pode-se colocar até sete leituras no mesmo transmissor. Por exemplo, para este, foi colocado a leitura no nível em litros e em mmH2O. Os parâmetros a serem alterados são: MODE_BLK, BLOCK_TAG_PARAM_1 e 2, INDEX_RELATIVE_1 e 2, SUB_INDEX_1 e 2, MNEMONIC_1 e 2.

- BLOCK_TAG_PARAM: é o *tag* de um determinado bloco que o bloco *display* irá buscar para informar no transmissor. Neste caso, o primeiro é o bloco AI do nível e o segundo é o bloco *transducer* do nível;
- INDEX_RELATIVE e SUB_INDEX: são os endereços dentro do bloco relacionado acima, os quais contem o valor das variáveis a serem medidas;
- MNEMONIC: é responsável pelo texto que irá aparecer logo abaixo do valor numérico da variável no transmissor. Normalmente, escreve a unidade desta variável. No caso deste parâmetro do transmissor de nível, foi passado "litros" para o primeiro e "mmH2O" para o segundo.

Observe-se pela figura 4.9 as funcionalidades do bloco *display* do transmissor de nível.

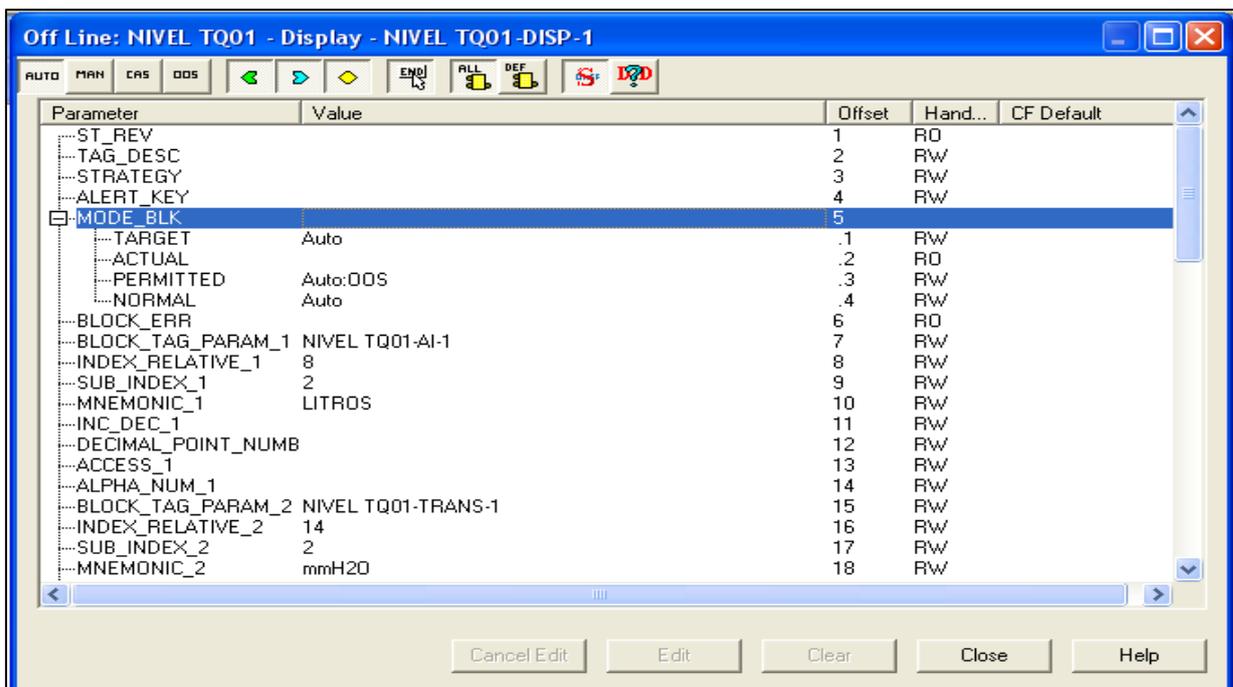


Figura 4.9: Configuração do bloco *Display* do transmissor de nível.

4.4.1.4 Bloco PID

O bloco PID irá promover o controle de nível do tanque. a lógica do controle PI é feita aqui, diferentemente de outros dispositivos que a desenvolvem no controlador lógico programável. Os blocos PID pegam o erro e o convertem à porcentagem de amplitude usando o parâmetro PV_SCALE. O algoritmo opera em uma porcentagem de amplitude para produzir uma saída naquela forma. Esta é convertida de volta a um número de unidades de engenharia sendo

usado a variação de OUT_SCALE.. Os principais parâmetros que precisam ser modificados são:

- MODE_BLK.PERMITTED: Auto:Man. É o tipo do controle permitido, manual e automático;
- PV_SCALE: unidade de medida da variável e o *range* da mesma, que neste caso o tanque comporta de 0 a 150 litros;
- OUT_SCALE: unidade de medida da variável manipulada e seu *range*, que neste caso é a abertura da válvula de controle que vai de 0 a 100%;
- CONTROL_OPTS: *Direct acting*. Ação direta para o tipo de controle;
- GAIN: é o ganho proporcional (Kp) do controlador;
- RESET: é o ganho integral (Ki) do controlador;
- RATE: é o ganho derivativo (Kd) do controlador.

Observe-se pela figura 4.10 as funcionalidades do bloco PID do transmissor de nível.

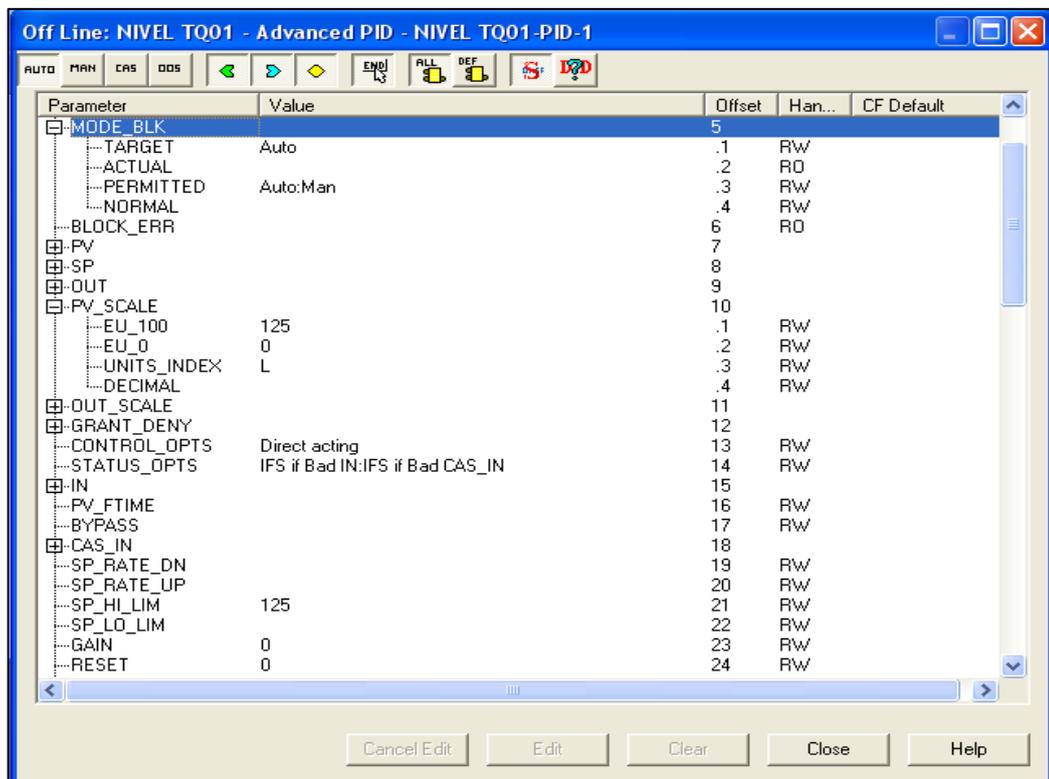


Figura 4.10: Configuração do bloco PID do transmissor de nível.

4.4.2 Configuração do Transmissor Indicador de Temperatura TIT-02

O transmissor de temperatura efetua a leitura da entrada direta ou temperatura linearizada do sensor e torna-a disponível para o bloco AI através do parâmetro PRIMARY_VALUE. Ele é ligado a um pt 100 e será responsável por enviar o valor desta variável para o sistema supervisão, onde será monitorada. De maneira análoga ao transmissor de nível, o transmissor de temperatura utilizará os mesmos blocos que o de nível, com exceção do bloco PID. A seguir a configuração de cada bloco.

4.4.2.1 Bloco Transducer

Para este bloco, devem-se passar informações sobre o tipo do sensor ligado ao transmissor. Para este bloco são configurados os seguintes parâmetros:

- MODE_BLK: configura-se o *Target* para Automático;
- SENSOR_TYPE: tipo do sensor de temperatura, que no caso é o Pt 100;
- SENSOR_CONNECTION: a conexão do sensor com o transmissor, que é três fios.

Observe-se pela figura 4.11 as funcionalidades do bloco *Transducer* do transmissor de temperatura.

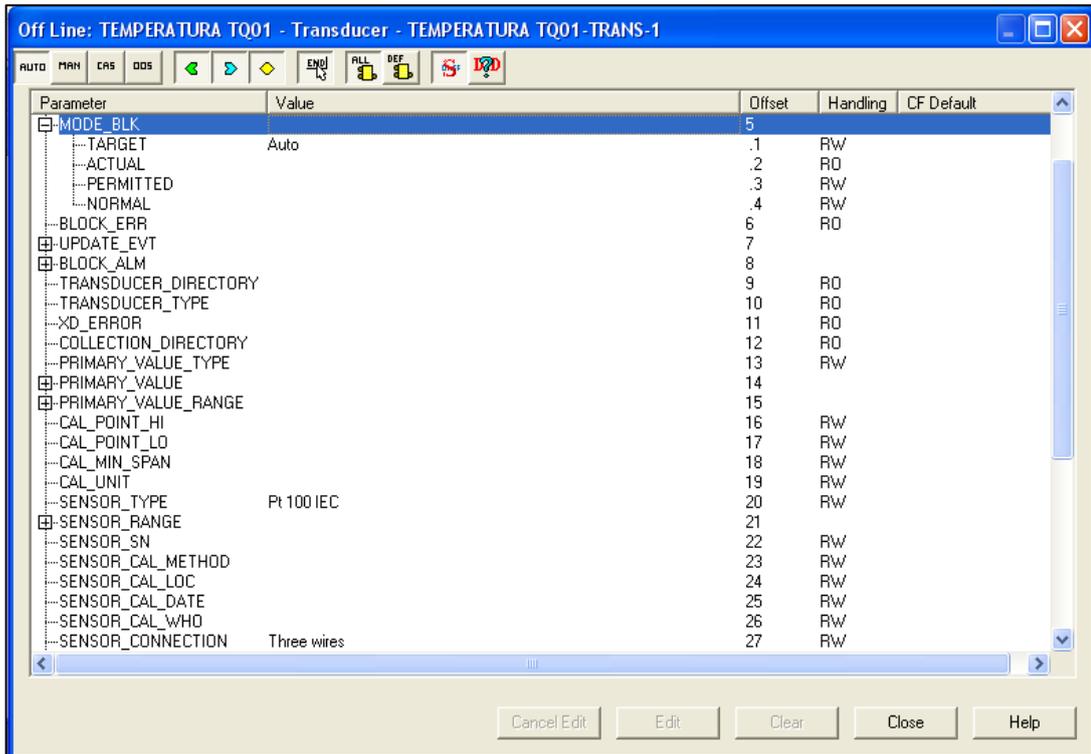


Figura 4.11: Configuração do bloco *Transducer* do transmissor de temperatura.

4.4.2.2 Bloco Analog Input

É responsável por transmitir o valor da temperatura. Assim como o no transmissor de nível, deve-se informar ao Syscon a maneira que esta variável é medida e em qual canal ela é feita. Para este bloco serão configurados os seguintes parâmetros:

- MODE_BLK: Auto;
- L_TYPE: *Direct*, para informar que a medição da variável é feita de forma direta pelo sensor.

Observa-se pela figura 4.12 as funcionalidades do bloco *Analog Input* do transmissor de temperatura.

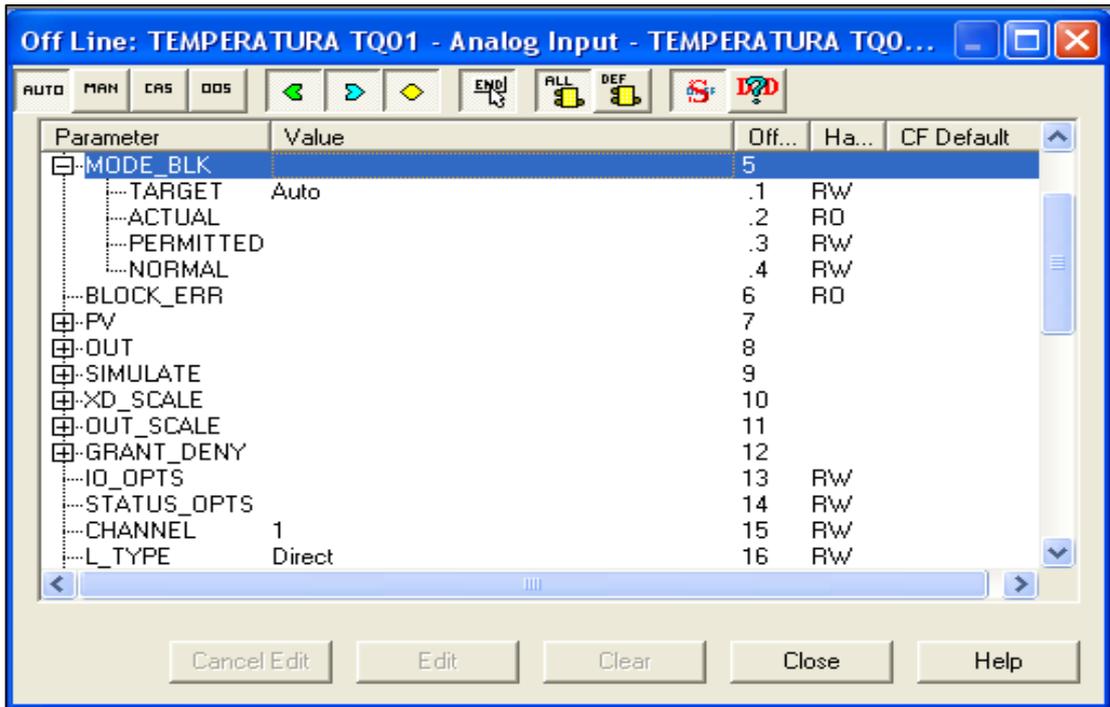


Figura 4.12: Configuração do bloco *Analog Input* do transmissor de temperatura.

4.4.2.3 Bloco *Display*

Tem os mesmos parâmetros do bloco *display* do transmissor de nível a serem configurados com a diferença no `BLOCK_TAG_PARAM` que trás o valor da entrada analógica (AI) da temperatura e o `MNEMONIC` que mostra a unidade de medida da mesma, que no caso é °C.

Observa-se pela figura 4.13 as funcionalidades do bloco *Display* do transmissor de temperatura.

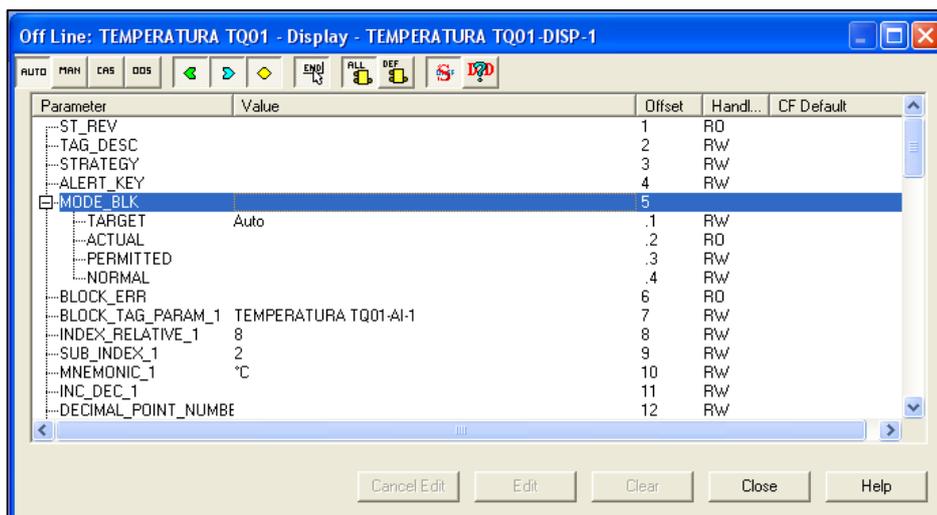


Figura 4.13: Configuração do bloco *Display* do transmissor de temperatura.

4.4.3 Configuração do LV-01 (Válvula de Nível)

A configuração dos parâmetros da válvula de controle coincide em muitos aspectos com as descritas anteriormente, portanto só os parâmetros mais relevantes serão apresentados. Para este transmissor serão necessários os seguintes blocos: *Resource*, *Transducer*, *Display* e *Analog Output*.

4.4.3.1 Bloco Transducer

Para este bloco, um parâmetro importante para o Syscon é o operador informar o tipo da válvula, isto é, se a mesma é normalmente aberta (NA) ou normalmente fechada (NF). Esta informação é passada no parâmetro MAIN_LATCH, se ela for NA basta selecionar a opção "Air to close" (ar para fechar) e caso contrário, usar a opção "Air to open" (ar para abrir), que é o caso da válvula que será utilizada neste estudo.

Observa-se pela figura 4.14 as funcionalidades do bloco *Transducer* da válvula de controle

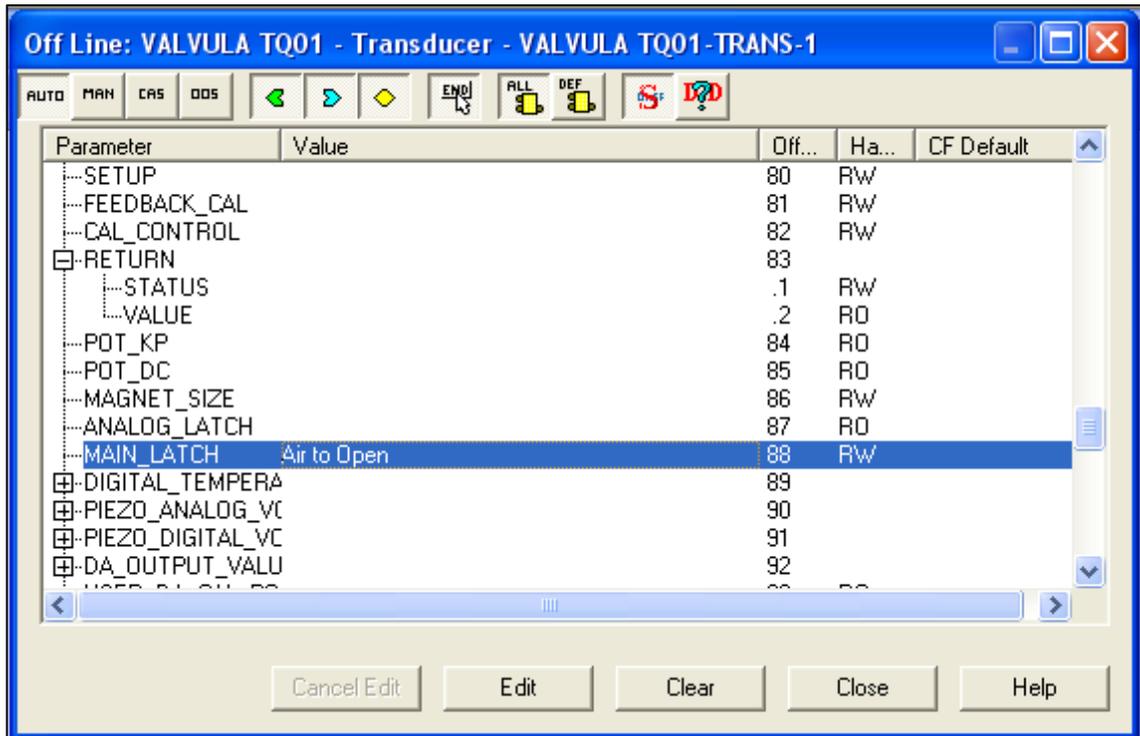


Figura 4.14: Configuração do bloco *Transducer* da válvula de controle.

4.4.3.2 Bloco *Display*

Vale ressaltar, que a unidade de medida utilizada será "%" para mostrar a abertura da válvula que vai de 0 a 100%. Os parâmetros modificados podem ser observados na figura 4.15.

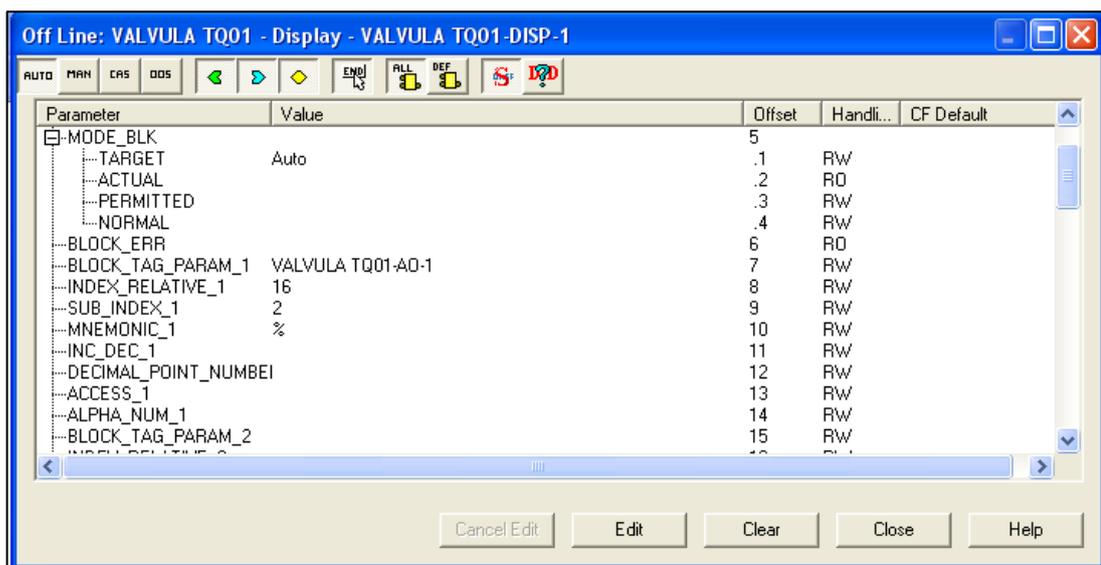


Figura 4.15: Configuração do bloco *Display* da válvula de controle.

4.4.3.3 Bloco Analog Output

Para o bloco de saída analógica da válvula de controle, é preciso informar que ela trabalhará no modo de controle em cascata e automático (Cas:Aut no parâmetro MODE_BLK), além disso deve-se parametrizar as unidades de medida e o *range* da variável relacionada a ela, como pode ser observado na figura 4.16.

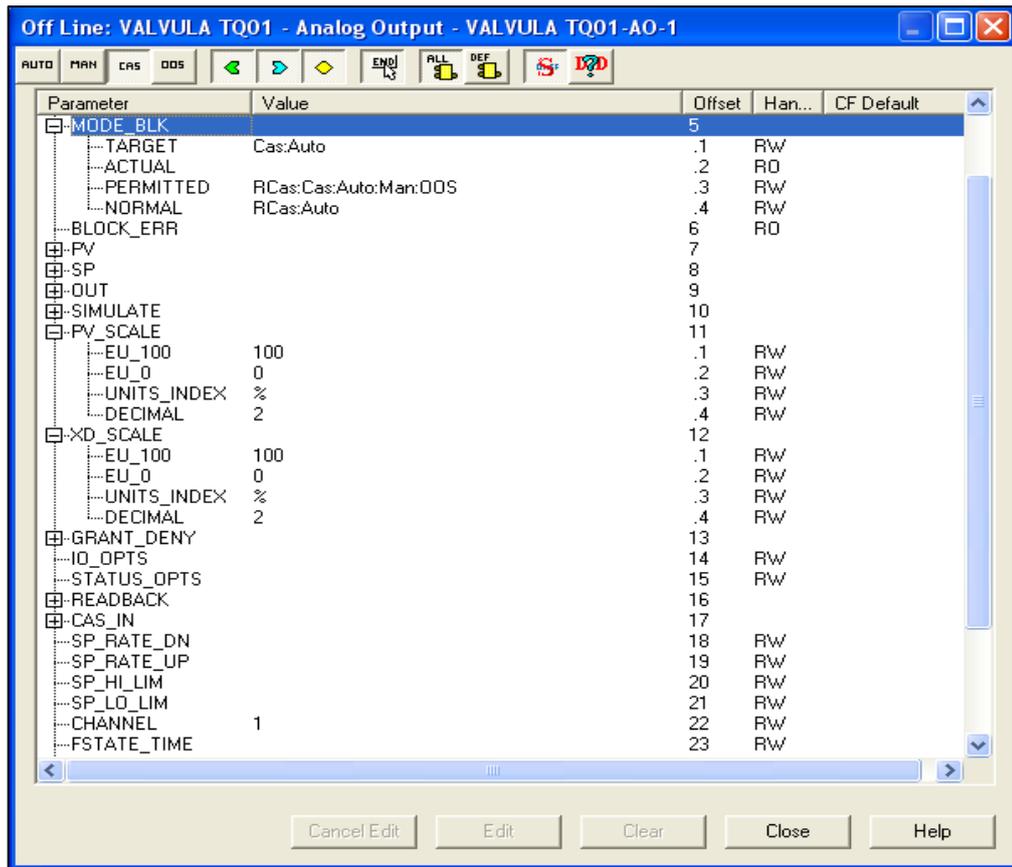


Figura 4.16: Configuração do bloco *Analog Output* da válvula de controle.

4.4.4 Configuração do Modbus

Os blocos funcionais Modbus permitem a transferência de dados do Foundation Fieldbus para o CLP. Eles também são configurados pelo Syscon.

4.4.4.1 Bloco Modbus Configuration - MBCF

Aqui será definido que o DFI302 é o mestre o DF65 (controlador) o escravo, além de outros parâmetros, como endereço dos dispositivos, taxa de transferência, *timeout*, paridade e número de retransmissões. Os principais parâmetros são listados abaixo.

- MASTER_SLAVE: Master. Define que o DFI302 é o mestre;
- DEVICE_ADDRESS: 1. É o único canal utilizado;
- BAUD_RATE: 9600. É a taxa de transmissão dos dados;
- MEDIA: Serial. É o meio de comunicação do DFI302 com o DF65.

Observe-se pela figura 4.17 as funcionalidades do bloco Modbus Configuration.

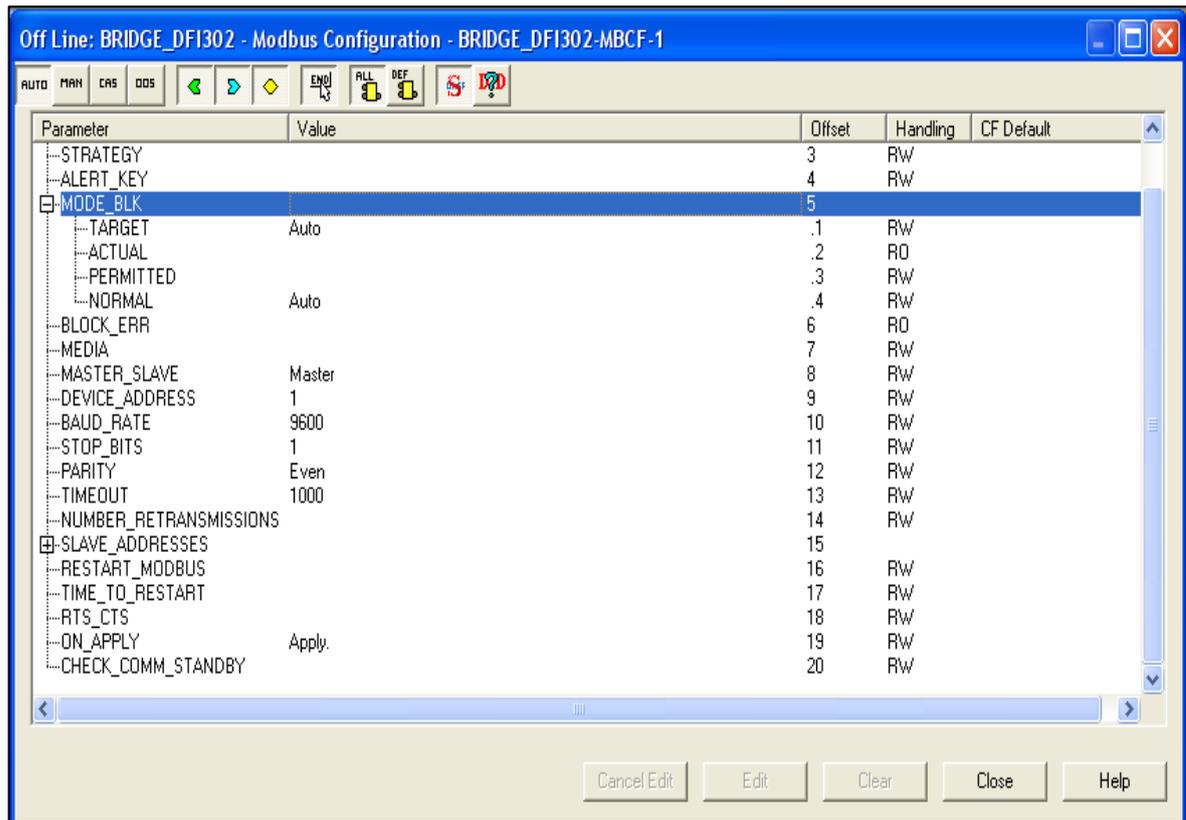


Figura 4.17: Configuração do bloco Modbus Configuration.

4.4.4.2 Bloco Modbus Control Master -MBCM

É utilizado quando o DFI e o Modbus necessitam trocar informações, para que o DFI302 seja capaz de ler e escrever as variáveis, trocar dados e interagir com a estratégia de controle feita na Foundation Fieldbus. Esse bloco está sendo usado para escrever os valores do nível do tanque e da temperatura da água no CLP. Os principais parâmetros serão configurados são:

- DATA_TYPE: *Float*. É o tipo da variável, que neste caso é flutuante;
- MODBUS_ADDRESS_OF_VALUE: 42501 para a primeira grandeza e 42503 para a segunda. É o endereço Modbus da variável. Este valor é fornecido pela tabela de

endereços Modbus do LogicView. No caso das variáveis do tipo *float*, cada uma ocupa dois endereços;

- SLAVE_ADDRESS: 1. É o endereço do dispositivo escravo que é o módulo DF65 do CLP.

Observa-se pela figura 4.18 as funcionalidades do bloco *Modbus Control Master*.

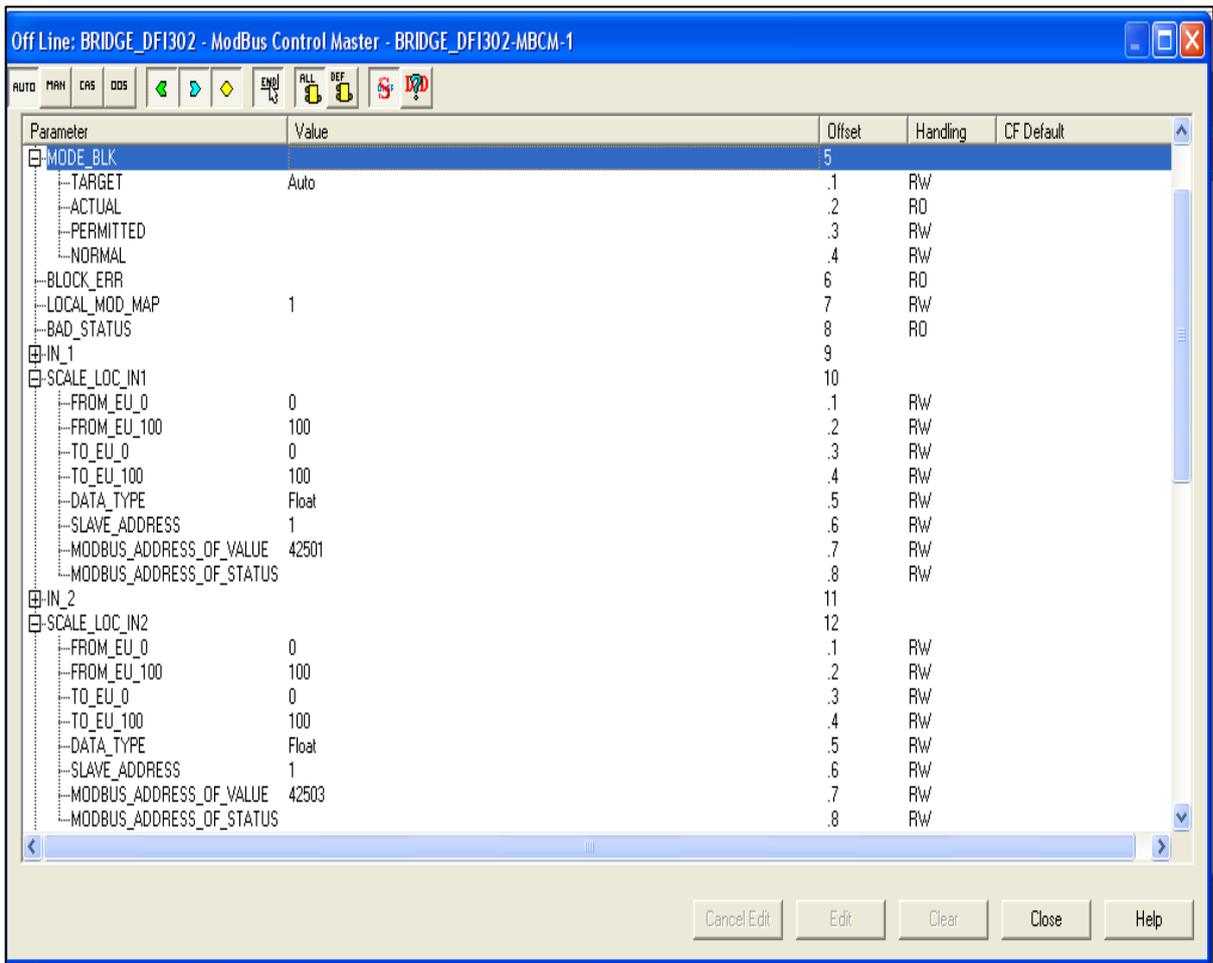


Figura 4.18: Configuração do bloco Modbus Control Master.

Depois de finalizada a etapa de configuração *off-line* com a programação do Syscon feita, em modo online faz-se o comissionamento e o *download* da nova configuração para o sistema. No *download*, toda a configuração é passada aos equipamentos de campo de acordo com a rede criada. No modo on-line é possível monitorar o andamento do processo com os valores dos parâmetros disponíveis em tempo real. Entre as alterações permitidas neste modo, está a mudança nos valores de alguns parâmetros como *setpoints*, e parâmetros de controladores. O que não se permite, no entanto, é fazer nenhuma alteração nas conexões entre os blocos, ou seja, na estratégia.

Observa-se pela figura 4.19 a configuração final do Syscon.

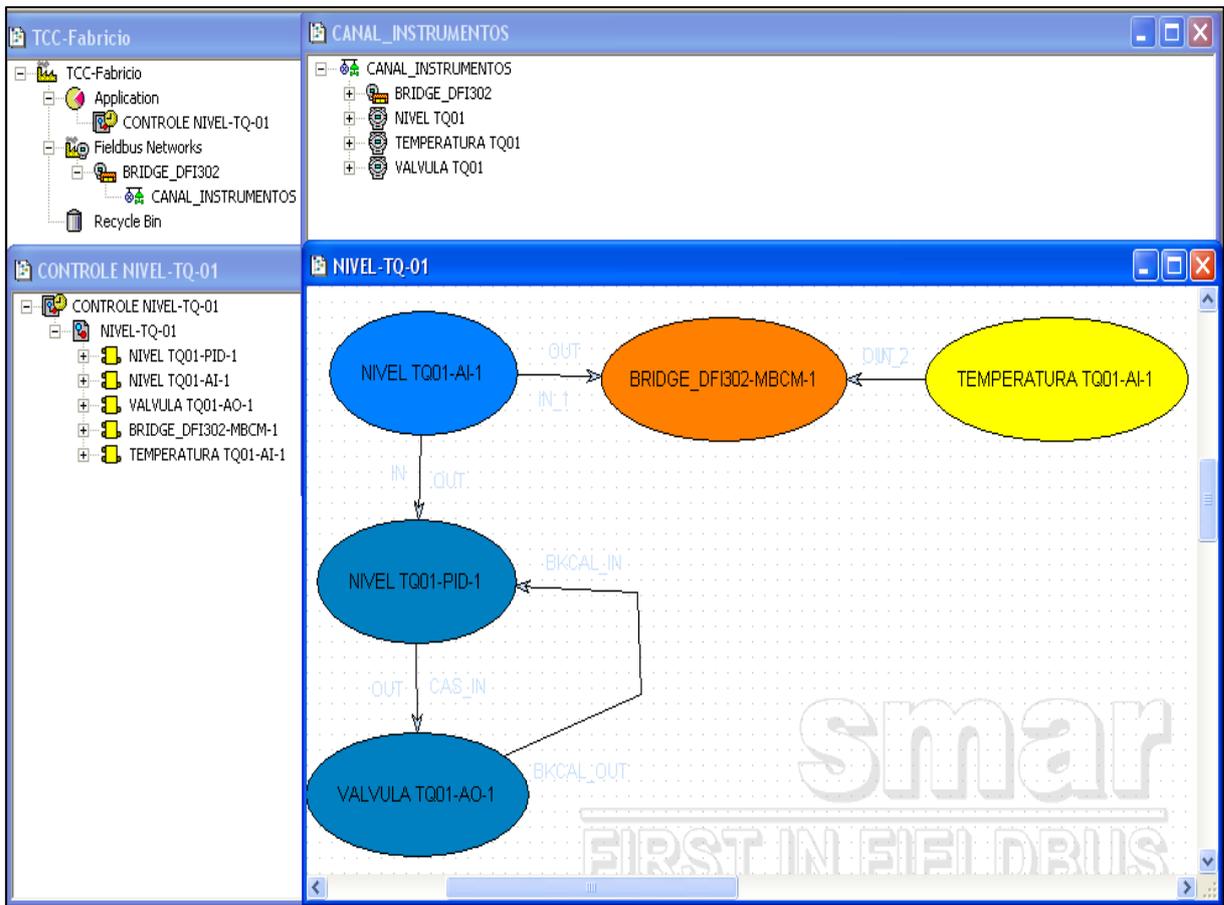


Figura 4.19: Configuração final do Syscon.

4.5 A Lógica do Controlador LC700

Após a configuração da planta física e da estratégia de controle no syscon foi realizada uma lógica no controlador LC700 que é compatível com os padrões Ladder IEC- 61131-3. A programação foi desenvolvida para o acionamento e desacionamento da válvula solenoide de abastecimento do tanque e um sistema de intertravamento para a segurança.

A lógica deste trabalho foi desenvolvida em sete etapas, a primeira uma linha para acionamento do sistema, a segunda para intertravamento e segurança da planta, terceira para desligar, a quarta para ativar o sistema de alarme através do botão de emergência. A quinta com o bloco responsável por ler os valores analógicos e utiliza-los, caso necessário, em uma lógica qualquer no CLP. Na sexta etapa foi desenvolvido um sistema para captar o sinal de emergência. E por ultimo, para completar o sistema de alarme foi acrescentado um sinal sonoro que é ativado caso o botão de emergência seja acionado.

No LogicView, deve-se informar alguns dados básicos para o *software*, como o modelo do módulo da CPU do CLP, que no caso é o DF65/V11.51, e quais os módulos de entrada e saídas analógicas e digitais. O controlador da planta possui apenas módulos de entrada e saída digitais que são o DF11 e DF21 respectivamente. Em Página de Módulos Virtuais, foram adicionados dois módulos virtuais com 8 pontos discretos cada um. É necessário um módulo virtual para utilizar uma variável auxiliar e usar comandos remotos para ligar e desligar a solenoide via sistema supervisorio. Com essa primeira etapa completa, o LogicView está pronto para receber a lógica de acordo com as especificações do usuário na opção Página de Rede. As próximas etapas descreverão as lógicas feitas.

Observe-se pela figura 4.20 os modulos utilizados para realização da lógica pelo LogicView.

Configuração de Hardware para a CPU Principal					
Rack	Slot	Módulo	Descrição	Comentário	
0	0	DF50	Módulo Fonte de Alimentação 90-24 VAC para 5VDC @3A/24VDC @300mA (Também: PS-AC-R)	Fonte de alimentação redundante para garantir um fo	
0	1	DF65/V11.51	Módulo CPU V11.51 - 28K bytes de E2PROM - Controlador de 15MHz	É conectado ao DF51 para adicionar maiores capacid	
0	2	DF11	2 Grupos de 8 Entradas de 24VDC (Isolados Opticamente)	módulo de entradas digitais	
0	3	DF21	2 Grupos de 8 saídas open collector (Isolados Opticamente)	módulo de saídas digitais	

Figura 4.20: Configuração dos módulos no LC700.

4.5.1 Lógica de abastecimento

A configuração da lógica de acionamento do solenoide de abastecimento tem por função ligar e desligar a válvula responsável por encher o tanque o qual terá seu nível controlado. Foi utilizado um circuito de auto retenção através das instruções *set* e *reset* que ativam e desativam o sistema. A instrução *set* liga uma saída e a mantém ligada mesmo que o contato de entrada deixe de conduzir. Para desligar a saída é utilizada a função *reset*. Na linha de acionamento do sistema foi inserida uma chave de contato aberto que fecha quando recebe o comando via sistema supervisorio pelo “BOTAO LIGA”, portanto recebe um endereço virtual, em seguida foi inserida uma bobina virtual para o acionamento da função *set* que será responsável por acionar a segunda linha. Na segunda linha foi adicionada uma chave de contato aberto que recebe o sinal da bobina *set* para que a linha seja energizada em seguida

foram inseridas duas chaves de contato normalmente fechado, uma com a chave de nível para quando o nível chegar ao seu limite máximo e o botão de emergência que é o contato que fica na gaveta de comando da planta, caso o botão seja pressionado o sistema é desligado instantaneamente. Quando o botão liga é pressionado, a bobina de abastecimento do TQ-01 é acionada e a solenoide abre. Na terceira linha foi utilizada uma chave de contato aberto para ativar a função *reset* e desligar o sistema, através do “BOTA O DESLIG”.

Para endereçamento da bobina de abastecimento do TQ-01, ligou-se a saída 3 do módulo DF21 que está ligado diretamente ao relé do solenoide. Para os contatos da chave de nível e do botão de emergência foram utilizadas as entradas 3A e 2A do módulo DF11.

Observe-se pela figura 4.21 a lógica de acionamento de abastecimento do tanque TQ-01 e do sistema de emergência.

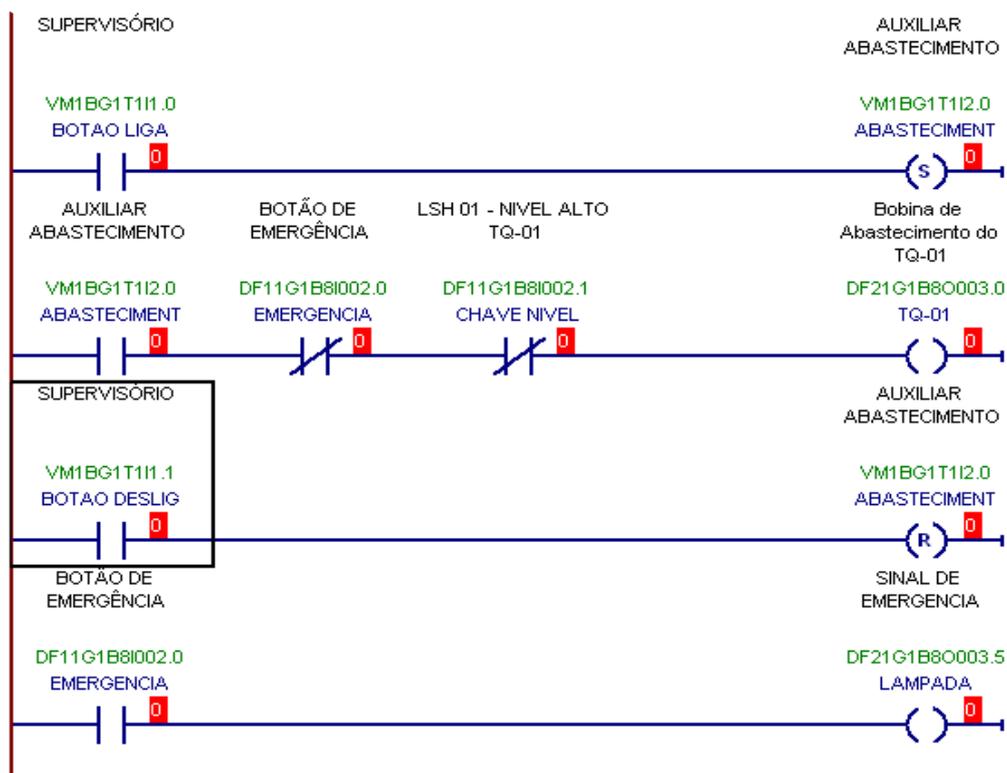


Figura 4.21: Lógica de acionamento de abastecimento do tanque.

Para criar o sistema de alarme foi necessário utilizar um módulo virtual que recebe o sinal da lâmpada de emergência e aciona o sinal sonoro. Para o acionamento do sistema de emergência

foram utilizadas as saídas 5A e 3A do módulo DF21, que representam a lâmpada de emergência e o sonorizador.

Observa-se pela figura 4.22 o acionamento do alarme quando a lâmpada é ativada pelo botão de emergência.

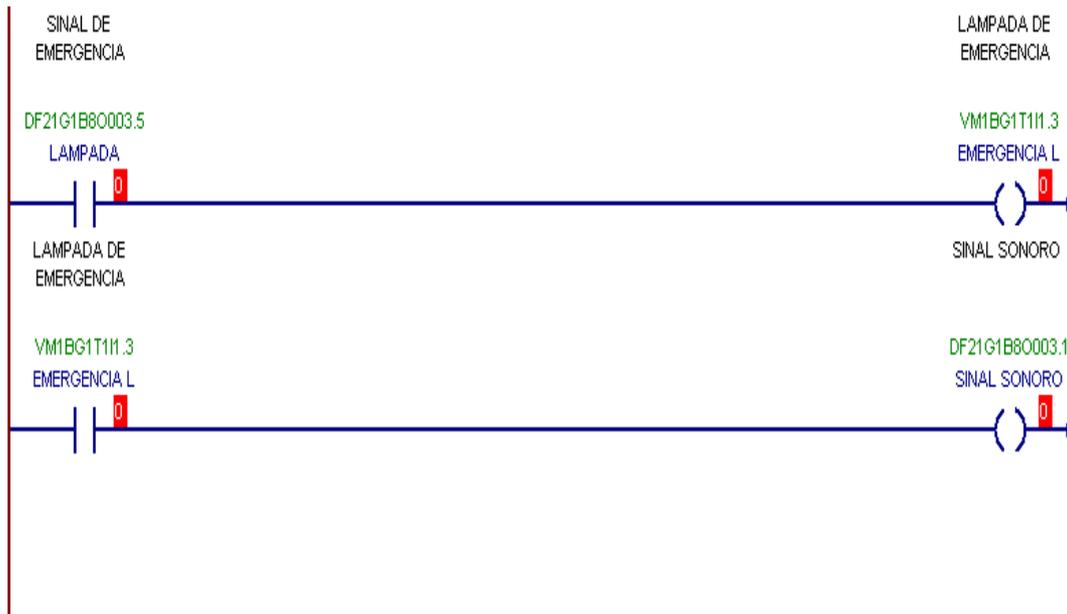


Figura 4.22: Lógica de acionamento do sistema de alarme.

Observe-se pela figura 4.23 o acionamento do botão de emergência.



Figura 4.23: Sinal luminoso do sistema de alarme.

4.5.2 Entradas analógicas no CLP

No Syscon foi realizada uma estratégia de controle para utilizar as variáveis analógicas no controlador. O bloco MBCM é o responsável por gravar as informações lidas das variáveis analógicas. Para que o controlador utilize essas variáveis é necessário adicionar um bloco que pegue essas constantes reais (RCT) e manipule-as. Cada bloco RCT pode fornecer até três constantes reais para as saídas. Para qualquer operação, basta adicionar um bloco na saída do bloco RCT e ligar a ele as variáveis analógicas.

Observa-se pela figura 4.24 a implementação do bloco RCT.

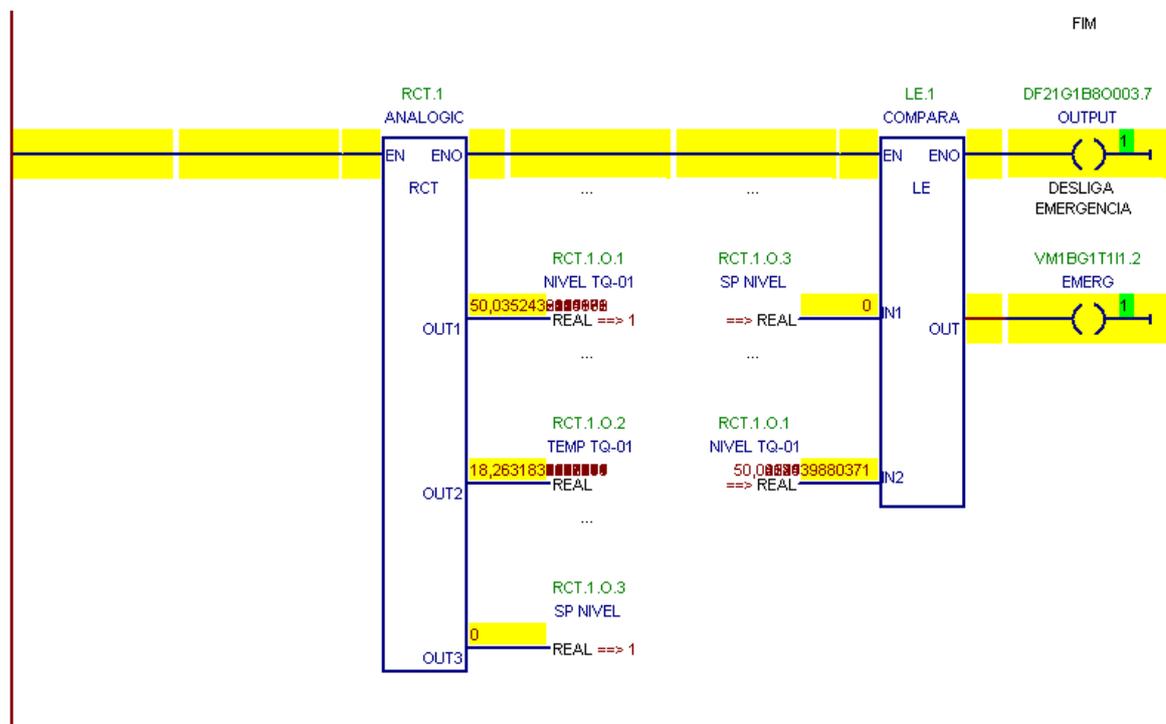


Figura 4.24: Lógica do bloco RCT

É importante após o desenvolvimento da lógica, pela opção Verifica Configuração, constatar se a mesma está correta ou não.

4.5.3 Gerador de Lista de Tags (Tag List for DF65)

O Gerador de Lista de Tags é uma ferramenta de software desenvolvida para configurar a base de dados do LC700 OPC Server. Para adicionar uma configuração no Tag list primeiro o usuário deverá “Selecionar a Pasta da Porta” correspondente ao LC700 que ele está se referindo e então clicar no menu *Edit* e então clicar *Add e Configuration*, ou então clicar no

botão *Add Configuration*, no toolbar. Uma janela aparecerá para o usuário escolher a configuração. Além de gerar esta lista, por meio dele o operador escolhe a lista para ser a ativa no sistema, pois utiliza-se apenas uma por vez. Adiciona-se uma nova *Device List* buscando o nome do programa feito no LogicView, após isso informa-se o valor do *Device ID* como 1. Feito esses passos, o que resta é registrar a nova *Tag List* em *OPC Register Active List*. Assim, a nova lista é gerada e registrada como ativa.

4.6 O Sistema Supervisório no ProcessView

Após feita a parte do Syscon e do LogicView, é possível desenvolver uma interface de monitoramento à partir da obtenção de dados da planta.

Para tanto, foi utilizado o *software* GraphWorX do ProcessView que permite criar telas animadas. E o TrendWorX para a criação dos gráficos, armazenamento em um banco de dados e gerar relatórios.

Para criar uma interface parecida com a malha de controle utilizada neste trabalho, foram inseridos alguns símbolos disponíveis no pacote básico do programa. Isso é feito clicando no ícone *Import Symbol* e depois é necessário somente arrastar os símbolos a serem utilizados para a tela principal. Para adicionar os pontos de comunicação do processo é necessário clicar no ícone *Process Point* e em seguida no ícone *OPC Tags* que trás todos os OPCs instalados, como o Syscon está sendo utilizado, o OPC a ser selecionado é o *SmarDFIOleServer*. Clicando em *My Computer* e abrindo o *Data Access* é possível encontrar o *Smar.DfiOleServer0* onde estão presentes todos os *tags* salvos dentro do Syscon.

A criação do *link* entre os valores registrados na estratégia do Syscon e a interface produzida no GraphWorX é feita através da pasta referente a cada dispositivo (TT302, FI302, LD302 e FY302) e selecionando qual parâmetro se deseja monitorar na interface.

4.6.1 Botões liga/desliga do sistema de abastecimento

Os botões liga/desliga foram criados para acionamento remoto da válvula que abastece o tanque que terá seu nível controlado. Esses botões tem a função *Download Value* para que quando forem pressionados, assumam o valor "1" e após isso modificar a lógica desenvolvida no LogicView. Em Tags Menu deverá conter o endereço do CLP correto para que acione ou desligue a válvula. No caso do botão liga, o *tag* é "Smar.DF65Server.1\TCC-FABRICIO_CLP. BOTAO_LIGA" o qual indica que esse endereço está presente no DF65

que é o controlador do CLP. O mesmo procedimento é feito para o botão desliga mudando apenas o endereço no servidor DF65, que seria "Smar.DF65ServeR.1\TCC-FABRICIO_CLP.BOTAO_DESLIG." Feito isso, já é possível fazer o acionamento e desligamento remoto da válvula solenóide.

4.6.2 Botões de controle manual/automático

A transição do modo de operação manual (malha aberta, sem controlador) para o modo automático (malha fechada, com controlador) é altamente aplicado na indústria. O mais comum é deixar o processo sob o controle automático. Caso algo que prejudique o processo aconteça, o operador pode colocar o controle no modo manual e manipular um atuador do processo de acordo com a necessidade.

O modo automático tem a função de manter a abertura da válvula proporcional de acordo a referência (*setpoint*) do nível do tanque. No modo manual ativado o operador pode escolher a abertura que deseja desta válvula, ajustando este valor em modo *On-line Characterization* do bloco NIVEL TQ01-PID no Syscon.

Foi desenvolvido um sistema para indicar se o controle está no modo automático ou manual, no qual os botões manual e automático troquem suas cores indicando qual está ativo. Após os botões serem pressionados eles devem informar ao bloco PID que o modo de operação irá mudar. Para isso foi necessário interligar o botão com o *tag* "Smar.DfiOleServer.0\NIVEL TQ01-PID.MODE_BLK.TARGET", tanto para o botão manual quanto para o automático, colocando o valor "16" em *Value (On Down)* para manual e o valor "8" para automático. Assim, o Syscon saberá para qual modo de operação mudar. Para a mudança de cor, ir à aba *Color* nas propriedades de cada botão uma expressão que passe esses valores ao Syscon e escolher as cores que o botão usará depois de pressionado. A expressão é escrita da seguinte maneira $x=\{\{ \text{Smar.DfiOleServer.0\NIVEL.TQ01-PID.MODE_BLK.TARGET} \}\}==16$. Percebe-se que x recebe o valor 16 no endereço citado, no caso para ir para modo automático. Para o botão manual faz-se de maneira análoga.

4.6.3 Ligação das Variáveis do sistema supervisório

O sistema supervisório foi desenvolvido para entender melhor o que acontece com o sistema em tempo real, permitindo que as variáveis sejam monitoradas e rastreadas pelas informações

da instalação física da planta. Foram criados *displays* para fazer a leitura e a escrita das variáveis do processo.

Foi introduzido um *display* para inserir o valor do *Setpoint* do processo. Além de o operador fazer a leitura, ele também pode inserir um novo valor que repassará ao Syscon. Para isso é preciso associar o *display* com o endereço da tag "Smar.DfiOleServer.0\NIVEL.TQ01.PID.SP.VALUE" e acionar a opção "Data Entry" para que o operador possa digitar os novos valores no *display*.

Um segundo *display* foi destinado à Variável de Processo que no caso deste controle, é a variável do sistema a ser controlada, ou seja, o nível do tanque que varia de 0 a 150 litros. Esse *display* mostra em tempo real o seu valor para que o operador possa compará-la ao valor desejado (*Setpoint*) e assim, analisar se o sistema está trabalhando dentro do esperado. Para que o sistema supervisório mostre esse valor, basta ligá-lo ao *tag* do Syscon responsável por ele, o qual tem o endereço "Smar.DfiOleServer.0\NIVEL.TQ01-AI-1.OUT.VALUE". Este endereço vem do bloco Analogic Input (AI) do transmissor de nível.

Foi inserido um *display* responsável por mostrar a Variável Manipulada, esta é a variável que será manipulada pelo controlador para que a variável do processo fique a mais próxima possível do *setpoint*. No caso deste trabalho, a variável manipulada do sistema é a abertura da válvula de controle, variando de 0 a 100%. Assim como as outras, ela é relacionada a uma *tag* para que mostre o valor esperado, que no caso é "Smar.DfiOleServer.0\NIVEL.TQ01-PID.OUT.VALUE" sendo o valor de saída do bloco PID.

Para o monitoramento da temperatura da água do tanque foi associado um *display* ao transmissor de temperatura na tela do supervisório. É importante que as variáveis de um processo industrial sejam monitoradas para que, caso atinjam um valor crítico, o operador tome as decisões necessárias de forma mais eficiente. Para que isso seja possível, deve-se passar o *tag* do bloco *Analogic Input* do transmissor de temperatura para o *display*. Então, a expressão "Smar.DfiOleServer.0\TEMPERATURA.TQ01-AI-1.OUT.VALUE" é colocada em suas propriedades.

Observa-se pela figura 4.25 a interface criada para representar a tela inicial do sistema supervisório.

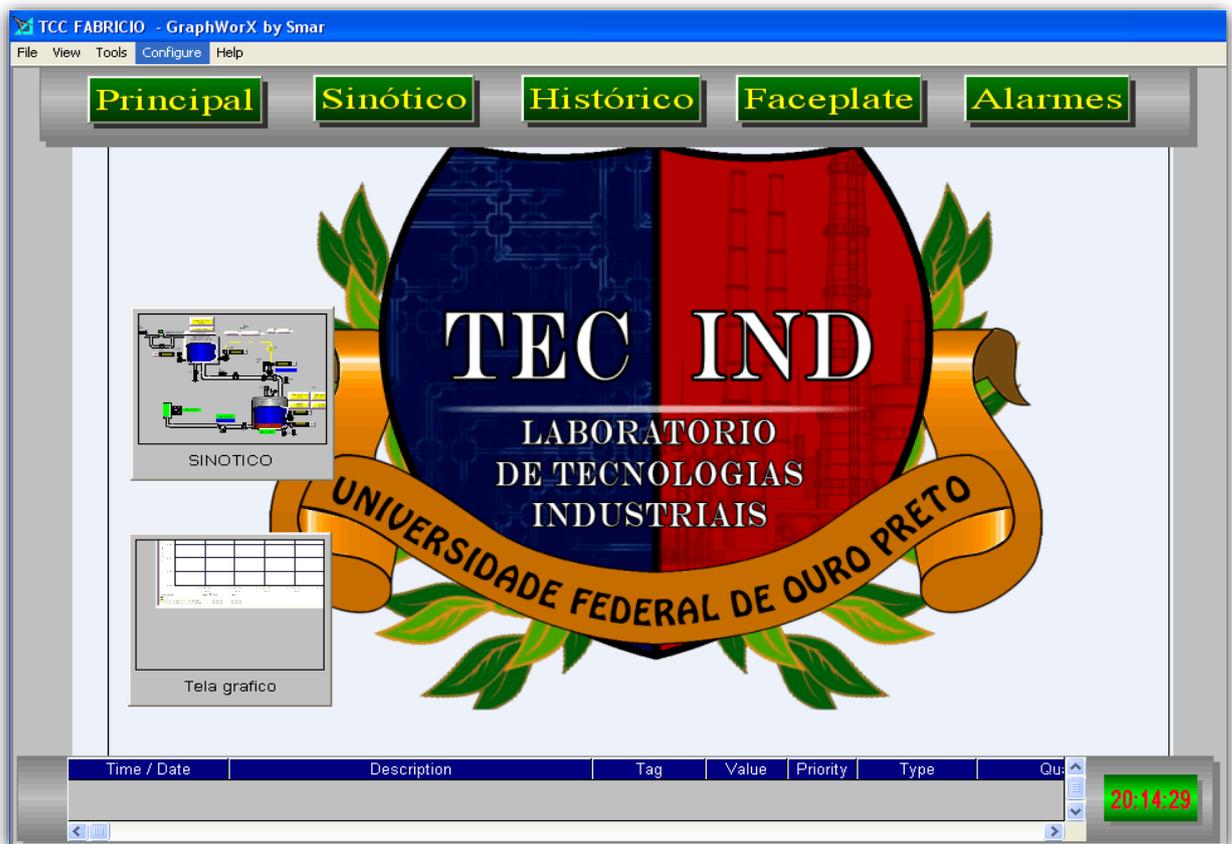


Figura 4.25: Tela inicial do sistema supervisorio.

Observa-se pela figura 4.26 a interface criada para representar a malha de controle de nível.

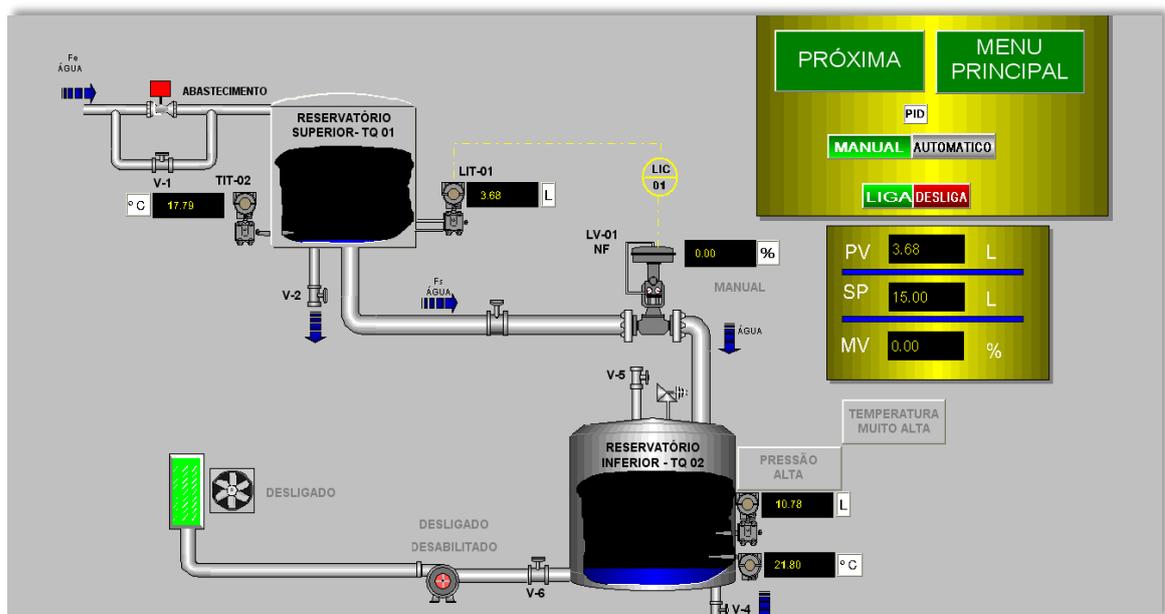


Figura 4.26: Interface de monitoramento e controle do sistema.

Observa-se pela figura 4.27 a interface criada para indicar o sistema de emergência acionado.

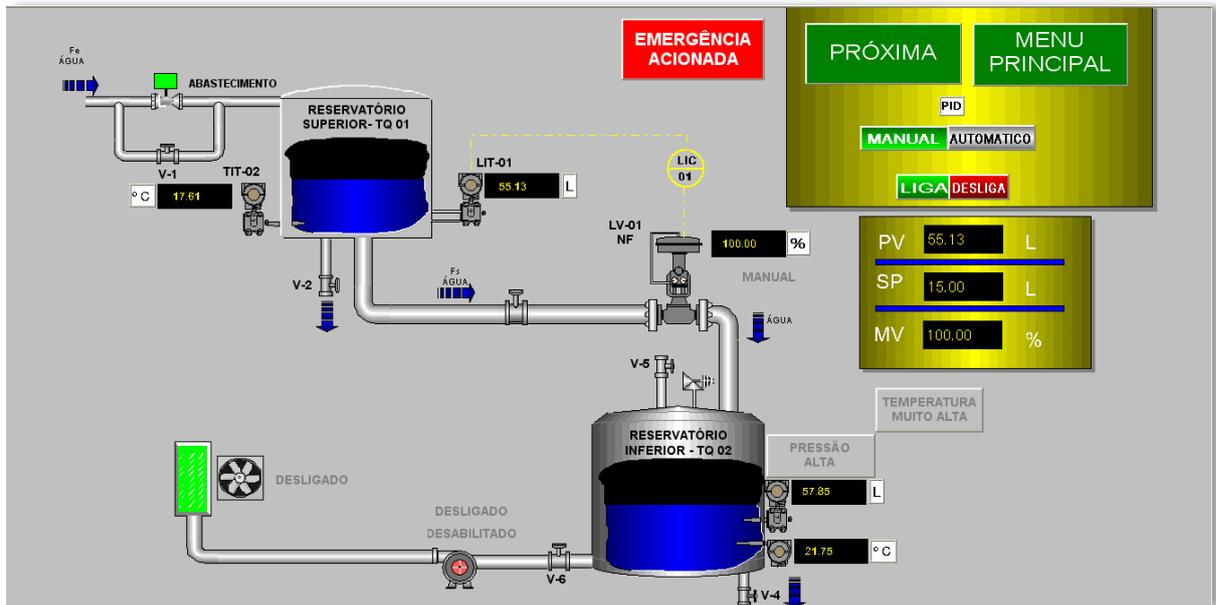


Figura 4.27: Interface de monitoramento com o sinal de emergência acionado.

4.7 Modelo do processo

O principal objetivo deste trabalho é projetar um controlador PID SISO (monovariável), capaz de prover um desempenho adequado em uma malha de controle de nível. O primeiro passo foi a obtenção do modelo descritivo do processo. O modelo deste projeto será representado na forma de função de transferência. Uma função de transferência representa de forma simplificada o comportamento dinâmico que relaciona a entrada e a saída do sistema que no caso deste trabalho é o fluxo de água que abastece o tanque e o nível. Denotando a Transformada de Laplace de entrada e da saída respectivamente por $\Delta Y(S)$ e $\Delta U(S)$, a função de transferência $G(S)$ desse sistema é dada pela equação 2:

$$G(S) = \frac{\Delta Y(S)}{\Delta U(S)} = \frac{Num(s)}{Den(s)} \quad (2)$$

O numerador $Num(s)$ e o denominador $Den(s)$ são polinômios na variável complexa S . A partir dela, e supondo as raízes de $Den(s)$ são diferentes das raízes de $Num(s)$, define-se (BAZANELLA e SILVA JR., 1999):

- Pólos de $G(S)$: raízes de $Den(s)$;
- Zeros de $G(S)$: raízes de $Num(s)$;

- Ordem do sistema: grau de $Den(s)$;
- Tipo de sistema: número de pólos de $G(S)$ em $S = 0$.

A obtenção dos parâmetros que definem uma função de transferência pode ser feita através de determinadas técnicas de identificação baseadas em dados do processo (AGUIRRE, 2004), ou diretamente através das equações que governam determinado sistema linear. Para sistemas não-lineares, faz-se necessário um procedimento de linearização (PHILLIPS e HARBOR, 1997), devido ao fato da Transformada de Laplace, em termos práticos, somente ser aplicada a sistemas lineares e com condições iniciais nulas.

4.7.1 Malha de controle de Nível

O objetivo do controle é manter um nível (H_1) constante de água do reservatório superior TQ01 manipulando a vazão líquida que sai do sistema.

Observa-se pela figura 4.28 a representação simplificada do sistema.

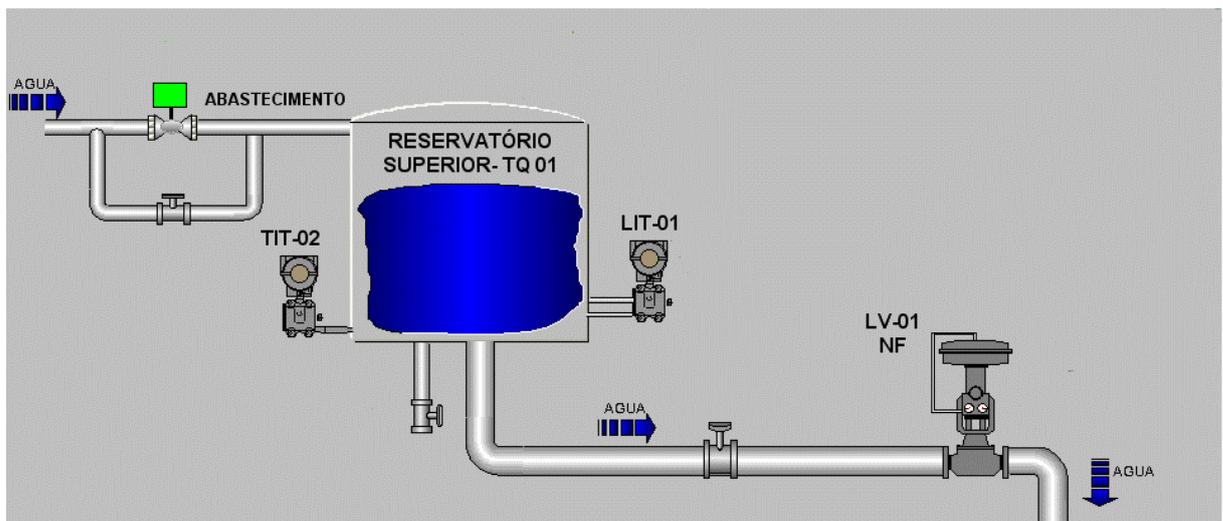


Figura 4.28: Representação esquemática simplificada do sistema.

Nesta representação, a variável manipulada efetiva é a abertura de válvula de controle LV-01, contudo, a malha de controle considerada atua sobre o valor de referência da vazão que sai do tanque TQ01.

O modelo descritivo do sistema da malha de controle foi obtido através da modelagem fenomenológica do processo, comportamento dinâmico do nível H_1 do tanque TQ01 através

de um fluxo de entrada Fe e um fluxo de saída Fs pode ser modelado por um sistema linear como mostra a equação 3:

$$A \frac{dH1}{dt} = Fs - Fe \quad (3)$$

O fluxo de saída Fs em relação ao nível $H1$ é representado pela equação 4:

$$Fs = KH1 \quad (4)$$

Em que A é a área da base do tanque TQ01, e K é uma constante que depende das características do tanque. Assim, a função de transferência que relaciona o fluxo de entrada Fe no tanque TQ01 e seu nível $H1$ é representada pela equação 5:

$$H1(S) = \frac{1/k}{T \cdot S + 1} Fe(S), \quad T = A/K \quad (5)$$

Após configurar a malha de controle de acordo com os processos apresentados neste trabalho e definir a função de transferência do sistema foram feitos vários testes colocando a planta para funcionar com o controlador em modo manual e automático. Foi desenvolvido no TrendWorX do ProcessView o sistema para analisar os gráficos em tempo real.

4.7.2 Análise gráfica

No sistema supervisor foram inseridos gráficos para analisar o comportamento do nível do tanque de acordo com a abertura da válvula de controle. O gráfico do nível recebe o tag NIVEL.TQ01-AI-1.PV.VALUE e o para abertura da válvula o VALVULA.TQ01-AO-1.OUT.VALUE. Pelos gráficos observou-se o efeito da dinâmica do sistema se o comportamento era estável ou instável.

Ao aplicar variações na variável manipulada obteve-se as respostas da variável de processo de acordo com as perturbações. O primeiro passo foi encher o tanque TQ01 com a abertura da válvula de controle em 40%. Após um determinado instante, observou-se o comportamento da curva de nível e o resultado obtido está representado na figura 4.29:

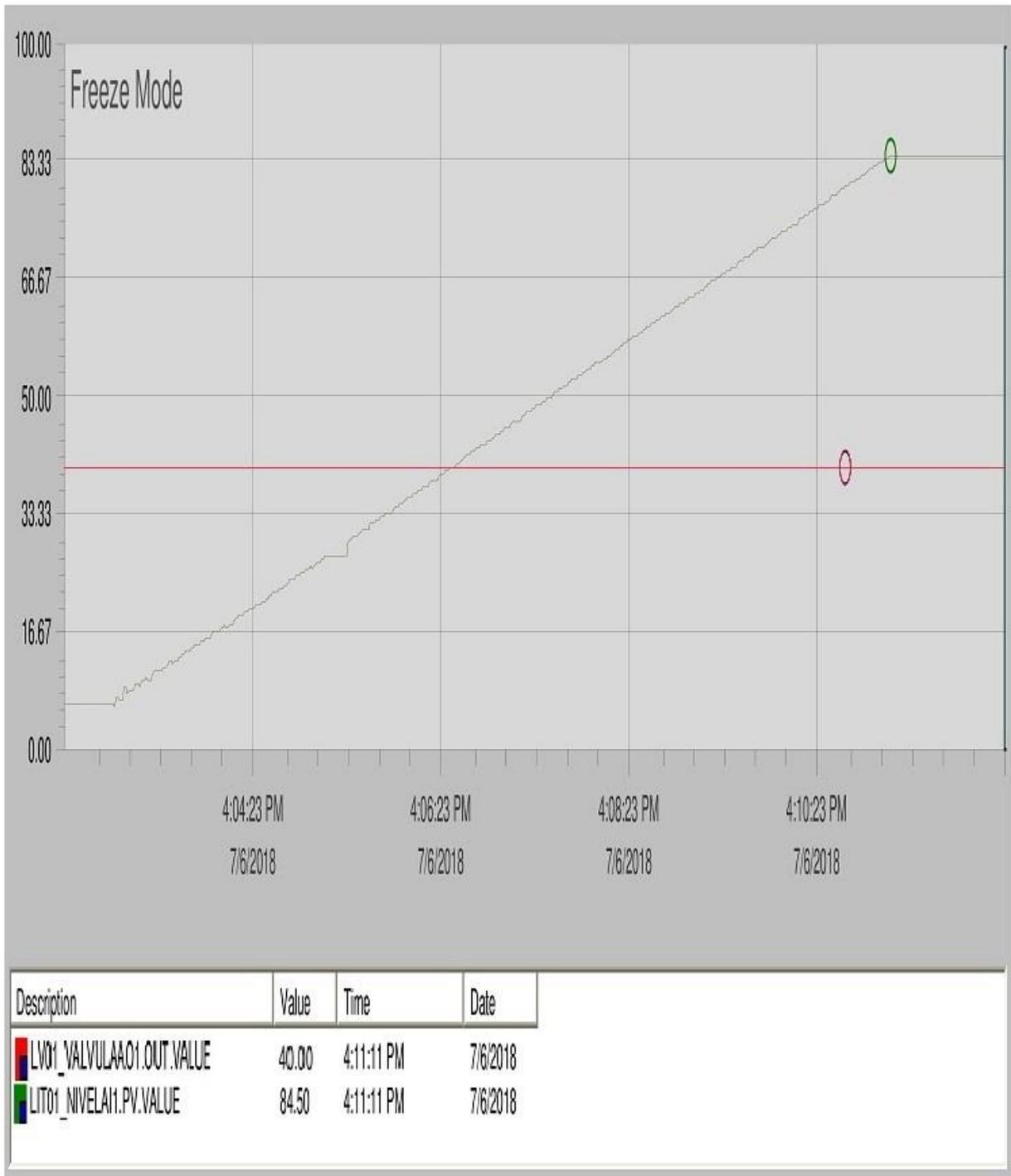


Figura 4.29: Experimento de enchimento do tanque em malha aberta.

O segundo passo foi esvaziar o tanque TQ01 mantendo a abertura da válvula de controle em 40%. Observou-se o comportamento da curva de nível e o resultado obtido está representado na figura 4.30.

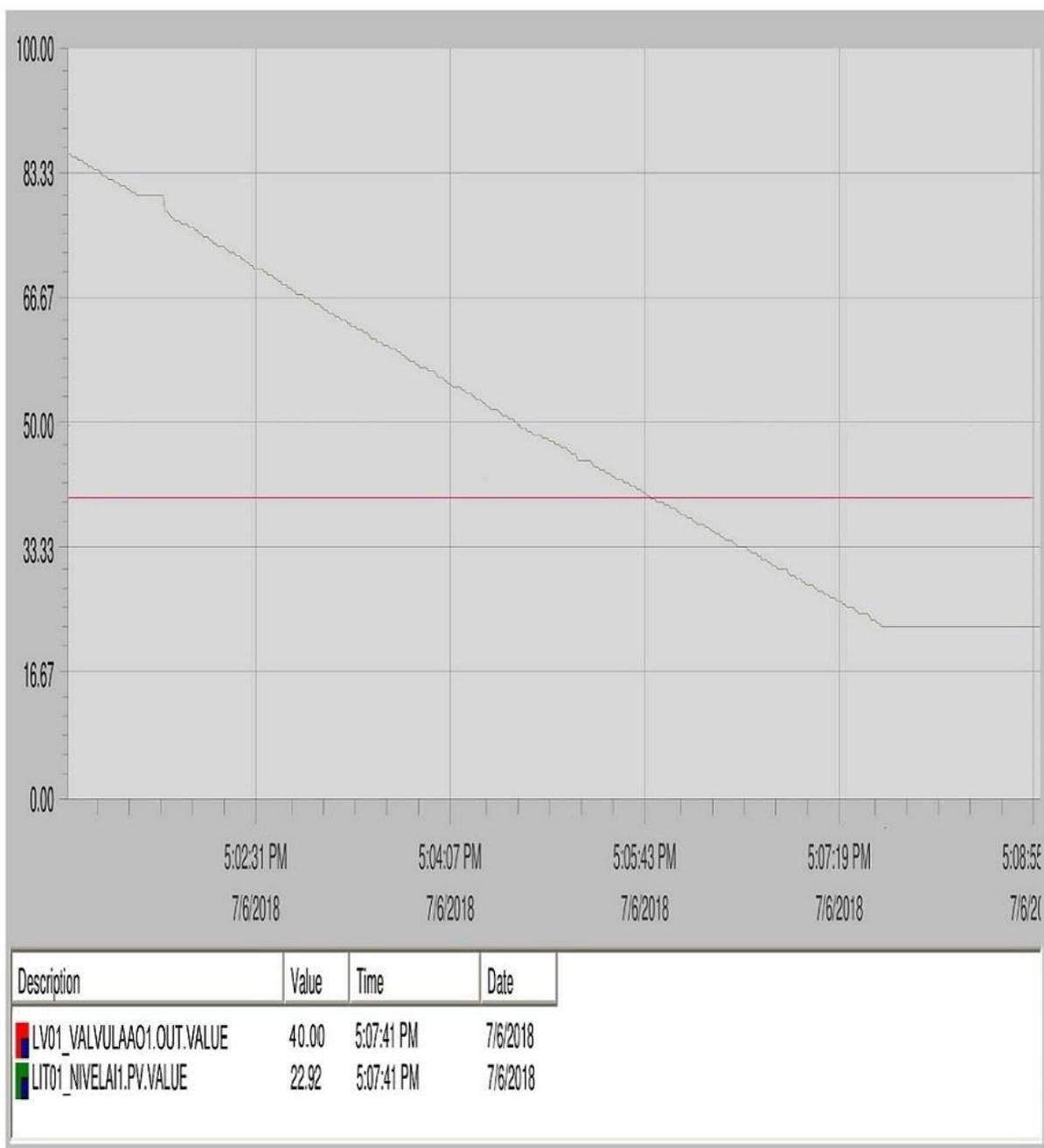


Figura 4.30: Experimento de esvaziamento do tanque em malha aberta.

Em seguida foi dado um degrau de 10% fazendo com que a abertura da válvula variasse para 50%. De acordo com a figura 4.31 o comportamento da dinâmica foi da seguinte forma:

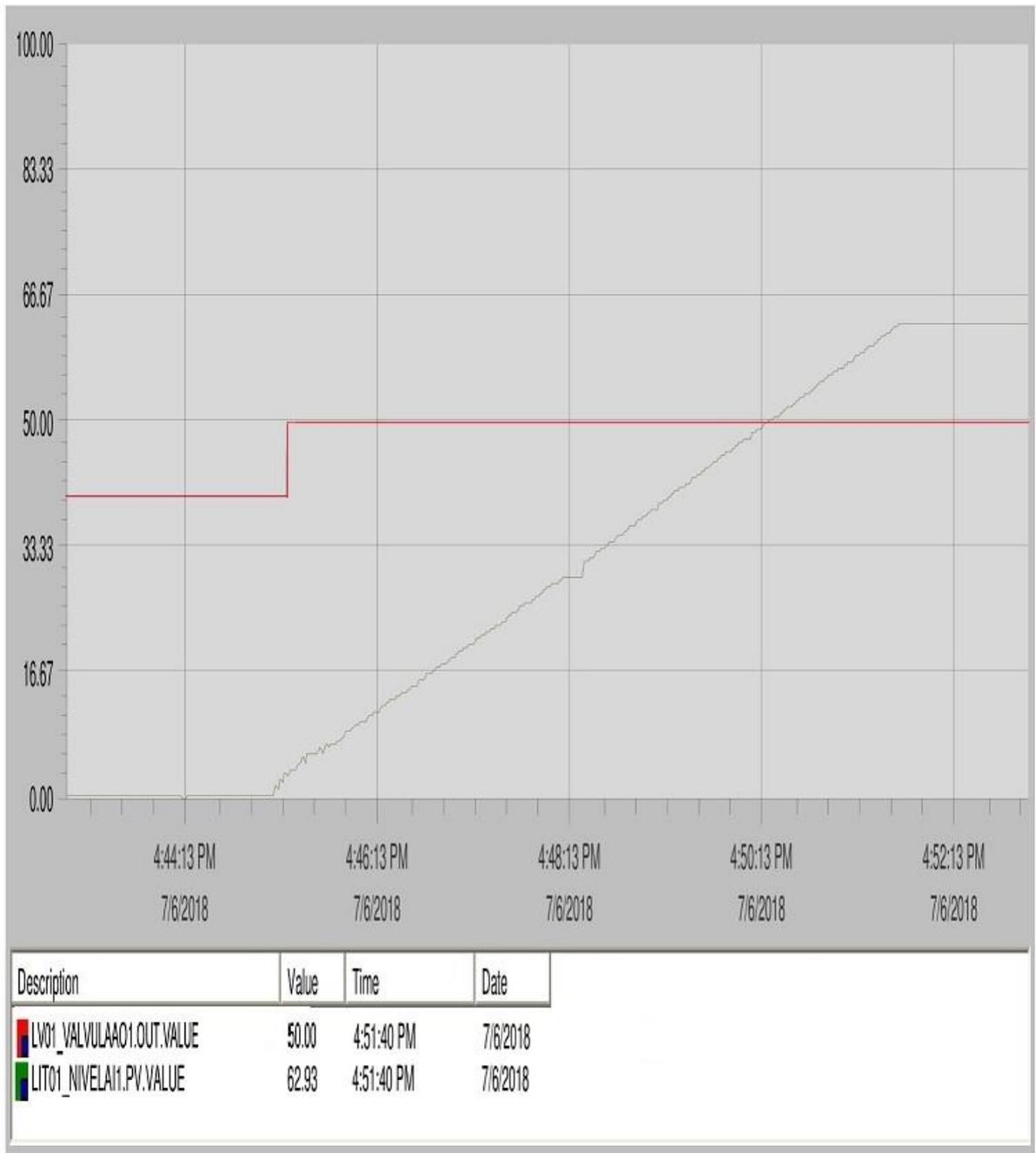


Figura 4.31: Experimento de resposta ao degrau em malha aberta.

Avaliou-se o efeito da dinâmica do sistema e pelos resultados percebeu-se que a variável de processo possui uma dinâmica que sai do seu ponto de equilíbrio e começa a acumular tendendo a transbordar ou esvaziar. Assim, o processo é compatível com o comportamento de um sistema instável ou integrador. Após isso, foi definida uma ação de controle para sintonizar o sistema em malha fechada.

4.7.2.1 Ação de controle proporcional e integral

Segundo Ogata (2000), a ação de controle de um controlador proporcional e derivativo é definida pela seguinte equação 6:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (6)$$

E a função de transferência do controlador é definida pela equação 7:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot S} \right) \quad (7)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional e T_i é chamado tempo integral. Ambos são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto a mudança no valor K_p afeta tanto a parte proporcional quanto a integral da ação de controle. Esta combinação tem por objetivos principais, corrigir os desvios instantâneos (proporcional) e eliminar ao longo do tempo qualquer desvio que permaneça (integral).

Na figura 4.32 (a) mostra o diagrama de blocos de um controlador proporcional e integral. Um sinal de erro atuante $e(t)$ em função de uma rampa unitária figura 4.32 (b) e a saída do controlador $u(t)$ figura 4.32 (c).

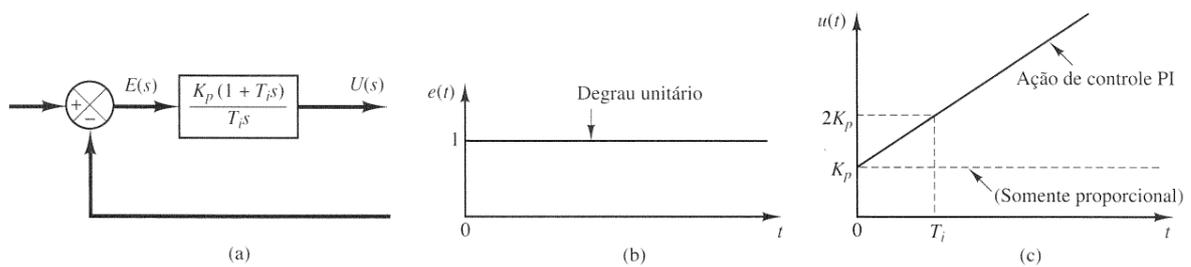


Figura 4.32: Ação de controle proporcional e integral.

FONTE: (OGATA, 2000).

No projeto do controlador, é desejável que existam parâmetros que possam influenciar na performance do sistema. Estes parâmetros serão definidos a partir de certas especificações. Considerando a representação da malha de controle com retroalimentação, mostrada na figura 4.33, seria interessante que a função de transferência em malha fechada, pudesse ter um

determinado comportamento, com um desempenho desejado, dependente da filosofia adotada pela malha de controle. Para isso, buscou-se uma maneira de ajustar os parâmetros PI através dos métodos de sintonia de malhas de controle.

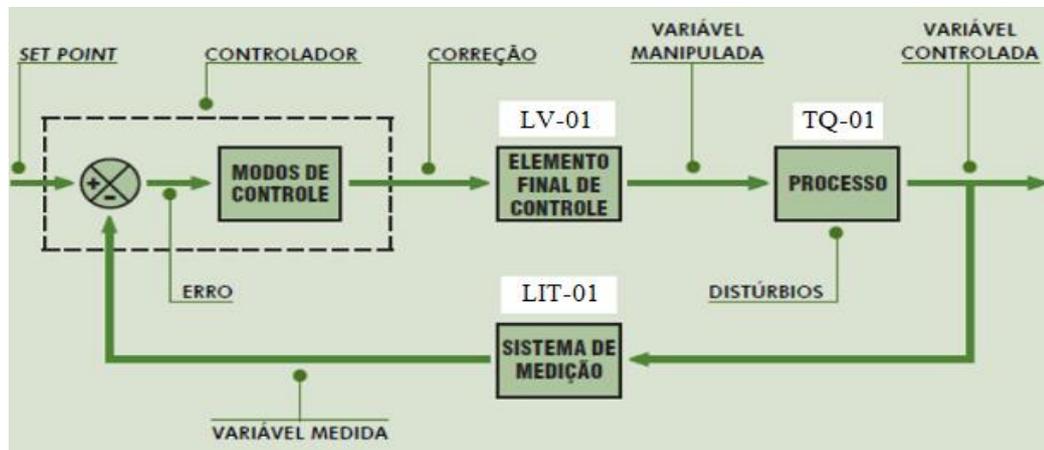


Figura 4.33: Malha de Controle de Nível.

Segundo VanDore (2006) a essência da sintonia de malhas de controle é identificar como a dinâmica de um processo reage aos esforços de controle e, baseado em requisitos de desempenho, determinar a dinâmica necessária ao algoritmo PID para eliminar os erros.

Fazendo análise do sistema e pelas ferramentas disponíveis, foram escolhidos o método SIMC e o método de resposta em frequência proposto por Ziegler & Nichols.

4.7.3 Controlador SIMC (Skogestad IMC)

A técnica de ajuste do controlador SIMC é baseada na teoria de modelo interno para controladores (sigla inglesa-IMC) e propõe uma metodologia simples para o ajuste de controladores industriais PI e PID. Esta metodologia é usada especialmente para sistemas de primeira e segunda ordem com atraso.

O Princípio do modelo interno para controladores consiste em ser um método geral para sintonia de sistemas de que pode ser aplicado para algoritmos PID.

Observe-se pela figura 4.34 o diagrama de blocos deste projeto.

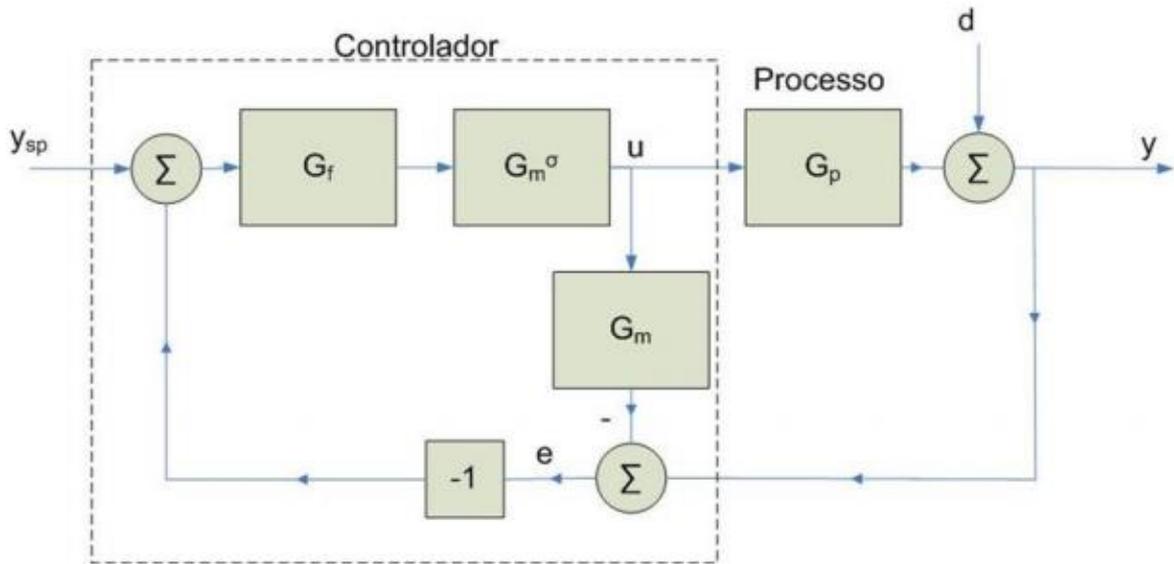


Figura 4.34: Diagrama de blocos representativo do método IMC.

Fonte: (CAMPOS e TEIXEIRA 2006).

Neste diagrama é assumido que todos os distúrbios agindo na planta são reduzidos a um distúrbio equivalente, introduzido na saída do processo. G_m representa o modelo do processo, G_m^σ é a inversa aproximada de G_m , e G_f é um filtro que define o grau de robustez da sintonia proposta. Esse modelo está conectado paralelamente ao processo (ÅSTRÖM e HÄGGLUN, 1995).

O método SIMC, apresenta bom desempenho para diversos tipos de sistemas (de alta ordem, com tempo morto, e com características integradoras), tanto para características servo quanto para regulatórias (SKOGESTAD, 2003). As regras de ajuste para controlador PID estão baseadas em função de segunda ordem com tempo morto, como mostra a equação 8:

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-\theta S}}{S} \quad (8)$$

a constante K é definida pela equação 9:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U \Delta T} \quad (9)$$

Em que ΔY é o nível, ΔU a abertura da válvula e ΔT o tempo.

A sintonia foi obtida usando a tabela 4.5.

Tabela 4.5: Tabela de sintonia SIMC PID.

Process	$g(s)$	K_c	τ_i	τ_D^d
First-order	$k \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)}$	$\frac{1}{k} \frac{\tau_1}{\tau_c + \theta}$	$\min\{\tau_1, 4(\tau_c + \theta)\}$	-
Second-order, Eq. (4)	$k \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{k} \frac{\tau_1}{\tau_c + \theta}$	$\min\{\tau_1, 4(\tau_c + \theta)\}$	τ_2
Pure time delay ^a	$k e^{-\theta s}$	0	0 ^e	-
Integrating ^b	$k' \frac{e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{1}{k'} \frac{1}{(\tau_c + \theta)}$	$4(\tau_c + \theta)$	-
Integrating with lag	$k' \frac{e^{-\theta s}}{s(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{k'} \frac{1}{(\tau_c + \theta)}$	$4(\tau_c + \theta)$	τ_2
Double intergrating ^c	$k'' \frac{e^{-\theta s}}{s^2}$	$\frac{1}{k''} \frac{1}{4(\tau_c + \theta)^2}$	$4(\tau_c + \theta)$	$4(\tau_c + \theta)$

Fonte: (SKOGESTAD, 2003).

4.7.4 Método da Resposta em Frequência - Ziegler-Nichols

Desenvolvido por J.G Ziegler e N.B. Nichols, ambos da *Taylor Instrument Companies*, foi o primeiro método de ajuste sistemático dos parâmetros de um controlador PID (Ziegler & Nichols 1942).

No método da resposta em frequência, com o controlador P em malha fechada, aumenta-se o ganho proporcional (só o termo P) gradativamente até se obter uma resposta oscilatória com amplitude constante. Neste ponto, determina-se o ganho crítico (K_u) e o período crítico de oscilação (T_u). O ganho crítico (K_u) é o valor do ganho do controlador P que gerou uma resposta oscilatória sustentada na saída do processo, e o período crítico (T_u) será o próprio período do processo oscilante. A Figura 4.35 mostra um exemplo da resposta do processo durante um ensaio.

Com estes valores de K_u e T_u , observa-se então a Tabela 4.6 proposta por Ziegler & Nichols (1942) para se obter a sintonia PID, usando como critério de desempenho uma razão de declínio igual a $\frac{1}{4}$.

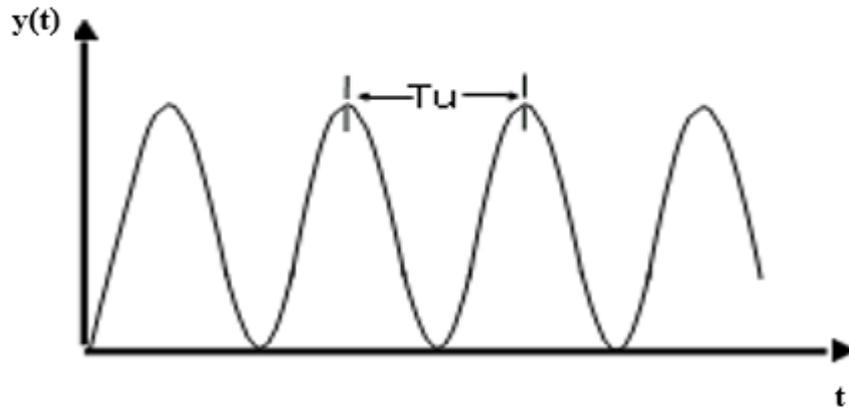


Figura 4.35: Resposta do sistema usando o método da resposta em frequência.

Fonte:(GOMERY, 2014).

Tabela 4.6: Ziegler-Nichols para sintonia, 1942

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

Fonte:(GOMERY, 2014).

4.7.5 Simulação do sistema em malha fechada

Após analisar os métodos de sintonia, faz-se necessário avaliar o seu desempenho e verificar se o método obteve um resultado plausível, ou seja, se a função de transferência em malha fechada possui comportamento semelhante à função desempenho alcançável, quando excitada por uma mudança do tipo degrau unitário. Para tanto, foram realizados testes simulados contendo as curvas, com o auxílio do aplicativo Simulink[®]/Matlab[®]. Assim, é possível fazer uma avaliação visual se o projeto foi satisfatório. Adicionalmente, partindo dos resultados simulados, é realizada uma avaliação mais detalhada, computando alguns índices de qualidade, para caracterizar o desempenho do sistema de controle projetado.

Observe-se pela figura 4.36 o diagrama de blocos para simulação do controle utilizando o método SIMC.

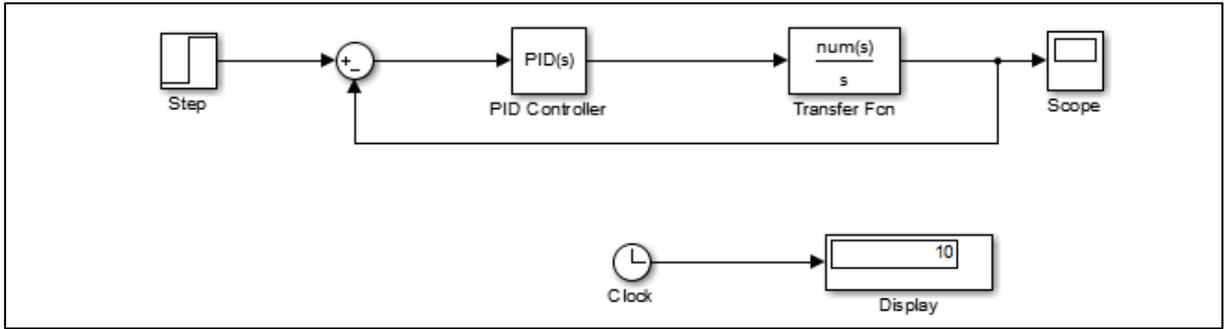


Figura 4.36: Simulação do controle pelo método SIMC.

Observe-se pela figura 4.37 o diagrama de blocos para simulação do controle utilizando o método da resposta em frequência.

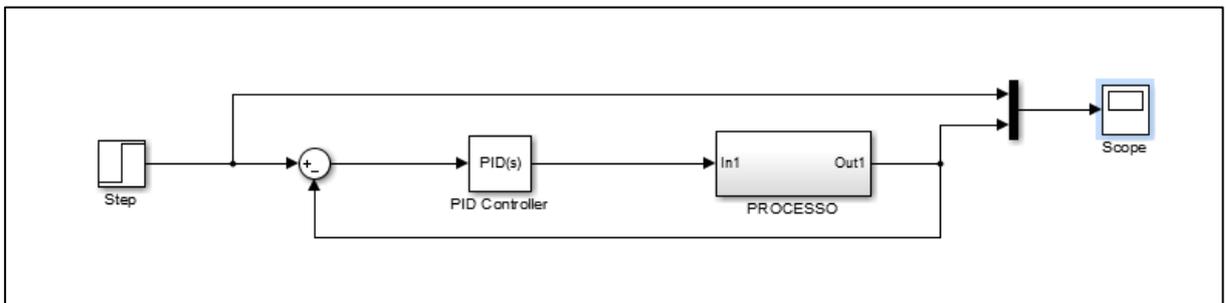


Figura 4.37: Simulação do controle pelo método de Ziegler Nichols.

A resposta para uma excitação do tipo degrau unitário em malha fechada através da sintonia SIMC pode ser visualizada na figura 4.38.

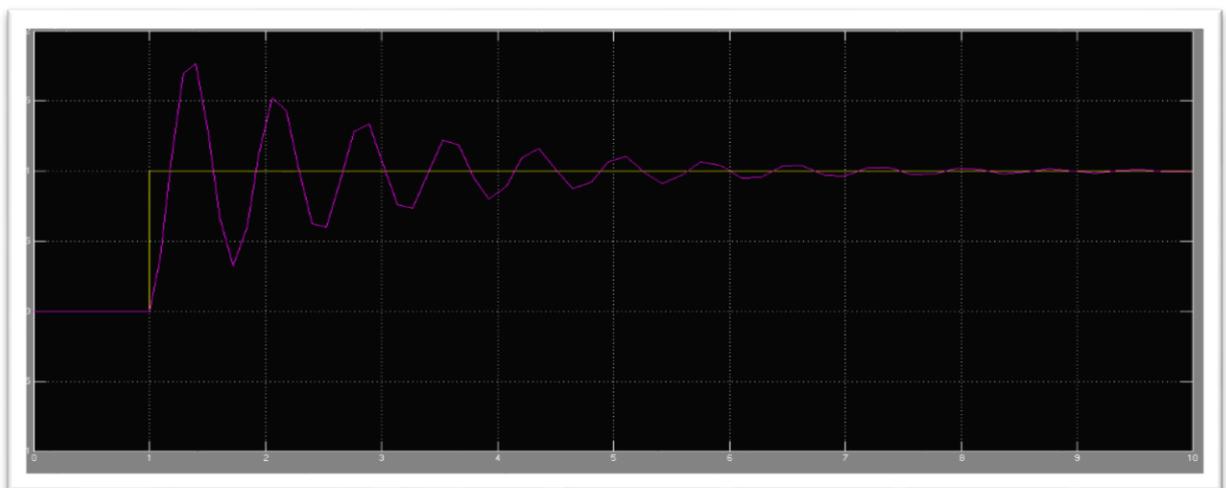


Figura 4.38: Resposta ao degrau unitário pelo modelo SIMC.

Observa-se pela figura 4.39 a resposta para uma excitação degrau unitário pelo método SIMC de forma mais detalhada.

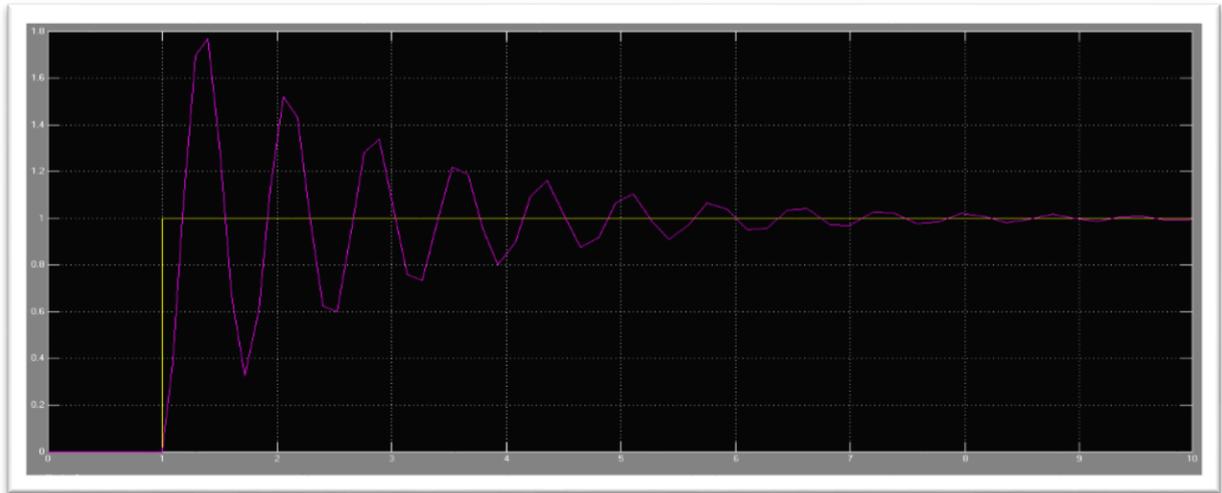


Figura 4.39: Resposta ao degrau unitário pelo método SIMC.

Observa-se pela figura 4.40 a curva após aumentar o ganho do sistema até que a resposta gerada fosse um sinal aleatório, com amplitude da oscilação constante. Para determinar o se o ganho crítico (K_u) e o período crítico de oscilação (T_u) utilizando o método de resposta em frequência.

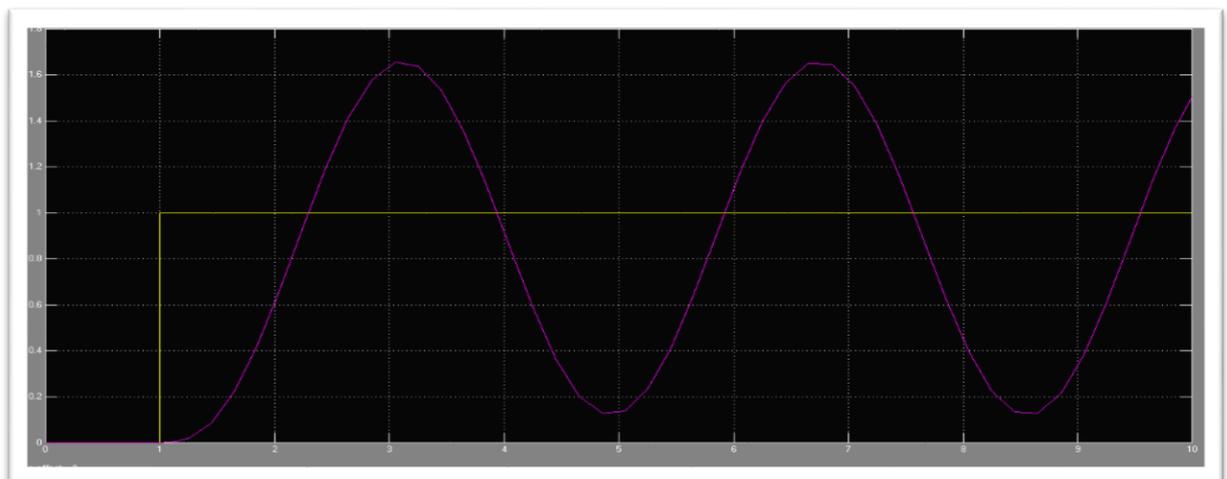


Figura 4.40: Resposta ao degrau unitário pelo método da resposta em frequência.

Após obter o ganho o ganho crítico (K_u) e o período crítico de oscilação (T_u), através da tabela Ziegler-Nichols para sintonia obteve-se a resposta ao degrau unitário pelo método de resposta em frequência, como pode ser visualizado na figura 4.41.

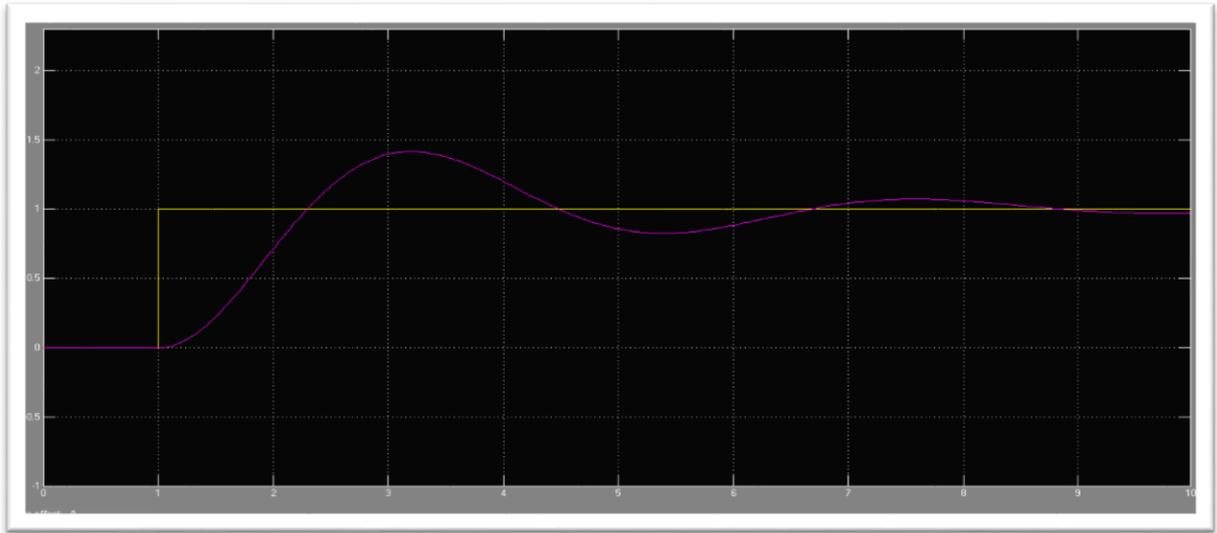


Figura 4.41: Resposta ao degrau unitário pelo modelo do Ziegler-Nichols.

4.7.6 Critérios de desempenho

A seguir são detalhados alguns índices que serão utilizados na avaliação da qualidade da resposta produzida pelos controladores projetados. Os critérios de desempenho objetiva mensurar a estabilidade do sistema, para isso, eles se associam a velocidade de resposta do sistema, a presença ou não de oscilações e a quão bem a saída acompanha um valor desejado.

Os critérios de desempenho do um sistema de controle utilizado neste trabalho está representados na Tabela 4.7. A Figura 4.42 apresenta a resposta de um sistema subamortecido típico para mudança do tipo degrau no valor da variável de referência, onde pode-se visualizar alguns dos critérios de desempenho definidos.

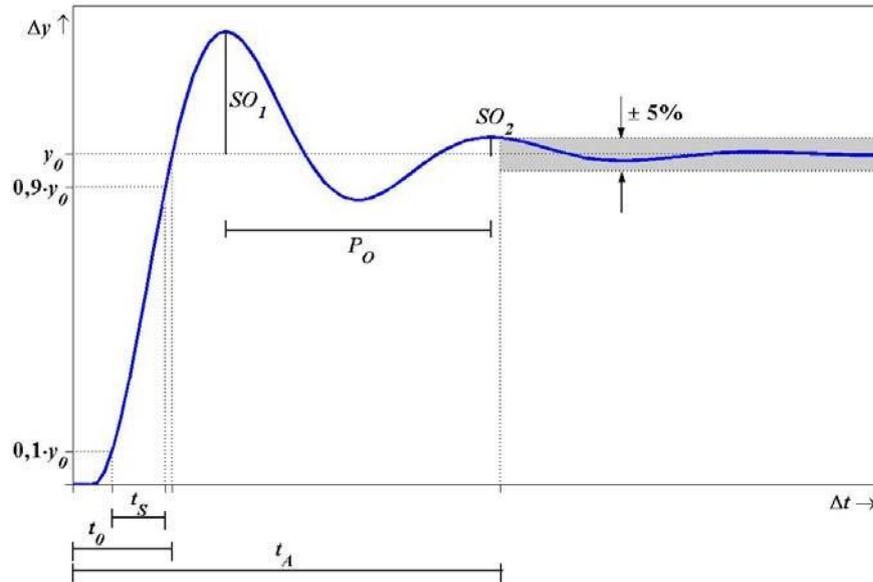


Figura 4.42: Critérios de desempenho baseados na resposta de um sistema subamortecido.

Fonte: (FACCIN, 2004).

Tabela 4.7: Critérios de desempenho

<p>Erro em regime permanente (e_{∞}): também chamado de offset, é a diferença entre o valor em estado estacionário da variável controlada e o seu valor de referência. É altamente desejável valor nulo para o erro em regime permanente, que é conseguido através do uso da ação integral (MARLIN, 1995).</p>	$e_{\infty} = y_0 - y_R$
<p>Tempo de assentamento (t_A): tempo necessário para se ter a resposta no interior de uma faixa percentual arbitrária do valor estacionário, no caso 5% (D'AZZO e HOUPIS, 1978).</p>	
<p>Tempo de subida (t_S): tempo em que o sistema leva para passar de 10% até 90% do valor estacionário para respostas frente a mudança no valor da variável de referência (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1995).</p>	
<p>Período de oscilação (PO): diferença de tempo entre dois valores máximos consecutivos do sinal de erro (MARLIN, 1995).</p>	

4.8 Análise dos Resultados

Para a análise dos resultados foram traçadas as curvas utilizando a sintonia em malha fechada pelo método SIMC e o método da resposta em frequência. Os gráficos foram adquiridos através da relação entre o *setpoint* e o nível.

Os índices de qualidade utilizados neste trabalho para caracterizar o sistema quanto ao seu desempenho são: erro em regime permanente (e_{∞}), tempo de assentamento (t_A), Tempo de subida (t_S), Período de oscilação (PO). Com estes índices, foi possível ter uma avaliação detalhada do comportamento dinâmico do sistema para mudanças no valor da variável de referência.

4.8.1 Resultado pelo método SIMC

A figura 4.43 mostra o resultado da resposta ao degrau unitário pelo método SIMC. Após colocar o *setpoint* em 10 litros observou-se o comportamento do sistema. Os dados obtidos foram os seguintes:

- Regime permanente (e_{∞}): quase nulo após 5 min;
- tempo de assentamento (t_A): 4 minutos;
- Tempo de subida (t_S): 1 minuto e 18 segundos aproximadamente;
- Período de oscilação (PO): 1 minuto.

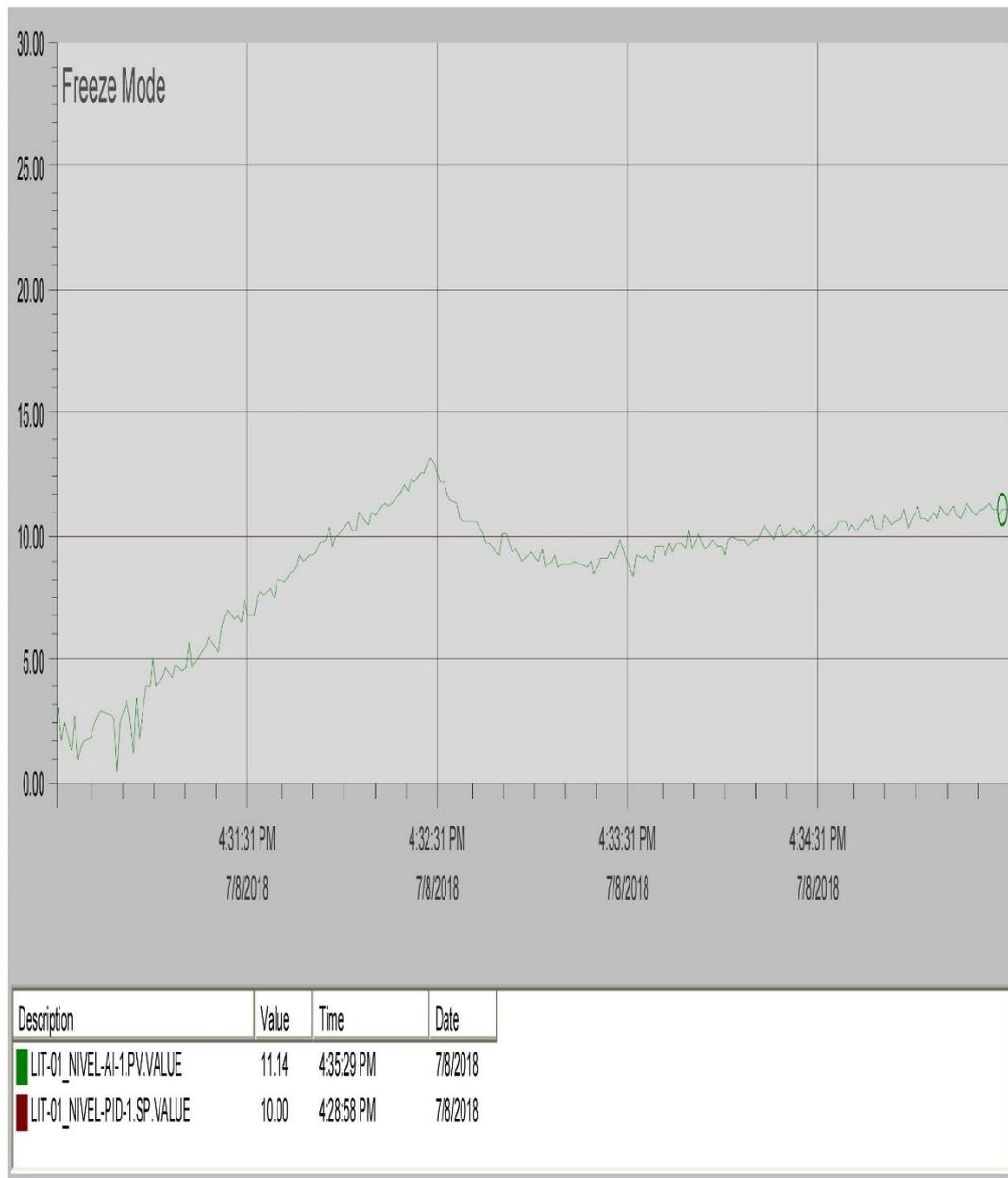


Figura 4.43: Resposta ao degrau pelo modelo SIMC.

4.8.2 Resultado pelo método da resposta em frequência

A figura 4.44 mostra o resultado da resposta ao degrau unitário pelo método da resposta em frequência. Após colocar o *setpoint* em 20 litros observou-se o comportamento do sistema. Os dados obtidos foram os seguintes:

- Regime permanente (e_{∞}): nulo após 8 minutos;
- Tempo de assentamento (t_A): 7 minutos e 18 segundos;
- Tempo de subida (t_S): 4 minutos e 19 segundos;

- Período de oscilação (PO): aproximadamente 3 minutos e 12 segundos.

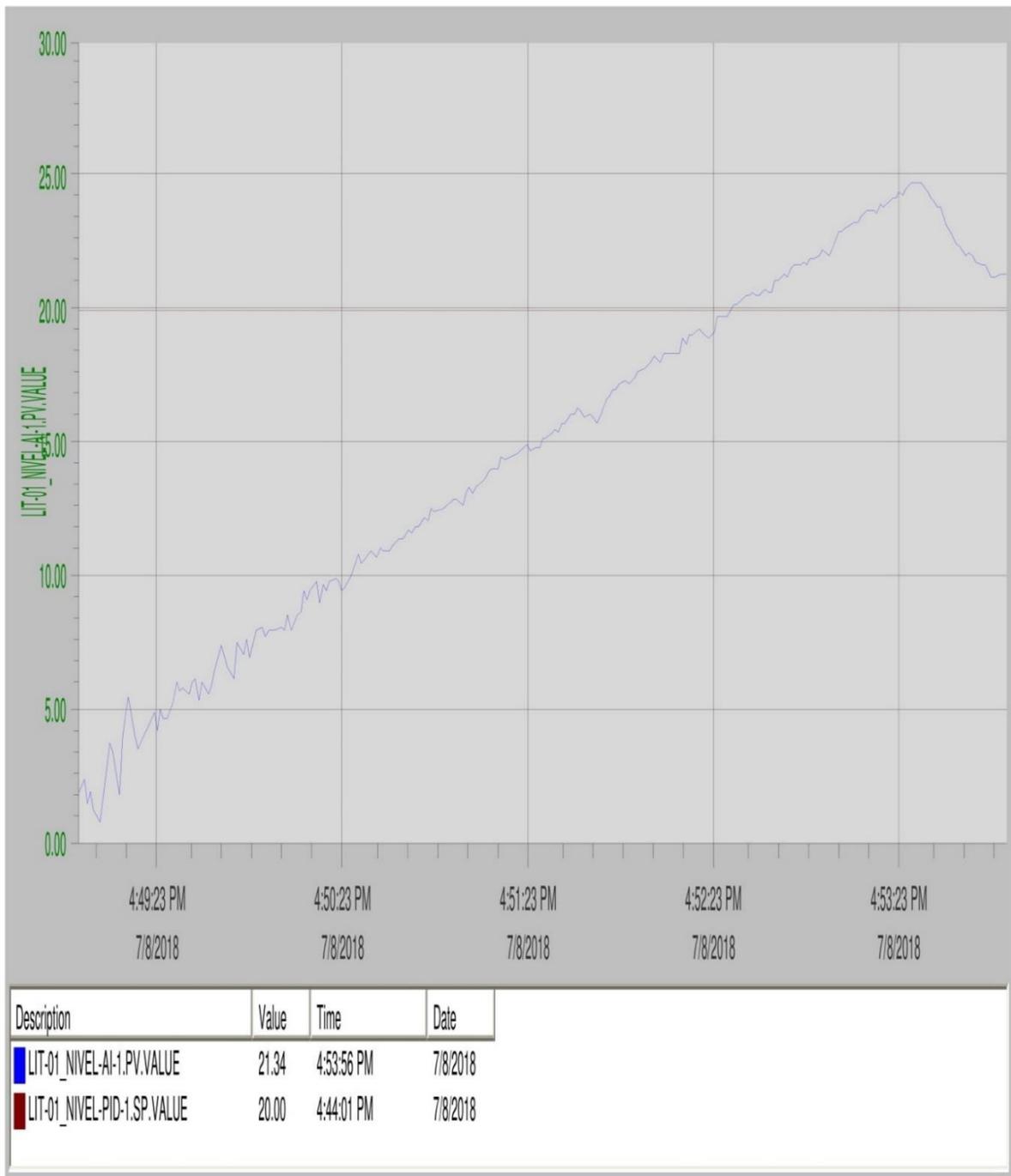


Figura 4.44: Resposta ao degrau pelo método de Ziegler-Nichols.

Observe-se pela figura 4.45 a continuação da resposta obtida na figura 4.42.

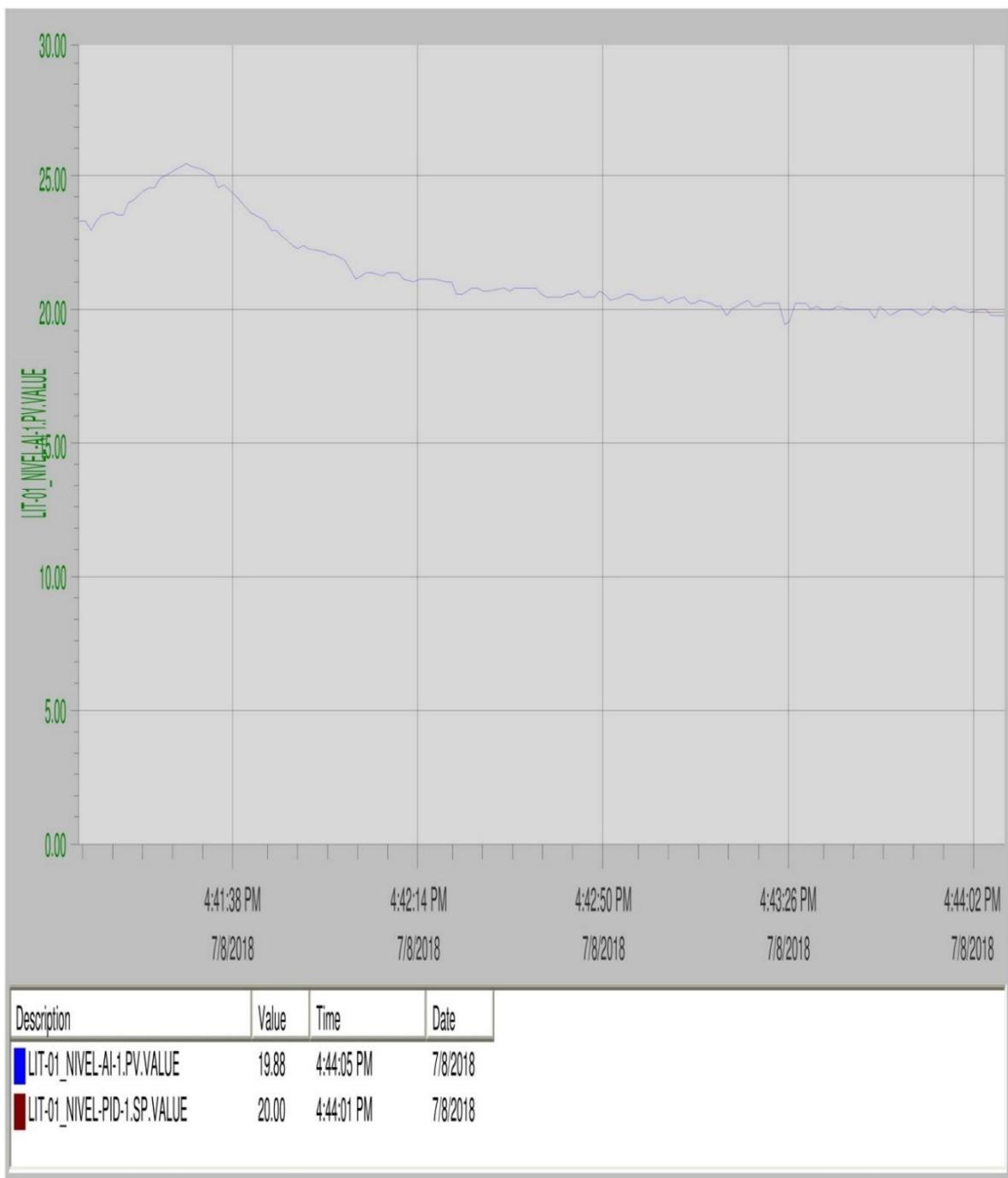


Figura 4.45: Resposta ao degrau pelo método de Ziegler-Nichols.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi possível realizar a sintonia de um controlador utilizando o método SIMC e o método de Ziegler-Nichols para o controle de nível do tanque de abastecimento da planta didática industrial presente no laboratório Laboratório de Tecnologias Industriais da Escola de Minas.

A planta didática proporcionou a elaboração deste trabalho foi de grande valia para conclusão da graduação em Engenharia de Controle e Automação pela aplicação de muitas disciplinas cursadas durante o curso e pelos desafios gerados, estudados e solucionados do começo ao fim deste estudo.

Os métodos de sintonia para ajustar o controlador PI do tanque de abastecimento da planta didática funcionou de acordo como mostrado no capítulo anterior, em que o controlador desenvolvido no próprio transmissor responsável por medir a variável pode ser muito eficiente.

A interface de monitoramento proporcionou uma visão de tudo que está acontecendo na planta, em tempo real, trazendo uma maior comodidade a quem cabe supervisioná-la através de uma interface clara e objetiva. O monitoramento da temperatura que se fez através do sistema supervisão também se mostrou adequado mediante as variações da temperatura da água do tanque.

Além disso, foi desenvolvido um sistema de alarme em que ao pressionar o botão de emergência uma luz vermelha se acendia no painel da planta didática, um sinal sonoro indicando o alerta, e um sinal de emergência no sistema supervisão mostrando ao operador que ocorreu uma falha no sistema. Assim, a planta é desativada instantaneamente quando o botão é pressionado.

A planta de instrumentação e controle de processos contínuos mostrou-se condizente com o esperado de um ambiente industrial. Além disso, este trabalho proporcionou a familiarização do aluno com o ambiente industrial, e mostra os conhecimentos necessários e situações que o profissional poderá deparar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **Artigos Técnicos**. Acesso em 23 Julho, 2011. Disponível em <http://www.smar.com/brasil/artigos-tecnicos>.

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **GraphWorX: User's Manual**. Maio, 2006. 146 p. Disponível em: <www.smar.com/brasil/manuais>. Acesso em 22 jun. 2018.

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **LC700 Controlador Híbrido Universal**. 34 p. Disponível em: <www.smar.com/brasil/manuais>. Acesso em 22 jun. 2018.

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **LogicView for FFB: Manual do Usuário**. Julho, 2012. 146 p. Disponível em: <www.smar.com/brasil/manuais>. Acesso em 23 jun. 2018.

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **PD3-F - Manual de Instruções, Operação e Manutenção: Plantas Didáticas**. Junho, 2012, 54 p. Disponível em: <www.smar.com/brasil/manuais>. Acesso em 21 jun. 2018.

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **ProjectWorX: User's Manual**. Maio, 2006. 146 p. Disponível em: <www.smar.com/brasil/manuais>. Acesso em 21 jun. 2018.

© 1994 - 2018 Smar Equipamentos Industriais Ltda. **System302: Applications Bulletin**. Novembro, 2005. 140 p. Disponível em: <www.smar.com/brasil/manuais>. Acesso em 21 jun. 2018.

AGUIRRE, L A. **Introdução á identificação de sistemas técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais**. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG (2004).

ALVES, José L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005

ÅSTRÖM, K. J. e HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2ª ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America (1995).

BAZANELLA, A. S. e SILVA JR., J. M. G. *Ajuste de Controladores PID*. Apostila do Curso de Extensão, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (1999).

BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006. 583 p.

BEGA, Egídio A. **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

CAMPOS, M.C.C.C. TEIXEIRA, H.C.G, controles tipicos de equipamentos de processos industriais. 1 ed. São Paulo-SP: Blücher 2006.

CARVALHO, Jorge L. M. de. **Sistema de controle automático**. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CAMPOS, Mario M. de. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

CASSIOLATO, César – **Medição de nível & nível de interface**, *Revista Controle & Instrumentação*, Edição nº 110, 2005

CORREA, P. V. **Fundamentos de instrumentação e controle**. Julho, 2002. 163 p

D'AZZO, J. J. e HOUPIS, C. H. *Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares*. Tradução de: FILHO, B. S. S. Rio de Janeiro: Guanabara Dois (1978).

FACCIN, F. **Abordagens inovadora no projeto de controladores PID**. 2004. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Química) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

GALLON, J. R. **Estudo de Processos Contínuos em um Protótipo de uma Planta Industrial**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

GALLON, J. R.; GONZAGA, D. A. **Apostila para planta didática de processos contínuos de Lorenzo**. Ouro Preto, Escola de Minas, 2012. 25p.

GOMERY, P. J. E. M **Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese**. 2014. Dissertação de Mestrado (pós graduação em Engenharia Elétrica de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2014.

GONÇALVES, M. G. **Monitoramento e controle de processos: Programa de qualificação de operadores**. Brasília, PETROBRAS, 2003. 99 p.

GUTIERREZ, R. M. V.; PAN, S. K. Complexo Eletrônico: Automação do Controle Industrial. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 28, p. 189-232, set. 2008. Disponível em:< <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9536>> acesso em 25/06/2018

LIMA, F. S. (2004). **Estratégia de Escalonamento de Controladores PID Baseado em Regras Fuzzy para Redes Industriais Foundation Fieldbus Usando Blocos Padrões**. Dissertação. Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – 2004.

MARLIN, T. E. *Process Control*. New York: McGraw-Hill (1995).

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

PEREIRA, W. H. **Sistemas digitais de controle distribuído**. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

PHILLIPS, C. L. e HARBOR, R. D. *Sistemas de Controle e Realimentação*. Tradução de: RICARDO, L. F. São Paulo: Makron Books (1997).

RADUAN, L. R. F. **SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID PARA UMA ESTUFA**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

Ribeiro, F. P.; Torres, A. G.; Silva, G. P.; Moreira, K. S. (2012). **Desenvolvimento de um Sistema de Controle e Automação para Aplicação Didática**. Artigo – XIX Congresso Brasileiro de Automática – Campina Grande – 2012

RIBEIRO, M. A. **Instrumentação**. Salvador, 1999. 360 p.

RITZMAN, L.; KRAJEWSKI, L. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Prentice Hall, 2007.

SANTOS, J. J. R. (2008). **Sistema integrado de monitoramento de instrumentos e rede foundation fieldbus para melhorias dos processos de medição e controle na indústria do petróleo** – Monografia (Graduação em Engenharia de Computação) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

SANTOS, M. H. S. (2010). **Estudo de Estratégias de Controle para Processos com Atraso em uma Rede Foundation Fieldbus. Relatório Técnico para disciplina DAS 5501** – Estágio em Controle e Automação. Engenharia de Controle e Automação – Universidade Federal de Santa Catarina – 2010.

SKOGESTAD, S. **Simple analytic rules for model reduction and PID controller design**. *Journal of Process Control*, **13**, 291-309 (2003).

SOUZA, L. E. **Controladores Lógico Programáveis**. Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria. Itajubá, p. 93. 2001.

VanDore, V. (2006), **auto-tuning control using Ziegler Nichols**, em ‘9th IEEE/IAS International Conference national Conference on Industry Applications INDUSCON’. From de pages of Control Engineering: <https://www.controleng.com/single-article.html>

ZIEGLER, J. G. e NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Trans. A.S.M.E.*, **64**, 759-768 (1942).