

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL BETTIOL TONHOLO

**SISTEMA SCADA DIDÁTICO PARA SUPERVISÃO E CONTROLE DE NÍVEL E
TEMPERATURA**

MEDIANEIRA

2021

RAFAEL BETTIOL TONHOLO

**SISTEMA SCADA DIDÁTICO PARA SUPERVISÃO E CONTROLE DE NÍVEL E
TEMPERATURA**

Didactic scada system for level and temperature supervision and control

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Leandro Antonio Pasa.

MEDIANEIRA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAFAEL BETTIOL TONHOLO

SISTEMA SCADA DIDÁTICO PARA SUPERVISÃO E CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Elétrica”.

Data da Aprovação: 07 de maio de 2021

Prof. Dr. Leandro Pasa - Orientador
UTFPR - Câmpus Medianeira

Prof. Me. Yuri Ferruzi
UTFPR - Câmpus Medianeira

Prof. Me. Alex Lemes Guedes
UTFPR - Câmpus Medianeira

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

Com o constante crescimento da capacidade de produção, sistemas de automações industriais e residenciais cada vez mais inteligentes conjunta a migração para a Indústria 4.0, surge a necessidade de acompanhar os processos a cada detalhe. Com objetivo de atuar e extrair do processo o máximo de informações de um sistema de controle de nível e temperatura de tanques o seguinte trabalho tem como objetivo a elaboração de um sistema de supervisão a fim de acompanhar as etapas de um processo industrial. O sistema responde controlando a abertura de válvulas para controle de nível e acompanhando uma função de aquecimento para controle de temperatura, ambos atuando via controlador PID. Este também é, de certa forma, um material didático àqueles que se interessam a elaborar ou estudar sobre a supervisão e aquisição de dados.

Palavras-chave: Automação industrial, Material didático, Supervisório.

ABSTRACT

With the constant growth of production capacity, industrial and residential automation systems increasingly intelligent together with the migration to Industry 4.0, there is a need to monitor the processes in every detail. In order to act and extract as much information as possible from a tank level and temperature control system, the following work has the objective of creating a supervisory system in order to follow up as stages of an industrial process. The system responds by controlling the opening of valves for level control and following a heating function for temperature control, both acting via PID controller. This is also, in a certain way, a didactic material for those who are interested in elaborating or studying the supervision and acquisition of data.

Keywords: Industrial automation, Didactic material, Supervisory.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Diagrama de blocos de sistema em malha aberta e malha fechada	11
FIGURA 2	– Esquema de nível e curva de altura vs vazão	12
FIGURA 3	– Modelo de aquecimento de tanques.	15
FIGURA 4	– Diagrama de blocos controlador PID.	16
FIGURA 5	– Diagrama de Blocos do CLP.	18
FIGURA 6	– CLP compacto Moeller.	19
FIGURA 7	– Estrutura CLP modular.	20
FIGURA 8	– CLP modular.	20
FIGURA 9	– Ilustração das formas de energia de um sensor.	21
FIGURA 10	– Transmissor de temperatura.	23
FIGURA 11	– Modelo OSI.	24
FIGURA 12	– Fluxograma comunicação OPC.	24
FIGURA 13	– Supervisório para controle de nível e temperatura.	25
FIGURA 14	– Fluxograma de funcionamento.	31
FIGURA 15	– Esquema física simulado	32
FIGURA 16	– POU's e variáveis globais utilizadas.	33
FIGURA 17	– POU para linearização e transformação.	34
FIGURA 18	– POU's do controle PID da válvula de entrada do aquecimento.	35
FIGURA 19	– Filtro média móvel.	36
FIGURA 20	– Alocação de variáveis no software Factory IO.	37
FIGURA 21	– Drive OPC no software Elipse E3.	37
FIGURA 22	– Criação da tabela Histórico de consulta.	38
FIGURA 23	– Tela de controle do supervisório.	39
FIGURA 24	– Resposta ao degrau Altura x Tempo no simulink.	43
FIGURA 25	– Resposta Nível Aquecedor x Tempo Controlador ON/OFF.	44
FIGURA 26	– Turbulências observadas nos tranques.	44
FIGURA 27	– Resposta Nível x Tempo Controlador PI com distúrbio.	45
FIGURA 28	– Resposta ao degrau Nível Aquecimento x Tempo Controlador PID.	46
FIGURA 29	– Comportamento do nível e temperatura do sistema.	47
FIGURA 30	– Definição e alocação de variáveis nas IOs físicas.	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Configurações analógicas do tanque.	29
TABELA 2	– Vazão encontrada em função da altura.	41
TABELA 3	– Resistências fluídicas encontradas.	41

LISTA DE SIGLAS

PID	Proporcional Integral Derivativo
CLP	Controladores Lógico Programável
CPU	Central Process Unit
IHM	Interface Homem Máquina
OSI	Open Systems Interconnection
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
OPC	Open Platform Communications
CODESYS	Controller Development System
POUs	Program Organization Unit
MDB	Microsoft Database

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO GERAL	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE	10
2.2	MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE	11
2.2.1	Sistemas de nível de líquidos	11
2.2.2	Sistemas térmicos	14
2.3	CONTROLADORES PID	16
2.4	CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS	17
2.4.1	Tipos de CLPs	18
2.5	ELEMENTOS SENSORES	21
2.5.1	Transdutores e Transmissores	22
2.6	COMUNICAÇÃO OPC	23
2.7	SISTEMAS SUPERVISÓRIOS	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	SIMULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E PROCESSOS	27
3.1.1	Simulação do Processo por Virtualização	27
3.2	FERRAMENTAS UTILIZADAS	28
3.2.1	CodeSys	28
3.2.2	Factory IO	29
3.2.3	Eclipse E3	29
3.3	METODOLOGIA	30
3.3.1	Elaboração da estrutura física	31
3.3.2	Implementação do código no CodeSys	32
3.3.3	Programas e funções auxiliares	33
3.3.4	Estabelecendo comunicação entre os softwares	35
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	40
4.1	MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA	40
4.1.1	Resistência Fluídica	40
4.1.2	Capacitância Fluídica	41
4.1.3	Função de Aquecimento	42
4.2	SIMULAÇÃO DO SISTEMA NO MATLAB	42
4.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	43
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Sistemas essenciais para a cadeia produtiva industrial necessitam de técnicas de controle apropriadas para cada situação. Segundo Silveira e Santos (2009) o controle, na escala tecnológica, assume papel primordial e decisivo dentre os modelos e processos existentes, sejam eles simples, modestos, robustos ou de extrema complexidade no plano das ações.

Dessa forma, os sistemas de controle respondem de forma diferente às aplicações. Portanto, quando se fala em automação, se refere ao processo de instalar controles automáticos em um equipamento, uma máquina ou um processo. (CAMARGO, 2014)

Existem, basicamente, dois tipos de processo industrial, segundo a manipulação das variáveis a serem controladas. Quando tais variáveis são, em sua grande maioria, do tipo analógicas, ou de tempo contínuo, tem-se um processo do tipo contínuo; caso as variáveis sejam do tipo discreta, ou digital, tem-se um processo do tipo discreto. (SILVEIRA; SANTOS, 2009)

Como conseguinte, é necessário equipamentos específicos para monitorar as variáveis do processo dentro de uma unidade industrial. Sensores, atuadores e elementos de comando se comunicam através de uma rede muito bem estabelecida e confiável. Como cita Almeida (2019) esse tipo de integração possibilitou a produção seriada de vários tipos de produtos, inclusive os customizados, isto é, com características determinadas pelo cliente.

Assim, o presente trabalho busca apresentar de forma didática a elaboração de um sistema de controle de nível e temperatura controlado via CLP e integrado a um sistema supervisório SCADA capaz de atuar continuamente no processo, sendo uma solução para aquecimento de líquidos ou fornecimento de água quente.

A utilização de *softwares* para simulação do processo, do controlador e da planta física facilita a implementação e resolução do problema sem necessitar de equipamentos ou planta física.

1.1 OBJETIVO GERAL

Simulação de processo de controle de nível e temperatura integrado a um sistema SCADA abordando conceitos didáticos dos recursos utilizando CLP.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos descritos abaixo são propostos para que o objetivo geral possa ser alcançado.

- a) Programação das rotinas do CLP em software livre.;
- b) Construção da planta física proposta em ambiente de simulação computacional ;
- c) Controlar de forma confiável o nível e a temperatura do processo;
- d) Estabelecer de forma robusta a comunicação entre os softwares e a aquisição de dados SCADA.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é fazer uma revisão breve e sucinta das principais definições e terminologias associadas à automação industrial. Serão apresentadas, inicialmente, os principais equipamentos relacionados aos sistemas de controle e automação industrial e, em sequência, as bases teóricas necessárias para a compreensão das técnicas de controle e equipamentos.

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE

O controle automático, como cita Ogata (2010), é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. O controle automático é um componente importante e intrínseco em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão etc. É desejável que a maioria dos engenheiros e cientistas esteja familiarizada com a teoria e a prática do controle automático.

Quando citados sistemas controlados, dois tipos de sistemas são definidos, a partir do tipo de controle que é feito na planta, sistemas de malha aberta ou fechada. (OGATA, 2010)

- **Sistemas de Controle em Malha Aberta:** Os chamados sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que, em um sistema de controle de malha aberta, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada.
- **Sistemas de Controle em Malha Fechada:** Os sistemas de controle com realimentação são, com frequência, denominados também sistemas de controle de malha fechada. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante realimenta o controlador de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado.

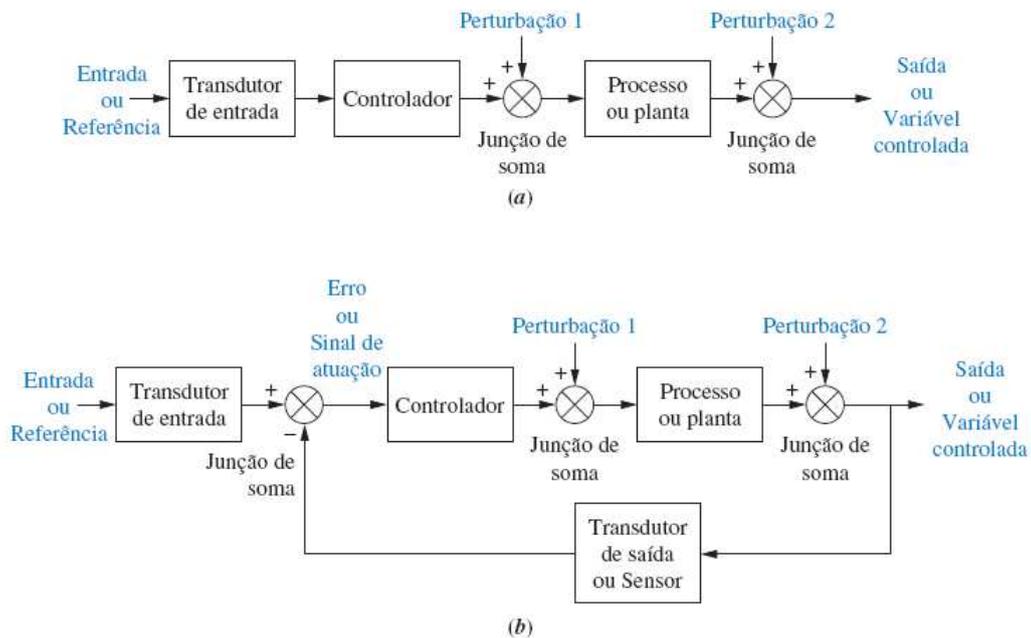


Figura 1 – Diagrama de blocos de sistema: a. malha aberta; b. malha fechada.

Fonte: (NISE, 2017)

2.2 MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE

Obter a função de transferência de um sistema é de grande importância caso se deseje uma análise mais detalhada e um controle mais preciso do processo. Dentro da literatura são descritos processos para modelagem de sistemas elétricos, mecânicos, de controle de temperatura e nível. Desse modo, nessa sessão, será abordado o procedimento para se obter a função de transferência e o diagrama de blocos de um sistema de controle de nível e temperatura de um tanque tubular circular. Diferentes modelos de tanques ou sistemas ocorrem de maneira similar.

2.2.1 Sistemas de nível de líquidos

A resistência R_f ao fluxo de líquido nessa tubulação ou restrição é definida como a variação na diferença de nível (a diferença entre o nível dos líquidos nos dois reservatórios)

necessária para causar a variação unitária na vazão.

A capacitância C_f de um reservatório é definida como a variação na quantidade de líquido armazenado necessária para causar uma mudança unitária no potencial (altura). (O potencial é a grandeza que indica o nível de energia do sistema.)

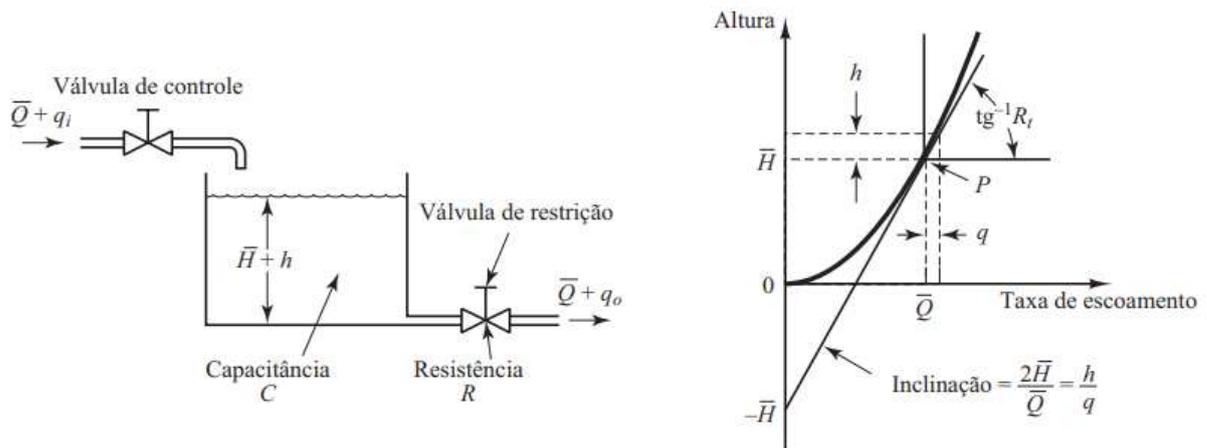


Figura 2 – Esquema de nível e curva de altura vs vazão

Fonte: (OGATA, 2010)

Onde,

- \bar{Q} é a vazão do fluido em regime permanente, m^3/s .
- q_i é uma pequena variação na vazão de entrada, m^3/s .
- q_o é uma pequena variação na vazão de saída, m^3/s .
- \bar{H} é o nível do nível em regime permanente, m.
- h pequeno desvio de nível a partir de seu valor de regime permanente, m.

$$R_f = \frac{\text{Variação na diferença de nível, } m}{\text{Variação na vazão em volume, } m^3/s} \quad (1)$$

$$C_f = \frac{\text{Variação na quantidade de líquido, } m^3}{\text{Variação na altura, } m} \quad (2)$$

Considerando que a vazão de escoamento de um líquido é determinado pela diferença de pressão entre dois pontos, a variação na pressão de saída P pode ser definida como:

$$\Delta P = R_f Q \quad (3)$$

Dessa forma a vazão de escoamento através de uma válvula proporcional considerada de fluxo turbulento, caracterizado não linear pela presença da raiz quadrada da altura dada por:

$$Q = KH \quad (4)$$

Onde,

- Q é a vazão, m^3/s
- H é o nível do nível em regime permanente, m.
- K é o coeficiente, m^2/s .

Assim, para encontrar R_f :

$$R_f = \frac{dH}{dQ} \quad (5)$$

Manipulando as equações Eq. 5:

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \quad (6)$$

Isolando K de 4 e substituindo em Eq. 6 obtemos:

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q} \quad (7)$$

Assim,

$$R_f = \frac{2H}{Q} \quad (8)$$

Para se encontrar a capacitância do reservatório é importante considerar que o sistema é linear ou linearizado e que o fluxo de entrada menos o fluxo de saída durante um pequeno intervalo de tempo dt é igual à quantidade adicional armazenada no reservatório. (OGATA, 2010)

Também é importante observar como cita Ogata (2010), a capacidade (m^3) e a capacitância (m^2) são diferentes. A capacitância do reservatório é igual à sua secção transversal. Se esta for constante, a capacitância será constante para qualquer altura do nível.

Dessa forma,

$$Cdh = (q_i - q_o)dt \quad (9)$$

A partir da definição de resistência, a relação entre q_o e h dado pela Eq. 5 é:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (10)$$

Obtendo, então, a constante de tempo RC do sistema e tomando a transformada de Laplace de ambos os membros da Equação 10 e considerando condições iniciais nulas, encontra-se:

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_i(s) \quad (11)$$

Logo, considerando q_i a entrada e h , a saída, é possível obter a função de transferência:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (12)$$

Agora, se q_o for admitida como a saída e tendo como entrada q_i , pode-se encontrar a seguinte função de transferência relacionando a entrada com a saída.

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (13)$$

Considerando,

$$Q_o(s) = \frac{1}{R}H(s) \quad (14)$$

2.2.2 Sistemas térmicos

Sistemas térmicos são aqueles que envolvem transferência de calor de uma substância para outra. Os sistemas térmicos podem ser analisados em termos de resistência e capacitância, embora a resistência térmica e a capacitância térmica não possam ser representadas com precisão como parâmetros concentrados, uma vez que estas, normalmente, são distribuídas nas substâncias. Para uma análise mais precisa, devem ser utilizados os modelos de parâmetros distribuídos (OGATA, 2010).

Considerando o modelo de aquecimento de tanques simplificado é ideal que o reservatório, como cita Ogata (2010), seja isolado para eliminar as perdas de calor para o ar em torno do sistema. Além disso, supõe-se que não haja armazenamento de calor no material de isolamento e que o líquido do reservatório seja perfeitamente misturado, de modo que a temperatura seja uniforme. Assim, utiliza-se um único valor para descrever a temperatura do líquido no reservatório e no fluxo do líquido de saída.

Onde a resistência térmica R_t e a capacitância térmica C_t para sistemas de condução ou convecção é dada por pelas Equações 16 e 17 onde como definido,

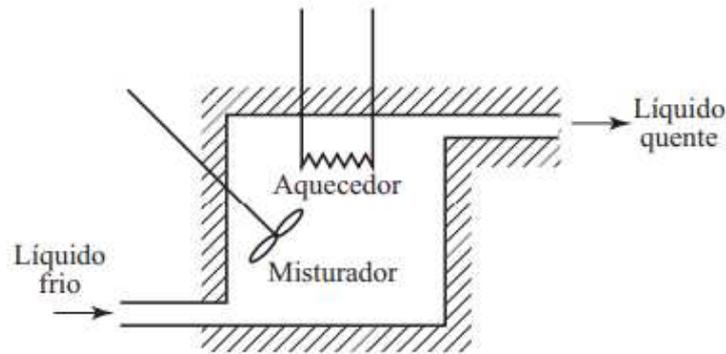


Figura 3 – Modelo de aquecimento de tanques.

Fonte: Adaptado de Ogata (2010)

- Θ_i = temperatura em regime permanente do líquido de entrada, °C
- Θ_o = temperatura em regime permanente do líquido de saída, °C
- G = vazão em massa do líquido em regime permanente, kg/s
- M = massa do líquido no reservatório, kg
- c = calor específico do líquido, kcal/kg °C
- \bar{H} = taxa de entrada de calor em regime permanente, kcal/s

Contudo, podemos então manipular para encontrar,

$$h_o = Gc\theta \quad (15)$$

$$R_t = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc} \quad (16)$$

$$C_t = Mc \quad (17)$$

A equação de balanço de calor para esse sistema é:

$$C_t \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_o \quad (18)$$

essa podendo ser reescrita como:

$$R_t C_t \frac{d\theta}{dt} = R_t h_i \quad (19)$$

Dessa forma a constante de tempo do sistema é igual a resistência térmica vezes a capacitância térmica. A função de transferência relacionando a temperatura de saída e a variação na taxa de calor é dada por:

$$\frac{\Theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R_t}{R_t C_t s + 1} \quad (20)$$

2.3 CONTROLADORES PID

Atualmente há uma grande variedade de técnicas de controle de processos industriais ou não. Neste trabalho o método utilizado será o controle PID devido a sua grande utilização na indústria.

Como cita Bayer e Araujo (2010), controladores PID são largamente utilizados uma vez que são capazes de solucionar a grande maioria dos problemas de controle que surgem em processos industriais. Essa expressiva utilização deve-se ao fato desse controlador ser de fácil implementação, baixo custo e versátil na capacidade de estabilizar os comportamentos transitório e de regime permanente dos processos sob controle

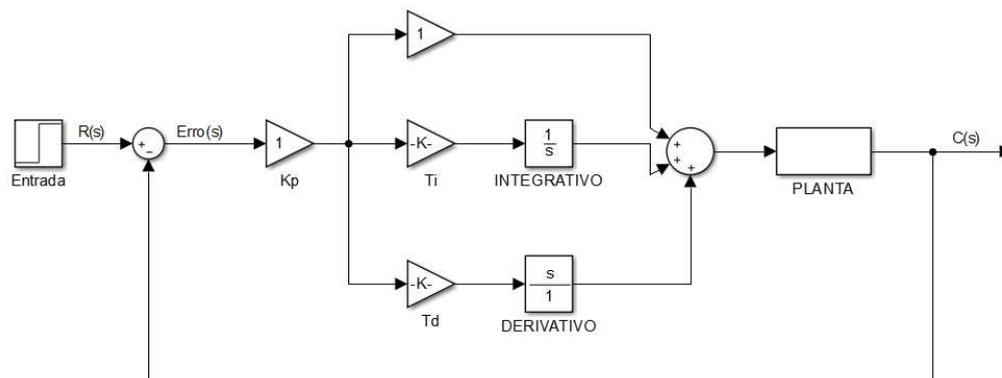


Figura 4 – Diagrama de Blocos controlador PID.

Fonte: Autoria própria

Como visto na Figura 4 existem três parcelas ajustáveis para se construir um Controlador PID, Proporcional, Integral e Derivativa.

A ação proporcional é uma ação que atua conforme o valor do erro. Quando comparado os valores de entrada a saída, essa diferença, também chamada de erro, recebe um ganho K_p

por meio da ação proporcional respondendo imediatamente quando detecta um sinal de erro e daí inicia sua ação corretiva. É um dos tipos de controle mais fáceis de serem utilizados, pois requer somente o ajuste do ganho.

Para correção de erros em regime permanente é utilizado a ação integral. Esta atua no processo ao longo do tempo, deixando o sistema mais lento, enquanto a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor mensurado persistir. A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro de off-set em regime permanente, e a adoção de um tempo integral excessivamente longo pode levar o processo à instabilidade.

A ação derivativa atua na variável manipulada proporcionalmente à velocidade de variação do desvio. O objetivo é diminuir a velocidade das variações de variável controlada, evitando que se eleve ou se abaixe muito rapidamente. Dessa forma pode ser considerada parte de um controle preditivo, que antecipa eventos na resposta.

É interessante ressaltar que atribuindo valores nulos ao tempo integral e ao tempo derivativo torna suas ações nulas, porém essas não podem ficar independentes de K_p . Logo, as ações integral e diferencial não são, isoladamente, técnicas de controle, pois não podem ser empregadas estando separadas de uma ação proporcional (BAYER; ARAUJO, 2010).

2.4 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS

A literatura especializada apresenta definições para este equipamento. De acordo com Petruzella (2014), os Controladores Lógicos Programáveis (CLP) são hoje a tecnologia de controle de processos industriais mais amplamente utilizada.

De acordo com Silveira e Santos (2009) as variáveis de entrada são sinais externos recebidos pelo CLP, os quais podem ser oriundos de fontes pertencentes ao processo controlado ou de comandos gerados pelo operador. Tais sinais são gerados por dispositivos como sensores diversos, chaves, botoeiras, entre outros. Já os dispositivos de saída são elementos controlados por cada ponto de saída do CLP, tais pontos podem servir de intenção direta no processo controlado por acionamento próprio, ou também, para sinalização de estados em painéis.

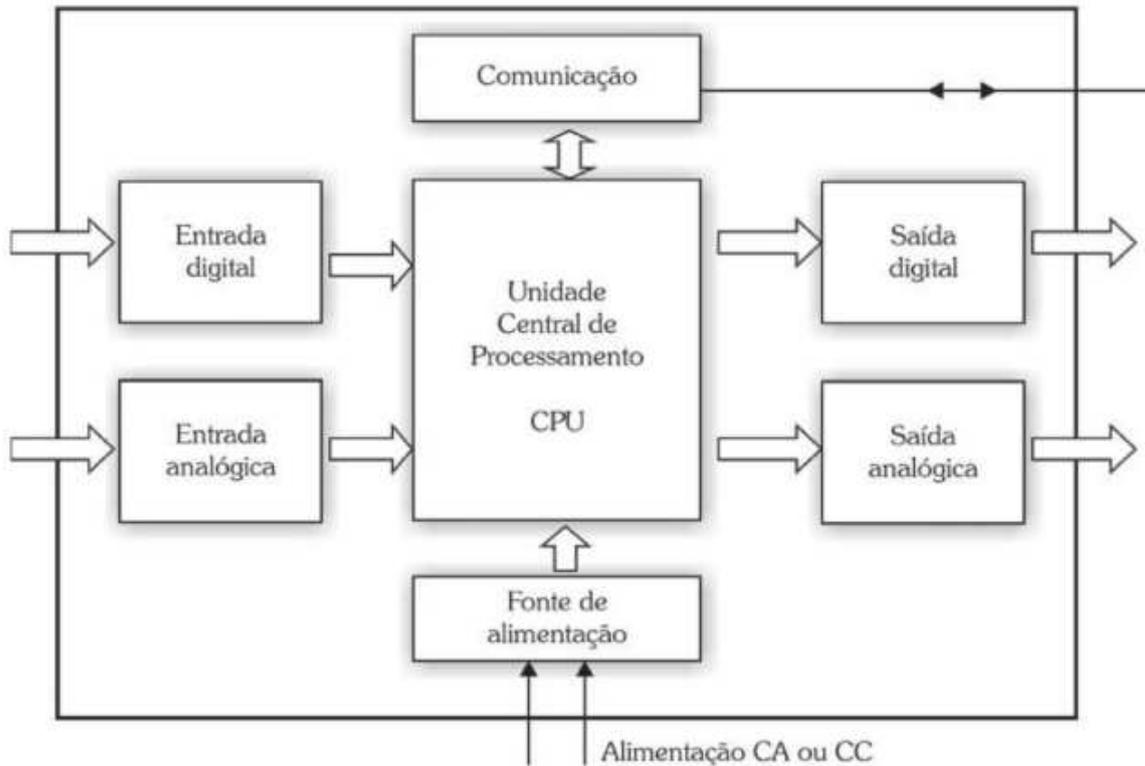


Figura 5 – Diagrama de Blocos do CLP.

Fonte: (CAMARGO, 2014)

Um programa é uma sequência específica de instruções selecionadas de um conjunto de opções oferecidas pelo controlador em uso e, que efetuem as ações de controle desejadas, ativando ou não as memórias internas e os pontos de saída do CLP a partir de monitoração do estado das mesmas memórias internas e/ou dos pontos de entrada do CLP. (SILVEIRA; SANTOS, 2009)

2.4.1 Tipos de CLPs

Como descreve Franchi e Camargo (2021), de acordo com a disposição dos elementos constituintes dos CLPs. São classificados como compactos e modulares.

Os CLPs compactos possuem incorporados em uma única unidade a fonte de alimentação, a CPU e os módulos de entradas e saídas (IOs), ficando o usuário com acesso somente aos conectores IOs. Atualmente, suportam grande variedade de módulos especiais como expansões IOs, conectores rápidos, módulos de comunicação e IHM.

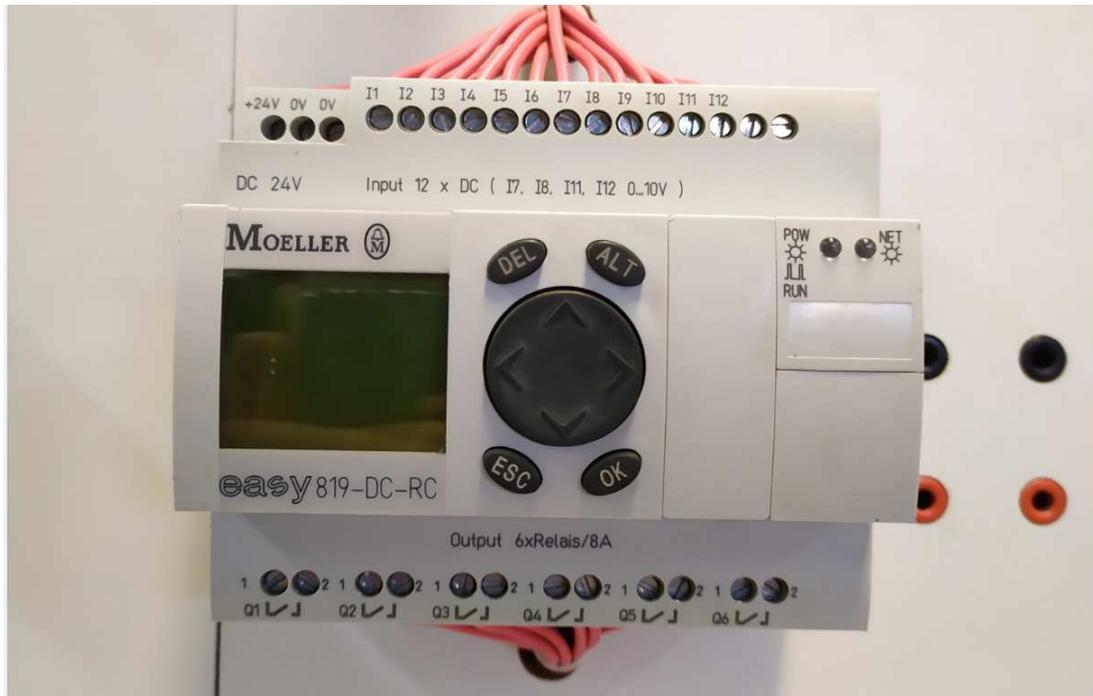


Figura 6 – CLP compacto Moeller disponível no laboratório do campus.

Fonte: Autoria própria

Já os CLPs modulares são compostos por uma estrutura modular, em que cada módulo executa determinada função. Tendo processador e memória em um único módulo com fonte separada ou, então, até três partes juntas em um único gabinete. O sistema de entradas e saídas (IOs) é decomposto em módulos de acordo com suas características. Eles são colocados em posições predefinidas (racks) formando uma configuração de médio e grande porte.

Dessa forma temos a seguinte configuração comum mostrada na Figura 7 comparada a Figura 8 com o CLP XC-CPU101 disponível no laboratório da universidade.

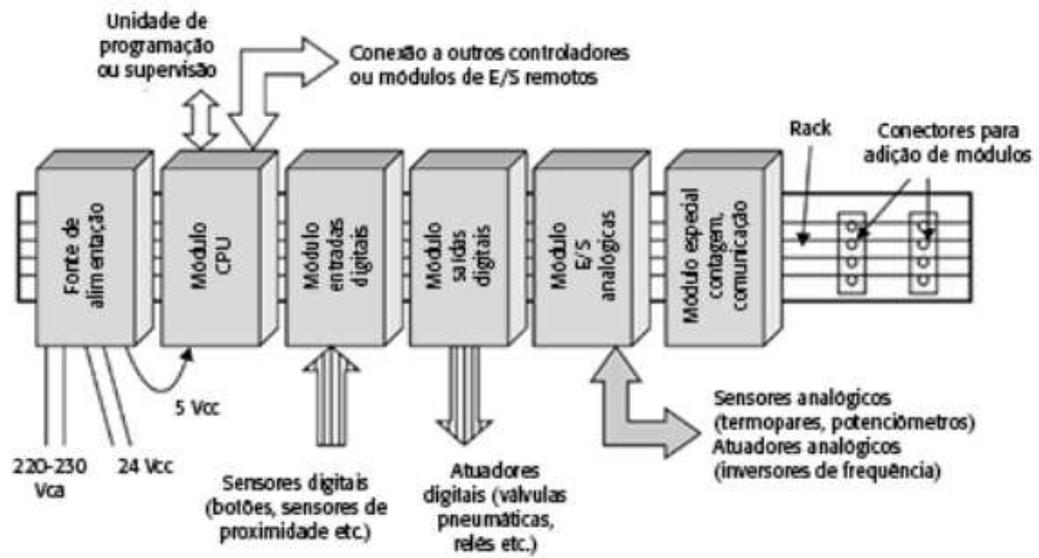


Figura 7 – Estrutura CLP modular.

Fonte: (FRANCHI; CAMARGO, 2021)



Figura 8 – CLP modular disponível no laboratório do campus.

Fonte: Autoria Própria

2.5 ELEMENTOS SENSORES

Os sensores são largamente aplicados nas estações de trabalho e constituem o único meio prático de operar um sistema de fabricação e controlar o seu desempenho continuamente. (SOLOMAN, 2012)

Uma primeira definição seria dizer que os sensores são os responsáveis por traduzir sinais, vindos dos fenômenos físicos, em informações compreensíveis para o controlador do processo. Assim como Camargo (2014) expressa, sempre que se deseje detectar a presença ou a posição de objetos, temperatura, vazão e pressão de um líquido, bem como qualquer outra grandeza física que seja importante, os sensores são utilizados.

Thomazini e Alburquerque (2011) também expressa que sensores nem sempre tem as características elétricas necessárias para ser utilizado em um sistema de controle. Normalmente o sinal de saída deve ser manipulado antes da sua leitura no sistema de controle, isso geralmente é realizado com um circuito de interface para produção de um sinal que possa ser lido pelo controlador.

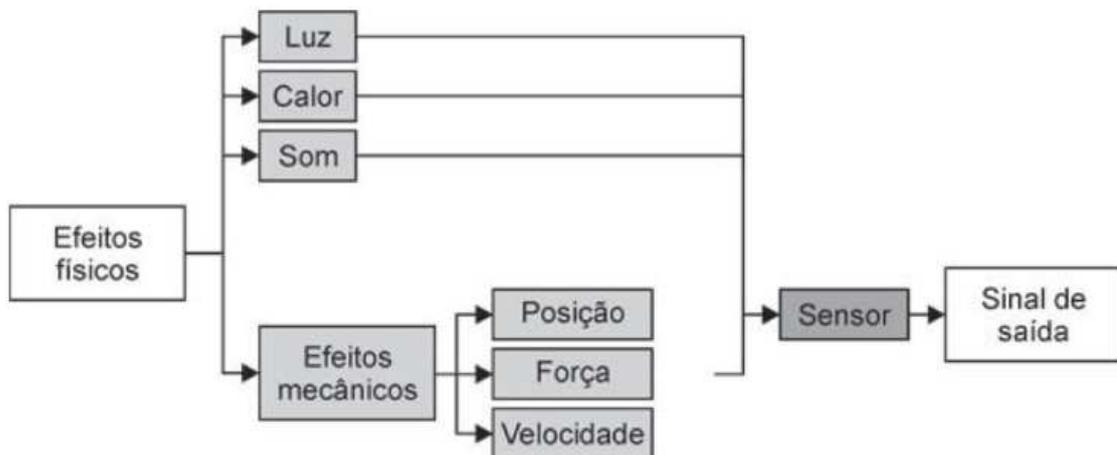


Figura 9 – Ilustração das formas de energia de um sensor.

Fonte: (THOMAZINI; ALBURQUERQUE, 2011)

Como cita Thomazini e Alburquerque (2011), Transdutor é a denominação que recebe um dispositivo completo, que contém o sensor, usado para transformar uma grandeza qualquer em outra que pode ser utilizada nos dispositivos de controle. Um transdutor pode ser considerado uma interface às formas de energia do ambiente e o circuito de controle ou, eventualmente, entre o controle e o atuador.

Os transdutores transformam uma grandeza física (temperatura, pressão etc.) em um sinal de tensão ou corrente que pode ser facilmente interpretado por um sistema de controle.

Por conveniência nas análises, é interessante classificar os sensores pertinentes ao trabalho em suas aplicações

- **Sensores de Nível:** Os sensores de nível são utilizados para o controle de líquidos ou grãos sólidos, contidos em reservatórios, silos, tanques abertos, tanques pressurizados na indústria.
- **Sensores de Temperatura:** Utilizados em indústrias, veículos, eletrodomésticos e instalações prediais os sensores de temperatura podem ser termistores, termopares, termorresistivos, par bimetálico, sensores eletrônicos e pirômetros.
- **Sensores de Vazão:** Vazão representa a quantidade de líquidos, gases ou vapores que passa em um determinado ponto, durante um certo período de tempo. Pode ser medida sob a forma de vazão volumétrica (quantidade em volume que escoar através de certa secção em um intervalo de tempo dado em m³/h, litro/min, Nm³/h etc.)
- **Sensores de Pressão:** Os sensores de pressão mais utilizados em aplicações industriais, como células de carga, cristal piezoelétrico, tubos de Bourdon, sensores eletrônicos integrados e capacitivos.

2.5.1 Transdutores e Transmissores

Os transdutores transformam uma grandeza física (temperatura, pressão etc.) em um sinal de tensão ou corrente que pode ser facilmente interpretado por um sistema de controle. Muitas vezes os termos “sensor” e “transdutor” são usados indistintamente. Neste caso, o transdutor é o instrumento completo que engloba sensor e todos os circuitos de interface capazes de serem utilizados numa aplicação industrial.

Transmissor é o dispositivo que prepara o sinal de saída de um transdutor para utilização a distância, fazendo certas adequações ao sinal, as quais se chamam padrões de transmissões de sinais. Para transmissão de sinais digitais utilizam-se protocolos de comunicação para redes industriais (fieldbus). (LUGLI; SANTOS, 2019)



Figura 10 – Transmissor de temperatura 0-10Vdc disponível no laboratório do campus.

Fonte: Autoria própria

2.6 COMUNICAÇÃO OPC

Redes industriais e de computadores são construídas baseadas no modelo OSI. Como cita Forouzan e Mosharraf (2013), o modelo OSI é uma estrutura em camadas para a concepção de sistemas de rede que permitam a comunicação entre todos os tipos de sistemas computacionais. Sendo constituído por sete camadas separadas, porém relacionadas, cada uma das quais definindo uma parte do processo de transferência de informação ao longo de uma rede.



Figura 11 – Modelo OSI.

Fonte: (FOROUZAN; MOSHARRAF, 2013)

Um padrão de interoperabilidade para a troca de dados segura e confiável no espaço de automação industrial e em outras indústrias é a comunicação OPC. Este permite uma comunicação entre um cliente compatível com OPC que pode interagir com qualquer servidor compatível com OPC. A Figura 12

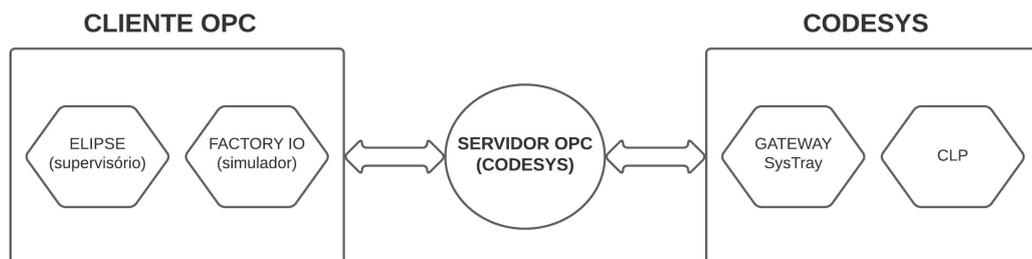


Figura 12 – Fluxograma comunicação OPC.

Fonte: Autoria própria

2.7 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

A importância de um sistema supervisor SCADA é referência quando o assunto é um processo industrial. Este recurso permite ao operador a visualização, de forma clara e objetiva, das variáveis de entrada e os status das saídas. Saber como estão as condições operativas e controlar as variáveis envolvidas é de suma importância para que, como um todo, as etapas de um mesmo processo ocorram corretamente.

Este *software* é um intermediador entre quem deseja realizar a atuação e o dispositivo necessário para a mesma, dessa forma, ao realizar uma ação de comando o software se comunica com o CLP e este retornará a leitura ou efetuará uma ação no processo. Um sistema supervisor que mostra leituras de nível e temperatura na planta do processo é mostrado na Figura 13.

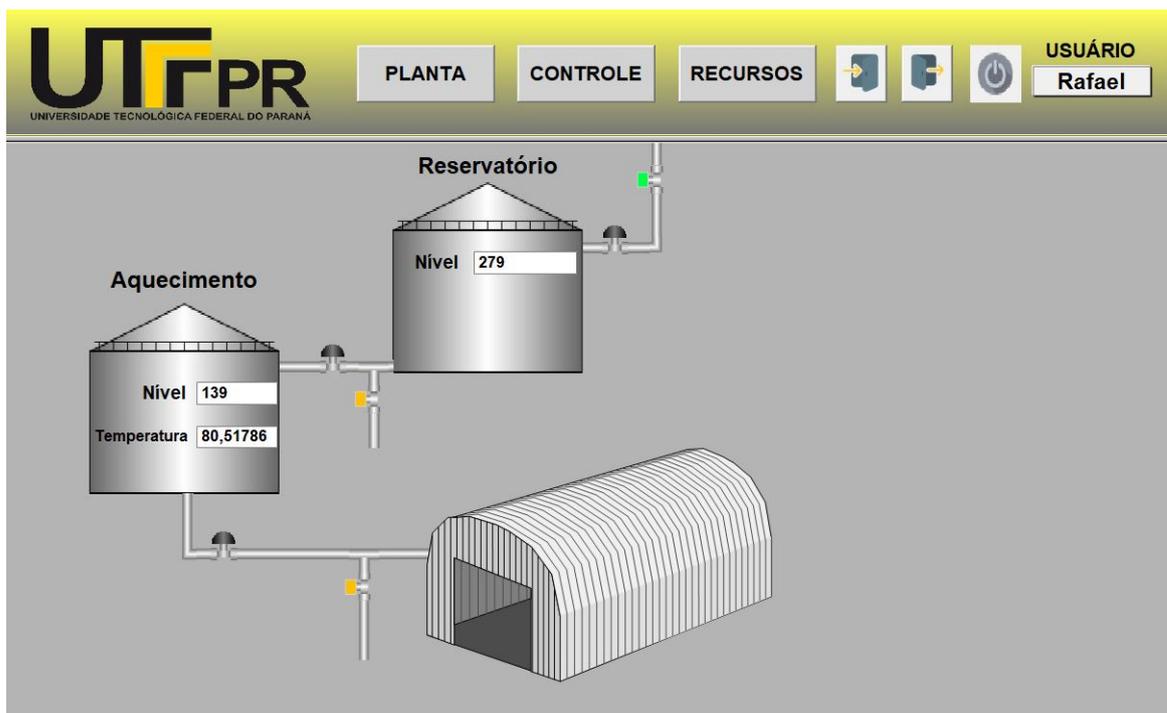


Figura 13 – Supervisor para controle de nível e temperatura.

Fonte: Autoria própria

Novamente Camargo (2014) diz em sua obra algumas características de projeto funcional de um sistema de controle ter um dispositivo de hardware ou software em que há uma responsabilidade em específico com um mínimo de efeito sob outras funcionalidades. As principais funções de sistemas SCADA são:

- Funções de supervisão são todas as funções de monitoramento do processo, tais como:

sinóticos animados, gráficos de tendência de variáveis analógicas e digitais, relatórios em vídeo e impresso etc.

- Funções de operação relacionam, hoje em dia, os sistemas SCADA e sua primazia de uso com relação às funções das mesas de controle. As funções de operação são: ligar e desligar equipamentos e sequencia de equipamentos, operação de malhas PID, mudança do modo de operação de equipamentos etc.
- Funções de controle como, por exemplo, o controle DDC (Digital Direct Control). Alguns sistemas de supervisão possuem uma linguagem que permite definir diretamente ações de controle, sem depender de um nível intermediário de controle representado por remotas inteligentes.

Todas as operações de entrada e saída são executadas diretamente por meio de cartões de I/O ligados diretamente ao barramento do micro, ou por remotas mais simples. Os dados são amostrados, um algoritmo de controle como um controlador PID, por exemplo, é executado, e a saída é aplicada ao processo (ação direta sobre uma variável manipulada) Isso contudo, está condicionado à velocidade do processo. Em certos casos, esse tipo de solução não é aconselhável em virtude de requisitos de confiabilidade.

Essa comunicação, como já vista, necessita que todos os componentes conversem em uma mesma linguagem. No caso do CLP é necessário um drive, disponibilizado pela Elipse, para que o software consiga acessar seus registradores e fazer uma atuação a distância sem que alguém tenha que se deslocar ao local da atuação. Logo, em caso de desligamentos repentinos ou pane no sistema, o próprio supervisor consegue retomar o processo sem que uma equipe tenha que ir até o local.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SIMULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E PROCESSOS

Devido ao alto custo de aquisição de materiais e o período de inacessibilidade dos laboratórios, a decisão de utilizar softwares de simulação se tornaram necessários à execução do trabalho. Esta opção se mostra uma alternativa para testes e ferramenta didática para ensino de automação.

3.1.1 Simulação do Processo por Virtualização

Dentre as opções de equipamentos à disposição do projeto como sensores, CLP's e softwares disponíveis, cabe ao projetista a análise de viabilidade e estrutura do projeto. Para o trabalho em questão foi virtualizado em um computador pessoal o relé programável(CLP) pelo software CodeSys. Esse software possui um sistema de virtualização interno, onde o computador se comporta como um CLP, chamado CODESYS Control Win Sys Tray.

Dessa forma, a própria máquina onde é programado as rotinas serve como Unidade de Processamento para a execução do projeto. Nesse caso, a inexistência de entradas e saídas físicas nos limitam a utilização de protocolos de rede que enviam mensagem aos relés dos atuadores.

Dentre diversos fabricantes presentes no mercado como TIAPortal (Siemens) e Studio5000 (Allen Bradley) foi utilizado a versão gratuita de testes, para melhores fins didáticos, do software Factory IO. Este possibilita a simulação de diversos elementos, assim como visualização do processo em andamento por meio de uma comunicação com o CLP por

uma rede industrial.

Para a comunicação efetiva entre os softwares utilizados, será usado o driver de comunicação OPC. Este é necessário um Servidor OPC e um Cliente OPC. Fabricante do CLP fornecem um meio de criar o servidor em seu software de desenvolvimento como no caso do Codesys. Ao terminar nossa programação é necessário dispor as variáveis de controle como formas de símbolos, que serão lidas como tag's, capazes de serem interpretadas pelos softwares.

3.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS

As ferramentas utilizadas para a elaboração do processo como um todo foram simuladas em um computador pessoal, não necessitando de aquisição de equipamentos, utilização de bancadas de simulação ou do próprio CLP. As etapas, códigos e processos descritos se comportam de maneira semelhante para a utilização em bancada e equipamentos físicos, onde é possível implementar em um sistema real.

Os seguintes recursos computacionais serão utilizados para o desenvolvimento do estudo.

3.2.1 CodeSys

CODESYS: *Software* utilizado para a implementação de rotinas dentro do nosso CLP. O mesmo também possui o *CODESYS Control Win Sys Tray*, ferramenta capaz de virtualizar um CLP no computador pessoal.

A programação de qualquer CLP, independente do fabricante, seguem a IEC 61131-3. Dessa forma, um programa escrito em uma plataforma pode ser testado em outra plataforma de um outro fabricante.

3.2.2 Factory IO

Factory IO: *software* desenvolvido para simulações de ambientes industriais com vasta opções de sensores e atuadores. Utilizado para simulação da estrutura física do trabalho o mesmo simula todo o ambiente.

Dentro deste, possui a simulação de um tanque de nível contendo válvulas de entrada e saída de líquido, sensor de nível capacitivo, medidor de vazão na descarga. A lista de itens completa se encontra na Tabela 1 retirada de (FACTORYI/O, 2021)..

Tabela 1 – Configurações analógicas do tanque.

Tag	I/O	Tipo	Descrição
Válvula de enchimento	Output	Float	Posicionamento válvula de enchimento [0, 10]V.
Válvula de descarga	Output	Float	Posicionamento válvula de descarga [0, 10]V.
Medidor de nível	Input	Float	Valor do medidor de nível [0, 10]V.
Medidor de fluxo	Input	Float	Valor do medidor de fluxo [0, 10]V.

Fonte: (FACTORYI/O, 2021)

Demais informações sobre o tanque:

- Altura: 3m
- Diâmetro: 2m
- Raio do tubo de descarga: 0,125 m
- Máx. vazão de entrada: 0,25 m³/s
- Máx. fluxo de saída: 0,3543 m³/s
- Sensores capacitivos podem detectar líquido

3.2.3 Elipse E3

Software genuinamente brasileiro desenvolvido para aplicações SCADA e grande utilização pela industria mundial. Neste foi desenvolvido todo sistema de monitoração, gráficos, alarmes e login de usuários.

A Elipse possui drives de comunicação para os mais diversos tipos de protocolos existentes no mercado, permitindo a conexão com CLPs, SDCDs, controladores, relés de

proteção e medidores. Além do drive OPC utilizado para comunicação entre os *softwares* utilizados neste trabalho.

No site da empresa Elipse (2021), é possível obter algumas informações sobre as ferramentas presentes no software as quais serão utilizadas ao longe deste trabalho como o E3 Studio. Uma ferramenta única de configuração do sistema, servindo como plataforma universal de desenvolvimento. Possui um ambiente moderno e amigável, incluindo desde a configuração da comunicação até editores de scripts e de gráficos para a criação das telas de operação

E3 Server é o servidor de aplicações onde são gerenciados os principais processos do sistema, além de realizar a redundância e sincronismo de bases de dados. Oferece grande robustez e estabilidade, permitindo que as informações gráficas e dados sejam enviados ininterruptamente aos clientes (Viewers) em qualquer local.

Da mesma maneira a Elipse ainda disponibiliza uma interface de operação com o usuário, o E3 Viewer. Essa interface permite visualizar e operar em qualquer computador, a aplicação que está no servidor, podendo ser executado tanto na intranet quanto na internet, via *browser*. Não é necessária a instalação do aplicativo (projeto) na máquina cliente, pois todos os componentes, telas e bibliotecas são baixados do servidor e registrados ou atualizados automaticamente.

3.3 METODOLOGIA

O sistema de aquecimento simulado é do tipo resistência, controlado por um PID, submersa no tanque. Na construção do programa do CLP, existe formas de se implementar o controle desta variável, temperatura, por meio de sub-rotinas. O processo para a implementação deste controle é visto na Figura 18 onde os parâmetros Assim, é necessário encontrar o valor dos parâmetros a serem implementados pelo PID.

Devido as limitações, foi elaborado uma função de aquecimento independente que altera a variável temperatura. Considerado que leituras de temperatura reais de tanque são realizadas na saída do transdutor, a leitura de temperatura do nosso processo será simulada de 0 a 10Vdc, medida na qual é possível se obter na saída do transdutor. Na Figura 10 é possível verificar a ligação de um transdutor real de temperatura.

Dessa forma, tendo a planta do processo, é possível construir o layout da tela de supervisão, para isso é utilizado o E3 Studio colocando primeiramente as figuras que representam nossa estrutura física e sua disposição, sua indicação, status de operação e gráficos.

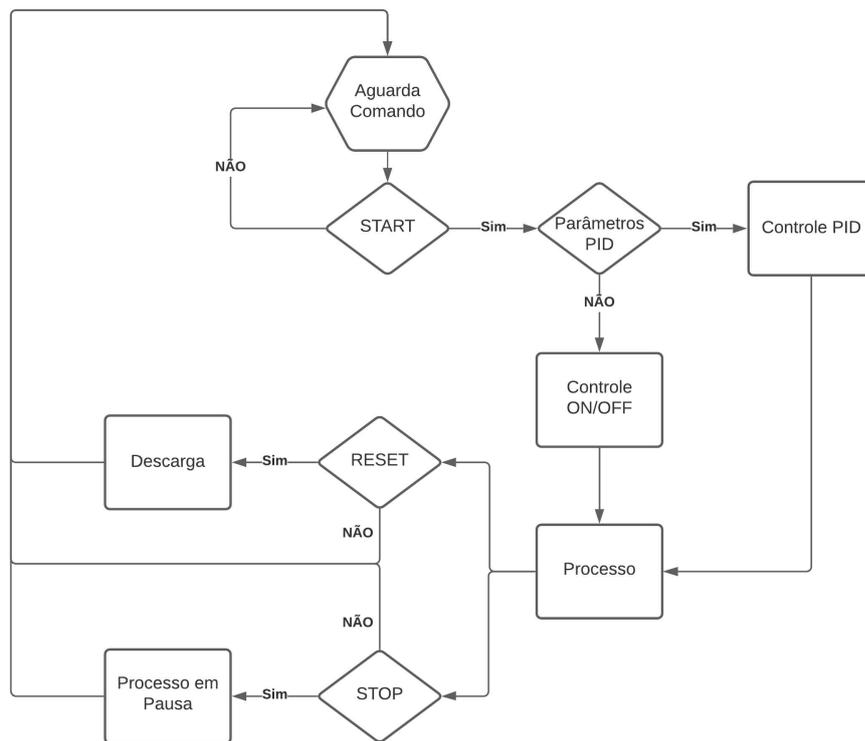


Figura 14 – Fluxograma de funcionamento.

Fonte: Autoria própria

3.3.1 Elaboração da estrutura física

O processo se resume em dois tanques, onde o superior se comporta como reservatório de líquido e o segundo como boiler de aquecimento. Para que o sistema de aquecimento entre em operação é necessário que haja um nível mínimo dentro no reservatório, capaz de encerrar o processo em caso de falhas no fornecimento primário de água. Na Figura 15 é possível visualizar a planta do processo.

O processo de simulado aquecimento pelo *software* utilizado é composto por duas válvulas proporcionais, controladas de 0 a 10V, uma localizada na parte superior do tanque para controle de entrada da líquido e a inferior, responsável pela simulação de consumo de água quente pela indústria.

Os dois tanques, reservatório de líquido e tanque de aquecimento, possuem os mesmos componentes mas utilizações diferentes. A saída de líquido do reservatório é ligada na entrada de líquido do tanque de aquecimento, dessa forma a simulação atua drenando a água do reservatório para o tanque de aquecimento.



Figura 15 – Planta física simulada.

Fonte: Autoria própria

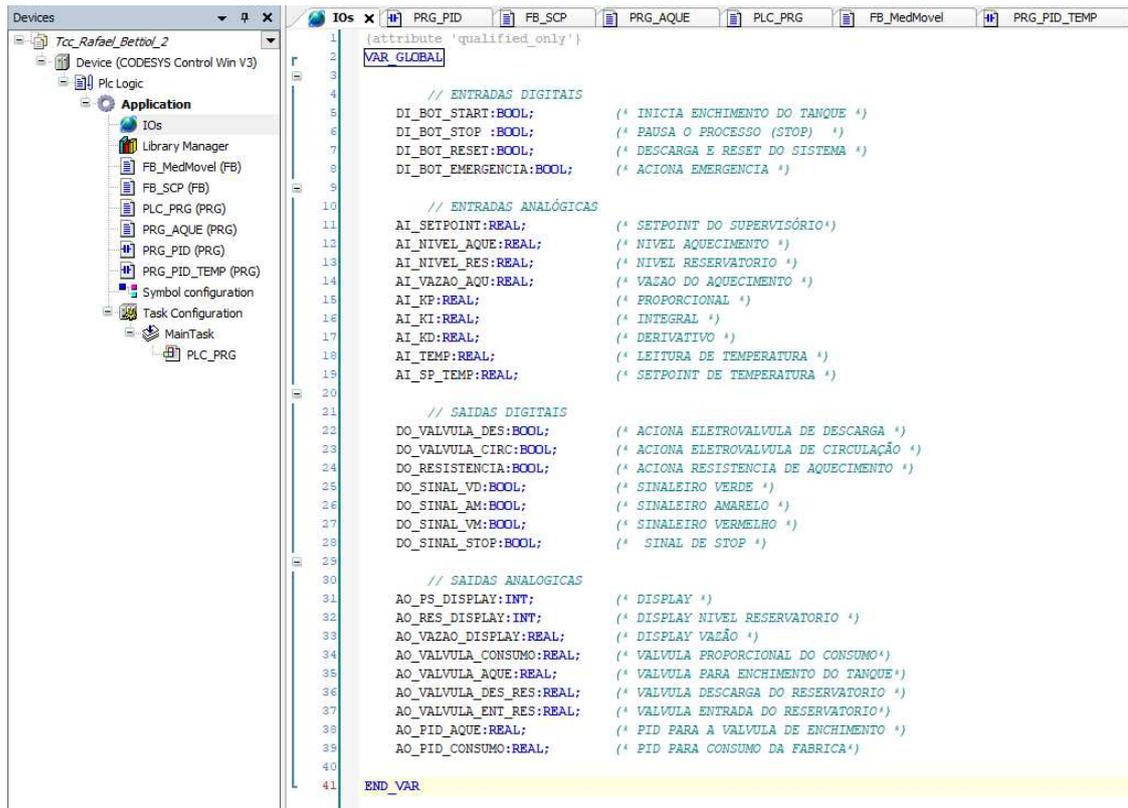
3.3.2 Implementação do código no CodeSys

Boas praticas de programação são essenciais para que o código fique limpo e bem organizado. Seguir padrões e utilizar recursos da plataforma é fundamental para que se obtenha satisfação na implementação. Por esse motivo foi utilizado funções com aplicações específicas para cada situação.

Na Figura 16 é mostrado a definição de variáveis globais. A esquerda da janela do software é mostrada a lista de POU's construídas para melhor execução.

A separação de variáveis utilizada por notação húngara facilita a manutenção e construção do código em si. O recurso de criação de variáveis globais presentes nas plataformas auxiliam na chamada da variável dentro de qualquer função. As variáveis globais podem ser entendidas como as variáveis dos equipamentos de campo como os elementos sensores e atuadores.

É dentro das POU's onde são criadas funções e variáveis auxiliares capazes não interferindo o programa principal e a leitura dos IOs. Dessa forma, variáveis locais não são compartilhadas com o sistema supervisorio nem alocadas em IOs físicas.



```

1 [attribute 'qualified only']
2 VAR GLOBAL
3
4 // ENTRADAS DIGITAIS
5 DI BOT_START:BOOL; (* INICIA ENCHIMENTO DO TANQUE *)
6 DI BOT_STOP :BOOL; (* PAUSA O PROCESSO (STOP) *)
7 DI BOT_RESET:BOOL; (* DESCARGA E RESET DO SISTEMA *)
8 DI BOT_EMERGENCIA:BOOL; (* ACIONA EMERGENCIA *)
9
10 // ENTRADAS ANALÓGICAS
11 AI SETPOINT:REAL; (* SETPOINT DO SUPERVISÓRIO *)
12 AI NIVEL_AQUE:REAL; (* NIVEL AQUECIMENTO *)
13 AI NIVEL_RES:REAL; (* NIVEL RESERVATORIO *)
14 AI VAZAO_AQU:REAL; (* VAZAO DO AQUECIMENTO *)
15 AI_KP:REAL; (* PROPORCIONAL *)
16 AI_KI:REAL; (* INTEGRAL *)
17 AI_KD:REAL; (* DERIVATIVO *)
18 AI_TEMP:REAL; (* LEITURA DE TEMPERATURA *)
19 AI_SP_TEMP:REAL; (* SETPOINT DE TEMPERATURA *)
20
21 // SAIDAS DIGITAIS
22 DO VALVULA_DES:BOOL; (* ACIONA ELETROVALVULA DE DESCARGA *)
23 DO VALVULA_CIRC:BOOL; (* ACIONA ELETROVALVULA DE CIRCULAÇÃO *)
24 DO RESISTENCIA:BOOL; (* ACIONA RESISTENCIA DE AQUECIMENTO *)
25 DO_SINAL_VD:BOOL; (* SINALEIRO VERDE *)
26 DO_SINAL_AM:BOOL; (* SINALEIRO AMARELO *)
27 DO_SINAL_VM:BOOL; (* SINALEIRO VERMELHO *)
28 DO_SINAL_STOP:BOOL; (* SINAL DE STOP *)
29
30 // SAIDAS ANALOGICAS
31 AO_PS_DISPLAY:INT; (* DISPLAY *)
32 AO_RES_DISPLAY:INT; (* DISPLAY NIVEL RESERVATORIO *)
33 AO_VAZAO_DISPLAY:REAL; (* DISPLAY VAZÃO *)
34 AO_VALVULA_CONSUMO:REAL; (* VALVULA PROPORCIONAL DO CONSUMO *)
35 AO_VALVULA_AQUE:REAL; (* VALVULA PARA ENCHIMENTO DO TANQUE *)
36 AO_VALVULA_DES_RES:REAL; (* VALVULA DESCARGA DO RESERVATORIO *)
37 AO_VALVULA_ENT_RES:REAL; (* VALVULA ENTRADA DO RESERVATORIO *)
38 AO_PID_AQUE:REAL; (* PID PARA A VALVULA DE ENCHIMENTO *)
39 AO_PID_CONSUMO:REAL; (* PID PARA CONSUMO DA FABRICA *)
40
41 END_VAR

```

Figura 16 – POU e variáveis globais utilizadas.

Fonte: Autoria própria

3.3.3 Programas e funções auxiliares

Para uma melhor organização do programa foi elaborado algumas sub-rotinas para que sejam chamadas pela função principal com a finalidade de executar funções específicas, entre essa a execução dos Controladores PID, linearização de variáveis, simulação da funções de aquecimento e filtros de leitura.

Uma importante etapa dentro da construção de um sistema de controle é a linearização e parametrização das variáveis. Os transmissores de campo nos emitem sinais de 0 a 10V, podendo ser sinais digitais por meio de variáveis do tipo WORD, essas devem ser transformadas para que o sistema SCADA interprete de maneira correta. Essa transformação pode ser também efetuada na importação de variáveis como mostrado na Figura 21.

Para essa situação pode ser usada o bloco de funções LIN_TRAFO ou criando uma POU para isso. Neste caso, foi criado a POU FB_SCP. Esta, por meio de uma equação da reta,

```

1  FUNCTION_BLOCK FB_SCP
2  VAR_INPUT
3      /// PARAMETROS DE ENTRADA
4      IN: REAL;
5      IN_MIN: REAL;
6      IN_MAX: REAL;
7      OUT_MIN: REAL;
8      OUT_MAX: REAL;
9  END_VAR
10 VAR_OUTPUT
11     /// PARAMETROS DE SAIDA
12     OUT: REAL;
13 END_VAR
14 VAR

1 // OUT = m*In + b
2 // m = Inclinação = (OUT_MAX - OUT_MIN)/(IN_MAX - IN_MIN)
3 // b = Offset = OUT_MIN - (IN_MIN*m)
4
5 // CALCULO DA INCLINAÇÃO DA RETA
6 IF ((IN_MAX - IN_MIN) <> 0) THEN
7     m := (OUT_MAX - OUT_MIN) / (IN_MAX - IN_MIN);
8 END_IF
9
10 // CALCULO DO OFFSET
11 b := OUT_MIN - (IN_MIN*m);
12
13 // EXPRESSÃO DA TRANSFORMAÇÃO LINEAR
14 OUT := (m*IN) + b;

```

Figura 17 – POU para linearização e transformação.

Fonte: Autoria própria

transforma uma variável de 0 a 10V em variável condizente do processo.

As funções PID para o controle de nível e temperatura foram desenvolvidas em linguagem Ladder pela facilidade de interpretação das variáveis no controlador. A Figura 18 mostra a POU desenvolvida para o controle da abertura da válvula de enchimento do tanque de aquecimento.

Para auxiliar essa POU foi criado um filtro chamado FB_MediaMovel que auxilia na leitura de nível do tanque. Como a utilização do sensor capacitivo as variações são sentidas bruscamente pelo controle, dessa forma o controle proporcional agia de maneira a amplificar essas oscilações transmitindo para a válvula de abertura. Essa amplificava as oscilações dentro do tanque tornando o sistema instável.

O filtro FB_MediaMovel também tornou possível a utilização do controle derivativo do PID onde as oscilações do líquido, similares a ruídos de alta frequência, foram neutralizados pelo filtro. Dessa maneira, a leitura do sensor de nível é filtrada e transmitida para a variável auxiliar Nivel_Media_Filtrado que atua, de fato, no controle.

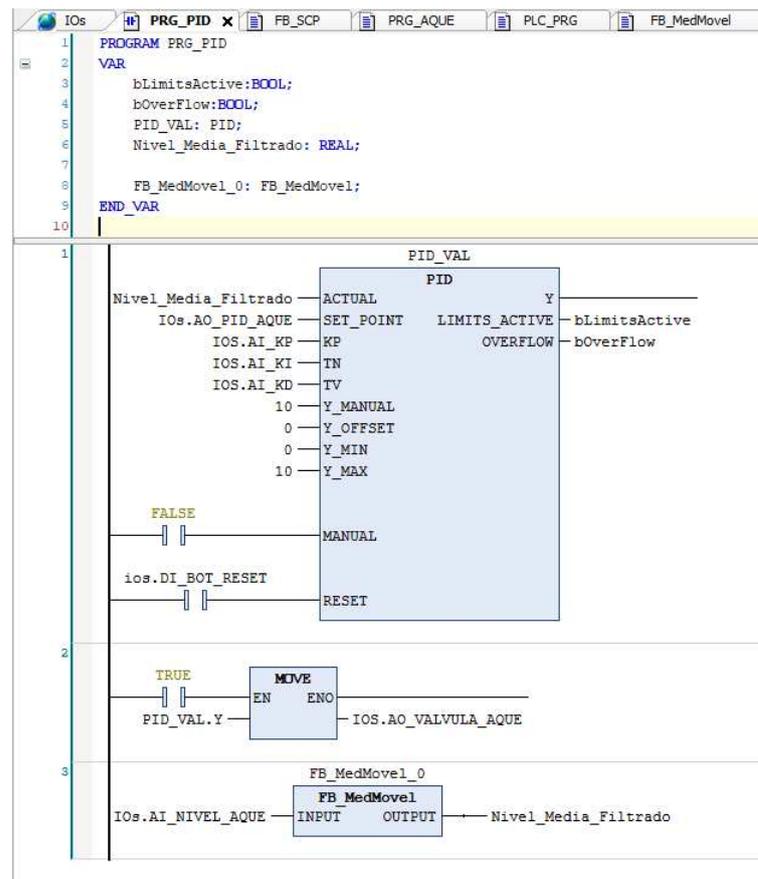


Figura 18 – POUs do controle PID da válvula de entrada do aquecimento.

Fonte: Autoria própria

A Figura 19 mostra a construção do filtro utilizando cem elementos de leitura em um vetor. Como nossa Task é configurada para intervalos cíclicos de 20ms, a interpretação do filtro se dá pela adição de um novo valor de leitura da variável global IOs.AI_NIVEL_AQUE a última posição do vetor, onde é feita a média e escrita na variável Nivel_Nivel_Filtrado.

3.3.4 Estabelecendo comunicação entre os softwares

A conexão das variáveis com o *software* Factory IO se dá de maneira prática e intuitiva. Acessando as configurações de Drivers é possível escolher qual tipo de servidor se deseja conectar. Escolhendo a opção OPC Client Data Acces é possível buscar as variáveis enviadas pelo protocolo OPC do nosso servidor CodeSys Gateway SysTray. É importante verificar se o mesmo se encontra ativo em nossa máquina, com status running.

```

1  FUNCTION_BLOCK FB_MedMove1
2  VAR_INPUT
3    INPUT: REAL;
4  END_VAR
5  VAR_OUTPUT
6    OUTPUT: REAL;
7  END_VAR
8  VAR
9    BUFF: ARRAY[0..99]OF REAL;
10   i:INT;
11   ACUM:LREAL;
12 END_VAR
13
14 FOR i:= 0 TO 98 DO
15   BUFF[i]:= BUFF[i+1];
16 END_FOR
17
18 BUFF[99]:=INPUT;
19 ACUM:= 0;
20
21 FOR i:=0 TO 99 DO
22   ACUM:=ACUM+BUFF[i];
23 END_FOR
24
25 OUTPUT := LREAL_TO_REAL(ACUM/100) ;

```

Figura 19 – Filtro média móvel.

Fonte: Autoria própria

Após encontrar as variáveis compartilhadas basta direcioná-la aos elementos da simulação. Na Figura 20 é visualizada as conexões existentes da simulação. Ao lado esquerdo se encontram os sensores, ao lado direito os atuadores do processo.

A adição do Drivers de comunicação com o servidor OPC para o *software* Elipse E3 também se dá de forma parecida, para isso é necessário identificar na janela *Organizer* a aba Driver e OPC. Assim, inserindo um novo Drive de Comunicação OPC no nosso domínio pode-se importar nossas variáveis para o Elipse E3, que funcionará como Cliente OPC. Consequente, buscar o Servidor OPC e criar uma lista de tags como mostrado na Figura 21.

Para o monitoramento e criação do banco de dados foi utilizado o criado pelo próprio Elipse, arquivo de banco de dados .MDB criado automaticamente ao se construir um banco de dados pelo *Organizer*. Dentro deste é possível a criação de histórico de eventos onde são gravados em uma tabela dentro do banco de dados todos os eventos e alarmes registrados pelo supervisor.

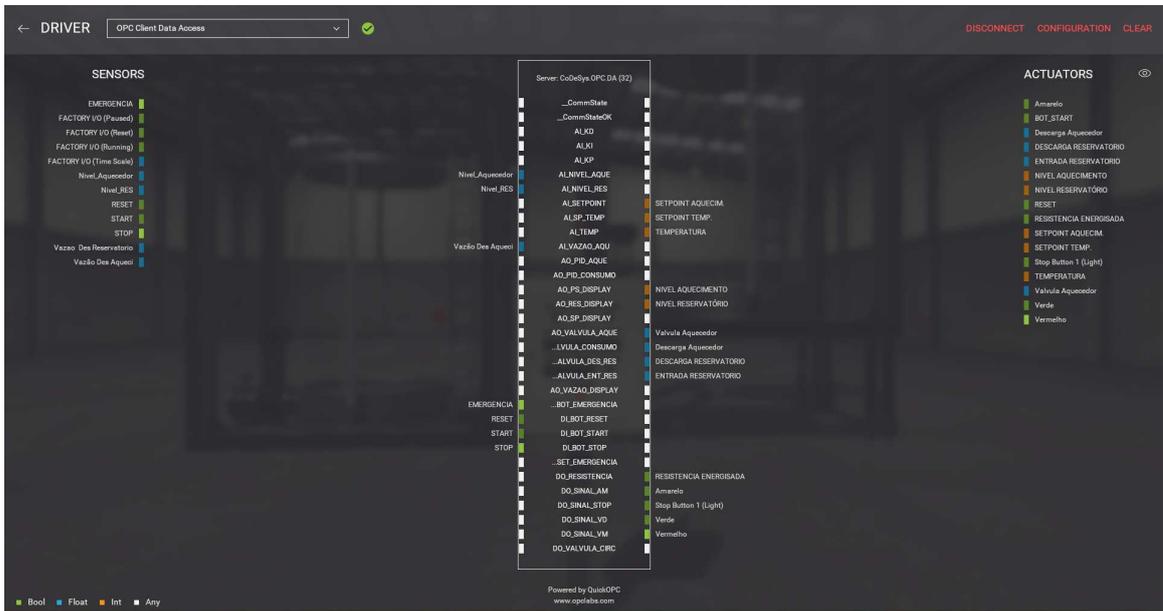


Figura 20 – Alocação de variáveis no software Factory IO.

Fonte: Autoria própria

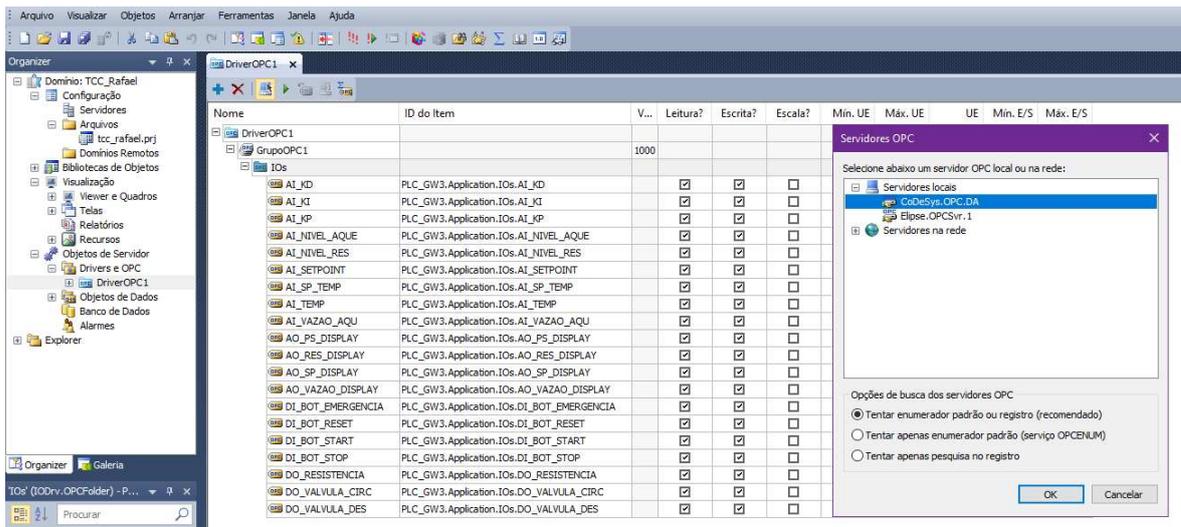


Figura 21 – Drive OPC no software Elipse E3.

Fonte: Autoria própria

Com o acesso ao banco de dados é criado consultas onde permite buscar a informação dentro da tabela e utiliza-las para gerar relatórios, construir gráficos e consultar alarmes. Estes recursos são mostrados na Figura 22.

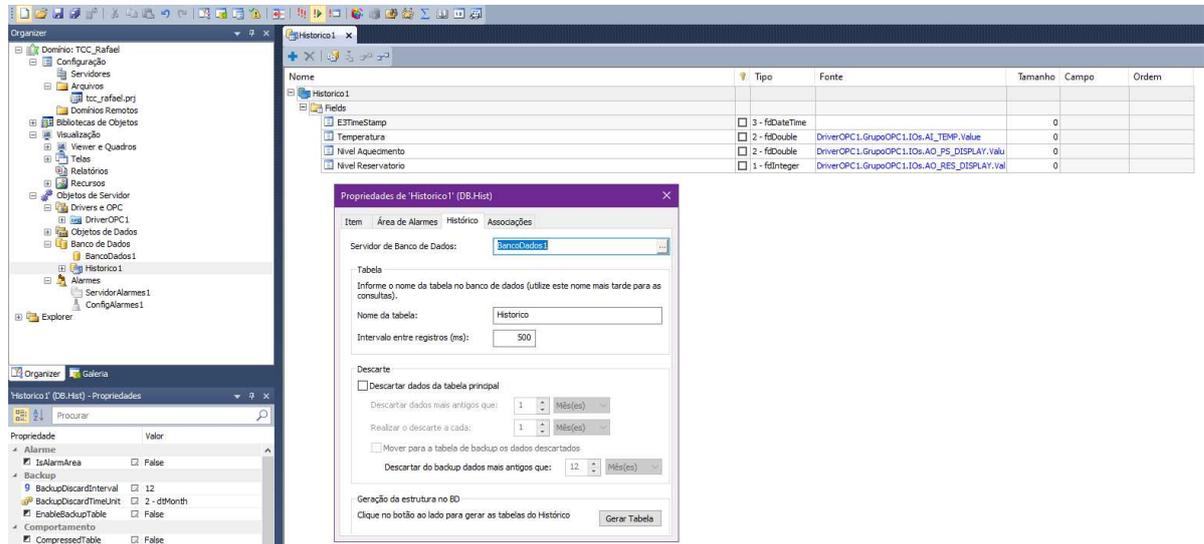


Figura 22 – Criação da tabela Histórico de consulta.

Fonte: Autoria própria

Contudo, para que o sistema funcione de maneira integrada, a tela de controle do sistema supervisorio recebe a atribuição dos *setpoints*, parâmetros PID e ações de comando.

Nesta tela, representada na Figura 23, se encontra os botões Start, Stop, Reset e entrada dos valores setados de nível e temperatura. Nesta tela é possível simular um consumo, abrindo a válvula de descarga do aquecedor, após a temperatura atingir um valor próximo ao *setpoint* de temperatura.

Para melhor conhecimento e domínio dos softwares utilizados, como também obter tutoriais didáticos, foram utilizados a documentação e arquivos de ajuda disponibilizado pelos fabricantes, podendo ser encontrados nos sites Elipse (2021) e também nas documentações do FactoryI/O (2021).

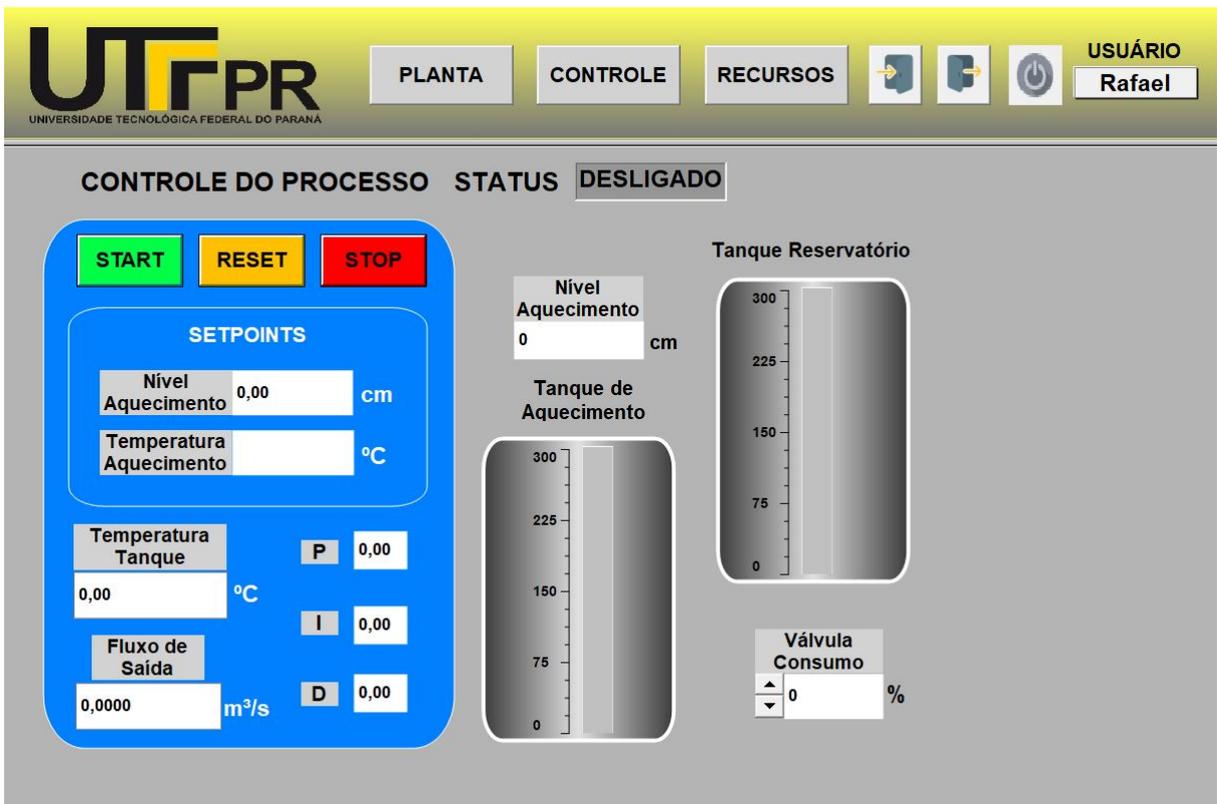


Figura 23 – Tela de controle do supervisor.

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

A análise do comportamento de um controle de nível é um tanto delicado, neste caso, considerando a aplicação de um controle PID em simulação, trata-se de analisar o comportamento da abertura da válvula de entrada com base no consumo baseado em uma função aleatória (gerada baseada em consumo real), além de todo o processo de desenvolvimento do ambiente de interação com o usuário final.

4.1 MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA

A obtenção de um modelo que expressa matematicamente um processo permite a construção de simulações computacionais, estas podem ser grande valia para a construção de controladores, já que podemos projeta-los com base nos modelos. O modelo em questão foi utilizado para avaliar a variação da vazão em função do nível do tanque e construir uma função de aquecimento para o sistema.

4.1.1 Resistência Fluídica

Como a resistência fluídica é encontrada experimentalmente, foi então simulado condições para que fosse encontrado tal parâmetro. Seguindo a limitação dos equipamentos, a faixa de trabalho encontrada foi metade do tanque, onde a vazão de descarga se encontrava menor ou igual a vazão de entrada. Para níveis superiores a 150cm a vazão de descarga era maior que a de entrada.

A tabela com os dados obtidos se encontram na Tabela 2

Tabela 2 – Vazão encontrada em função da altura.

Altura (%)	Altura (cm)	Abertura da válvula	Vazão (m ³ /s)
50	150	100%	0,2500
45	135	100%	0,2370
40	120	100%	0,2243

Fonte: Autoria própria

Com os dados é possível encontrar os valores de resistência fluídicas dos três diferentes níveis de operação seguindo a Equação 8 dada por $R_f = 2H/Q$. Os valores de resistência se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistências fluídicas encontradas.

Altura (m)	Vazão (m ³ /s)	Resistência fluídica (s/m ²)
1,50	0,2500	12
1,35	0,2370	11,392
1,20	0,2243	10,699

Fonte: Autoria própria

4.1.2 Capacitância Fluídica

Como citado no Capítulo 2, a capacitância fluídica é representada pela seção transversal do tanque. Se sua seção transversal for constante, a capacitância sera constante para qualquer nível de fluido. Na Equação 21 é expressa a capacitância constante em função do diâmetro do tanque utilizado, sendo dois metros.

$$C_f = \pi \frac{(d^2)}{4} = \pi \frac{(2^2)}{4} = \pi = 3,1416m^2 \quad (21)$$

Dessa forma encontra-se o valor de capacitância fluídica de 3,1416 m².

4.1.3 Função de Aquecimento

A obtenção dos parâmetros para se construir uma função de transferência de aquecimento se tornam insuficientes para esta aplicação. Neste caso foi construída uma função de aquecimento que, como variáveis principais, dependem da entrada de água do reservatório tratando como distúrbio e a saída do Controlador PID de temperatura como o parâmetro de aquecimento.

Onde foi criado,

$$PERDA_CALOR = (IOs.AO_VALVULA_AQUE * 0.25) / 7.5;$$

$$GANHO_CALOR = IOs.AO_PID_TEMPERATURA / 500;$$

$$IOs.AI_TEMP = (IOs.AI_TEMP - (PERDA_CALOR / 10) + GANHO_CALOR);$$

4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA NO MATLAB

Obtendo os valores de R_f e C_f é possível expressar funções de transferências para os três diferentes níveis de operação do tanque, 50%, 45% e 40%.

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{37,699s + 1} \quad (22)$$

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{35,790s + 1} \quad (23)$$

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{36,6149s + 1} \quad (24)$$

Realizando a simulação das funções de transferência obtidas a resposta ao degrau, sendo o nível de *setpoint*, obtidas estão representadas na Figura 24. A resposta simulada leva em questão o sistema enquanto a válvula de descarga está aberta, variando a vazão de saída conforme o nível do líquido aumenta.

Esta simulação demonstra como o sistema cresce rapidamente quando o nível dentro do tanque é baixo devido a pouca vazão da válvula de saída. Conforme o nível aumenta a vazão na válvula de saída também cresce tornando mais difícil o sistema alcançar o valor pré definido de nível.

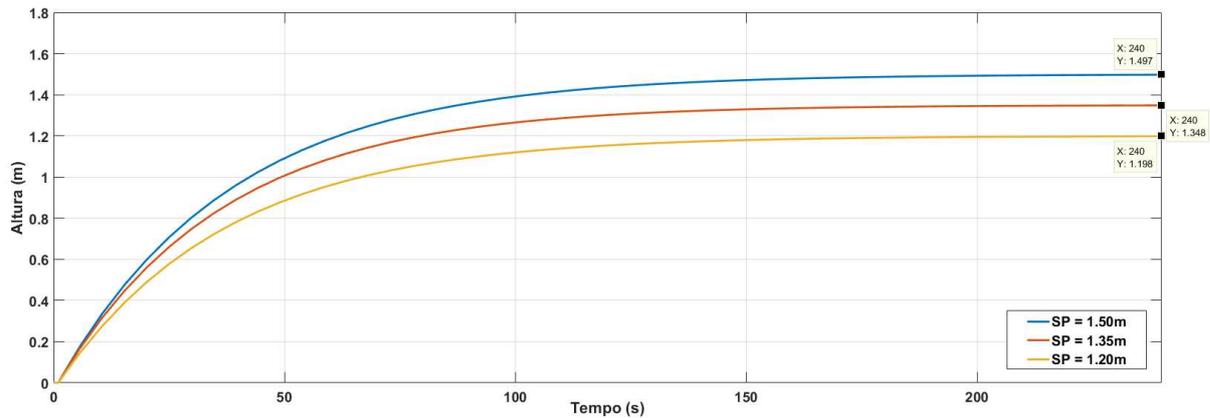


Figura 24 – Resposta ao degrau Nível x Tempo no simulink.

Fonte: Autoria própria

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta primeira etapa será verificado as diferentes formas de controle aplicadas ao processo, Controle ON/OFF, Controle PI e Controle PID para o nível. Para todas as parcelas foram atribuídos *setpoints* de 135cm para nível e 80°C para Temperatura.

Na Figura 25 é observada a resposta do sistema quando sujeita a um controle ON/OFF, para utilizar esse controle na simulação basta não atribuir nenhum valor aos parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador PID.

É possível notar que o sistema apresenta grandes oscilações, característica pela qual o sistema espera atingir um valor abaixo do *setpoint* para que possa deslocar a válvula de abertura em sua capacidade máxima, parando assim quando o *setpoint* for novamente atingido. Dessa maneira, a cada abertura da válvula o líquido do tanque se movimenta e interfere diretamente na leitura de nível, causando assim grandes oscilações.

A Figura 26 mostra o momento em que ocorrem essas turbulências dentro do tanque. O resultado é perda completa do sistema de controle impossibilitando um sistema contínuo, possível normalizar apenas parando o processo e aguardar até que estabilize.

Considerando valores intermediários para a abertura da válvula de entrada no tanque de aquecimentos, o Controlador PI se mostrou eficaz para pequenos valores de consumo. Quando o mesmo chegava a 50% o controle se comportava de maneira muito oscilatória, não obtendo um fluxo constante de entrada de líquido e comprometendo o aquecimento do tanque.



Figura 25 – Resposta Nível Aquecedor x Tempo Controlador ON/OFF.

Fonte: Autoria própria



Figura 26 – Turbulências observadas nos tranques.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 27 é mostrada o nível do tanque de aquecimento pelo tempo. Os primeiros instantes entende-se pelo regime permanente alcançado seguindo da aplicação do distúrbio aumentando o valor do consumo. Ao longo do tempo, enquanto o consumo era aumentado de 30% à 50% as oscilações aumentavam, tornando mais demorada a retomada ao valor de *setpoint*, indo em contrapartida da estabilização.

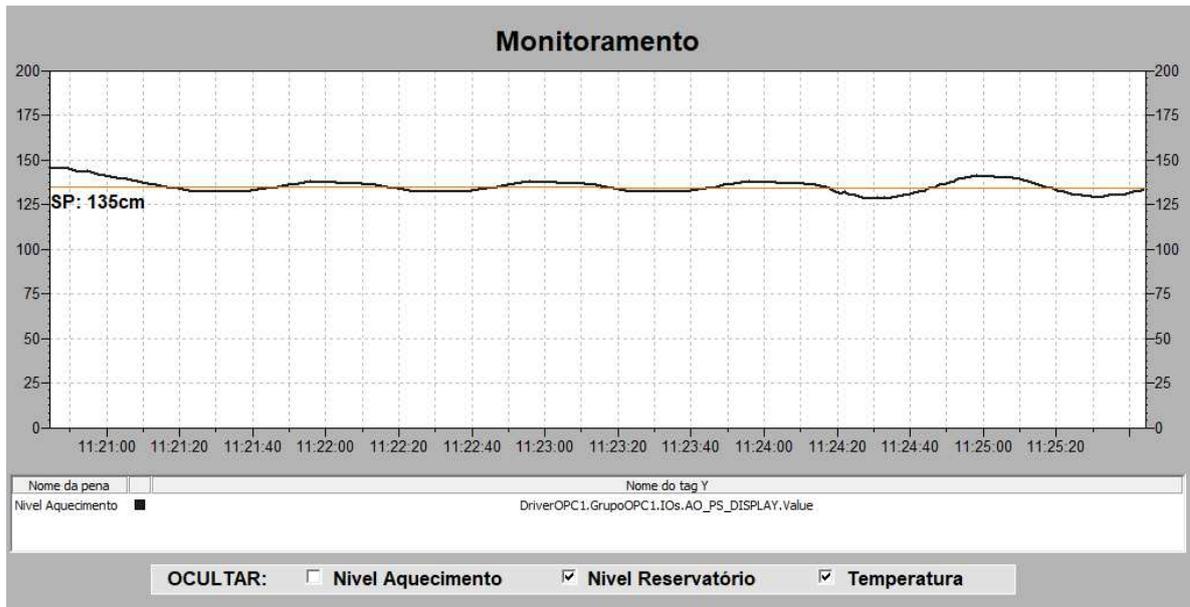


Figura 27 – Resposta Nível x Tempo Controlador PI com distúrbio.

Fonte: Autoria própria

Considerando agora as três parcelas, proporcional, integral e derivativa do controlador PID, foi obtido um resultado estável. Obtendo regiões de pouca movimentação na válvula de entrada em regime permanente, garantindo assim um fluxo constante de entrada de líquido. Para esse resultado foram encontrados valores de $K_p = 15$, $K_i = 12$ e $K_d = 1$.

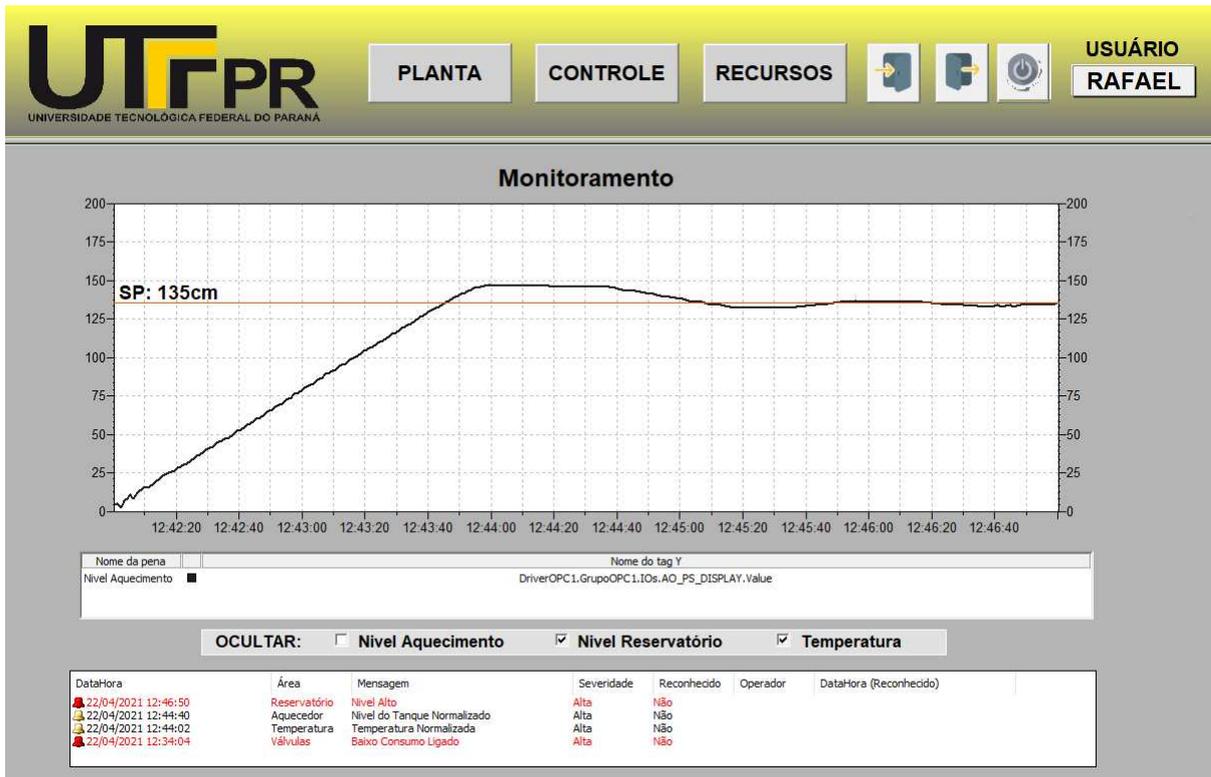


Figura 28 – Resposta ao degrau Nível Aquecimento x Tempo Controlador PID.

Fonte: Autoria própria

Em todos os casos foi possível notar um valor elevado de *overshoot*, ou sobre sinal. Essa resposta é característica de sistemas de controle de nível e implica em uma inércia do fluido além da válvula de abertura. Ou seja, além do atraso na resposta do controlador, após o sistema em realimentação identificar o valor ideal atingido, o líquido continua, por um breve momento, a escorrer para o tanque.

Quando colocado em pleno funcionamento o processo se comporta de maneira estável, não apresentando quaisquer oscilações sustentadas ou turbulências instáveis. O controle de temperatura atua de forma condizente e mantém o tanque dentro da faixa proposta. O comportamento do sistema pode ser verificado na Figura 29.

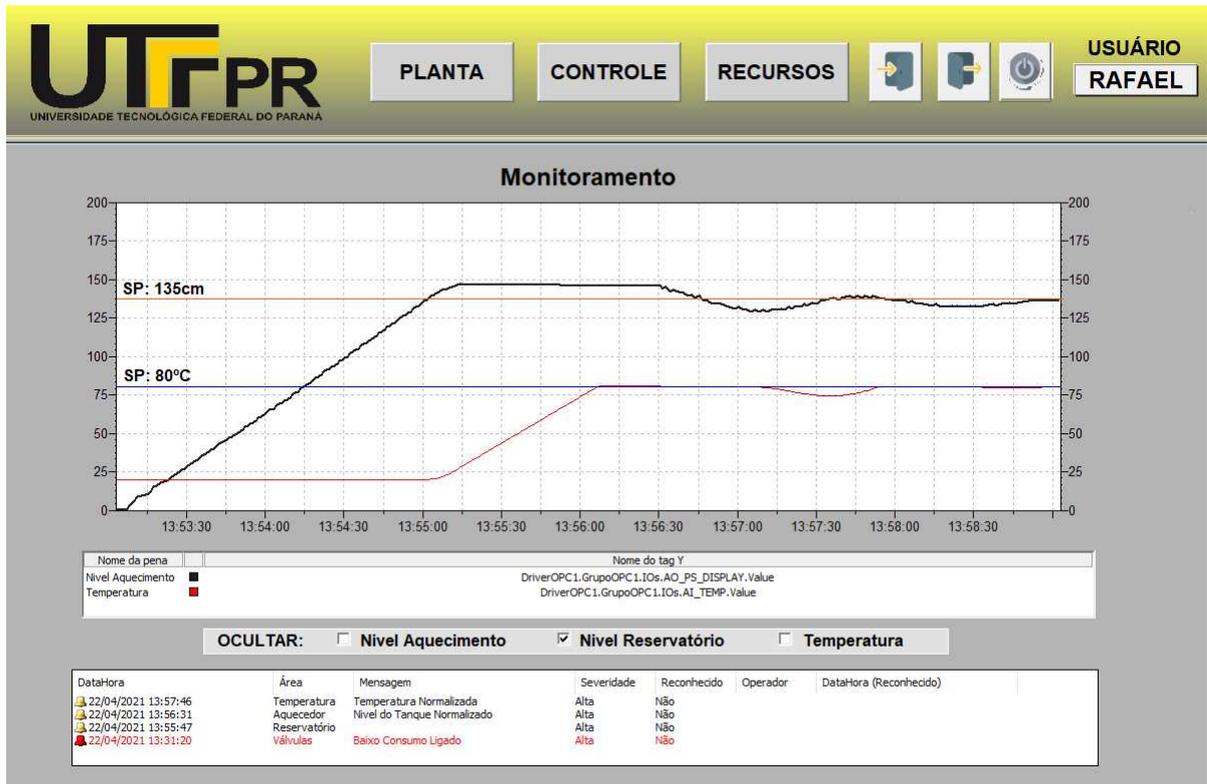


Figura 29 – Comportamento do nível e temperatura do sistema.

Fonte: Autoria própria

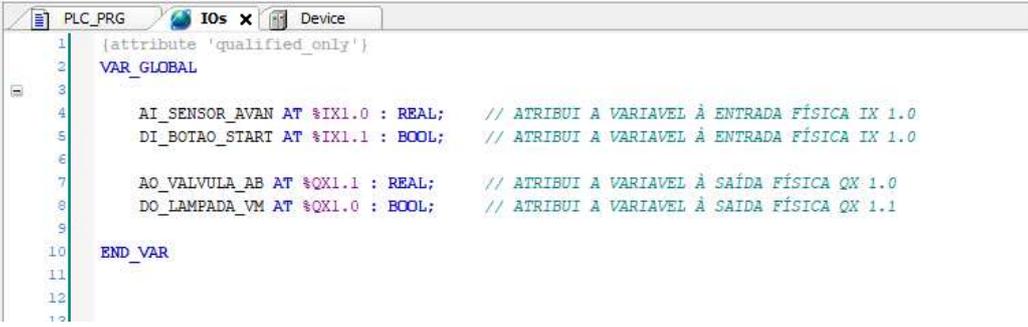
Ademais é possível notar o comportamento do controlador quando ativo no sistema simulado, para todos os casos, resulta em uma estabilidade mais rápida para controladores que possuem controle derivativo, este observado que ainda ocorrem grandes oscilações nos controladores PI.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho permitiu a simulação de um sistema de fornecimento de água quente, controlando nível e temperatura, envolvendo conceitos de automação industrial, *softwares* de simulação e teste de programas elaborados em CLP sem a necessidade física do processo ou equipamentos. Este também mostra, de forma didática, a construção dos ambientes de simulação, o processo dos controles, comunicação entre os *softwares* e resposta dinâmica da planta.

Analisando os resultados encontrados conclui-se que os objetivos do trabalho foram cumpridos, garantindo um processo automático de controle de nível e temperatura através de um sistema SCADA, utilizando de recursos didáticos.

É importante salientar que alguns recursos utilizados neste trabalho foram realizados por simulações e que, caso este sistema fosse implementado em um CLP real, é necessária atribuir as variáveis alocadas na memória para as saídas físicas do CLP. Este processo é visível na Figura 30 e deve, obrigatoriamente, ser atribuído.



```

1  {attribute 'qualified_only'}
2  VAR_GLOBAL
3
4  AI_SENSOR_AVAN AT %IX1.0 : REAL; // ATRIBUI A VARIÁVEL À ENTRADA FÍSICA IX 1.0
5  DI_BOTAO_START AT %IX1.1 : BOOL; // ATRIBUI A VARIÁVEL À ENTRADA FÍSICA IX 1.0
6
7  AO_VALVULA_AB AT %QX1.1 : REAL; // ATRIBUI A VARIÁVEL À SAÍDA FÍSICA QX 1.0
8  DO_LAMPADA_VM AT %QX1.0 : BOOL; // ATRIBUI A VARIÁVEL À SAÍDA FÍSICA QX 1.1
9
10 END_VAR
11
12
13

```

Figura 30 – Definição e alocação de variáveis nas I/Os físicas.

Fonte: Autoria própria

Além das observações feitas a partir dos resultados experimentais, é necessário ficar atento as características dinâmicas do processo quando se trabalha com variáveis analógicas. Como mostrado na Figura 26, fluidos se comportam de maneira dinâmica e possuem uma alta inércia, onde pequenas oscilações se transformam em grandes turbulências. Efeito no qual foi diminuído utilizando o filtro média móvel do bloco FB_Media_Movel.

Para melhorar aproveitamento dos conceitos aplicados a esta simulação alguns trabalhos futuros podem ser estipulados para continuidade do mesmo, este sendo a aplicação física do sistema aqui simulado. Dessa forma, seria possível observar quais efeitos se implicariam da mesma maneira, obter respostas mais precisas e condizentes do processo, comparar diferentes tipos de comunicação e implementação de equipamentos e recursos como IHMs, a fim de facilitar a operação e tornar o trabalho mais interessante comercialmente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. de. **Industria 4.0**: Princípios básicos, aplicabilidade e implementação na área industrial. 1. ed. São Paulo: Érica, 2019.
- BAYER, F. M.; ARAUJO, O. C. B. de. **Controle Automático de Processos**. 92 f. Dissertação (Material Didático) — Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.
- CAMARGO, V. L. A. de. **Elementos de Automação**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- ELIPSE. **Elipse Knowledgebase**. jan. 2021.
- FACTORYI/O. **Documentation I/Os Tank**. Março 2021. Disponível em: <<https://docs.factoryio.com/manual/parts/stations/tank>>.
- FOROUZAN, B. A.; MOSHARRAF, F. **Redes de computadores**: Uma abordagem top-down. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. de. **Controladores Lógicos Programáveis**: Sistemas discretos e analógicos. 3. ed. São Paulo: Érica, 2021.
- LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. D. **Redes Industriais para automação industrial**: As-i, profibus e profinet. 2. ed. São Paulo: Érica, 2019.
- NISE, N. S. **Sistemas de Controle Moderno**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- OGATA, K. **Sistemas de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- PETRUZELLA, F. D. **Controlador Lógico Programável**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.
- SILVEIRA, P. R. da; SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.
- SOLOMAN, S. **Sensores e sistema de controle na industria**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- THOMAZINI, D.; ALBURQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores Industriais**: fundamentos e aplicações. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011. (rev e atual).