

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA**

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



GEAN MARQUES SILVA

**PROPOSTA DE CONTROLE DE NÍVEL EM AMBIENTE VIRTUAL USANDO
CONTROLADORES PID**

**ITUMBIARA-GO
2025**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gean Marques Silva

Matrícula: 20201040100197

Título do Trabalho: Proposta de Controle de Nível em Ambiente Virtual Usando Controladores PID.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, ____28____/____08____/____2025____.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GEAN MARQUES SILVA

**PROPOSTA DE CONTROLE DE NIVEL EM AMBIENTE VIRTUAL USANDO
CONTROLADORES PID**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a banca avaliadora, parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Orientador: Victor Régis Bernardeli,

**ITUMBIARA-GO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586 Silva, Gean Marques

Proposta de controle de nível em ambiente virtual usando controladores PID. -- Itumbiara, 2025.
73 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli.

1.Automação industrial. 2.Controladores programáveis. 3.Métodos (Engenharia industrial). I. Título. II. Silva, Gean Marques. III. Bernardeli, Victor Régis. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 629

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Marla de Souza Correia CRB-1/3011



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Gean Marques Silva

PROPOSTA DE CONTROLE DE NÍVEL EM AMBIENTE VIRTUAL USANDO CONTROLADORES PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 07 de Agosto de 2025.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Orientador

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Jucélio Costa Araújo
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

Documento assinado eletronicamente por:

- Jucelio Costa de Araujo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/09/2025 22:08:59.
- Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/08/2025 07:10:16.
- Victor Regis Bernardeli, CHEFE - CD4 - ITU-DAA, em 28/08/2025 16:41:19.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 685909

Código de Autenticação: 44a17f4bea



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5622 (ramal: 5622)

Destino este projeto à minha família, que esteve presente em cada etapa, oferecendo suporte incondicional, amor e compreensão durante toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Àqueles que acompanharam cada etapa desta jornada, direciono meus mais profundos agradecimentos:

À minha mãe, Liene Marques de Faria Silva, por ser meu alicerce incondicional, fonte de amor e resistência. Sua força e dedicação inspiraram-me a nunca desistir, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Ao meu pai, Geraldo Romildo da Silva, pelo exemplo de perseverança e trabalho, e por sempre acreditar em meu potencial, mesmo quando eu próprio duvidava.

À minha irmã, Larissa Marques Silva, por transformar a rotina acadêmica em momentos mais leves com seu apoio, sorrisos e parceria inigualável.

À minha avó, Maria Marques de Faria, por semear em mim valores que transcendem os livros: humildade, gratidão e a importância de lutar pelos sonhos.

Ao Prof. Victor Régis Bernardeli, meu orientador, pela orientação técnica precisa, disponibilidade para debates e paciência em cada ajuste deste trabalho.

Ao IFG Campus Itumbiara, por proporcionar a base técnica e humana que tornou este projeto possível.

Aos colegas e amigos, pelas trocas de conhecimento, auxílio em laboratórios e pela cumplicidade ao longo do curso.

Aos criadores do Simmaq 3D e Codesys, ferramentas que permitiram materializar teorias em simulações práticas.

E a todos que, de perto ou de longe, contribuíram para que este dia se tornasse realidade.

“Nenhum sucesso é individual. Ele é feito de mãos que apoiam, corações que encorajam e almas que acreditam.”

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”.

(Ayrton Senna)

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema integrado de controle de nível em uma planta didática, utilizando a técnica PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para otimizar a precisão e a estabilidade do processo. A abordagem substitui estratégias convencionais, como o PWM (originalmente aplicado para controle de potência), destacando a versatilidade do controlador PID em contextos dinâmicos. A metodologia envolve três etapas principais: revisão teórica dos parâmetros de sintonia PID e sua aplicação em sistemas de nível, simulação no ambiente Simmaq 3D que permite a modelagem realista de tanques, sensores, atuadores e malhas de controle e a programação da lógica de controle em ladder no CODESYS, plataforma amplamente utilizada na indústria para programação de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis). Os resultados esperados incluem a demonstração da utilidade do PID em garantir estabilidade e redução de overshoot no controle de nível, além da validação da resposta do sistema a perturbações e instabilidades. A combinação do Simmaq 3D e do CODESYS permite replicar cenários industriais e oferecer um ambiente seguro para testes iterativos.

Palavras-chave: Controle PID; Simmaq 3D; CODESYS; Automação Industrial; Controle de Nível.

ABSTRACT

This work proposes the development of an integrated level control system in a teaching plant, using the PID (Proportional-Integral-Derivative) technique to optimize process accuracy and stability. The approach replaces conventional strategies, such as PWM (originally applied to power control), highlighting the versatility of the PID controller in dynamic contexts. The methodology involves three main steps: a theoretical review of PID tuning parameters and their application in level systems; simulation in the Simmaq 3D environment, which allows realistic modeling of tanks, sensors, actuators, and control loops; and programming of the ladder control logic in CODESYS, a platform widely used in industry for programming PLCs (Programmable Logic Controllers). The expected results include demonstrating the usefulness of PID in ensuring stability and reducing overshoot in level control, as well as validating the system's response to disturbances and instabilities. The combination of Simmaq 3D and CODESYS allows for replicating industrial scenarios and provides a safe environment for iterative testing.

Keywords: PID Control; Simmaq 3D; CODESYS; Industrial Automation; Level Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nível de um Tanque	20
Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta	22
Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada	22
Figura 4 - Índices de desempenho 1	24
Figura 5 - Índices de desempenho 2	24
Figura 6 - Ação Proporcional (P)	25
Figura 7 - Ação Integral (I)	25
Figura 8 - Ação Derivativa (D)	25
Figura 9 - Controle Proporcional	26
Figura 10 - Erro em regime permanente	27
Figura 11 - Controle Proporcional Integral (PI)	27
Figura 12 - Simulação Controle Proporcional Integral (PI)	28
Figura 13 - Controle PID no domínio do tempo	29
Figura 14 - Bloco Controle PID	29
Figura 15 - Método da Curva de Reação (ZN)	31
Figura 16 - Parâmetros (ZN)	31
Figura 17 - Modelo FOPDT com função transferência	31
Figura 18 - % de decaimento	32
Figura 19 - Modelo FOPDT com função transferência	33
Figura 20 - Simbologias Ladder	35
Figura 21 - Ambientes Simmaq 3D	36
Figura 22 - Planta Nível e Temperatura	36
Figura 23 - Sensor Ultrassônico	37
Figura 24 - Sensor chave boia	38
Figura 25 - Válvula Solenoide	39
Figura 26 - Bomba Centrífuga	41
Figura 27 - Bancada didática de medição de nível	42
Figura 28 - Painel de Controle	44
Figura 29 - Modbus Config	45
Figura 30 - Arvore do Projeto	46
Figura 31 - Control Win V3 x64	48
Figura 32 - Modbus TCP Slave	49
Figura 33 - Ethernet	51
Figura 34 - Lista de Variáveis Globais	53
Figura 35 - Lista de Variáveis Locais	53
Figura 36 - Lista de Variáveis declaradas via Modbus TCP Slave	54
Figura 37 - Lista de Variáveis declaradas via Modbus TCP Slave	55
Figura 38 - Linha de programação 1 - 3	56
Figura 39 - Linha de programação 4 - 6	57
Figura 40 - Linha de programação 7	58

Figura 41 - Linha de programação 8 - 11	59
Figura 42 - Linha de programação 12 - 14	60
Figura 43 - Linha de programação 15 - 18	61
Figura 44 - Linha de programação 19 - 22	61
Figura 45 - Supervisor controlador PID convencional	64
Figura 46 - Curva de reação.....	65
Figura 47 - Estabilização	65
Figura 48 - Valor de K de ZN.....	66
Figura 49 - τ constante de tempo de ZN	66
Figura 50 - θ tempo morto de ZN	66
Figura 51 - Valor Kp	66
Figura 52 - Valor Ti	67
Figura 53 - Valor Td.....	67
Figura 54 - Controlador PID ideal paralelo método de ZN	68
Figura 55 - % de decaimento de ZN.....	68
Figura 56 - Função Transferência	69
Figura 57 - Valor de K de Cohen Coon	69
Figura 58 - τ constante de tempo de Cohen Coon	69
Figura 59 - θ tempo morto de Cohen Coon	70
Figura 60 - Valor Kp	70
Figura 61 - Valor Ti	70
Figura 62 - Valor Td.....	70
Figura 63 - Controlador PID ideal paralelo método de Cohen Coon	71
Figura 64 - % de decaimento de Cohen Coon	71
Figura 65 - Calculo % de decaimento de Cohen Coon	72
Figura 66 - Função Transferência Cohen Coon	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculos para controladores (ZN).....	32
Tabela 2 - Cálculos para controladores (Cohen Coon).....	33
Tabela 3 - Endereços das entradas e saídas da planta.....	52
Tabela 4 - Detalhes bloco PID	62
Tabela 5 - Detalhes bloco PID	63
Tabela 6 - Resultados ZN	73
Tabela 7 - Resultados Cohen Coon.....	73

LISTA DE SIGLAS

CLP – Controlador Lógico Programável

CODESYS – Control Development System (Sistema de desenvolvimento de controle)

FBD – Function Block Diagram (Diagrama de blocos funcionais)

FOPDT – First-Order Plus Dead Time (Primeira ordem mais tempo morto)

HMI – Human-Machine Interface (Interface Homem-Máquina)

IEC – International Electrotechnical Commission (Comissão eletrotécnica internacional)

IHM – Interface Homem-Máquina

IMC – Internal Model Control (Controle por Modelo Interno)

ITAE – Integral of Time-weighted Absolute Error (Integral do absoluto ponderado no tempo)

LD – Ladder Diagram (Diagrama Ladder)

MV – Variável Manipulada

NA – Normalmente Aberta

NF – Normalmente Fechada

ON/OFF – Controle Binário (Ligado/Desligado)

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture (Arquitetura unificada de comunicação de plataforma aberta)

PD – Proporcional-Derivativo

PI – Proporcional-Integral

PID – Proporcional-Integral-Derivativo

PLC – Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programável)

PV – Variável de Processo

PWM – Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Controle de supervisão e aquisição de dados)

SP – Setpoint (Valor de Referência)

ST – Structured Text (Texto Estruturado)

TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Protocol (Protocolo de controle de transmissão de internet)

Z-N – Ziegler-Nichols

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVO GERAL	18
1.3 OBJETIVO ESPECIFICO	19
2 ESTADO DA ARTE	20
2.1 NÍVEL	20
2.2 CONTROLE DE PROCESSOS	20
2.3 TERMINOLOGIAS	21
2.4 DESEMPENHO	22
2.5 CONTROLADOR PID	24
2.5.1 Controle Proporcional (P).....	26
2.5.2 Controle Proporcional Integral (PI).....	27
2.5.3 Controle Proporcional Derivativo (PD).....	28
2.5.4 Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)	28
2.6 MÉTODO DE SINTONIA	29
2.6.1 Técnica da razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ (Ziegler & Nichols, 1942).....	30
2.6.2 Técnica da razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ (Cohen Coon, 1953).....	32
2.7 CODESYS E LINGUAGEM LADDER.....	33
2.8 SIMMAQ 3D E CONEXÃO MODBUS.....	35
2.9 SENSOR ULTRASSÔNICO.....	37
2.10 SENSOR CHAVE BOIA	38
2.11 VÁLVULA SOLENOIDE	39
2.12 BOMBA CENTRIFUGA.....	40
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA A SER CONTROLADO	42
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL.....	42
3.2 LISTA DE ALOCAÇÕES	52
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL EM LINGUAGEM LADDER.....	53
3.4 BLOCO PID	62
3.5 DESCRIÇÃO DO SUPERVISÓRIO	63

3.6 EXPERIMENTO MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO DE ZN E COHEN COON	64
4 AJUSTES DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR PID.....	73
5 CONCLUSÃO	75
6 REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

O controle de processos industriais é um pilar essencial da automação moderna, garantindo eficiência, segurança e qualidade em operações que envolvem variáveis como nível, temperatura, pressão e vazão. Nesse contexto, os sistemas de controle automático desempenham um papel crítico, sendo o controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) uma das técnicas mais utilizadas. Segundo Åström e Hägglund (2006), o PID é responsável por mais de 90% dos controladores industriais, graças à sua simplicidade estrutural, robustez e capacidade de adaptação a sistemas dinâmicos. Sua utilidade é comprovada em aplicações que vão desde ajustes de temperatura em reatores químicos até o controle de nível em tanques de armazenamento (OGATA, 2010).

Tradicionalmente, estratégias como o PWM (Modulação por Largura de Pulso) são preferidas em sistemas de potência, como aquecimento resistivo ou acionamento de motores, devido à sua eficiência energética e simplicidade de implementação (SILVA, 2022). No entanto, o PWM apresenta limitações em cenários que demandam alta precisão e rejeição a perturbações externas, especialmente em sistemas térmicos. Como destacam Visioli e Piazzzi (2006), a falta de ação integral no PWM pode resultar em erros em regime permanente, tornando-o inadequado para aplicações que exigem estabilidade rigorosa.

Diante dessas lacunas, este trabalho propõe uma abordagem inovadora: utilizar um controlador PID de forma independente para gerenciar simultaneamente a variável de nível em uma planta didática, substituindo técnicas como o PWM. Essa estratégia busca explorar a versatilidade do PID em múltiplos contextos dinâmicos, conforme defendido por Skogestad e Postlethwaite (2005), que destacam sua capacidade de compensar atrasos e perturbações por meio da sintonia adequada de ganhos.

O problema central deste estudo reside na seguinte questão: "Como implementar controlador PID para otimizar o controle de nível em uma planta simulada, integrando ferramentas de modelagem 3D e programação industrial". A solução proposta envolve duas etapas principais:

- 1º Simulação da planta no ambiente Simmaq 3D, uma plataforma que permite a criação de protótipos virtuais realistas, incluindo tanques e sensores,

conforme aplicado em estudos recentes de automação didática (COSTA, 2021).

- 2º Programação da lógica de controle em ladder no CODESYS, ambiente padrão para desenvolvimento de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), amplamente adotado na indústria por sua interoperabilidade e flexibilidade (BRITO, 2020).

Essa integração entre simulação e programação industrial não apenas valida estratégias de controle sem custos elevados com hardware físico, mas também prepara estudantes e profissionais para desafios práticos da automação, alinhando-se com as demandas da Indústria 4.0 por ambientes de treinamento virtualizados (KAGERMANN, 2013). Além disso, como ressaltam (Franklin, 2019), a combinação de modelagem 3D e lógica de CLPs permite testar cenários críticos (ex.: falhas de sensores, variações bruscas de atuadores) de forma segura e replicável, otimizando a curva de aprendizado.

Em síntese, este trabalho não apenas explora o controlador PID em variáveis de processo, mas também consolida uma metodologia acessível para o ensino de controle e automação, reforçando a importância de ferramentas modernas na formação de profissionais que vão atuar nessa área.

1.1 JUSTIFICATIVA

A opção pelo uso do controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) em substituição às estratégias convencionais de controle ON/OFF e PWM (Modulação por Largura de Pulso) fundamenta-se em vantagens técnicas, operacionais e pedagógicas amplamente reconhecidas na literatura. Enquanto o controle ON/OFF, baseado em histerese, é simples de implementar, ele apresenta oscilações frequentes em torno do SP (setpoint), consumo energético elevado e baixa precisão em sistemas sensíveis, como destacam Visioli e Piazzi (2006). Já o PWM, embora eficiente em controle de potência (ex.: aquecimento resistivo), carece de mecanismos para compensar erros em regime permanente, especialmente em processos térmicos (ÅSTRÖM, HÄGGLUND, 2006). O PID, por sua vez, oferece uma solução intermediária: combina a simplicidade estrutural com a capacidade de minimizar erros estáticos (ação integral), antecipar variações (ação derivativa) e responder

proporcionalmente a desvios (ação proporcional). Como demonstra Ogata (2010), essa combinação resulta em maior estabilidade, menor *overshoot* e resposta mais suave a perturbações, características críticas para sistemas como o proposto, que envolvem essa variável interdependente o nível. Além disso, ao substituir o controle ON/OFF, o PID reduz o desgaste mecânico de atuadores (ex.: válvulas solenoides) e térmico de resistências, prolongando a vida útil dos componentes, conforme discutido por Franklin (2019). A escolha do Simmaq 3D e do CODESYS reforça a viabilidade da proposta.

O Simmaq 3D permite simular não apenas a dinâmica do processo, mas também efeitos práticos como falhas em sensores e atuadores, cenários onde o PID trabalha melhor esses efeitos do que o ON/OFF e o PWM (COSTA, 2021). Já o CODESYS, ambiente industrial para programação de CLPs, facilita a implementação de lógicas de controle, como o PID, em linguagem ladder, preparando os estudantes para demandas reais do mercado, conforme Brito (2020). Essa integração também reduz custos com protótipos físicos, alinhando-se a princípios de sustentabilidade (ALLENBY, 2012), e permite testar estratégias de sintonia ex.: Ziegler-Nichols sem riscos operacionais.

Do ponto de vista educacional, a substituição do ON/OFF e PWM pelo PID amplia o escopo de aprendizagem. Enquanto o ON/OFF limita-se a conceitos básicos de histerese, o PID introduz temas como ajuste de ganhos, estabilidade de malha fechada e resposta a perturbações, essenciais para a formação de futuros profissionais da área de controle (SKOGESTAD, POSTLETHWAITE, 2005). Além disso, a metodologia proposta conecta teoria e prática, simulando cenários industriais ex.: falhas de sensores que exigem adaptação dinâmica do controlador, algo inviável com técnicas mais rudimentares.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e implementar um sistema integrado de controle de nível em uma planta didática, utilizando controlador PID para a variável de processo, substituindo estratégias convencionais (ON/OFF e PWM), com programação em ladder no CODESYS e validação em ambiente de simulação 3D (Simmaq 3D). O projeto visa demonstrar a utilidade do PID em otimizar estabilidade, precisão e

eficiência energética, além de servir como ferramenta pedagógica para o ensino de técnicas de controle em automação industrial.

1.3 OBJETIVO ESPECIFICO

- Pesquisar e assimilar as técnicas e estratégias de controle para controlar variáveis de processo como o nível em tanques e reservatórios;
- Programar a lógica de controle PID em linguagem ladder no CODESYS, garantindo a integração das malhas de nível e a interoperabilidade com dispositivos simulados;
- Testar o sistema sob diferentes cenários operacionais fazendo uso do SIMMAQ 3D analisando o comportamento e reação do sistema para avaliar a robustez do PID;
- Validar o desempenho do controlador como tempo de estabilização, overshoot, erro em regime permanente;
- Testar pelo menos duas sintonias de PID para fazer análises e comparações;
- Utilizar de protocolo de comunicação virtual Modbus TCP IP para conexão da planta didática ao programa em ladder.

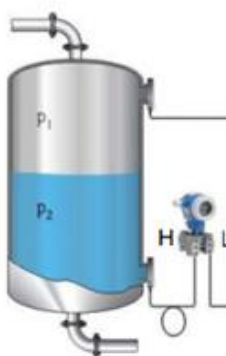
2 ESTADO DA ARTE

A variável de processo nível pode ser considerado crítica em processos industriais, influenciando diretamente a eficiência, segurança e qualidade de operações em setores como químico, petroquímico, alimentício e farmacêutico.

2.1 NÍVEL

O nível corresponde à altura ou volume de um líquido ou sólido em reservatórios. Seu controle evita transbordamentos, garantindo segurança e otimização de recursos (FONTOURA, 2024). De acordo com a figura 1.

Figura 1 - Nível de um Tanque



Fonte: OLIVEIRA (1999).

2.2 CONTROLE DE PROCESSOS

Conforme destacado por Campos e Teixeira (2006), os sistemas de controle estão presentes em diversos aspectos do cotidiano na sociedade contemporânea. No cenário industrial, onde a competitividade exige diferenciais estratégicos, essas tecnologias desempenham um papel crucial, permitindo a automação, o refinamento e a otimização de processos. Além disso, são essenciais em aplicações que demandam precisão avançada, como em aeronaves, veículos autônomos e equipamentos militares.

Nise (2013) define um sistema de controle como um conjunto de subsistemas e processos projetados para atingir uma saída específica, com desempenho predefinido, a partir de uma entrada determinada. Campos e Teixeira (2006) complementam que, no contexto industrial, esse conceito está frequentemente

associado à necessidade de manter variáveis críticas dentro de parâmetros operacionais ideais como o controle de nível de um reservatório.

Nessa perspectiva, um processo industrial possui uma dinâmica própria: ele recebe uma entrada, processa-a por meio de atuadores e gera uma saída. O controle automático atua para garantir que essa saída permaneça alinhada aos valores desejados, mesmo diante de variações na entrada. Um exemplo ilustrativo é o funcionamento de uma escada rolante: o sistema ajusta automaticamente a potência do motor (atuador) para manter a velocidade constante (saída), independentemente do peso das pessoas (entrada). Assim, a entrada (carga) é compensada pelo controle, assegurando que a saída (velocidade) não seja afetada.

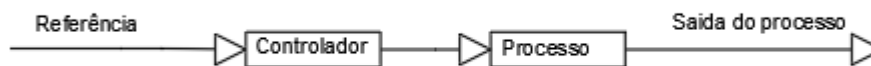
2.3 TERMINOLOGIAS

Para compreender os sistemas de controle automático, é fundamental definir termos-chave utilizados nessa área. A Variável de Processo (PV) corresponde à grandeza monitorada e regulada, como o nível de um reservatório, a temperatura de um reator ou a velocidade de um eixo. Já a Variável Manipulada (MV) é ajustada pelo sistema para influenciar a PV, visando alcançar o valor desejado. Exemplos incluem a vazão de uma bomba, a posição de uma válvula ou a potência aplicada a um aquecedor. O Setpoint (SP), ou valor de referência, representa o objetivo estabelecido para a PV, que pode ser definido manualmente por um operador, por algoritmos ou por outras malhas de controle em sistemas integrados (SMITH & CORRIPIO, 2008).

O Controlador é o componente responsável por executar cálculos para reduzir o erro entre o SP e a PV, utilizando leis de controle (como o algoritmo PID). Em ambientes industriais, esse elemento geralmente está embarcado em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). O Atuador, por sua vez, é o dispositivo físico que modifica o processo com base nos comandos do controlador, como válvulas motorizadas ou inversores de frequência (CORREA & PASSOS, 2024).

Campos e Teixeira (2006) classificam os sistemas de controle em duas categorias: Malha Aberta: A ação do atuador é definida sem monitoramento da PV. Por exemplo, um operador ajusta manualmente a abertura de uma válvula com base em dados históricos, sem correção automática para distúrbios externos. Conforme a figura 2.

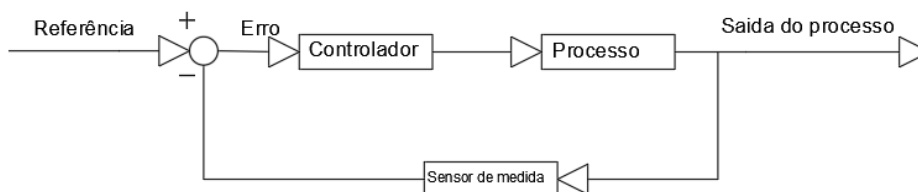
Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Malha Fechada: Utiliza realimentação em tempo real da PV para ajustar a MV. Nesse caso, sensores fornecem dados contínuos, permitindo que o controlador compense variações inesperadas, como mudanças de nível ou temperatura. Pode-se observar na figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Quando a tomada de decisão depende exclusivamente de um operador humano, o sistema é classificado como manual. Já no controle automático, a intervenção humana é substituída por algoritmos programados em CLPs, que processam sinais de entrada, executam cálculos e enviam comandos aos atuadores de forma autônoma (CORREA & PASSOS, 2024). Essa automatização garante maior precisão, eficiência e resposta rápida a perturbações, sendo essencial em processos industriais.

2.4 DESEMPENHO

Como ilustrado nas figuras 4 e 5, o desempenho de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é analisado em dois regimes fundamentais o transitório e permanente (ou estacionário). Essas fases representam,

respectivamente, o comportamento dinâmico do sistema durante ajustes a perturbações ou mudanças no setpoint e sua estabilização em torno do valor desejado. A interação entre os termos P, I e D do controlador influencia diretamente ambos os regimes, exigindo sintonia equilibrada para otimizar respostas rápidas, precisão e estabilidade (FRANKLIN, 2019).

Regime Transitório: Ocorre imediatamente após uma perturbação ou alteração no setpoint, caracterizando-se por oscilações, overshoot (ultrapassagem) e tempo de acomodação (settling time). Nesta fase:

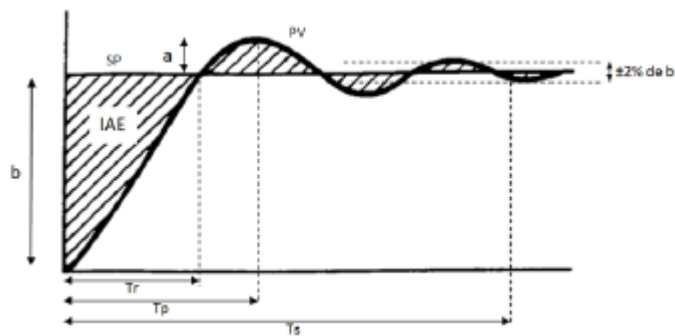
- **Termo Proporcional (P):** Atua sobre o erro instantâneo, acelerando a resposta inicial. Um ganho K_p elevado reduz o tempo de subida (rise time), mas pode ampliar overshoot e instabilidade (OGATA, 2010).
- **Termo Derivativo (D):** Antecipa tendências do erro, amortecendo oscilações e suavizando a curva de resposta. Segundo Åström e Hägglund (2006), o termo derivativo é crítico para sistemas com alta inércia, como controle de temperatura em fornos, onde a taxa de variação do erro (de dt) deve ser controlada para evitar oscilações excessivas.
- **Termo Integral (I):** Corrige erros acumulados ao longo do tempo, mas em excesso pode prolongar o transitório devido ao fenômeno de integral windup (acúmulo não linear de ação integral durante saturações) (SEBORG, 2016).

Regime Permanente: No regime permanente, o sistema opera em estado estacionário, com erro residual próximo de zero. Aqui, o termo integral domina, pois sua ação contínua elimina erros de offset (ex diferença entre o setpoint e a saída em processos com carga variável). Conforme Nise (2020), a ausência do termo integral ($K_i=0$) resultaria em erro permanente em sistemas sujeitos a perturbações constantes, como em controles de nível com vazão de saída variável. A eficiência do termo I depende da constante de tempo integral T_i valores muito baixos podem reintroduzir instabilidades, enquanto valores altos retardam a correção do erro (SKOGESTAD, 2003).

Interação entre os Regimes: A sintonia PID busca equilibrar os dois regimes. Por exemplo, o método Ziegler-Nichols (1942) prioriza a resposta transitória ao ajustar K_p , T_i , e T_d para uma razão de decaimento de $1/4$, enquanto técnicas

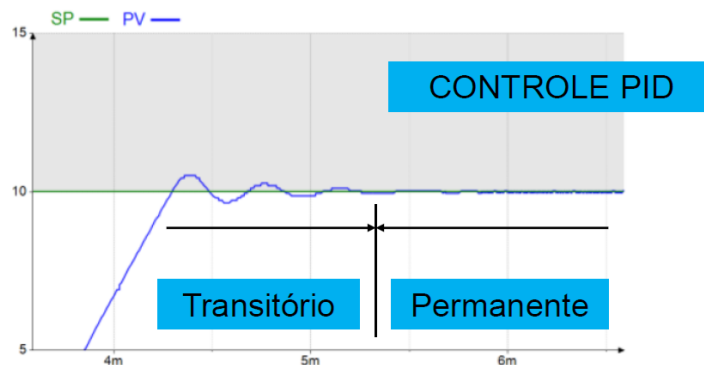
baseadas em ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error) minimizam tanto o erro transitório quanto o permanente, penalizando erros prolongados (FRANKLIN, 2019). Em sistemas com tempo morto (modelos FOPDT), a combinação de K_p moderado com T_i ajustado ao tempo morto (θ) é essencial para evitar oscilações no permanente (SEBORG, 2016).

Figura 4 - Índices de desempenho 1



Fonte: Adaptado de Correa e Passos (2025)

Figura 5 - Índices de desempenho 2



Fonte: Acervo do Autor (2025).

2.5 CONTROLADOR PID

Conforme destacado por Campos e Teixeira (2006), o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é a estratégia de controle mais difundida na indústria, graças à sua simplicidade de ajuste de parâmetros e à versatilidade em diferentes aplicações. Embora haja variações na implementação entre fabricantes, a estrutura fundamental

do algoritmo mantém-se consistente: ele combina três ações distintas – proporcional (P), integral (I) e derivativa (D) – para gerar um sinal de saída (MV) que minimize o erro entre a variável de processo (PV) e o setpoint (SP). O funcionamento do PID baseia-se nos seguintes princípios:

- Ação Proporcional (P): Reduz o erro instantâneo de forma linear, aplicando um ganho proporcional à diferença entre PV e SP. Como se pode ver na figura 6.

Figura 6 - Ação Proporcional (P)

$$P = K_p e(t)$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

- Ação Integral (I): Elimina erros residuais em regime permanente, integrando o erro ao longo do tempo. Conforme a figura 7.

Figura 7 - Ação Integral (I)

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

- Ação Derivativa (D): Antecipa variações futuras do erro, atuando sobre sua taxa de mudança (derivada), o que confere maior estabilidade à resposta transitória. De acordo com a figura 8.

Figura 8 - Ação Derivativa (D)

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Como explicam os autores, a sinergia entre essas três ações permite que o controlador não apenas corrija desvios atuais (via P), mas também elimine offsets persistentes (via I) e atenua oscilações (via D), garantindo um equilíbrio entre rapidez, precisão e estabilidade (CAMPOS e TEIXEIRA, 2006).

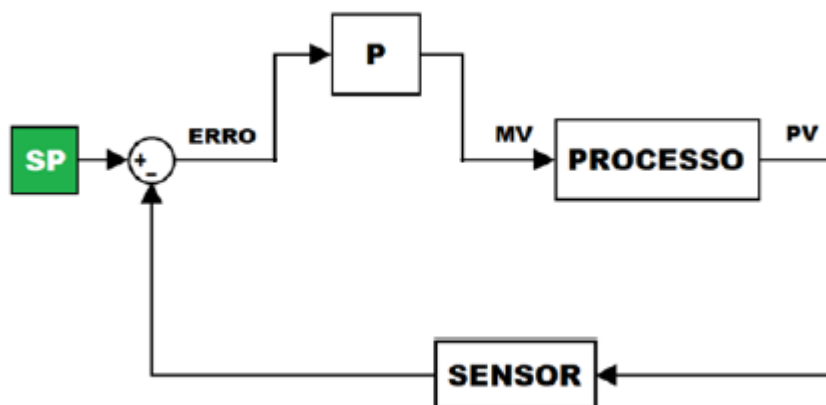
2.5.1 Controle Proporcional (P)

Como ilustrado na figura 9, o controle proporcional é amplamente utilizado em processos com dinâmicas lineares de baixa complexidade, destacando-se por sua resposta ágil a perturbações e alterações no setpoint (OGATA, 2010).

Contudo, como apontam Nise (2013) e Corripio (2008), essa estratégia apresenta uma limitação crítica: a presença de erro residual em regime permanente (offset), que ocorre mesmo após a estabilização do sistema. Esse fenômeno decorre da relação linear entre o erro e a ação de controle, incapaz de eliminar completamente desvios estáticos. Pode – se observar na figura 10.

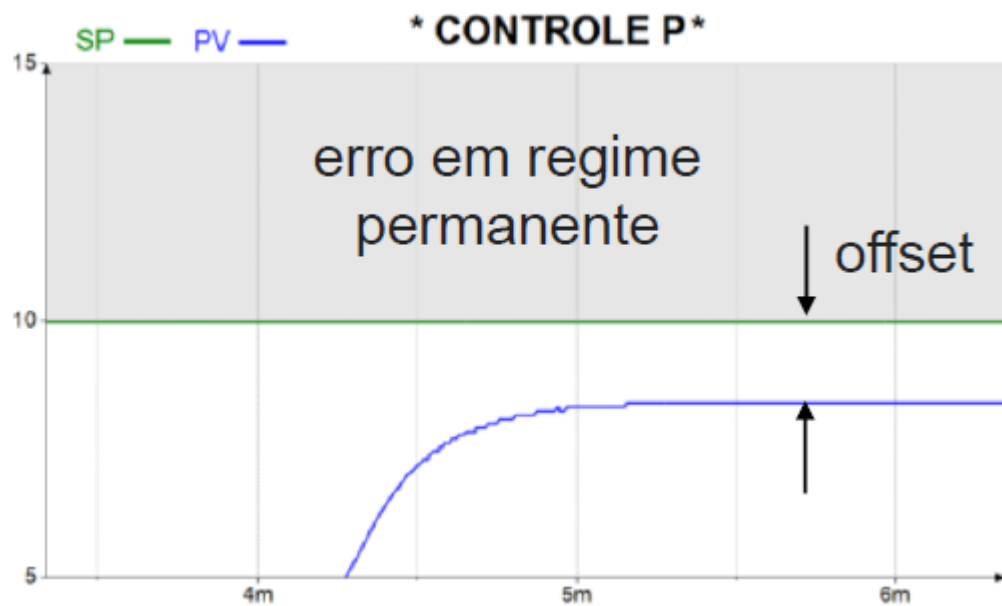
A principal vantagem do controle proporcional reside na simplicidade de sintonia, exigindo apenas o ajuste de um único parâmetro: o ganho proporcional (K_p). Essa característica facilita sua implementação em aplicações industriais que demandam rapidez e baixa complexidade computacional (CAMPOS e TEIXEIRA, 2006).

Figura 9 - Controle Proporcional



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 10 - Erro em regime permanente

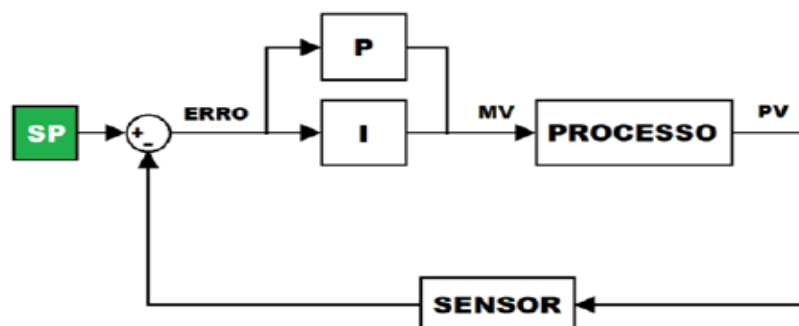


Fonte: Acervo do Autor (2025).

2.5.2 Controle Proporcional Integral (PI)

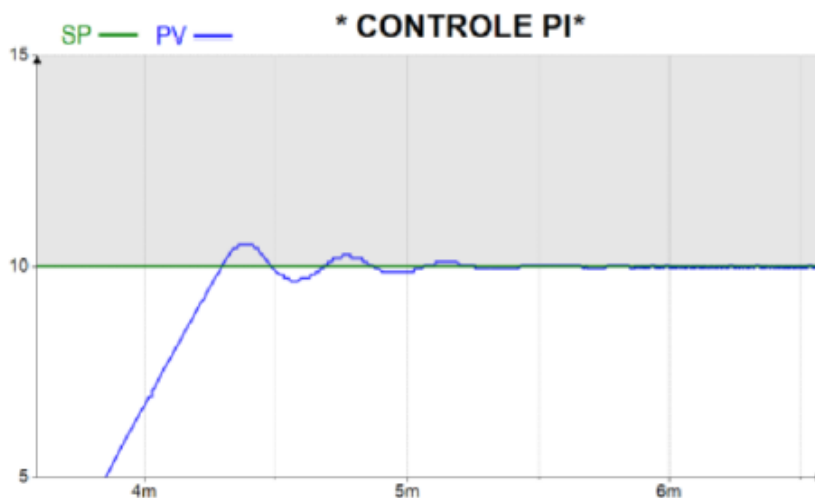
O controle Proporcional Integral (PI) combina as ações proporcional (P) e integral (I), oferecendo uma solução balanceada para sistemas que exigem eliminação de erro em regime permanente (offset) sem a complexidade da ação derivativa (D). Essa estratégia é amplamente adotada em processos industriais onde perturbações frequentes e a necessidade de precisão estática são críticas (OGATA, 2010; CAMPOS e TEIXEIRA, 2006). Como se pode ver nas figuras 11 e 12.

Figura 11 - Controle Proporcional Integral (PI)



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 12 - Simulação Controle Proporcional Integral (PI)



Fonte: Acervo do Autor (2025).

2.5.3 Controle Proporcional Derivativo (PD)

O controle Proporcional Derivativo (PD) combina as ações proporcional (P) e derivativa (D), sendo uma estratégia eficaz para sistemas que exigem resposta rápida e redução de oscilações, mas onde o erro em regime permanente (offset) não é crítico.

Essa abordagem é frequentemente aplicada em processos com dinâmicas de alta inércia ou em sistemas que necessitam de antecipação a perturbações, como robótica e controle de posição (OGATA, 2010).

2.5.4 Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)

O controlador PID integra a capacidade de estabilização transitória do controle proporcional-derivativo (PD) com a eliminação de erros em regime permanente proporcionada pelo controle proporcional-integral (PI). Essa combinação permite não apenas corrigir desvios instantâneos, mas também antecipar tendências de variação e garantir precisão estática (OGATA, 2010).

No entanto, a ação derivativa introduz complexidade na sintonia do controlador, uma vez que o ganho derivativo (K_d) amplifica ruídos de alta frequência e requer ajustes finos para evitar instabilidades. Por essa razão, o PID é recomendado apenas para processos nos quais sua implementação traz benefícios significativos, como

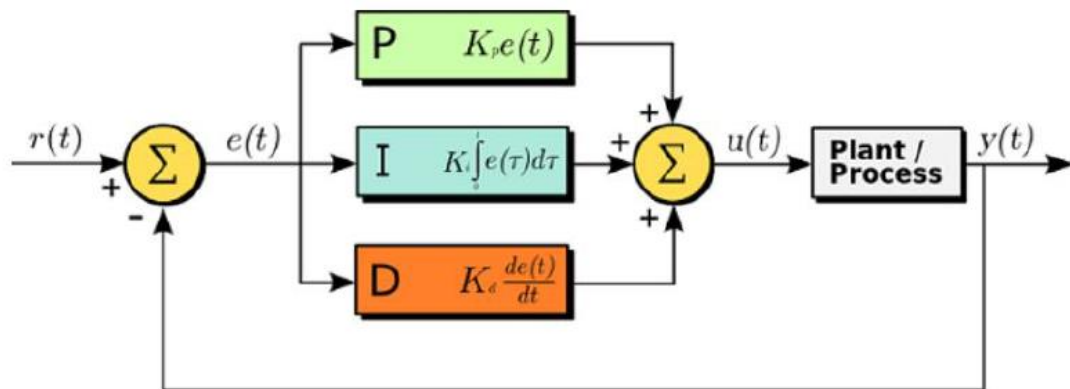
sistemas com atraso considerável, inércia térmica ou dinâmicas não lineares que demandam resposta antecipada (BENTO, 1989). De acordo com a figuras 13 e 14.

Figura 13 - Controle PID no domínio do tempo

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 14 - Bloco Controle PID



Fonte: OLIVEIRA (1999).

2.6 MÉTODO DE SINTONIA

A sintonia de controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é uma etapa crítica para garantir desempenho estável e eficiente em sistemas de controle. Dentre os métodos clássicos, destaca-se a técnica de Ziegler-Nichols (1942), que utiliza respostas experimentais do sistema, como a curva de reação em malha aberta ou a oscilação sustentada em malha fechada, para determinar os parâmetros K_p , T_i e T_d . Esse método, embora empírico, é amplamente difundido por sua simplicidade, mas pode gerar controladores agressivos em sistemas com alta não linearidade (OGATA, 2010).

Para sistemas com atraso significativo, o método de Cohen-Coon (1953) oferece uma alternativa, ajustando os parâmetros com base em um modelo de primeira ordem com tempo morto, priorizando a rejeição a perturbações. No entanto, como observado por Åström e Hägglund (2006), essa abordagem pode não ser ideal

para processos com dinâmicas complexas, como aqueles com múltiplas constantes de tempo.

Em contextos industriais modernos, métodos de sintonia baseados em otimização ganharam espaço, utilizando critérios como ITAE (Integral do Tempo Multiplicado pelo Valor Absoluto do Erro) para minimizar desvios. Skogestad (2003) propôs regras de sintonia simplificadas ("regras IMC") que relacionam parâmetros PID a modelos matemáticos do processo, garantindo robustez e resposta rápida. Já técnicas como o método de sintonia por relay (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1984) automatizam a identificação de frequências críticas, substituindo a intervenção manual e reduzindo erros humanos.

Além disso, métodos adaptativos, como os baseados em redes neurais ou algoritmos genéticos, surgiram para lidar com sistemas variantes no tempo. Segundo Nise (2020), essas estratégias são promissoras em ambientes dinâmicos, mas demandam maior complexidade computacional. Em contrapartida, abordagens como a sintonia Lambda (RICE; COOPER, 2004) focam em ajustar a velocidade de resposta do sistema por meio de um parâmetro único (λ), simplificando a implementação em CLPs (Controladores Lógicos Programáveis).

A escolha do método ideal depende das características do processo, como linearidade, presença de ruído e requisitos de desempenho. Como enfatizado por Franklin (2019), a combinação de simulação computacional (MATLAB/ Simulink ou plataformas de programação similares) com validação prática em hardware permite refinar parâmetros e mitigar riscos de instabilidade. Assim, a sintonia PID permanece um campo em evolução, equilibrando técnicas tradicionais e inovações algorítmicas para atender às demandas da automação industrial.

2.6.1 Técnica da razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ (Ziegler & Nichols, 1942)

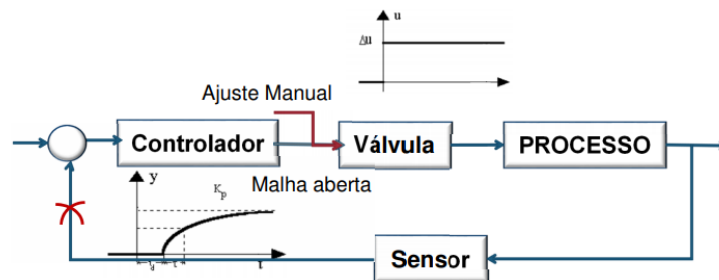
As figuras 15 e 16, apresenta o método que consiste na realização de uma ação em degrau sobre a variável manipulada (MV) em malha aberta para identificar a resposta correspondente da variável medida (PV) para então calcular os parâmetros de ajuste do controlador.

O primeiro passo consiste na obtenção do modelo FOPDT onde é uma representação matemática simplificada amplamente utilizada em controle de

processos para descrever a dinâmica de sistemas industriais, como tanques de nível, trocadores de calor, reatores químicos e outros processos com comportamento predominantemente linear. Conforme a figura 17.

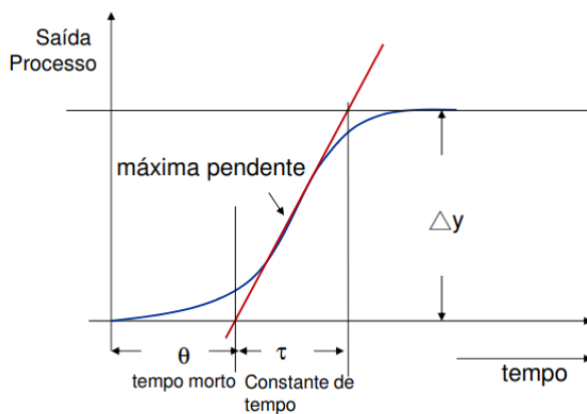
Ele combina um sistema de primeira ordem com um tempo morto (atraso de transporte). O segundo passo consiste nos cálculos para os controladores P, PI e PID como mostrado na tabela 1 logo abaixo.

Figura 15 - Método da Curva de Reação (ZN)



Fonte: OGATA (2010)

Figura 16 - Parâmetros (ZN)



θ = tempo morto

τ = constante de tempo

Δy = variação gerada do sistema

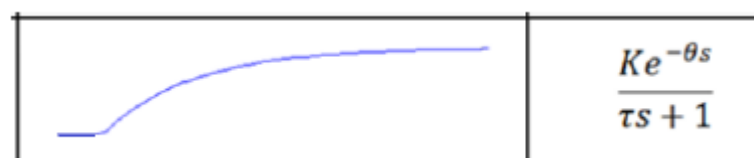
$\frac{\theta}{\tau}$ deve estar entre 0,2 e 0,4

fator de incontabilidade do processo

Valores acima de 4 deixam o processo instável

Fonte: OGATA (2010)

Figura 17 - Modelo FOPDT com função transferência



Fonte: VICENTE (S/A).

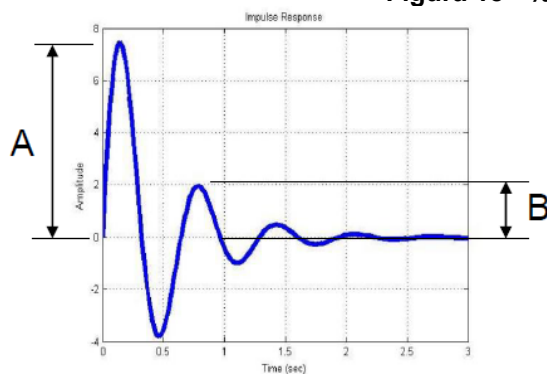
Tabela 1 - Cálculos para controladores (ZN)

Tipo do Controlador	Ganho Proporcional	Tempo Integral	Tempo Derivativo
P	$K_c = \frac{1,0}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right)$	--	--
PI	$K_c = \frac{0,9}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right)$	$\tau_I = 3,33\theta$	--
PID	$K'_c = \frac{1,2}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right)$	$\tau'_I = 2,00\theta$	$\tau'_D = \frac{\theta}{2}$

Fonte: VICENTE (S/A).

Objetivo desse método é garantir que em malha fechada o sistema responda de forma oscilatória e amortecida com uma taxa de decaimento de 0,25 como mostra a figura logo abaixo.

Figura 18 - % de decaimento



$$B = 0,25 \times A$$

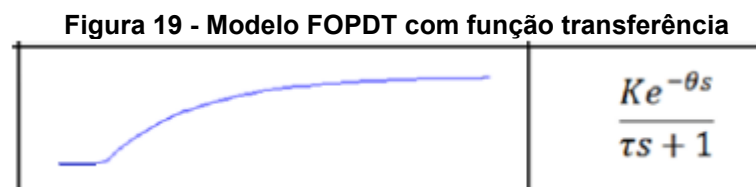
% de decaimento

Fonte: OLIVEIRA (1999).

2.6.2 Técnica da razão de decaimento de ¼ (Cohen Coon, 1953)

A técnica de Cohen e Coon, desenvolvida em 1953, é um método clássico de sintonia de controladores PID baseado no modelo FOPDT (First-Order Plus Dead Time), que busca otimizar a resposta do sistema para uma razão de decaimento de ¼ ou seja, cada pico subsequente na resposta transitória é 25% da amplitude do anterior. Diferentemente de Ziegler-Nichols (1942), que parte de experimentos em malha fechada, Cohen e Coon utilizam a curva de reação em malha aberta resposta ao

degrau para extrair os parâmetros do modelo FOPDT ganho estático (K), constante de tempo (τ) e tempo morto (θ), de acordo com a figura 19. Esses valores são então aplicados em fórmulas empíricas para calcular K_p , T_i e T_d , visando equilibrar rapidez, estabilidade e rejeição a perturbações (SEBORG, 2016). Como ilustrado na tabela 2.



Fonte: VICENTE (S/A).

Tabela 2 - Cálculos para controladores (Cohen Coon)

Tipo do Controlador	Ganho Proporcional	Tempo Integral	Tempo Derivativo
PID	$K_C = \left(\frac{\tau}{K\theta}\right)\left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau}\right)$	$\tau_I = \frac{\theta\left(32 + \frac{6\theta}{\tau}\right)}{13 + \frac{8\theta}{\tau}}$	$\tau_D = \frac{4\theta}{11 + \frac{2\theta}{\tau}}$

Fonte: VICENTE (S/A).

2.7 CODESYS E LINGUAGEM LADDER

O CODESYS (Control Development System) é uma plataforma de desenvolvimento integrado (IDE) amplamente utilizada na programação de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), destacando-se pela flexibilidade, conformidade com o padrão IEC 61131-3 e suporte a múltiplas linguagens de programação, incluindo Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST), Function Block Diagram (FBD) e outras. Desenvolvido pela empresa alemã 3S-Smart Software Solutions, o CODESYS permite a criação, simulação e depuração de lógicas de controle para automação industrial, sendo compatível com hardware de diversos fabricantes, como WAGO, Beckhoff e IFM (JOHN; TIEGELKAMP, 2010).

A linguagem Ladder, ou "diagrama ladder", é uma das mais populares no ambiente CODESYS devido à sua intuitividade gráfica, que remonta à lógica de relés eletromecânicos. Seu nome deriva da representação visual em "degraus" (rungs), onde contatos (entradas), bobinas (saídas) e blocos funcionais são organizados para simular circuitos elétricos. Essa abordagem facilita a transição de profissionais com formação em eletrotécnica para a programação de CLPs, pois reproduz a lógica de controle tradicional (PETRUZELLA, 2016). Segundo Bryan e Bryan (2009), a

linguagem Ladder é ideal para aplicações de lógica combinacional e sequencial, como o controle de esteiras transportadoras, sistemas de iluminação ou máquinas de embalagem, onde a clareza visual é crucial para manutenção.

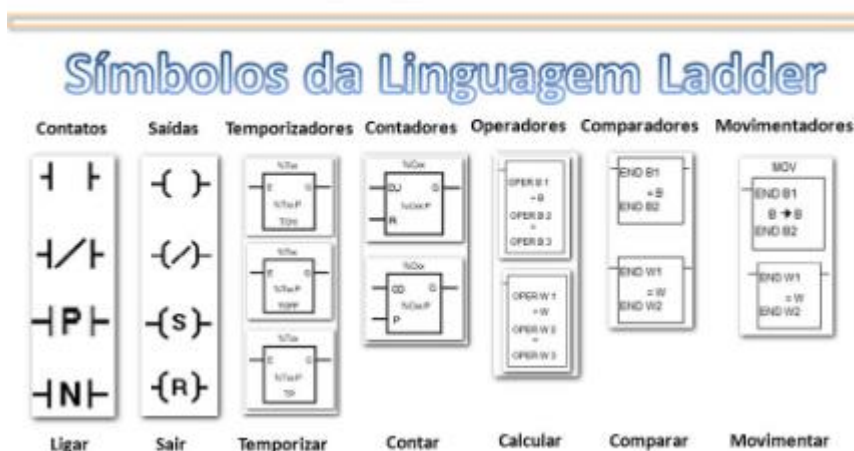
No CODESYS, a implementação de programas em Ladder vai além da simbologia básica, incorporando recursos avançados como:

- Funções de temporização e contagem (TON, TOF, CTU), essenciais para sequências automatizadas;
- Comunicação com periféricos (sensores, atuadores, IHM) via protocolos industriais (Modbus, OPC UA);
- Integração com outras linguagens IEC 61131-3, permitindo hibridizar Ladder com ST ou FBD (BATTY, 2014).

Um exemplo prático é o controle de nível em um tanque: um programa Ladder no CODESYS pode usar contatos associados a sensores de nível (entradas digitais) para acionar válvulas (saídas) e bombas, enquanto temporizadores regulam ciclos de enchimento e esvaziamento. A simulação integrada no CODESYS permite testar a lógica em um ambiente virtual antes da implantação física, reduzindo riscos e custos (LEE, 2017). Conforme a figura 20.

Apesar das críticas sobre limitações em algoritmos matemáticos onde linguagens como ST são mais eficientes o Ladder mantém relevância em aplicações de baixa a média complexidade. Como ressalta Petruzella (2016), sua legibilidade é insuperável para equipes multidisciplinares, combinando engenheiros e técnicos de campo. Já o CODESYS, segundo Hoffmann (2018), destaca-se na Indústria 4.0 ao suportar IoT e análise de dados em tempo real, expandindo o papel tradicional dos CLPs.

Figura 20 - Simbologias Ladder
Linguagem Ladder



Fonte: PETRUZELLA (2016).

2.8 SIMMAQ 3D E CONEXÃO MODBUS

O Simmaq 3D é um software de simulação e modelagem 3D voltado para a automação industrial, permitindo a criação de protótipos virtuais de plantas didáticas ou sistemas produtivos, tanques de nível, esteiras transportadoras, ou redes de distribuição térmica, como se pode ver nas figuras 21 e 22.

Desenvolvido para integrar-se a ambientes de controle realistas, o Simmaq 3D emula o comportamento dinâmico de sensores, atuadores e processos físicos, oferecendo uma plataforma segura e econômica para testes de estratégias de controle antes da implementação em hardware físico (SEBORG et al., 2016).

Uma de suas características mais relevantes é a capacidade de comunicação via protocolo Modbus, padrão amplamente adotado na indústria para conectar dispositivos como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), IHMs (Interfaces Homem-Máquina) e sistemas SCADA (Supervisão e Aquisição de Dados).

A conexão Modbus no Simmaq 3D opera geralmente no modo Modbus TCP/IP, utilizando endereçamento de rede para troca de dados em tempo real entre o modelo virtual e controladores externos, como os programados em CODESYS ou outros softwares compatíveis. Essa integração permite, por exemplo, que um CLP virtual no Simmaq 3D envie sinais de saída (abertura de válvulas) e receba dados de sensores (nível de líquido) através de registradores Modbus (holding registers ou input registers), replicando o comportamento de um sistema físico (PETRUZELLA, 2016).

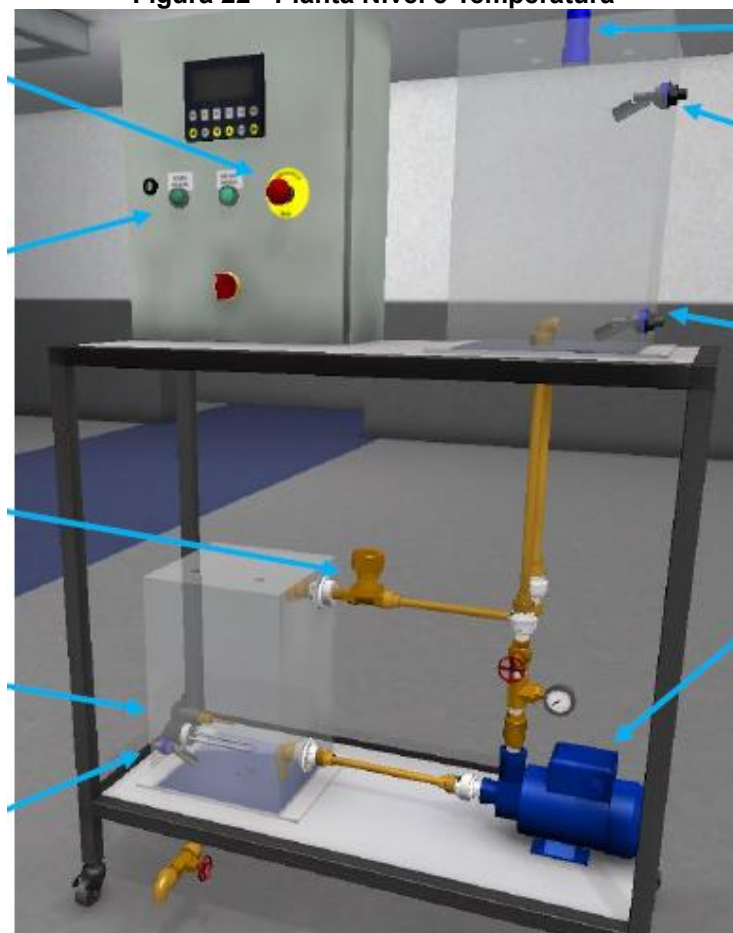
Segundo Ogata (2010), essa abordagem é essencial para validar lógicas de controle PID ou sequenciais em um ambiente livre de riscos operacionais.

Figura 21 - Ambientes Simmaq 3D



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 22 - Planta Nível e Temperatura

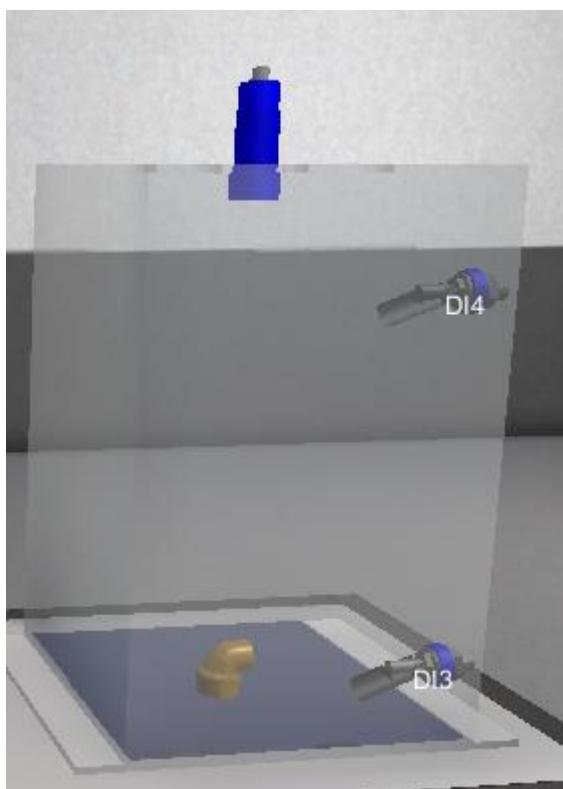


Fonte: Acervo do Autor (2025).

2.9 SENSOR ULTRASSÔNICO

Os sensores ultrassônicos são dispositivos amplamente utilizados para medição de distância ou detecção de objetos sem contato físico, como ilustrado na figura 23. Seu funcionamento baseia-se na emissão de ondas sonoras em frequências acima do limite audível humano (geralmente entre 20 kHz e 200 kHz) e na captação do eco refletido por um obstáculo. Conforme explica Fraden (2016), esse princípio é semelhante ao da ecolocalização utilizada por morcegos, onde o tempo entre a emissão do pulso e a recepção do eco é convertido em distância.

Figura 23 - Sensor Ultrassônico



Fonte: Acervo do Autor (2025).

O princípio de funcionamento do sensor é que possui dois componentes principais: um transdutor emissor (que converte energia elétrica em ultrassom) e um transdutor receptor (que faz o inverso). Ao emitir um pulso sonoro, o sensor inicia um temporizador, que é interrompido quando o eco é detectado. A distância d é calculada pela seguinte fórmula:

$$d = ((v * t) / 2)$$

v = velocidade do som no meio (aproximadamente 343 m/s no ar a 20°C);

t = tempo de ida e volta do sinal.

O fator 2 considera que o som percorre a distância duas vezes (ida e volta).

2.10 SENSOR CHAVE BOIA

A figura 24 apresenta o sensor chave boia, também conhecidos como chaves de nível por boia, são dispositivos amplamente utilizados para monitorar e controlar o nível de líquidos em tanques, reservatórios e sistemas industriais. Seu funcionamento baseia-se no princípio físico da flutuação uma boia, geralmente feita de material leve e impermeável (como plástico ou metal), move-se verticalmente conforme o nível do líquido, acionando um mecanismo de interruptor que altera o estado de um circuito elétrico. Conforme destaca Johnson (2019), essa simplicidade mecânica os torna uma solução robusta e econômica para aplicações onde a precisão extrema não é crítica.

Figura 24 - Sensor chave boia



Fonte: Festo (2019).

O princípio de funcionamento do sistema baseia-se na utilização de uma boia conectada a uma haste ou braço articulado, que se move conforme o líquido sobe ou

desce. Quando atinge um nível pré-definido, o movimento aciona um interruptor interno, que pode ser:

- Mecânico: Contatos físicos são abertos ou fechados diretamente pelo movimento da boia (ex.: microswitch).
- Magnético: Um ímã na boia ativa um reed switch (interruptor de lâminas) sem contato físico, aumentando a durabilidade em ambientes corrosivos (Smith & Patel, 2020).

A saída do sensor é geralmente um sinal digital (ON/OFF), usado para ligar/desligar bombas, acionar alarmes ou enviar alertas a sistemas de controle.

2.11 VÁLVULA SOLENOIDE

As válvulas solenoides são dispositivos eletromecânicos amplamente utilizados para controle automatizado do fluxo de fluidos (líquidos, gases ou vapores) em sistemas industriais, residenciais e comerciais, como pode se observar na figura 25.

Seu funcionamento baseia-se no princípio do eletromagnetismo uma bobina (solenóide) gera um campo magnético quando energizada, movendo um êmbolo que abre ou fecha a passagem do fluido. Conforme destaca Nesbitt (2016), essa combinação de eletricidade e mecânica permite respostas rápidas e precisas, tornando-as essenciais em aplicações que exigem automação.

Figura 25 - Válvula Solenoide



Fonte: Nesbitt (2016).

Principais características e componentes

- Bobina Solenoide: Enrolamento de fio condutor que, ao receber corrente elétrica, cria um campo magnético. A força magnética resultante move o êmbolo (ou pistão) dentro da válvula.
- Êmbolo: Peça metálica móvel que abre ou bloqueia o orifício de passagem do fluido. Em válvulas normalmente fechadas (NF), o êmbolo mantém a válvula fechada sem energia; em normalmente abertas (NA), ocorre o inverso (Parker Hannifin, 2020).
- Corpo da Válvula: Fabricado em materiais como latão, aço inoxidável ou plástico, resistente à corrosão e compatível com o fluido controlado (ASME B16.34, 2017).

Tipos e Configurações:

- Válvulas de 2 vias: Controlam o fluxo em uma única direção (aberto/fechado).
- Válvulas de 3 vias: Direcionam o fluido entre diferentes portas, úteis em sistemas de mistura ou desvio (Nesbitt, 2016).
- Válvulas proporcionais: Permitem ajuste contínuo do fluxo por meio de modulação da corrente elétrica, ideal para controle de pressão ou vazão (Festo, 2021).

2.12 BOMBA CENTRIFUGA

A figura 26 apresenta o equipamento bomba centrífuga ou motobomba possui uma roda com palhetas que gira em alta velocidade, transferindo energia ao fluido. O movimento rotacional cria uma força centrífuga, expelindo o fluido para a periferia do rotor e direcionando-o para uma carcaça espiral, onde a energia cinética é convertida em pressão estática (Gulich, 2014). O eixo conecta o rotor a um motor elétrico ou turbina, garantindo o acionamento.

Figura 26 - Bomba Centrífuga



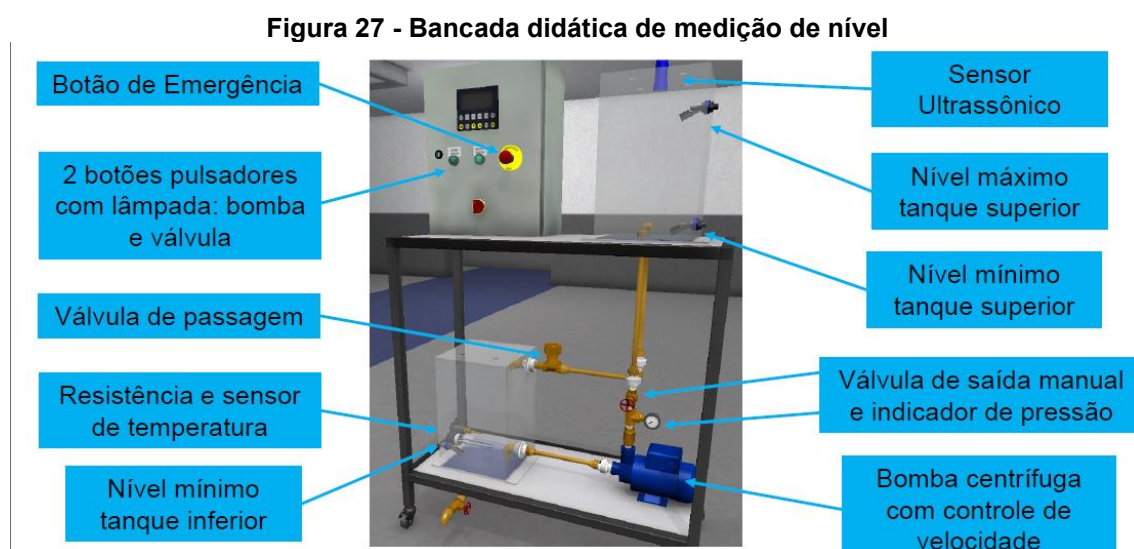
Fonte: FESTO (2016).

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA A SER CONTROLADO

Nesta seção, serão detalhados o sistema de medição de nível que é a descrição dos componentes e princípios de funcionamento. A identificação de modelos de primeira ordem com atraso onde é a metodologia aplicada para caracterizar a dinâmica da planta. A abordagem de simulação e experimentação dos procedimentos adotados para validação teórica e prática. A programação do CLP (Controlador Lógico Programável) que é a lógica de controle implementada e integração com o sistema. O projeto de sintonia do controlador PID que são as estratégias e critérios utilizados para ajuste dos parâmetros do controlador. O objetivo é apresentar, de forma organizada, as etapas técnicas e experimentais que fundamentam este trabalho.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL

A bancada virtual didática utilizada neste projeto foi desenvolvida pela empresa Automatus para ser realizados teste e análises didáticas em malhas de controle de nível e temperatura. Automatus (2014). Neste projeto foi utilizado apenas a malha de nível. Na figura logo abaixo temos uma ilustração da planta e seus respectivos nomes de equipamentos.



Fonte: Acervo do Autor (2025).

A bancada virtual desenvolvida pela Automatus para controle de nível e temperatura é composta por um sistema integrado que combina elementos de

automação e segurança. No centro do projeto, destacam-se dois botões pulsadores com lâmpada de sinalização, um para acionamento manual ou emergencial da bomba centrífuga (responsável pelo transporte do líquido) e outro para controle da válvula de passagem, que regula o fluxo entre os tanques.

Ambos os botões fornecem feedback visual de seu status operacional. A bancada também inclui uma resistência elétrica e um sensor de temperatura, que garantem o aquecimento e o monitoramento preciso da variável térmica, evitando desvios indesejados. No tanque inferior, um sensor de nível mínimo assegura que o sistema não opere com volume crítico, prevenindo danos por esvaziamento total.

Para o controle de nível, um sensor ultrassônico é utilizado no tanque superior, definindo os limites máximo e mínimo de operação, o que evita transbordamentos ou funcionamento abaixo da capacidade segura. A saída do líquido é gerenciada por uma válvula manual com indicador de pressão, permitindo ajustes precisos no fluxo e monitoramento da pressão interna. A bomba centrífuga, por sua vez, possui controle de velocidade ajustável, integrado a estratégias automáticas para manter a vazão desejada.

A bancada simula um ambiente industrial real, focando em controle PID, segurança operacional (como paradas de emergência e limites de nível) e monitoramento em tempo real por meio de indicadores luminosos e sensores. Projetada para testes de algoritmos, simulação de falhas e validação de parâmetros, essa solução reflete a expertise da Automatus em sistemas de automação robustos e adaptáveis.

A bancada também conta com um painel de controle onde é possível visualizar a planta de vistas diferentes que conta com 6 tipos de visualização cada um de um ângulo diferente da planta. De acordo com a figura 28.

Possui a opção de visualizar as siglas dos equipamentos ou deixa-las ocultas. Uma lista de atuadores digitais e analógicos e também uma lista de sensores digitais e analógicos. Dispõe de uma opção manual ou automático onde é possível fazer o controle da planta manualmente ou automaticamente por um CLP (controlador lógico programável).

No painel também conta com um botão de parada de emergência onde cessa toda a operação que esteja ocorrendo no momento. Dispõe também de dois botões digitais para ligar e desligar a bomba e a válvula solenoide e um botão para acrescentar fluido no tanque 01 da planta didática.

Figura 28 - Painel de Controle



Fonte: Acervo do Autor (2025).

O protocolo Modbus integrado ao simulador Simmaq 3D é uma ferramenta essencial para emular a comunicação industrial em ambientes virtuais, permitindo a conexão entre dispositivos de controle e sistemas de supervisão como o CLP virtual. No contexto do Simmaq 3D, o Modbus opera geralmente no modo TCP/IP, simulando a troca de dados entre CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), sensores, atuadores e interfaces homem-máquina (IHM). Essa funcionalidade é crítica para testar estratégias de automação, validar a leitura de variáveis (como nível, temperatura ou pressão) e ajustar parâmetros de controladores PID em tempo real, sem a necessidade de hardware físico.

O simulador replica cenários industriais realistas, onde o Modbus atua como a "ponte" entre o software de controle (ex.: SCADA, Soft PLCs) e os modelos virtuais de plantas industriais. Por exemplo, é possível configurar registradores Modbus (como holding registers ou coils) para simular a leitura de sensores ultrassônicos de nível, o acionamento de bombas ou o ajuste de válvulas. Além disso, o SIMmaq 3D permite a simulação de falhas de comunicação (como atrasos ou perda de pacotes), ajudando os usuários a entenderem a robustez de seus sistemas e a implementarem mecanismos de redundância.

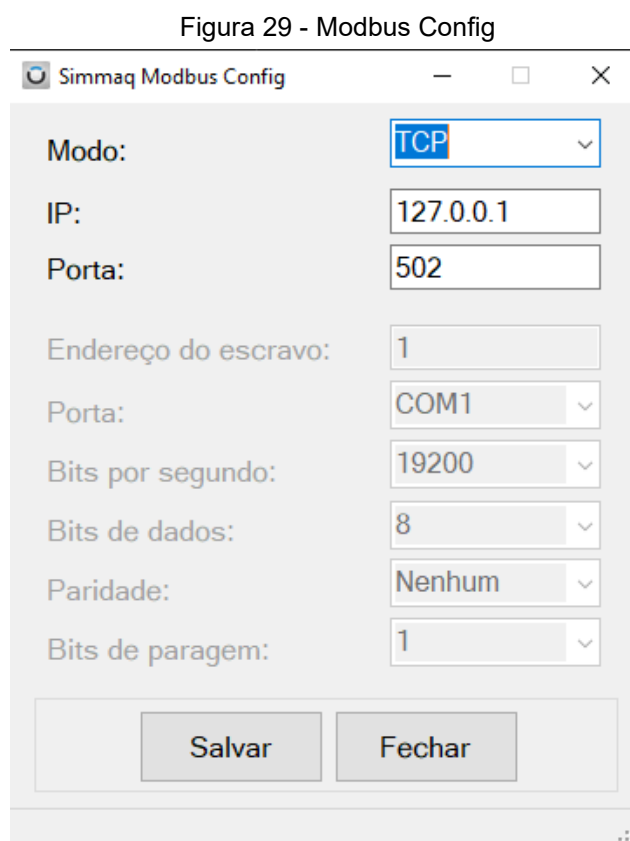
A integração com o Modbus também facilita a validação de protocolos e a padronização de interfaces, tornando o simulador uma ferramenta versátil para capacitação técnica, desenvolvimento de algoritmos de controle e testes de integração em projetos de automação industrial. Sua capacidade de emular redes industriais

complexas, aliada à flexibilidade do Modbus, torna o SIMmaq 3D uma solução eficaz para laboratórios virtuais e ambientes educacionais.

A figura 29 logo abaixo apresenta a interface gráfica do Modbus Config onde os parâmetros configurados foram:

- Modo: está selecionada a opção TCP o que habilita os campos de configuração correspondente a comunicação TCP IP.
- IP: 127.0.0.1 que corresponde ao endereço de loopback/localhost.
- Porta: 502 é a porta padrão utilizada em comunicação Modbus TCP.

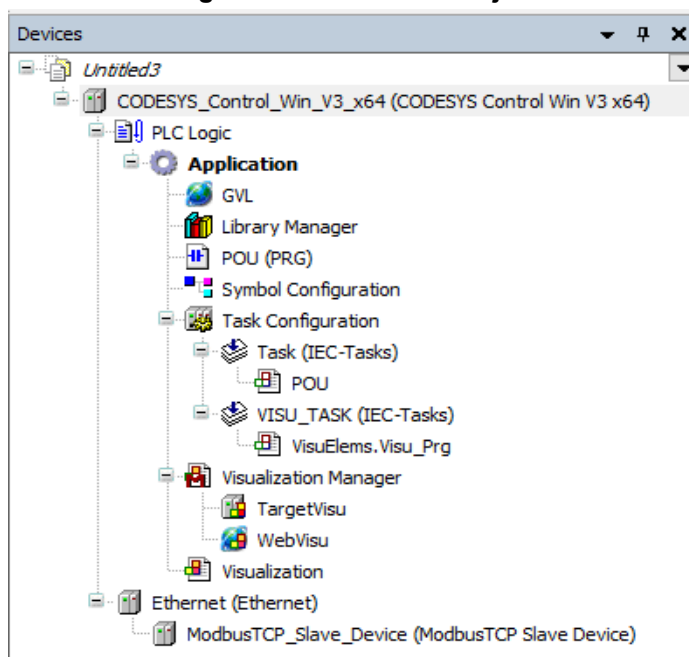
Os demais campos estão relacionados a comunicação serial utilizada em Modbus RTU e estão desabilitados.



Fonte: Acervo do Autor (2025).

A ilustração abaixo detalha o passo a passo seguido no Codesys para fazer o projeto do controle PID do nível.

Figura 30 - Arvore do Projeto



Fonte: Acervo do Autor (2025).

CODESYS Control Win V3 x64 são configurações de dispositivos, onde CODESYS Control Win V3 x64 refere-se ao runtime (tempo de execução) do CODESYS em ambiente Windows, emulando um CLP virtual para testes e simulação.

Application contém a aplicação principal, incluindo programas, variáveis e configurações específicas do projeto.

GVL (Global Variable List): Lista de variáveis globais acessíveis em todo o projeto, usadas para compartilhar dados entre diferentes partes do programa.

Library Manager: Gerenciador de bibliotecas externas, que permite importar funções pré-desenvolvidas (ex: blocos PID, comunicação Modbus).

POU (PRG): Program Organization Unit (Unidade de organização do programa), onde são escritos os programas principais (ladder, ST, FBD, etc.).

Symbol Configuration: Define mapeamento de símbolos (nomes de variáveis) para endereços físicos ou lógicos.

Configuração de Tarefas (Task Configuration): Define como e quando os blocos de programas (POUs) são executados dentro do CLP. No codesys uma task ou tarefa representa um ciclo ou evento no qual determinadas rotinas de código são executadas.

Task (IEC-Tasks): define as tarefas de execução do CLP, como ciclos de varredura (scan cycles).

POU: Corresponde a um bloco de código que será executado pela tarefa a qual ela está associada.

VISU_TASK: Tarefa dedicada à atualização da visualização (IHM), garantindo que a interface gráfica funcione sem conflitos com a lógica de controle.

VisuElms.Visu_Prg: Programa associado à dinâmica da visualização (ex: atualização de valores em tempo real).

Visualization Manager: gerencia os elementos da interface homem-máquina (IHM), como telas, botões e indicadores.

TargetVisu: Configuração da visualização para dispositivos específicos (ex: painéis operacionais).

WebVisu: Permite acesso à interface via navegador web, útil para monitoramento remoto.

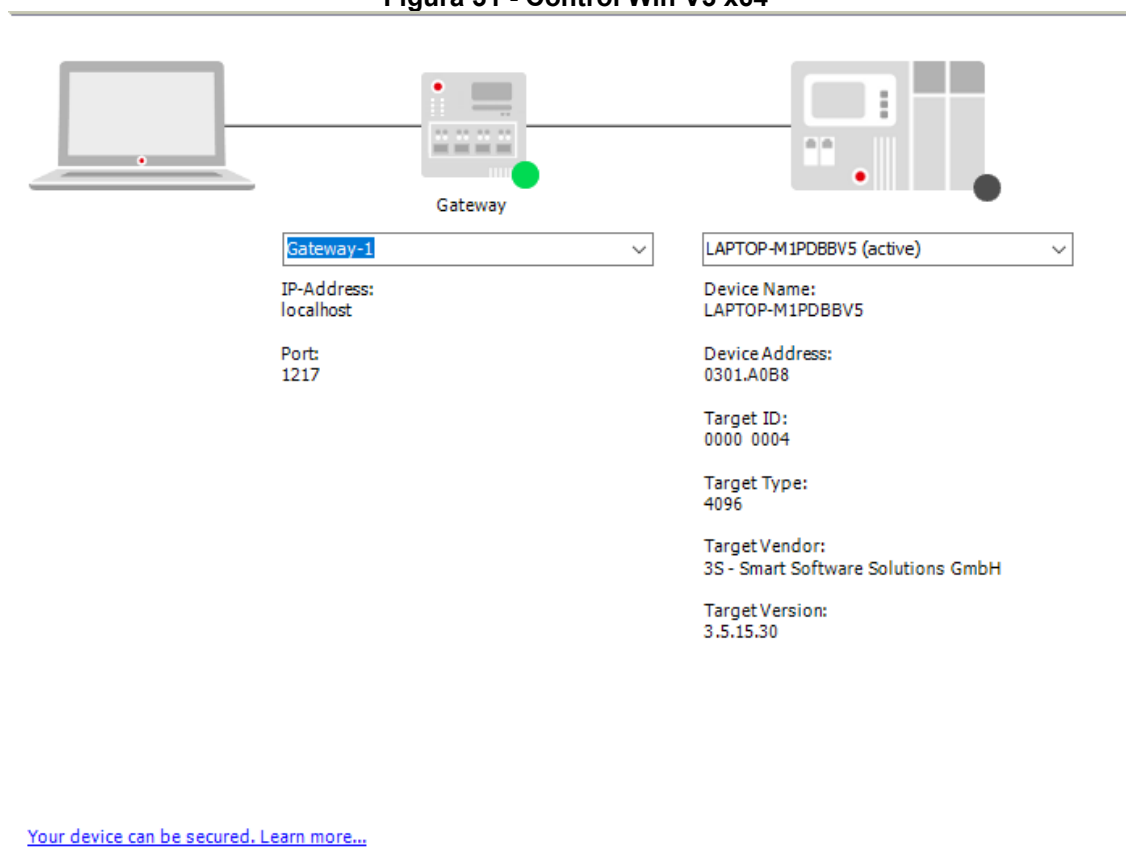
Visualization: É onde é criada as telas gráficas de interface do usuário (IHM) dentro do codesys.

Ethernet: configuração da interface de rede para comunicação com outros dispositivos ou sistemas.

ModbusTCP_Slave_Device: é um dispositivo configurado como slave (escravo) no protocolo Modbus TCP/IP, permitindo que o CLP troque dados com mestres (ex: SCADA, outros CLPs) via rede.

A figura 31 abaixo exhibe as configurações de comunicação de um Gateway (no caso, Gateway-1) dentro do ambiente CODESYS Control Win V3 x64, utilizado para emular um CLP (Controlador Lógico Programável) virtual. Os detalhes são relacionados à conexão entre o ambiente de desenvolvimento (CODESYS IDE) e o runtime (tempo de execução) do CLP simulado. Abaixo, a explicação dos elementos.

Figura 31 - Control Win V3 x64



Fonte: Acervo do Autor (2025).

A seguir as principais configurações:

Gateway-1: Indica que esta é uma instância de gateway configurada para comunicação.

Status active: Mostra que este gateway está ativo e em uso no momento.

IP-Address: A comunicação ocorre na própria máquina (endereço de loopback), sem necessidade de rede externa. Ideal para testes e simulações locais.

Port: 1217 porta TCP/IP utilizada para estabelecer a conexão entre o software CODESYS e o CLP virtual.

Device Name: LAPTOP-M1PDBBV5 nome do computador onde o CLP virtual está sendo executado. Identifica o dispositivo na rede local.

Device Address: 0301.A0B8 endereço lógico/físico do dispositivo em formato hexadecimal, usado para identificação única em protocolos de comunicação industrial.

Configurações do Alvo (Target) Target ID: 0000 0004 Identificador único do CLP virtual dentro do projeto, útil em redes com múltiplos dispositivos.

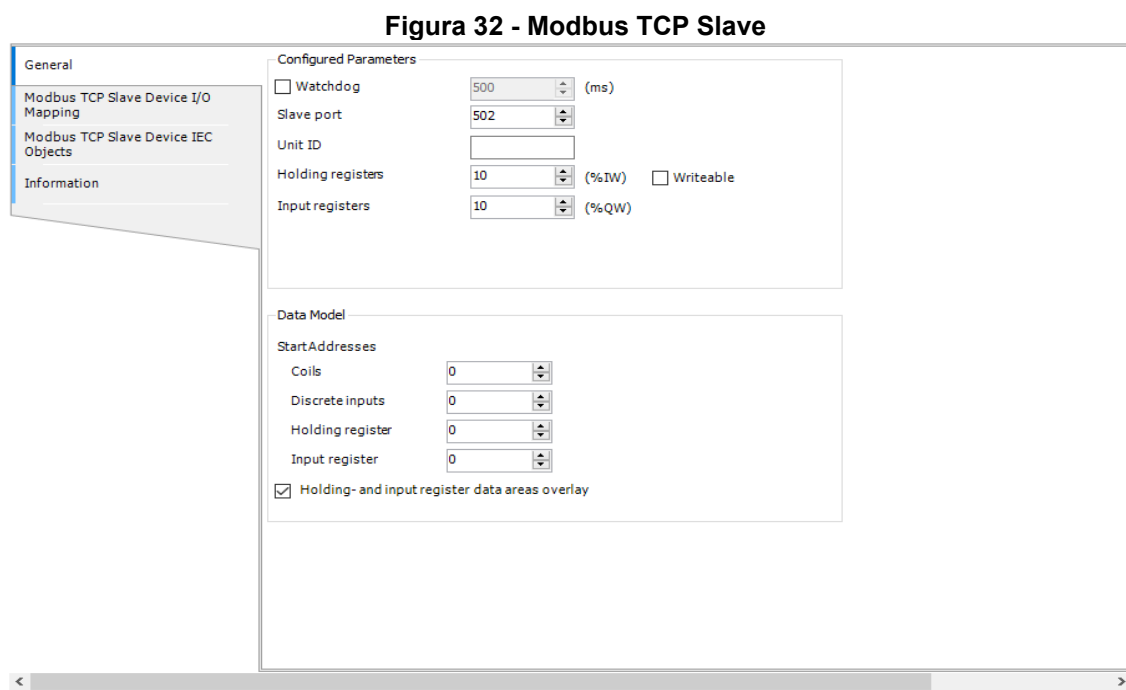
Target Type: 4096 códigos que define o tipo de dispositivo. O valor "4096" geralmente corresponde a um *Soft PLC* (CLP baseado em software).

Target Vendor: 3S - Smart Software Solutions GmbH fabricante do runtime (tempo de execução) (a empresa responsável pelo CODESYS).

Target Version: 3.5.15.30 versões específica do runtime (tempo de execução) instalado, garantindo compatibilidade com bibliotecas e funcionalidades.

Essa configuração é típica em projetos de simulação, onde o CLP virtual opera no mesmo computador que o ambiente de desenvolvimento. A porta 1217 e o endereço localhost facilitam a integração com interfaces IHM, sistemas SCADA ou ferramentas de monitoramento, sem exigir hardware físico.

A figura 32 descreve a configuração de um dispositivo Modbus TCP Slave no CODESYS, utilizado para simular ou implementar a comunicação Modbus em um projeto de automação. Abaixo, a explicação detalhada dos elementos apresentados.



Fonte: Acervo do Autor (2025).

A seguir, serão apresentadas as configurações do sistema.

Modbus TCP Slave Device I/O Mapping: Define o mapeamento entre os endereços Modbus e as variáveis do CLP (ex.: associar registradores a variáveis do programa).

Modbus TCP Slave Device IEC Objects: Relaciona os objetos IEC 61131-3 (como variáveis globais) que serão expostos via Modbus para comunicação externa.

Information: Fornece detalhes gerais sobre o dispositivo configurado (ex: status, versão do driver).

Com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão do funcionamento do projeto, a seguir são apresentados os parâmetros configurados na aba geral:

Watchdog: 500 (ms) temporizador que monitora a atividade da comunicação. Se nenhum dado for recebido em 500 ms, o dispositivo pode entrar em estado de falha, garantindo segurança operacional.

Slave port: 502, porta TCP padrão para comunicação Modbus TCP/IP, usada para receber comandos de um mestre.

Unit ID: 10, identificador único do dispositivo escravo na rede Modbus, permitindo que múltiplos dispositivos coexistam no mesmo IP.

Holding registers: 10 (%NW) Writeable (Gravável), define 10 registradores de escrita/leitura (endereçados como %NW0 a %NW9) para armazenar dados ajustáveis (ex.: setpoints, parâmetros de controle).

Input registers: 10 (%IW), configura 10 registradores somente leitura (endereçados como %IW0 a %IW9) para dados de entrada (ex.: leituras de sensores).

Modelo de Dados (Data Model):

StartAddresses: Define os endereços iniciais para cada tipo de dado Modbus:

Discrete inputs: Entradas binárias (ex.: sensores ON/OFF).

Holding register: Registradores de escrita/leitura (usados para controle).

Input register: Registradores somente leitura (usados para monitoramento).

Calls: Indica quantas vezes o serviço Modbus foi invocado, útil para diagnóstico de comunicação.

Holding- and input register data areas overlay: Alerta sobre a sobreposição de áreas de memória entre registradores, o que pode causar conflitos se não for gerenciado corretamente.

Essa configuração permite que um mestre Modbus (ex.: CLP, sistema SCADA) acesse os dados do escravo via TCP/IP, usando:

- Holding registers para enviar comandos (ex.: ajustar velocidade de uma bomba).
- Input registers para ler valores (ex.: nível de um tanque, temperatura).
- Discrete inputs para monitorar estados binários (ex.: alarmes).

A porta 502 e o Unit ID 10 garantem que a comunicação seja direcionada corretamente, enquanto o watchdog (monitoramento) assegura resiliência contra falhas de rede. A sobreposição de áreas de memória overlay (sobreposição) requer atenção para evitar corrupção de dados, sendo comum definir blocos de endereços distintos para cada tipo de registrador.

A figura 33 descreve as configurações de rede Ethernet de um dispositivo industrial o CLP.

Figura 33 - Ethernet

The screenshot shows the 'General' tab of the Ethernet configuration window. The sidebar on the left contains the following tabs: General, Log, Status, Ethernet Device I/O Mapping, Ethernet Device IEC Objects, and Information. The main configuration area includes the following fields:

- Interface:** A text box with a dropdown arrow.
- IP address:** A text box containing '192 . 168 . 0 . 1'.
- Subnet mask:** A text box containing '255 . 255 . 255 . 0'.
- Default gateway:** A text box containing '0 . 0 . 0 . 0'.
- Adjust operating system settings:** An unchecked checkbox.

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Configurações Gerais da Interface Ethernet:

IP Address: 192.168.0.1, endereço IP único atribuído ao dispositivo na rede local, permitindo comunicação com outros dispositivos (ex.: CLPs, IHMs, PCs).

Subnet Mask: 255.255.255.0, define a máscara de sub-rede, indicando que os dispositivos devem estar no intervalo 192.168.0.1 a 192.168.0.254 para se comunicarem diretamente.

Default Gateway: 0.0.0.0, indica que não há gateway padrão configurado (roteador para comunicação externa). Isso é típico em redes locais isoladas, sem acesso à internet ou a outras sub-redes.

3.2 LISTA DE ALOCAÇÕES

Na tabela abaixo consta todos os endereços das entradas e saídas digitais e analógica da planta didática para controle do nível e temperatura onde esses endereços são fornecidos pela fabricante da planta a Automatus.

Tabela 3 - Endereços das entradas e saídas da planta

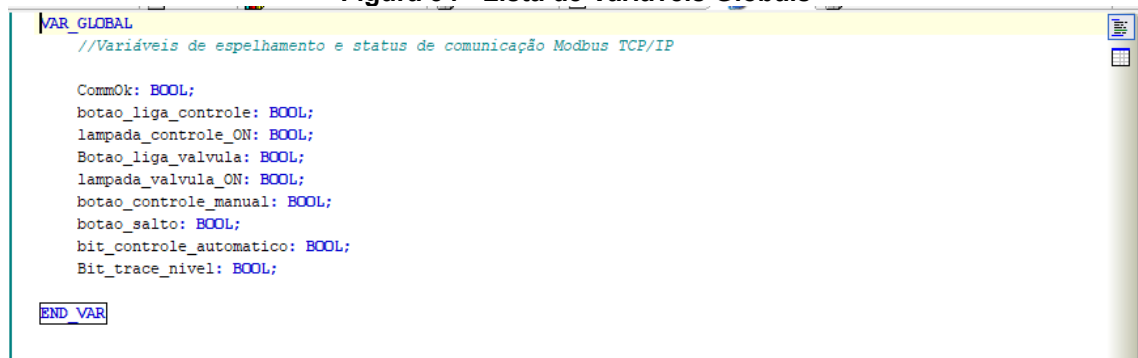
Endereço	Descrição Entradas Digitais
%IX0.0	Botão de acionamento manual da bomba
%IX0.1	Botão de acionamento manual da válvula
%IX0.2	Nível mínimo de fluido no reservatório inferior
%IX0.3	Nível mínimo de fluido no reservatório superior
%IX0.4	Nível máximo de fluido no reservatório superior
%IX0.5	Parada de emergência (NF)
Endereço	Descrição Saídas Digitais
%QX4.0	Válvula de interligação do reservatório superior com o inferior
%QX4.1	Acionamento da bomba (transfere fluido do reservatório inferior para o superior)
%QX4.2	Sinaleiro luminoso de bomba manual
%QX4.3	Sinaleiro luminoso de válvula manual
%QX4.4	Aciona o resistor de aquecimento do fluido
Endereço	Descrição Entradas Analógicas
%IW3	Sensor ultrassônico de nível - – 8 bits (0 a 255 / 0 a 20 litros)
%IW4	Sensor de temperatura - – 8 bits (0 a 255 / 0 a 100°C)
Endereço	Descrição Saída Analógica
%QW5	Ajuste de velocidade da bomba - – 8 bits (0 a 255 / 0 a 100%)

Fonte: Acervo do Autor (2025).

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL EM LINGUAGEM LADDER

Conforme pode ser observado na figura 34, são apresentadas as variáveis globais que foram utilizadas na programação do PID para nível. As variáveis tipo BOOL possuem 2 estados ligadas ou desligadas.

Figura 34 - Lista de Variáveis Globais



```

VAR_GLOBAL
//Variáveis de espelhamento e status de comunicação Modbus TCP/IP

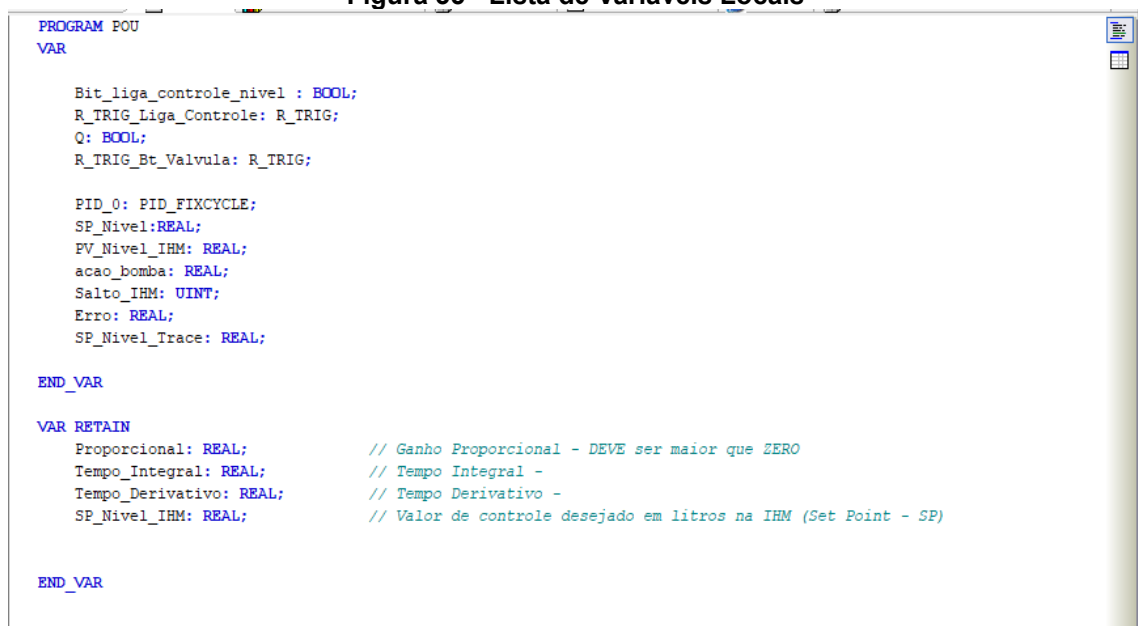
CommOk: BOOL;
botao_liga_controle: BOOL;
lampada_controle_ON: BOOL;
Botao_liga_valvula: BOOL;
lampada_valvula_ON: BOOL;
botao_controle_manual: BOOL;
botao_salto: BOOL;
bit_controle_automatico: BOOL;
Bit_trace_nivel: BOOL;

END_VAR
  
```

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Abaixo estão as variáveis locais do programa onde só podem ser utilizadas no Bloco de código que foram criadas.

Figura 35 - Lista de Variáveis Locais



```

PROGRAM POU
VAR

    Bit_liga_controle_nivel : BOOL;
    R_TRIG_Liga_Control: R_TRIG;
    Q: BOOL;
    R_TRIG_Bt_Valvula: R_TRIG;

    PID_0: PID_FIXCYCLE;
    SP_Nivel: REAL;
    PV_Nivel_IHM: REAL;
    acao_bomba: REAL;
    Salto_IHM: UINT;
    Erro: REAL;
    SP_Nivel_Trace: REAL;

END_VAR

VAR RETAIN
    Proporcional: REAL;           // Ganho Proporcional - DEVE ser maior que ZERO
    Tempo_Integral: REAL;         // Tempo Integral -
    Tempo_Derivativo: REAL;       // Tempo Derivativo -
    SP_Nivel_IHM: REAL;           // Valor de controle desejado em litros na IHM (Set Point - SP)

END_VAR
  
```

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Nas figuras 36 e 37, estão as variáveis que foram declaradas dentro do Modbus TCP Slave Device I/O Mapping que se refere ao processo de mapeamento de variáveis de seu programa como entradas e saídas digitais / analógicas para registros Modbus TCP permitindo que um dispositivo externo leia ou escreva dados no seu CLP onde ocorre a interação entre a planta didática e o programa no codesys.

Figura 36 - Lista de Variáveis declaradas via Modbus TCP Slave

Find	Filter	Show all	Add FB for IO Channel... Go to Instance				
Variable	Mapping	Channel	Address	Type	Unit	Description	
Botao_Valvula		Bit1	%IX0.1	BOOL			
nivel_min_inf		Bit2	%IX0.2	BOOL			
nivel_max_sup		Bit3	%IX0.3	BOOL			
emergencia		Bit4	%IX0.4	BOOL			
		Bit5	%IX0.5	BOOL			
		Bit6	%IX0.6	BOOL			
		Bit7	%IX0.7	BOOL			
		Bit8	%IX1.0	BOOL			
		Bit9	%IX1.1	BOOL			
		Bit10	%IX1.2	BOOL			
		Bit11	%IX1.3	BOOL			
		Bit12	%IX1.4	BOOL			
		Bit13	%IX1.5	BOOL			
		Bit14	%IX1.6	BOOL			
		Bit15	%IX1.7	BOOL			
		Inputs[1]	%IW1	WORD			
		Inputs[2]	%IW2	WORD			
Sensor_Ultrasonico...		Inputs[3]	%IW3	WORD			
		Inputs[4]	%IW4	WORD			
		Inputs[5]	%IW5	WORD			

Modbus Input Registers Reset Mapping Always update variables Use parent device setting

 = Create new variable
 = Map to existing variable

Bus Cycle Options

Bus cycle task Use parent bus cycle setting

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 37 - Lista de Variáveis declaradas via Modbus TCP Slave

Variable	Mapping	Channel	Address	Type	Unit	Description
Liga_Valvula		Bit0	%QX4.0	BOOL		
Liga_Bomba		Bit1	%QX4.1	BOOL		
Lamp_Bomba		Bit2	%QX4.2	BOOL		
Lamp_Valvula		Bit3	%QX4.3	BOOL		
		Bit4	%QX4.4	BOOL		
		Bit5	%QX4.5	BOOL		
		Bit6	%QX4.6	BOOL		
		Bit7	%QX4.7	BOOL		
		Bit8	%QX5.0	BOOL		
		Bit9	%QX5.1	BOOL		
		Bit10	%QX5.2	BOOL		
		Bit11	%QX5.3	BOOL		
		Bit12	%QX5.4	BOOL		
		Bit13	%QX5.5	BOOL		
		Bit14	%QX5.6	BOOL		
		Bit15	%QX5.7	BOOL		
		Outputs[3]	%QW3	WORD		
		Outputs[4]	%QW4	WORD		
Velocidade_Bomba		Outputs[5]	%QW5	WORD		
		Outputs[6]	%QW6	WORD		

= Create new variable = Map to existing variable
 Bus Cycle Options
 Bus cycle task Use parent bus cycle setting

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Conforme a figura 38, a lógica ladder do circuito "R.TRIG_Liga_Controlre" inicia com o acionamento do botão da bomba (Botao_Bomba), que é um contato normalmente aberto. Quando pressionado, esse botão envia um sinal para o bloco R TRIG, responsável por detectar o flanco de subida do sinal de clock. Esse bloco gera um pulso único de saída (R TRIG_Liga_Controlre.O) sempre que o botão é acionado. Esse pulso é utilizado para alternar o estado do bit Bit_liga_controle_nivel, criando uma lógica de toggle (liga/desliga). Por exemplo, se o controle estiver desabilitado, o pulso do R TRIG o habilita, e vice-versa.

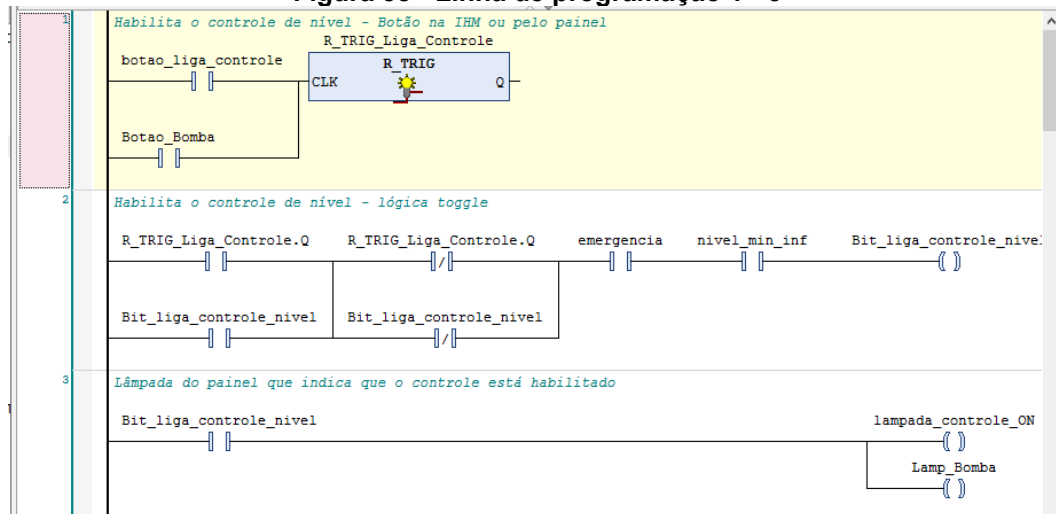
A segurança do sistema é garantida por duas condições críticas: a entrada de emergência e o nivel_min_inf (nível mínimo inferior). Ambos são contatos normalmente fechados que, quando ativados (por exemplo, em uma emergência ou se o nível do sistema atingir um limite crítico, forçam o desligamento do Bit_liga_controle_nivel, interrompendo imediatamente o controle. Isso assegura que o sistema priorize situações de risco.

Para indicar visualmente o estado do controle, o bit Bit_liga_controle_nivel está conectado a uma bobina que aciona a lampada_controle_ON. Quando o bit está ativo (valor 1), a lâmpada do painel acende, sinalizando que o controle de nível está

habilitado. Se o bit for desligado por ação do usuário, emergência ou nível mínimo, a lâmpada se apaga, fornecendo feedback claro ao operador.

Em resumo, a lógica funciona da seguinte forma: o pressionamento do botão alterna o estado do controle, condições críticas interrompem o funcionamento automaticamente, e uma lâmpada reflete o status atual. Essa estrutura combina usabilidade (toggle simples) com segurança (paradas de emergência) e transparência operacional (indicador visual), garantindo um controle robusto e intuitivo.

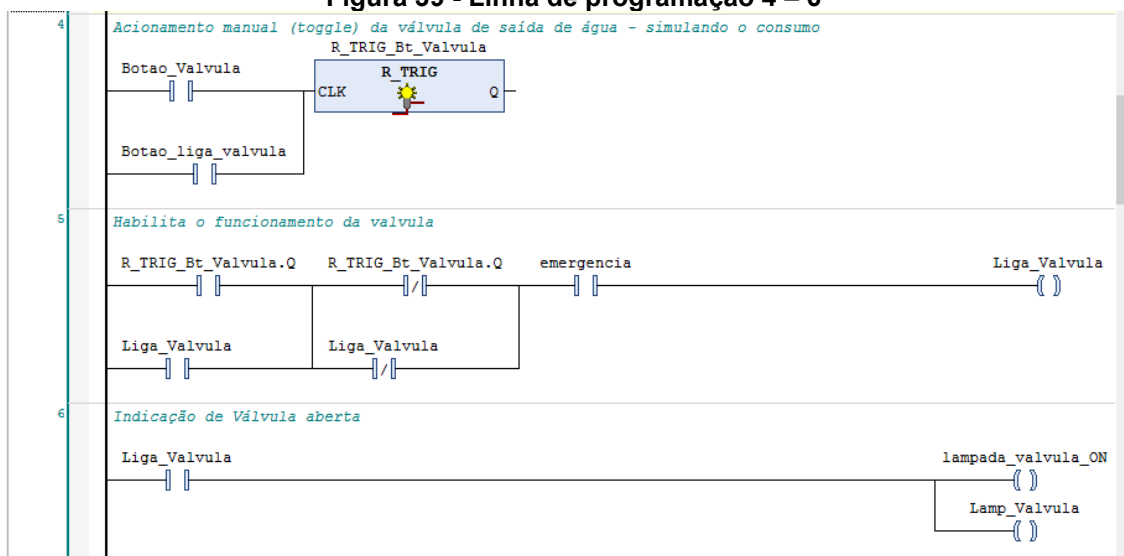
Figura 38 - Linha de programação 1 - 3



Fonte: Acervo do Autor (2025).

O sistema permite o acionamento manual (toggle) de uma válvula de água (R_TRIG_Bt_Valvula) através de um botão (Botao_Valvula) ou (Botao_liga_valvula). Quando pressionado, o botão habilita ou desabilita o funcionamento da válvula (Liga_Valvula), simulando um consumo de água. Há também indicações visuais como lâmpadas (lâmpada_valvula_ON) e (Lamp_Valvula) para mostrar o estado da válvula (aberta/fechada). Conforme ilustrado na figura 39.

Figura 39 - Linha de programação 4 – 6



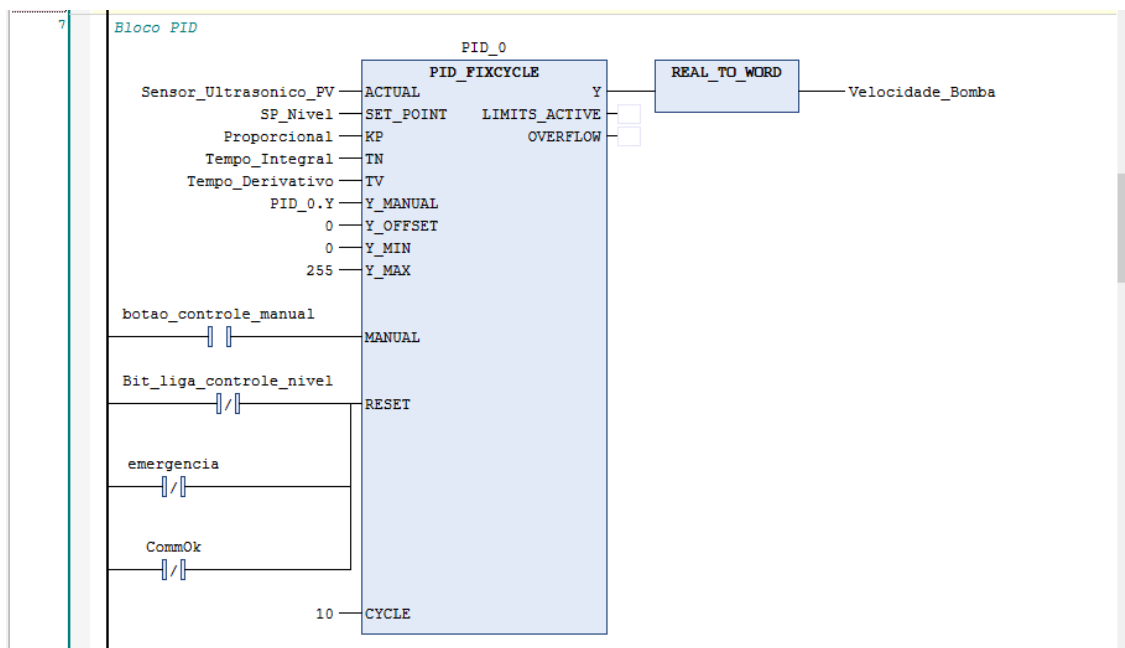
Fonte: Acervo do Autor (2025).

O bloco PID recebe como entrada o valor atual do nível (SP_Nível – SetPoint desejado) a partir do Sensor_Ultrasonico_FV e ajusta a saída (PID_0.Y) para controlar a velocidade de uma bomba (Velocidade_Bomba), mantendo o nível estável. De acordo com a figura 40.

O sistema permite alternar entre modo automático (PID) e manual (via Bit_liga_controle_nivel), além de incluir recursos de segurança (como emergência para desligamento forçado). A seguir, serão detalhados os modos de operação.

- Modo Automático: O PID calcula a saída com base no erro entre SP_Nível e ACTUAL, ajustando a velocidade da bomba para minimizar esse erro.
- Modo Manual: O operador define diretamente Y_MANUAL (útil para manutenção ou testes).
- Emergência: Se emergência for ativado, o sistema desliga a bomba, ignorando ambos os modos.

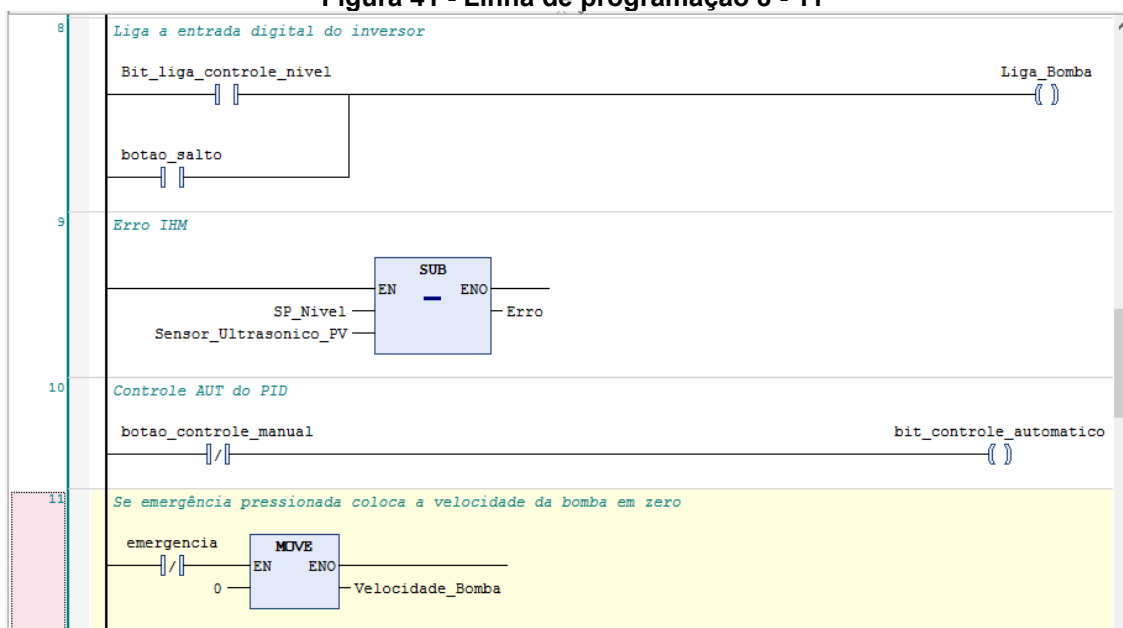
Figura 40 - Linha de programação 7



Fonte: Acervo do Autor (2025).

O sistema começa com o acionamento da entrada digital do inversor através do sinal Bit_liga_controle_nivel, que pode ser ativado manualmente pelo botao_salto ou por condições automáticas. O erro (Error) é calculado subtraindo o valor medido pelo Sensor_Ultrasonico_PV (valor atual do nível) do SP_Nivel (setpoint desejado), utilizando um bloco SUB para essa operação. Esse erro alimenta o bloco de controle PID (Controle AUT do PID), que ajusta a saída para manter o nível estável, operando em modo automático quando bit_controle_automatico está ativo. Caso o operador pressione botao_controle_manual, o sistema alterna para controle manual, ignorando o PID. Uma lógica crítica de segurança é acionada quando emergência é pressionada o sinal de emergência força a velocidade da bomba para zero (0), independentemente do modo de operação, através de um bloco MOVE que sobrescreve Velocidade_Bomba. O bloco MOVE garante que o comando de parada seja executado mesmo se houver falha em outras partes do sistema, assegurando a desativação imediata da bomba em situações de risco. Como ilustrado na figura 41.

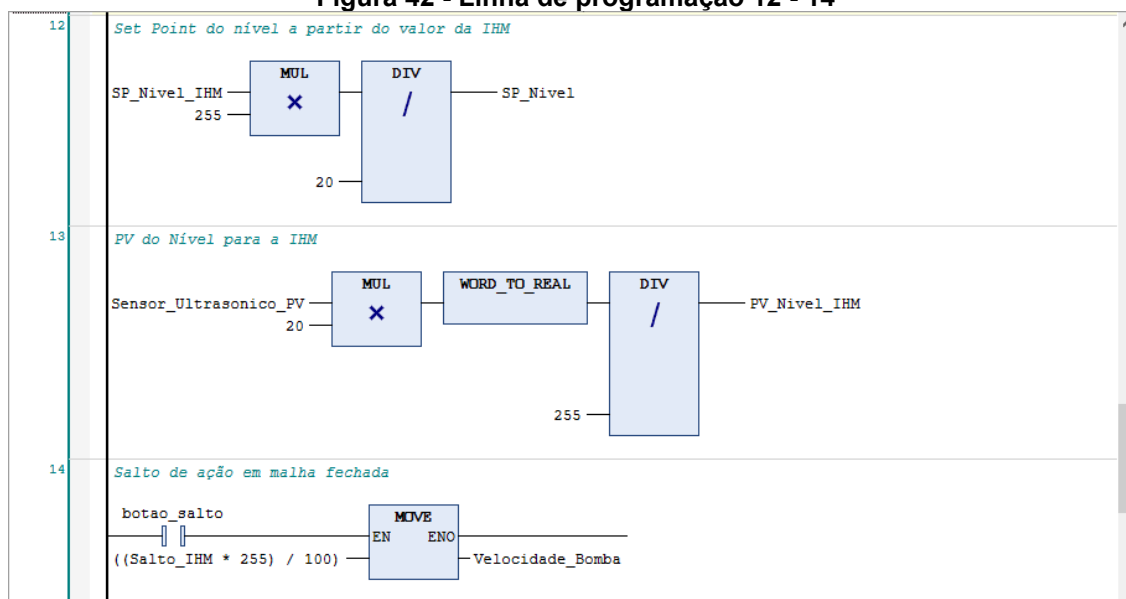
Figura 41 - Linha de programação 8 - 11



Fonte: Acervo do Autor (2025).

No primeiro bloco (linha 12), o Set Point (SP_Nivel) é configurado a partir de um valor fornecido pela IHM (SP_Nivel_IHM), passando por uma operação matemática que multiplica o valor por 255 e depois divide por 20, escalonando o para um range compatível com o sistema de controle de 0 a 20 litros para um sinal analógico (0-255). O segundo bloco (linha 13) processa o valor do sensor ultrassônico (Sensor_Ultrasonico_PV), que mede o nível atual (PV), multiplicando-o por 20, convertendo-o de WORD para REAL (para precisão em cálculos) e dividindo por 255, ajustando-o para exibição na IHM – invertendo o processo do Set Point para traduzir o sinal de controle (0-255) de volta para uma escala legível de 0 a 20 litros. O terceiro bloco (linha 14) implementa um salto de ação em malha fechada quando o botao_salto é acionado, um comando MOVE envia um valor pré-calculado $((\text{Salto_IHM} * 255) / 100)$ diretamente para a Velocidade_Bomba, ignorando temporariamente o controle PID sendo útil para testes ou ajustes rápidos. Esse valor está escalonado de 0-100% para 0-255, mantendo consistência com a lógica de conversão dos blocos anteriores. O sistema demonstra uma integração típica entre IHM e controle automatizado, onde valores são normalizados para comunicação entre interfaces humanas (porcentagens) e dispositivos de campo (sinais analógicos/digitais), garantindo operação flexível e segura. Como ilustrado na figura 42.

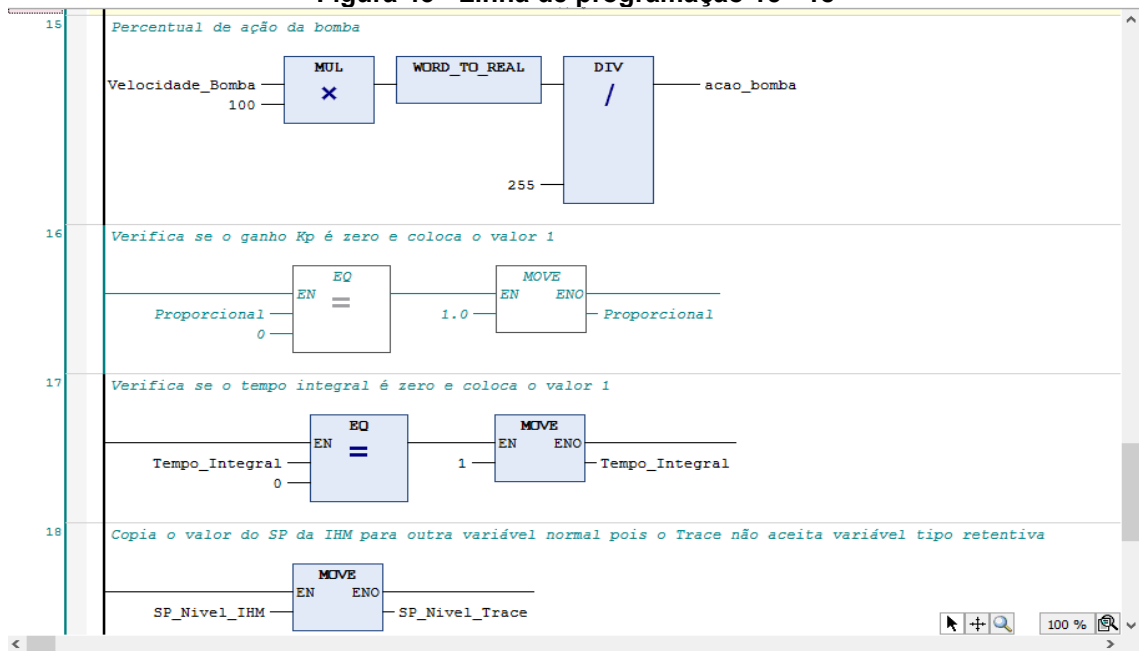
Figura 42 - Linha de programação 12 - 14



Fonte: Acervo do Autor (2025).

No bloco 15, o sistema converte o sinal de **Velocidade_Bomba** (que varia de 0 a 255) para um percentual legível (0-100%) através de operações matemáticas - multiplica por 100, converte para **REAL** para garantir precisão e divide por 255, armazenando o resultado em **acao_bomba**, permitindo que operadores visualizem a ação da bomba em porcentagem. Os blocos 16 e 17 implementam proteções críticas para os parâmetros do controlador PID se o ganho proporcional (Proporcional/Kp) ou o tempo integral (Tempo_Integral) forem zero (verificado pelos blocos que comparam com zero), o sistema automaticamente substitui esses valores por 1.0 através de comandos **MOVE** evitando erros matemáticos no cálculo do PID que poderiam ocorrer com divisões por zero ou termos nulos. Já o bloco 18 resolve uma limitação prática do sistema de monitoramento (Trace), copiando o valor do setpoint da IHM (**SP_Nivel_IHM**) para uma variável temporária não retentiva (**SP_Nivel_Trace**) já que ferramentas de diagnóstico frequentemente não conseguem acessar variáveis retentivas diretamente. Essas rotinas demonstram preocupações típicas de sistemas industriais robustos conversão de sinais para interfaces humanas (bloco 15), proteção contra configurações inválidas que poderiam desestabilizar o controle (blocos 16-17), e adaptações para compatibilidade com ferramentas de manutenção e análise (bloco 18), todas trabalhando em conjunto para garantir operação estável e monitorável do sistema de controle de nível. De acordo com a figura 43.

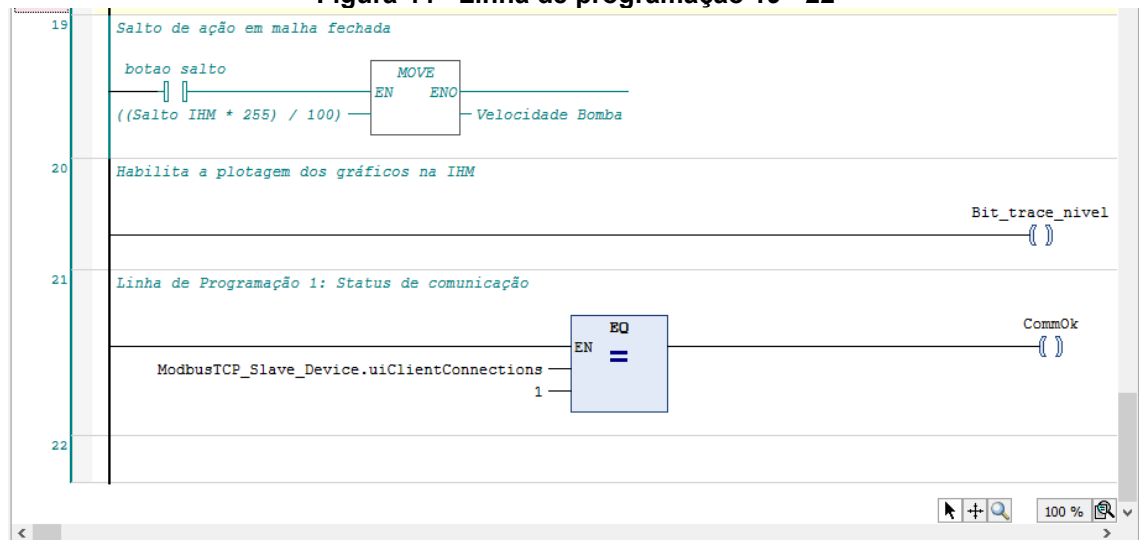
Figura 43 - Linha de programação 15 - 18



Fonte: Acervo do Autor (2025).

No bloco 20 foi utilizada uma ligação direta com uma bobina para ativar a lógica `Bit_trace_nivel` que habilita o supervisor onde está a IHM do sistema PID. Na outra linha de programação ou bloco 21 está a programação do status de comunicação Modbus onde verifica se a comunicação está em status 1 que significa que a comunicação está ocorrendo entre o computador e o CLP virtual ativando a bobina `CommOk`. Conforme a figura 44.

Figura 44 - Linha de programação 19 - 22



Fonte: Acervo do Autor (2025).

3.4 BLOCO PID

A tabela 4 descreve as variáveis de entrada e parâmetros do controlador:

ACTUAL (REAL): Representa o valor atual da variável controlada.

SET_POINT (REAL): Define o valor desejado (setpoint) para a variável controlada.

KP (REAL): Coeficiente de proporcionalidade do componente P (ação proporcional). Este valor não pode ser zero, caso contrário, o bloco de função não realizará cálculos.

TN (REAL): Tempo de reset (ação integral), dado em segundos (ex.: 0,5 para 500 ms). Deve ser maior que zero. Quanto menor o TN, maior a influência da parte integral no valor da variável manipulada.

TV (REAL): Tempo de ação derivativa (ação derivativa), também em segundos.

Y_MANUAL (REAL): Define o valor de saída Y quando o modo manual está ativo (MANUAL = TRUE).

Y_OFFSET (REAL): Offset aplicado à variável manipulada Y.

Y_MIN/Y_MAX (REAL): Limites inferior e superior para Y. Se Y ultrapassar esses limites, LIMITS_ACTIVE será TRUE, e Y será mantido dentro da faixa. Funciona apenas se $Y_MIN < Y_MAX$.

MANUAL (BOOL): Ativa o modo manual (TRUE), definindo Y conforme Y_MANUAL.

RESET (BOOL): Quando TRUE, reinicializa o controlador, redefinindo Y para Y_OFFSET.

Tabela 4 - Detalhes bloco PID

Variable	Data type	Description
ACTUAL	REAL	Current value of the controlled variable
SET_POINT	REAL	Desired value, command variable
KP	REAL	Proportionality coefficient, unity gain of the P-part This value mustn't be 0, otherwise the function block will not perform any calculations.
TN	REAL	Reset time, reciprocal unity gain of the I-part Given in seconds, for example "0.5" for 500 msec This value must be >0, otherwise the function block will not perform any calculations. The smaller TN is, the more the integral part gets included in the value of the manipulated variable. The more TN increases, the less this will be the case.
TV	REAL	Derivative action time, unity gain of the D-part Given in seconds, for example "0.5" for 500 msec
Y_MANUAL	REAL	Defines output value Y in case of MANUAL = TRUE
Y_OFFSET	REAL	Offset for the manipulated variable Y
Y_MIN, Y_MAX	REAL	Lower resp. upper limit for the manipulated variable Y. If Y exceeds these limits, output LIMITS_ACTIVE will be set to TRUE and Y will be kept within the prescribed range. This control will only work if $Y_MIN < Y_MAX$.
MANUAL	BOOL	If TRUE, manual operation will be active, that is the manipulated value will be defined by Y_MANUAL.
RESET	BOOL	TRUE resets the controller; during reinitialization $Y = Y_OFFSET$.

Fonte: Acervo do Autor (2025).

A tabela 5 descreve as variáveis de saída:

Y (REAL): Valor da variável manipulada, calculado pelo bloco de função.

LIMITS_ACTIVE (BOOL): Indica TRUE se Y excedeu os limites Y_MIN/Y_MAX.

OVERFLOW (BOOL): Sinaliza TRUE em caso de overflow (transbordamento) (ex.: estouro numérico durante cálculos).

Tabela 5 - Detalhes bloco PID

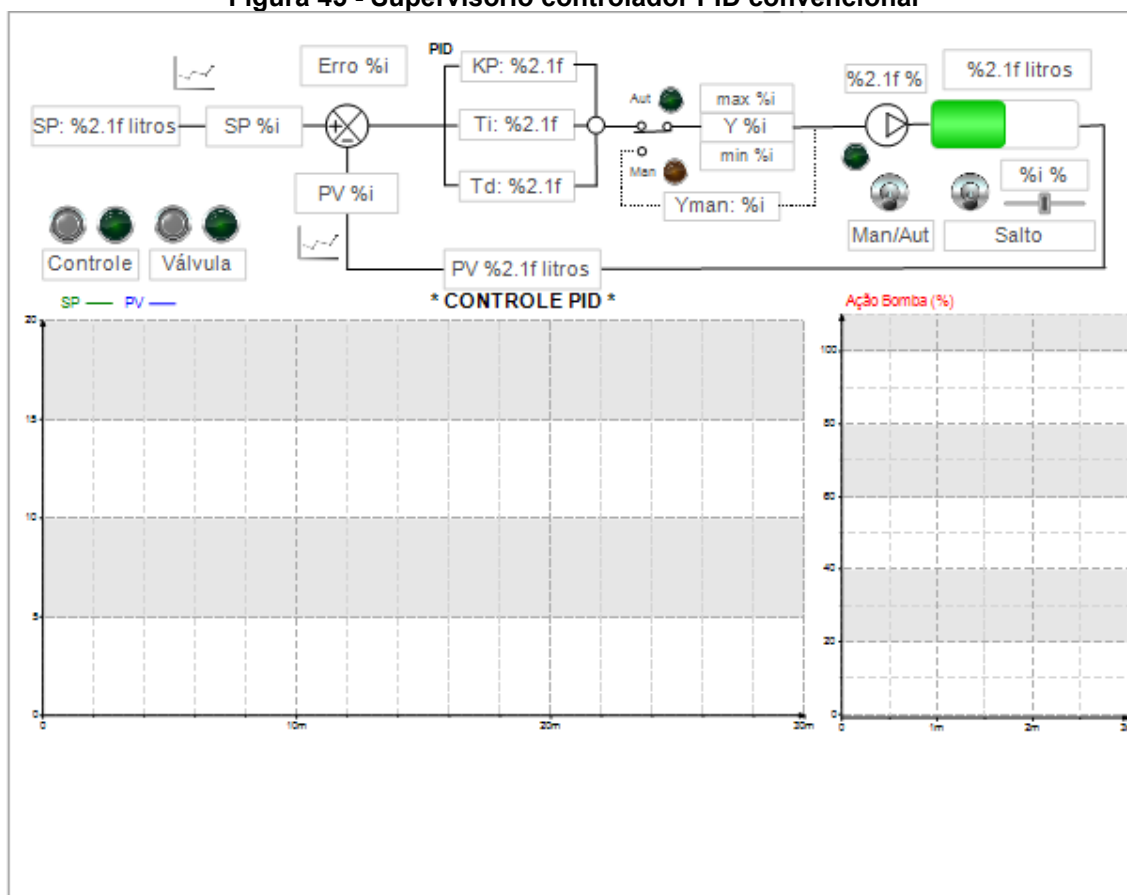
Variable	Data type	Description
Y	REAL	Manipulated value, calculated by the function block (see below)
LIMITS_ACTIVE	BOOL	TRUE indicates that Y has exceeded the given limits (Y_MIN, Y_MAX).
OVERFLOW	BOOL	TRUE indicates an overflow (see below)

Fonte: Acervo do Autor (2025).

3.5 DESCRIÇÃO DO SUPERVISÓRIO

O painel apresentado na figura 45, representa um sistema de controle de processo com foco em regulação de nível (em litros). O Controle automático via PID para manter o SetPoint desejado. O sistema permite a alternância entre modos manual e automático, com ajuste direto da saída (Y) em modo manual. Com monitoramento de limites (máximo/mínimo) para evitar saturação ou condições inseguras. E possui uma interface clara com valores dinâmicos atualizados em tempo real.

Figura 45 - Supervisório controlador PID convencional

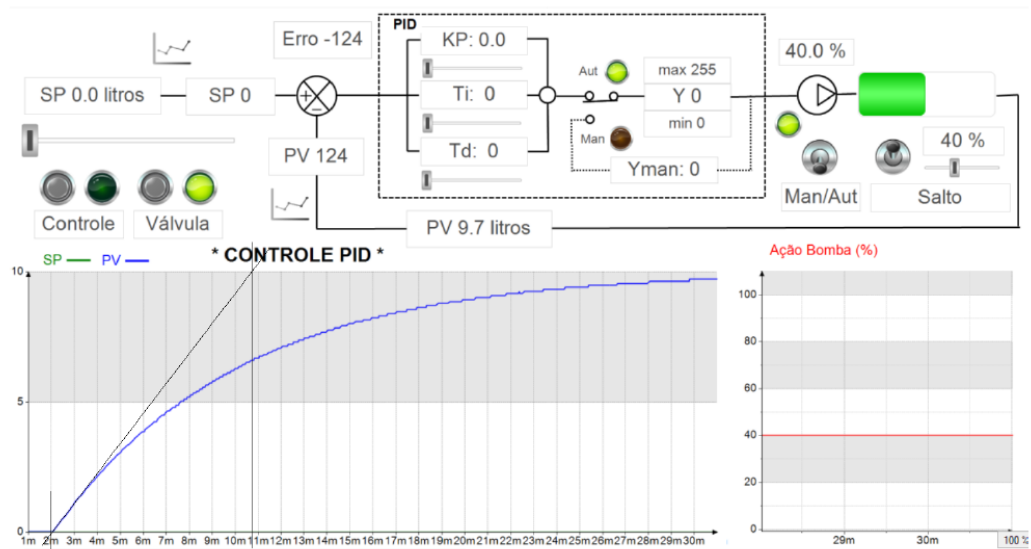


Fonte: Acervo do Autor (2025).

3.6 EXPERIMENTO MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO DE ZN E COHEN COON

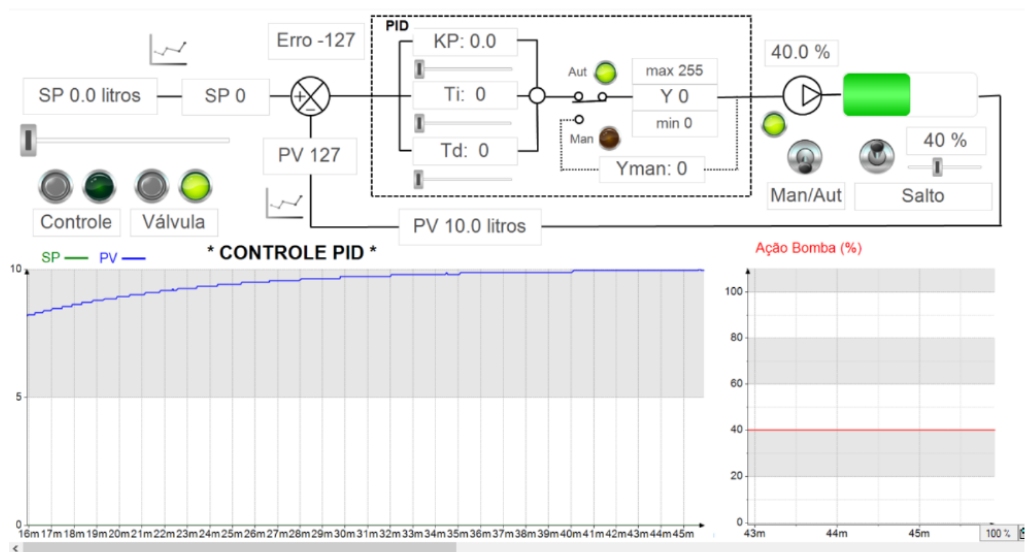
Após a análise e testes para obter a curva de reação, foi obtido os parâmetros para o controlador PID ideal paralelo sendo o primeiro parâmetro o K que corresponde a razão entre a saída que é a variação gerada no sistema pela entrada que é a mudança no Setpoint. Conforme as figuras 46 e 47.

Figura 46 -Curva de reação



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 47 - Estabilização



Fonte: Acervo do Autor (2025).

De acordo com a figura 48, os valores obtidos para a mudança no setpoint com 40 % de ação de bomba que varia entre 0 e 255 bits é de 102 bits e a variação gerada no sistema que corresponde a nossa PV que varia entre 0 a 255 bits é de 10 litros que corresponde a 127 bits dessa forma o K vale:

Figura 48 - Valor de K de ZN

$$K = \frac{127}{102} = 1,245$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

A constante de tempo τ encontrada foi de 525 segundos. A figura 49 ilustra matematicamente essa resposta.

Figura 49 - τ constante de tempo de ZN

$$\tau = 10,45 - 2 = 8,45 \approx 525 \text{ segundos}$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Observou-se que a planta virtual não apresenta tempo morto o que não é uma realidade na prática e considerando que o fator de incontabilidade do processo dado por θ/τ e que deve estar entre 0,2 e 0,4 então para o cálculo do tempo morto real considerou-se o valor do fator de incontabilidade em 0,2. A figura 50 apresenta esse cálculo.

Figura 50 - θ tempo morto de ZN

$$\frac{\theta}{525} = 0,2 \Rightarrow \theta \approx 105$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Após os parâmetros calculados foi encontrado os valores para K_p , T_i e T_d para assim fazer o controlador PID ideal paralelo para a técnica da razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ de Ziegler & Nichols, como ilustrado nas figuras 51, 52 e 53.

Figura 51 - Valor K_p

$$\frac{1,2}{1,245} \times \frac{525}{105} = 4,82$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 52 - Valor Ti

$$2 \times 105 = 210$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

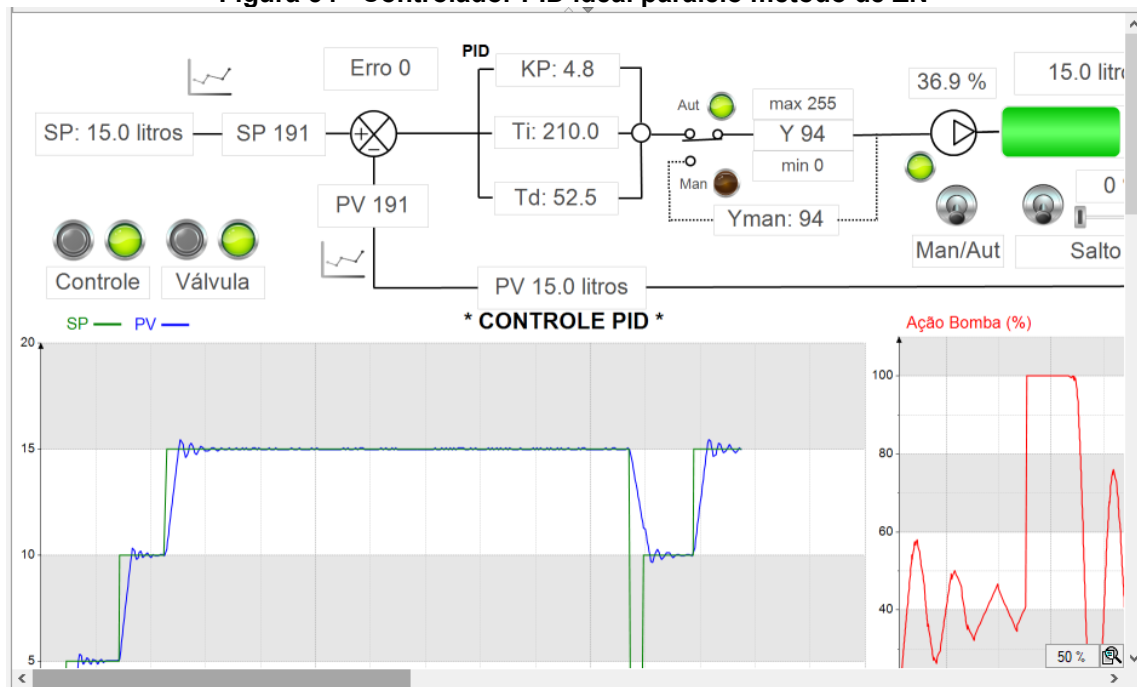
Figura 53 - Valor Td

$$0,5 \times 105 = 52,5$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Com os valores encontrados para as ações proporcional, integral e derivativo com o método de Ziegler & Nichols da curva de reação foi aplicado no projeto e feito as devidas análises. Pode-se observar na figura 54.

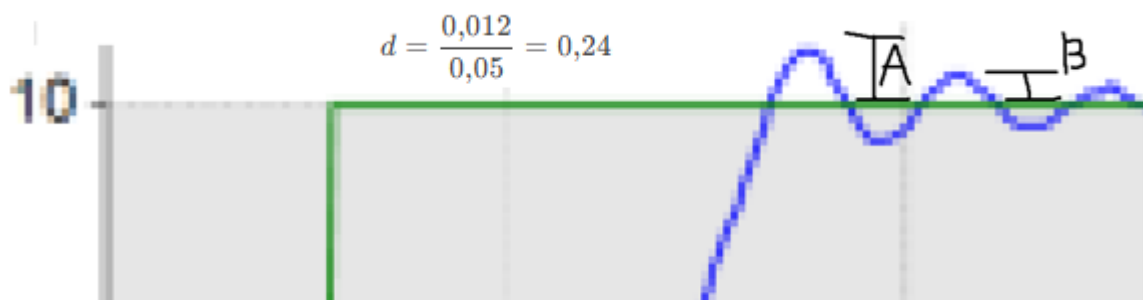
Figura 54 - Controlador PID ideal paralelo método de ZN



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Após realizada a técnica foi obtido a resposta para $\frac{1}{4}$ de decaimento, ou seja, o segundo semi ciclo deve possuir até 25% de diferença em relação ao primeiro semi ciclo. A porcentagem de decaimento (%d) resultou em um valor de 0,24. Como ilustrado na figura 55.

Figura 55 - % de decaimento de ZN



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Logo após a porcentagem de decaimento encontrada foi montada a função de transferência para o modelo FOPDT do PID ideal paralelo utilizando a razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ de Ziegler & Nichols. De acordo com a figura 56.

Figura 56 - Função Transferência

$$G(s) = \frac{1,245 \cdot e^{-105s}}{(525s + 1)}$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Após as mesma análise e testes para obter a curva de reação foi obtido os parâmetros para o controlador PID ideal paralelo para a técnica da razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ de Cohen Coon sendo o primeiro parâmetro o K que corresponde a razão entre a saída que é a variação gerada no sistema pela entrada que é a mudança no setpoint. Os valores obtidos para a mudança no setpoint com 40 % de ação de bomba que varia entre 0 e 255 bits é de 102 bits e a variação gerada no sistema que corresponde a nossa PV que varia entre 0 a 255 bits é de 10 litros que corresponde a 127 bits dessa forma o K vale: (figura 57).

Figura 57 - Valor de K de Cohen Coon

$$K = \frac{127}{102} = 1,245$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

A constante de tempo τ encontrada foi de 525 segundos. (Figura 58).

Figura 58 - τ constante de tempo de Cohen Coon

$$\tau = 10,45 - 2 = 8,45 \approx 525 \text{ segundos}$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Observou-se que a planta virtual não apresenta tempo morto o que não é uma realidade na prática e considerando que o fator de incontrolabilidade do processo dado por θ/τ e que deve estar entre 0,6 e 4,4 então para o cálculo do tempo morto real considerou-se o valor do fator de incontrolabilidade em 0,6. O cálculo é apresentado na figura 59.

Figura 59 - θ tempo morto de Cohen Coon

$$\frac{\theta}{525} = 0.6 \Rightarrow \theta \approx 315$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Após os parâmetros calculados foi encontrado os valores para K_p , T_i e T_d para assim fazer o controlador PID ideal paralelo para a técnica da razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ de Cohen Coon. De acordo com as figuras 60, 61 e 62.

Figura 60 - Valor K_p

$$K_P = \left(\frac{525}{1,245 \times 315} \times \frac{4}{3} \right) + \left(\frac{315}{4 \times 525} \right) \approx 1,9$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 61 - Valor T_i

$$T_i = \frac{315 \times \left(32 + \frac{6 \times 315}{525} \right)}{13 + \frac{8 \times 315}{525}} \approx 630$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

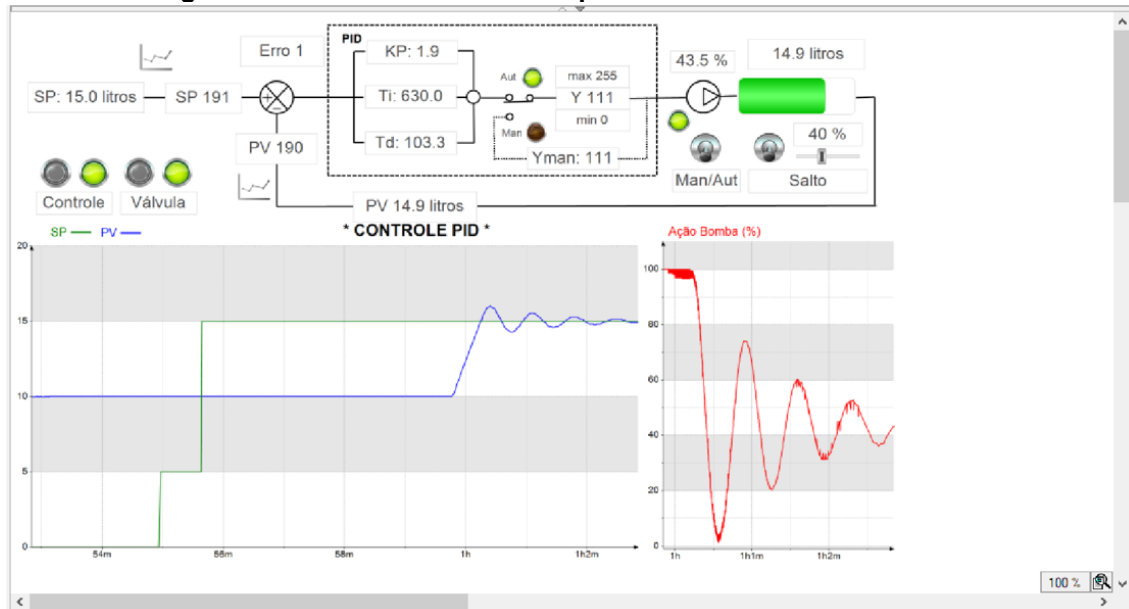
Figura 62 - Valor T_d

$$T_d = \frac{4 \times 315}{11 + \left(\frac{2 \times 315}{525} \right)} \approx 103,3$$

Fonte: Acervo do Autor 2025.

Com os valores encontrados para as ações proporcional, integral e derivativo com o método de Cohen Coon da curva de reação foi aplicado no projeto e feito as devidas análises. Pode-se observar na figura 63.

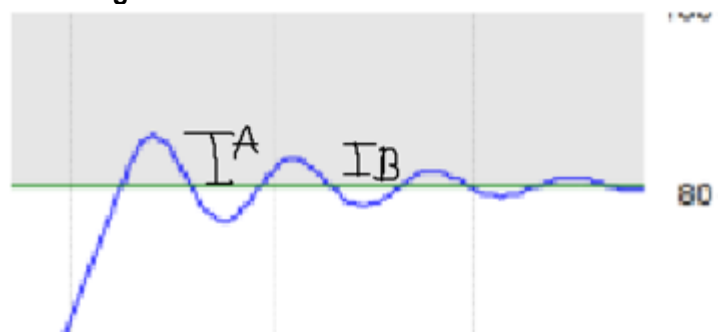
Figura 63 - Controlador PID ideal paralelo método de Cohen Coon



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Após realizada a técnica foi obtido a resposta para $\frac{1}{4}$ de decaimento, ou seja, o segundo semi ciclo deve possuir até 25% de diferença em relação ao primeiro semi ciclo. Como ilustrado nas figuras 64 e 65.

Figura 64 - % de decaimento de Cohen Coon



Fonte: Acervo do Autor (2025).

Figura 65 - Calculo % de decaimento de Cohen Coon.

$$d = \frac{0,011}{0,05} \approx 0,22$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Logo após a porcentagem de decaimento encontrada foi montada a função de transferência para o modelo FOPDT do PID ideal paralelo utilizando a razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ de Cohen Coon. (Figura 66).

Figura 66 - Função Transferência Cohen Coon

$$G(s) = \frac{1,245 \cdot e^{-315s}}{525s + 1}$$

Fonte: Acervo do Autor (2025).

4 AJUSTES DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR PID

Perante os parâmetros e valores encontrados para os dois métodos de sintonia, foram elaboradas as tabelas 6 e 7 com o objetivo de permitir a comparação e análises do projeto PID ideal paralelo para nível da planta didática virtual.

Tabela 6 - Resultados ZN

Técnica da Razão de Decaimento de $\frac{1}{4}$ (Ziegler & Nichols, 1942)		
K:	1,245	
θ :	105	
τ :	525	
K _p :	4,82	
T _i :	210	
T _d :	52,5	
% de decaimento:	0,24	
Nº de oscilação:	3	
Tempo de estabilização:	117 s	

Fonte: Acervo do Autor (2025).

Tabela 7 - Resultados Cohen Coon

Técnica da Razão de Decaimento de $\frac{1}{4}$ (Cohen-Coon, 1953)		
K:	1,245	
θ :	315	
τ :	525	
K _p :	1,9	
T _i :	630	
T _d :	103,3	
% de decaimento:	0,22	
Nº de oscilação:	3	
Tempo de estabilização:	126 s	

Fonte: Acervo do Autor (2025).

A análise comparativa entre as técnicas de Ziegler & Nichols (1942) e Cohen-Coon (1953) revela diferenças significativas em seus parâmetros e desempenho. Ambas utilizam o mesmo ganho do sistema ($K = 1,245$) e constante de tempo ($\tau = 525$), mas divergem no tempo morto (θ). Enquanto Ziegler & Nichols assume um tempo morto de 105 unidades, Cohen-Coon considera um valor três vezes maior ($\theta = 315$), refletindo uma abordagem mais conservadora para sistemas com atrasos pronunciados.

Os parâmetros do controlador também variam: Ziegler & Nichols emprega um ganho proporcional mais alto ($K_p = 4,82$) e um tempo integral mais curto ($T_i = 210$), resultando em uma resposta mais rápida e agressiva. Em contraste, Cohen-Coon reduz o ganho proporcional ($K_p = 1,9$), aumenta o tempo integral ($T_i = 630$) e intensifica a ação derivativa ($T_d = 103,3$), priorizando estabilidade em sistemas com maior tempo morto.

Em termos de desempenho, ambas as técnicas atingem três oscilações até a estabilização, alinhando-se com o esperado para métodos de razão de decaimento de 25%. A porcentagem de decaimento é ligeiramente superior em Ziegler & Nichols (24% vs. 22% de Cohen-Coon), mas ambas estão próximas da meta de 25%. O tempo de estabilização, porém, favorece Ziegler & Nichols: 117 segundos contra 126 segundos de Cohen-Coon, uma diferença de 7,6%. Essa vantagem em velocidade ocorre porque o maior ganho proporcional de Ziegler & Nichols acelera a correção de erros, enquanto a abordagem de Cohen-Coon, com ação derivativa mais forte e integração lenta, busca reduzir overshoot em sistemas complexos.

A escolha entre as técnicas depende das características do sistema. Ziegler & Nichols é mais adequado para processos com tempo morto baixo (próximo a $\theta = 105$), onde a rapidez é crítica. Já Cohen-Coon é preferível em sistemas com tempo morto elevado ($\theta = 315$), onde a estabilidade e a mitigação de oscilações são prioritárias. Ambos os métodos exigem validação experimental, pois parâmetros teóricos podem não capturar totalmente a dinâmica do sistema real. Em resumo, Ziegler & Nichols oferece eficiência em cenários dinâmicos, enquanto Cohen-Coon proporciona robustez em processos com atrasos significativos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e implementar um sistema de controle PID para nível em uma planta didática virtual, utilizando as ferramentas Simmaq 3D e CODESYS. A abordagem proposta demonstrou a eficácia do controlador PID em substituir técnicas convencionais, como o controle ON/OFF e PWM, destacando sua capacidade de garantir estabilidade, precisão e resposta rápida a perturbações. A integração entre o ambiente de simulação 3D e a programação em ladder no CODESYS permitiu a validação do sistema em um contexto virtualizado, reduzindo custos e riscos associados a protótipos físicos.

Os resultados obtidos com as técnicas de sintonia de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon evidenciaram as diferenças entre os métodos, sendo que Ziegler-Nichols proporcionou uma resposta mais rápida, enquanto Cohen-Coon ofereceu maior robustez em sistemas com tempo morto significativo. Ambas as técnicas alcançaram o objetivo de uma razão de decaimento de 25%, com tempos de estabilização próximos e desempenho satisfatório. A análise comparativa reforçou a importância da escolha adequada do método de sintonia, dependendo das características dinâmicas do processo em questão.

Além disso, o projeto destacou a relevância pedagógica da simulação virtual no ensino de controle e automação, preparando estudantes e profissionais para desafios reais da indústria. A combinação de ferramentas modernas, como o Simmaq 3D e o CODESYS, mostrou-se eficaz na replicação de cenários industriais complexos, facilitando a aprendizagem e a experimentação.

Em síntese, este trabalho não apenas validou a aplicação do controlador PID em sistemas de nível, mas também consolidou uma metodologia acessível e eficiente para o desenvolvimento e teste de estratégias de controle. Os resultados obtidos reforçam a importância do PID como uma ferramenta versátil e essencial na automação industrial, alinhando-se às demandas da Indústria 4.0. Futuros trabalhos podem explorar a aplicação dessas técnicas em sistemas multivariáveis ou a integração de algoritmos de controle mais avançados, para aprimorar ainda mais o desempenho e a adaptabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Advanced PID Control. Research Triangle Park: ISA, 2006.

BENTO, J. A. Controle Automático de Processos. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

BRITO, M. A. Programação de CLPs em CODESYS: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Érica, 2020.

CAMPOS, F. C.; TEIXEIRA, M. F. Sistemas de Controle Industrial. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

COSTA, R. P. Simulação de Processos Industriais com Simmaq 3D. Porto Alegre: Bookman, 2021.

FESTO. Manual de Válvulas Proporcionais. Alemanha: Festo Didactic, 2021.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. Feedback Control of Dynamic Systems. 8. ed. New York: Pearson, 2019.

GÜLICH, J. F. Centrifugal Pumps. 3. ed. Berlin: Springer, 2014.

JOHN, K.-H.; TIEGELKAMP, M. *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems.* 2. ed. Berlin: Springer, 2010.

KAGERMANN, H. et al. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Frankfurt: National Academy of Science and Engineering, 2013.

NESBITT, B. Handbook of Valves and Actuators. Oxford: Elsevier, 2016.

NISE, N. S. Control Systems Engineering. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, L. F. Controle de Nível em Tanques Industriais. Belo Horizonte: UFMG, 1999.

PARKER HANNIFIN. Technical Manual: Solenoid Valves. Cleveland: Parker, 2020.

PETRUZELLA, F. Programmable Logic Controllers. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

SEBORG, D. E. et al. Process Dynamics and Control. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

SILVA, G. M. Controle PID de Nível em Plantas Didáticas. Itumbiara: IFG, 2025.

SKOGESTAD, S. Simple Analytic Rules for Model Reduction and PID Controller Tuning. Journal of Process Control, v. 13, n. 4, p. 291-309, 2003.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. Principles and Practice of Automatic Process Control. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2008.

VISIOLI, A.; PIAZZI, A. Improving PID Control with Constrained Fuzzy Inference. ISA Transactions, v. 45, n. 2, p. 223-233, 2006.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME, v. 64, p. 759-768, 1942.