

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

**ALGORITMO DE CONTROLADOR PID SINTONIZADO PELO
MÉTODO DE PRODUTO INTERNO E EMBARCADO EM CLP
COM USO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO CODESYS**

BIANCA FONTENELE LEMOS VERAS

ORIENTADORA: PROF. DR. JOÃO VIANA DA FONSECA NETO

COORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ PINHEIRO DE MOURA

São Luís - MA
Setembro/2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

ALGORITMO DE CONTROLADOR PID SINTONIZADO PELO MÉTODO DE PRODUTO INTERNO E EMBARCADO EM CLP COM USO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO CODESYS

BIANCA FONTENELE LEMOS VERAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Eletricidade, área de concentração: Automação e Controle

Orientador: Dr. João Viana da Fonseca Neto

São Luís - MA
Setembro/2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Veras, Bianca Fontenele Lemos.

Algoritmo de controlador PID sintonizado pelo Método de Produto Interno e embarcado em CLP com uso da plataforma de simulação CodeSys / Bianca Fontenele Lemos Veras. - 2023.

81 f.

Coorientador(a): José Pinheiro de Moura.

Orientador(a): João Viana da Fonseca Neto.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2023.

1. CLP. 2. CodeSys. 3. PID. 4. Sistemas de controles. I. Moura, José Pinheiro de. II. Neto, João Viana da Fonseca. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

ALGORITMO DE CONTROLADOR PID SINTONIZADO PELO MÉTODO DE PRODUTO INTERNO E EMBARCADO EM CLP COM USO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO CODESYS

BIANCA FONTENELE LEMOS VERAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Eletricidade, área de concentração: Automação e Controle.

Aprovado em 12 de setembro de 2023.

Membros da Banca:

Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto

(Orientador – UFMA)

Prof. Dr. José Pinheiro de Moura

(UEMA)

Prof. Dr. Francisco das Chagas de Souza

(UFMA)

Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto

(UEMA)

São Luís - MA
Setembro/2023

*Dedico este trabalho à minha mãe
Mazé, que sonha comigo todos os sonhos.
Ela foi o motivo de eu chegar até aqui.*

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pois, para mim, sem Ele nada do que é feito possui qualquer sentido. Agradeço ao professor João Viana, por estar sempre disponível a orientar e a responder desde a mais simples pergunta às dúvidas mais complexas, a mostrar o lado positivo do ensino e da pesquisa, sendo um exemplo de seriedade, retidão, educação e gentileza em sua orientação. Agradeço ao meu coorientador José Pinheiro de Moura, que foi um grande incentivador para que este trabalho fosse concluído, o qual contribuiu com sua experiência, paciência e disposição em ajudar, fazendo com que este caminho fosse menos árduo. Agradeço à UFMA-PPGEE e à UEMA, em especial ao Departamento de Engenharia de Computação, por tornarem essa pesquisa possível e pelas contribuições técnico/científicas dadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos amigos Tayná Silva, Marcelo Viana e ao meu irmão Lucas que compartilharam conhecimento e motivação. Por fim, agradeço ao meu esposo Huelder Felipe, que esteve ao meu lado dando suporte sempre que necessário, desde os conselhos para continuar até os reparos nos desktops e ferramentas de trabalho. Ele é meu grande incentivador.

*"Se forte e corajoso, não temas, nem te espantes;
Porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares".*

Josué 1.9

RESUMO

Sistemas de controle com ações Proporcionais, Integrais e Derivativas (PID) são frequentemente utilizados em processos industriais e nos últimos anos técnicas que simulam a implementação de controles ótimo adaptativos em plantas do setor de mineração foram propostas como métodos de sintonia eficiente. Quanto ao desempenho de controles embarcados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), tais práticas ainda são pouco exploradas, o que fomenta a importância da discussão sobre o tema. Neste trabalho, apresenta-se a simulação de um sistema de controle PID embarcado em um CLP, concebida na plataforma de desenvolvimento e CodeSys para aplicação em uma planta obtida com dados reais do processo operacional de descarregamento de sólidos a granel por Virador de Vagões (VVs). Na indústria de mineração, o controle da vazão de sólidos a granel em VVs é feito, na maioria das vezes, variando a velocidade dos alimentadores (ALs) por meio da alteração da frequência de inversores, a qual é configurada manualmente com inserção de comandos em uma Interface Homem Máquina (IHM). A utilização da técnica de sintonia de controladores PID por Produto Interno é apresentada com o intuito de facilitar a configuração dos parâmetros de ganhos do controlador PID aplicado ao controle do fluxo de sólidos no descarregamento por VVs, garantindo mais assertividade no processo de sintonia e, desta forma, melhorando o processo de controle de velocidade de AL dos VVs para o alcance do fluxo desejado.

Palavras-chave: Sistemas de controles; CLP; PID; *Software* de simulação CodeSys.

ABSTRACT

Control systems with Proportional, Integral and Derivative (PID) actions are frequently used in industrial processes and in recent years techniques that simulate the implementation of optimal-adaptive controls in plants in the mining sector have been proposed as efficient tuning methods. As for the control performance embedded in Programmable Logic Controllers (PLC), it is still under explored, which promotes the importance of discussing control implementations in PLC. In this article, we present the simulation of a PID control system embedded in a PLC, designed in the CodeSys simulation and development software for application in a real plant of the operational process of unloading solids in grains by Car Dumper (CD). In the mining industry, the flow control of bulk solids in CD is done, most of the time, by varying the speed of the feeders by changing the frequency of inverters, which is manually configured with the insertion of commands in a Human Machine Interface (HMI). The use of the tuning technique of PID controllers by Internal Product is presented in order to facilitate the parameters' configuration of the PID controller gains applied to the control of the solid flow in the unloading by CD, guaranteeing more assertiveness in the tuning process and in this way improving the speed control process of the VVs to reach the desired flow.

Keywords: Control systems; Industrial processes; PID; PLC; Simulation software CodeSys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Controlador Lógico Programável.....	28
Figura 2 Interface do software CodeSys	33
Figura 3 Modelo de desenvolvimento CodeSys	34
Figura 4 Conexão CodeSys e CLP	35
Figura 5 Principais características da aplicação.....	36
Figura 6 Conexões da plataforma CodeSys.....	38
Figura 7 Vantagens para usuários e fabricantes de hardwares	38
Figura 8 Controlador PID de processos/temperatura modelos WEST.	41
Figura 9 Controladores PID – Modelos N1100, N2000, N1030.....	42
Figura 10 Controlador PID indicador – Modelo YS1500 - YOKOGAWA	42
Figura 11 Diagrama de blocos canônico do sistema de controle em MF	44
Figura 12 Comparação das ações P, I, D e PID.....	47
Figura 13 Método de sintonia por Ziegler-Nichols para controlador P, PI e PID	49
Figura 14 Virador de Vagões.....	59
Figura 15 Vista superior de um pátio de estocagem	60
Figura 16 Fluxo de carga dos AL até a pilha no pátio de estocagem.....	61
Figura 17 Vista lateral de um silo de abastecimento com um AL.....	61
Figura 18 Vista superior de um silo de abastecimento com um AL.....	61
Figura 19 IHM para Operação de Virador de Vagões	62
Figura 20 Overview geral de uma planta do setor de mineração	62
Figura 21 Lugar das raízes.....	67
Figura 22 Simulador da planta em forma de diagrama de blocos	68
Figura 23 Declaração das variáveis do algoritmo de controle	70
Figura 24 Algoritmo de controle PID	70
Figura 25 Sistema de controle PID embarcado no CLP	71
Figura 26 Resultados simulados no MATLAB/SIMULINK	72
Figura 27 Comportamento do sistema de controle PID sintonizado por PI	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estado atual da norma IEC 61131	28
Tabela 2 Comparação das ações Proporcionais, Integral e derivativa.....	47
Tabela 3 Sintonia de ganhos PID pelo método do ganho crítico de ZN	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alimentadores de vagões
CLP	Controlador Lógico Programável
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
E/S	Entrada / Saída
FBD	Function Block Diagram
FT	Função de Transferência
IDE	Integrated Development Environment
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OPC UA	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
OPC	<i>Open Platform Communications</i>
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PIMS	<i>Plant Information Management System</i>
TL	Transformada de Laplace
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
VV	Viradores de Vagões
VVs	Viradores de Vagões
ZN	Ziegler Nichols

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Contexto.....	16
1.2 Motivação e Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 Metodologia.....	20
1.4 Organização do Trabalho.....	21
CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE CONTROLE NA PLATAFORMA CODESYS	23
2.1 A evolução das técnicas de controle.....	23
2.1.1 Controladores Lógicos Programáveis.....	26
2.2 Plataforma de desenvolvimento e Simulação <i>CodeSys</i>	30
2.2.1 Características do <i>CodeSys</i>	34
2.2.2 Benefícios para os usuários.....	37
2.3 Considerações Finais.....	39
CAPÍTULO 3 - CONTROLADORES PID E MÉTODO DE SINTONIA POR PRODUTO INTERNO	40
3.1 Controladores PID.....	40
3.2 Modelos Matemáticos para implementação do controle.....	43
3.2.1 Modelo Matemático de uma planta em termos de FT.....	43
3.2.2 Modelo do Controlador PID.....	44
3.3 Métodos de Sintonia de Controladores PID.....	45
3.3.1 Método do ganho crítico de Ziegler Nichols.....	48
3.3.2 Método de Sintonia PID - Produto Interno.....	50
3.3.2.1 A FT em malha aberta em Produto Interno.....	54
3.3.2.2 A Matriz de propagação dos termos PID e coeficientes da FT.....	55
3.4 Descrição Operacional da planta.....	58
CAPÍTULO 4 - EXPERIMENTOS E CONCLUSÕES.....	63
4.1 Experimentos.....	63

4.2 Projeto do Controlador PID-Produto-Interno	65
4.3 Projeto do Controlador por Ziegler- Nichols	66
4.4 Implementação do código no Simulador <i>Codesys</i>	68
4.5 Resultados	71
4.6 Conclusões.....	74
REFERÊNCIAS.....	76

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza a motivação do trabalho e seus principais objetivos para a implementação de um sistema de controle PID sintonizado pelo método de produto interno por meio da plataforma de simulação CodeSys

1.1 Contexto

A automação de sistemas em plantas industriais é uma das atividades mais complexas na aplicação de controle de processos, além de ser uma grande impulsionadora de inovação no que tange à melhoria de controle de máquinas de grande porte, diminuição de desperdícios e melhor adequação de tarefas para otimização do processo produtivo. A automação tem como objetivo minimizar custos e maximizar qualidade em um pequeno intervalo de tempo. Processos operacionais, em geral, apresentam uma grande complexidade e variação de dinâmica, o que requer técnicas de controle sustentáveis e robustas do ponto de vista de estabilidade e desempenho, a fim de proporcionar operações seguras e otimizadas.

Ainda nesta década, boa parte do controle dos processos em plantas industriais é feita por meio de controladores Proporcional e Integrativos (PI), no entanto com advento da indústria 4.0, a necessidade de implantação de controladores adaptativos, ótimos e baseados em inteligência computacional está cada vez maior. Com a grande complexidade dos processos, os controladores sintonizados por ganhos fixos tornaram-se inviáveis, o que vem possibilitando o desenvolvimento de técnicas de controle que mitiguem de maneira eficiente problemas como variações paramétricas

e incertezas de modelagem e perturbações. Com o advento da quarta revolução industrial e do rápido avanço da ciência e tecnologia da informação, muitos negócios e indústrias têm passado por grandes mudanças. Como consequência deste crescimento em larga escala, os equipamentos de produção e os processos industriais em geral estão se tornando cada vez mais completos. Para esses sistemas difíceis, técnicas de decisão e controle são essenciais para assegurar um funcionamento correto, além do alcance de objetivos de desempenho pré-estabelecidos. Neste contexto, é inegável a relevância social de projetos de controle seguros, confiáveis e eficientes, pois à medida que os sistemas modernos se tornam mais complexos e os requisitos de desempenho se tornam mais rigorosos, métodos de controle avançados se tornam imprescindíveis para atingir um desempenho otimizado e objetivos satisfatórios (Liu et al., 2017) com segurança operacional.

Com a crescente complexidade dos processos industriais modernos, as abordagens de projeto de controle usando os métodos de controle clássico e controle moderno isoladamente tornaram-se insuficientes para atender aos rigorosos requisitos de desempenho dos sistemas, pois em geral os projetos de controladores resultantes desses métodos são estruturados com menor sensibilidade às mudanças nos valores dos parâmetros da planta ou ambiente (Moura et al., 2019).

No desenvolvimento da automação de processos industriais, os controladores lógicos programáveis (CLP) foram introduzidos por volta de 1960 como uma melhoria nos controladores a relés eletromecânicos, os quais eram usados para implementação do controle discreto. Atualmente, os CLPs são significativamente usados em sistemas de automação para aplicações de processos industriais (Rabiee e Fardo, 2002), (Groover, 2016). Diversas plataformas de simulação para aplicações em CLP estão disponíveis gratuitamente, o que possibilita a investigação e análise de implementações de controle e automatização de plantas reais. O CodeSys, software utilizado na realização dos experimentos que são apresentados neste trabalho, é uma plataforma de simulação que promove soluções integradas para a configuração e verificação de um controle adequado com o objetivo de fornecer aos usuários um suporte prático para suas tarefas de controle de processos (Group CodeSys, 2022). Em plantas industriais do setor de mineração, é de suma importância o uso de sistemas automáticos com controle funcional e com sintonia rápida, tendo em vista que, para o alcance de uma boa performance na logística e transporte do material, necessita-se de um controle de fluxo assertivo, de baixo custo e com boas

características de robustez. O controle da vazão de sólidos em Viradores de Vagões (VVs) é feito, na maioria das vezes, por tentativa e erro, variando a velocidade dos alimentadores por meio da alteração da frequência de inversores, a qual é configurada manualmente com inserção de comandos em uma Interface Homem Máquina (IHM). A utilização da técnica de sintonia de controladores PID por produto interno, (Moura, 2021a), é apresentada com o objetivo de facilitar o controle do fluxo de descarregamento do minério de ferro por VVs, para assim garantir mais assertividade no processo de sintonia e melhorar o processo de controle de velocidade dos AL. Neste trabalho é apresentado um sistema de controle PID sintonizado pelo método de produto interno entre o vetor de ganhos do controlador PID com os zeros associados aos polos da FT, (Moura, 2021a), para ser embarcado em CLP. Este controlador foi desenvolvido, simulado e implementado na plataforma de simulação CodeSys com aplicação em uma planta real do processo operacional de descarregamento de minério por VVs, o qual possui modelo matemático representado em termos de FT obtida pelo Matlab, usando o toolbox de identificação de sistemas (*system identification toolbox*) como ferramenta de apoio (Moura, 2021a). O foco principal deste trabalho é disseminar o uso de controladores PID embarcados em CLP com aplicação em plantas de alta complexidade de controle de processos industriais do setor da mineração, incentivar o uso da plataforma CodeSys para desenvolvimento e simulação de técnicas de controles, além de comprovar a eficácia do controle por meio da técnica de sintonia de controladores PID via produto interno proposta por (Moura, 2021a).

1.2 Motivação e Objetivos

De acordo com o relatório "*The Big Picture: 2022 Metals and Mining - A look ahead to the key strategic trends and opportunities expected to drive the metals and mining industry narrative through 2022 and beyond*" fornecido pela empresa S&P Global, empresa americana cuja principal atuação é a análise financeira (Schuh et al., 2021), os esforços globais para combater a pandemia COVID-19 prejudicaram a maioria dos aspectos da indústria de metais e mineração no primeiro semestre de

2020, no entanto, houve uma rápida recuperação do setor no seu segundo semestre, por conta do aumento da demanda pela maioria das *commodities* de mineração. Tais condições persistiram em 2022 e, em alguns casos, espera-se que permaneça por mais tempo (Schuh et al., 2021). No relatório, fornecido pela mesma empresa, referente ao ano de 2023, é destacada que a deterioração das condições macroeconômicas globais persistirá no início de 2023, representando um risco negativo ao setor, à medida que os preços de muitas *commodities* caem e o suporte do mercado de ações enfraquece. À medida que o ano de 2023 avança, é esperada uma melhoria das condições, assim que os bancos centrais ganharem vantagem sobre a inflação. Apesar da previsão de que os preços dos metais possam cair em relação às altas atuais, as restrições de oferta de médio prazo estão preparando o cenário para preços historicamente acima da média até 2025 - impulsionadas principalmente pelo aumento da demanda por materiais usados na transição energética global acelerada. De acordo com a *Fitch Ratings*, uma das três maiores agências de classificação de risco de crédito, existe uma perspectiva para um forte avanço econômico no negócio orientado a metais básicos, com preços do minério de ferro ainda em alta, dentre outros tipos de metais, dando suporte ao desempenho do setor de mineração global em 2023 relacionado também à demanda europeia por aço (Schuh et al., 2023). No entanto, existe um equilíbrio quanto a esta perspectiva, por conta de preocupações de liquidez relacionadas ao setor imobiliário chinês, que podem afetar os preços das *commodities*. Por outro lado, *The World Economic Forum's Mining and Metals Industry community*, grupo de pares de alto nível dedicado a garantir a sustentabilidade de longo prazo de sua indústria e valor para a sociedade, traz a discussão sobre o contexto de lucros para *commodities*, que provavelmente mudará significativamente até 2030. As empresas precisarão adaptar seus modelos de negócios para se manterem relevantes, competitivas e sustentáveis em uma economia de baixo carbono.

Diante deste cenário, a proposição de técnicas de controle com sintonia que imponham ações relevantes para melhorar a produtividade das plantas, reduzindo desperdícios e viabilizando operações otimizadas e seguras para os seus operadores, é extremamente relevante. Plantas industriais do setor da mineração são difíceis de controlar, pois os equipamentos são robustos, com estruturas metálicas de grande porte e com frequente substituição de equipamentos tecnológicos disponíveis para o monitoramento do seu funcionamento, tornando alto o custo do processo operacional

(Moura, 2019). Isto, somado ao fato de que a operação de equipamentos industriais é feita com um operador embarcado, ou remotamente em sala de controles, com interação via Interface Homem Máquina (IHM), por meio do envio de sinais via painéis com unidades remotas para um CLP, indica a relevância da elaboração de projetos e análises de desempenho de controladores com sintonia *on-line* e ótima para o controle de máquinas do setor na mineração.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e simular um modelo de sintonia PID via técnica de produto interno que seja factível à aplicação em CLP comerciais.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver um simulador virtual no software de simulação *CodeSys* para testes e validação do modelo de sintonia via Produto Interno;
- b) Realizar simulação de controle de planta real do setor da mineração com o uso do simulador *CodeSys* sintonizado pela técnica do Produto Interno;
- c) Avaliar os resultados obtidos em simulação, comparando o método do produto interno com o método de sintonia de Ziegler-Nichols, validando-o via simulação como uma alternativa promissora aos métodos convencionais.

1.3 Metodologia

Este projeto se desenvolve, do ponto de vista de sua natureza, como uma pesquisa aplicada, que tem como objetivo a abordagem do problema de controle em máquinas do setor da mineração, mais especificamente viradores de vagões, de forma qualitativa, observando os resultados esperados em seus objetivos de forma explicativa. O procedimento técnico para esta dissertação foi inicialmente construído por meio de uma pesquisa bibliográfica para construção de embasamento teórico e fundamento científico no que tange às técnicas de sintonia de controle PID, com foco

na técnica de sintonia via produto interno (Moura, 2019), a qual é verificada por uma pesquisa experimental em *software* de simulação CodeSys para avaliação do desempenho da técnica. Como método de procedimento, tem-se a aplicação de procedimento experimental, por meio de simulações que são iniciadas a partir da identificação do modelo da planta, baseado em dados reais do processo operacional de um VV. A proposta para esta dissertação se delinea, desta forma, em uma pesquisa aplicada, qualitativa, explicativa, bibliográfica e experimental.

No que tange ao procedimento experimental, a planta utilizada é similar à apresentada no trabalho de (Moura e Fonseca, 2019) a qual é obtida por meio de técnicas de identificação de sistemas e com uso de dados de uma planta industrial coletados durante o processo produtivo. O modelo em espaço de estados para a planta em questão foi construído com dados reais de um VV a partir da utilização do método dos mínimos quadrados e do algoritmo de busca *Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification* (N4SID) (Overschee, P. V., Moor, B. D., 2012) por meio do software *Matlab*® (Moura, 2019).

As pesquisas desenvolvidas se caracterizam como pesquisas científicas e tecnológicas tanto em sua metodologia quanto em suas aplicações. Quanto à metodologia, é utilizado para comparação um método de sintonia clássico de controlador PID, Método de Ziegler- Nichols. Quanto à aplicação, é utilizada uma planta de grande porte do setor da mineração com alto grau de complexidade e controle para a validação das metodologias propostas.

1.4 Organização do Trabalho

No primeiro capítulo deste trabalho, apresentou-se o contexto de aplicação e expectativas de ganhos ao direcionar a implementação de um sistema de controle de um controlador PID a uma planta do setor da mineração. Também foi apresentado o objetivo geral e objetivos específicos, seguidos da metodologia de trabalho. O segundo capítulo deste trabalho aborda detalhes dos componentes de *hardware* do sistema de controle, como o CLP e a plataforma CodeSys. O terceiro capítulo está direcionado para os controladores PID, bem como distintos métodos de sintonia para alcance de um controle satisfatório em tarefas de automatização de processos

industriais. Por fim, o quarto capítulo apresenta os experimentos realizados e principais resultados obtidos, bem como limitações encontradas e conclusões.

Capítulo 2

SISTEMA DE CONTROLE NA PLATAFORMA CODESYS

Os sistemas de controle utilizados neste trabalho são orientados à implementação em CLP de um controlador PID sintonizado pelo método de produto interno. Esta Seção aborda detalhes sobre os controladores lógicos programáveis e a plataforma utilizada para o desenvolvimento e simulação, a plataforma *CodeSys*.

2.1 A evolução das técnicas de controle

A história dos sistemas de controle evoluiu ao longo dos séculos, com contribuições significativas de diversas áreas, como matemática, engenharia e automação. Sua evolução remonta às civilizações antigas como as do Egito e China, onde relógios de água e de sol eram usados para medir e controlar a passagem do tempo. Sistemas de controle realimentados são conhecidos e usados por mais de 2.000 anos, alguns dos primeiros exemplos são relógios de água descritos por Vitruvius e atribuídos a Ctesíbio cerca de 270 a.C. Cerca de trezentos anos depois, Heron de Alexandria descreveu uma série de autômatos que empregavam uma variedade de mecanismos de realimentação e tais dispositivos antigos marcaram o início de uma longa trajetória de desenvolvimento. A história do controle automático divide-se convenientemente em quatro períodos principais: o Controle Antigo, aplicações até 1900, o período Pré-Clássico de 1900 a 1940, o Período Clássico, de 1935 a 1960 e o controle Moderno, com técnicas e pós 1955 (Bennett, 1996).

Um dos primeiros sistemas de controle registrados foi o regulador de bolas flutuantes de James Watt, desenvolvido no final do século XVIII. Este dispositivo foi usado para regular a velocidade das máquinas a vapor, ajustando o fornecimento de vapor com base na velocidade de rotação da máquina. O primeiro projeto foi produzido em novembro de 1788 e um regulador foi usado pela primeira vez no início de 1789 (Franklin et al.,2013).

Em 1922, Nicholas Minorsky apresentou uma clara análise do controle envolvido em sistemas de controle de posição e formulou uma lei de controle que agora é conhecida por lei de três termos ou controle PID. Ele chegou à sua lei, observando a maneira pela qual um timoneiro dirigia um navio (Minorsky, 1922). Em 1935, inicia-se a era do controle clássico e com isso a popularização do algoritmo de controle que forneceu uma maneira simples, porém eficaz, maneiras de controlar uma ampla gama de sistemas, ajustando os componentes proporcionais, integrais e derivativos do sinal de controle, o controlador PID. Em diversos momentos do desenvolvimento da teoria de controle, foram implementados diferentes tipos de controladores PID.

Controladores eletrônicos, hidráulicos e pneumáticos foram aperfeiçoados no decorrer das décadas. Hoje, grande parte dos controladores industriais em uso emprega processos de controle PID. Isto em virtude da localização física destes controladores, bem como por seu ajuste ser em campo e normalmente em áreas de difícil acesso. Neste contexto, diferentes tipos de regras e sintonias, como os métodos propostos por Ziegler e Nichols, bem como ajustes finos, foram desenvolvidos para facilitar a realizar tais ajustes em campo. Na década de 1940, métodos de resposta em frequência (especialmente os métodos com base nos diagramas de Bode) tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controle linear de malha fechada que satisfizessem o desempenho requerido. No início da década de 1940, Ziegler e Nichols criaram regras para o ajuste de controladores PID, no chamado método de Ziegler-Nichols. Do final da década de 1940 ao início da de 1950, o método de lugar das raízes foi desenvolvido. Os métodos de resposta em frequência e do lugar das raízes, os quais são a essência da teoria clássica de controle, conduziram a sistemas que são estáveis e satisfazem um conjunto de condições de desempenho relativamente arbitrárias. Esses sistemas são, em geral, aceitáveis, mas não são ótimos no sentido estrito desse termo. Desde o final da década de 1950, a ênfase nos problemas com projetos de controle foi deslocada do projeto de um dentre muitos

sistemas que funcionam para o projeto de um sistema que seja ótimo em algum aspecto relevante (Ogata, 2010)

Com o advento das grandes guerras, os servomecanismos, que usam controle realimentado para manter um estado desejado, tornaram-se proeminentes em vários sistemas, incluindo pilotos automáticos de aeronaves e alvos de armas antiaéreas. A partir de 1960, como a disponibilidade dos computadores digitais, possibilitou-se a análise de sistemas complexos diretamente no domínio do tempo, a teoria de controle moderno, surgindo também por volta de 1960 com base na análise e na síntese do domínio de tempo com o emprego de variáveis de estado, foi desenvolvida para lidar com a crescente complexidade dos sistemas modernos e seus rigorosos requisitos relativos à precisão, à importância e ao custo em aplicações militares, espaciais e industriais. Entre 1960 e 1980, o ótimo controle de sistemas determinísticos e estocásticos, bem como o controle adaptativo e de aprendizagem de sistemas complexos, foi amplamente pesquisado. De 1980 a 1990, os desenvolvimentos na teoria de controle moderno voltaram-se para o controle robusto (Ogata, 2010).

Atualmente, a teoria dos sistemas de controle continua a evoluir com os avanços no aprendizado de máquina e controle adaptativo, permitindo que os sistemas se adaptassem às mudanças de condições de forma autônoma, contando também com técnicas de identificação de sistemas (Ljung, 1987).

Diante da contínua e exponencial evolução de técnicas de controle, é notável que o controle proporcional-integral-derivativo (PID) oferece soluções práticas para muitos problemas de controle do mundo real, muito embora não forneça soluções ótimas, a sua relevância é inegável, pois a despeito das inúmeras inovações e técnicas apresentadas pela evolução da teoria de controle, o PID possui um forte viés prático que vence a barreira do tempo. Diz-se que é um controlador universal no sentido de que a ação integral trata o passado, a proporcional do presente, e o termo derivativo tem efeito preditivo. Desde a invenção, sua popularidade cresceu significativamente (Ang et al., 2005; Åstrom e Hägglund, 1995, 2006; Samad, 2017). Paralelo a isso, os métodos de sintonia automática foram desenvolvidos para possibilitar a sintonia *online* de controladores. O uso de controladores PID é expressivo dada a sua grande aplicabilidade na maioria dos sistemas de controle (Ogata, 2010).

Os sistemas de controle utilizados neste trabalho são orientados à implementação em CLP de um controlador PID sintonizado pelo método de produto

interno. Esta Seção contextualiza o papel dos CLPs no setor industrial, bem como a relevância de controladores PID nas tarefas de automatização de processos industriais. Este trabalho propõe a verificação da construção de um controlador PID sintonizado pelo método do produto interno entre o vetor de ganhos do controlador PID com os zeros associados aos polos da FT, conforme apresentado em (Moura, 2021a), para ser embarcado em CLP. A solução foi desenvolvida, simulada e implementada na plataforma de simulação CodeSys com aplicação em uma planta real do processo operacional de descarregamento de minério por VVs. O modelo matemático é representado em termos de FT obtida pelo *Software Matlab*, usando o toolbox de identificação de sistemas (*System Identification Toolbox*) como ferramenta de apoio (Moura, 2021a).

2.1.1 Controladores Lógicos Programáveis

Os controladores lógicos programáveis (CLP) são hoje a tecnologia de controle de processos industriais mais amplamente utilizada. Um CLP é um tipo de computador industrial que pode ser programado para executar funções de controle. Esses controladores reduziram muito a fiação associada aos circuitos de controle convencional a relé, além de apresentar outros benefícios, como a facilidade de programação e instalação, controle de alta velocidade, compatibilidade de rede, verificação de defeitos e conveniência de teste e alta confiabilidade. O CLP é projetado para arranjos de múltiplas entradas e saídas, faixas de temperatura ampliadas, imunidade a ruído elétrico e resistência à vibração e impacto. Programas para controle e operação de equipamentos de processos de fabricação e mecanismo normalmente são armazenados em memória não volátil ou com bateria incorporada. Um CLP é um exemplo de um sistema em tempo real, considerando que a saída do sistema controlado por ele depende das condições da entrada (Petruzella, Frank D., 2014).

Com o surgimento dos circuitos integrados, foi possível viabilizar e difundir a utilização do CLP em grande escala, melhorando o poder de processamento e diminuindo o tamanho dos equipamentos. Esse avanço está associado, em grande parte, ao desenvolvimento tecnológico dos computadores, até mesmo em sua arquitetura de *hardware* e *software* (Moura, 2021a). Antes do surgimento dos CLP, as

tarefas de comando e controle de máquinas e processos industriais eram feitas por relés eletromagnéticos, especialmente projetados para este fim. O controle baseado em relés exigia modificações na fiação, no caso de alterações no processo automatizado e em muitos casos isso se tornava inviável, sendo mais barato substituir todo o painel por um novo (Martins, 2007).

Os CLPs, já algum tempo, vêm desempenhando um importante papel em parques industriais, pois possibilitam a implementação de controles flexíveis, de baixo custo e de fácil instalação. Um CLP interage com o mundo externo por meio de entradas e saídas e desde que a tecnologia para controle de movimentos por acionamentos elétricos foi popularizada o seu uso associado à eletrônica de potência em aplicações de máquinas elétricas foi introduzido massivamente na automação industrial. Hoje a aplicação dos CLPs se dissemina por quase todos os tipos de processos industriais (Dlamini, 2016). Com o desenvolvimento tecnológico, o desempenho dos CLPs melhorou significativamente, o que fez com que seu alcance fosse ainda mais amplo (Jatti Júnior et al., 2021). Com o advento da quarta revolução industrial (indústria 4.0) e sua consolidação no que tange ao rápido avanço da ciência, tecnologia da informação e inovação, muitos processos de plantas reais têm sofrido alterações relevantes (Lasi et al., 2014). Como consequência deste crescimento em larga escala, os equipamentos de produção e processos, em geral, estão tornando cada vez mais complexos seus sistemas de controles.

Para esses sistemas, técnicas de decisão e controle são essenciais para assegurar um funcionamento correto, além do alcance de objetivos de desempenho pré-estabelecidos. Neste contexto, é inegável a relevância social de projetos de controle confiáveis e eficientes, tendo em vista a evolução de sistemas modernos, a qual exige requisitos de desempenho mais rigorosos (Moura, 2020).

Para atender às demandas da comunidade industrial internacional, foi formado um grupo de trabalho dentro da *International Electrotechnical Commission* (IEC) para avaliar o projeto completo de CLPs, incluindo os *hardwares*, instalações, testes, documentações, programações e comunicação. Para tanto, tem-se a normatização em partes, apresentadas na tabela 1.

Figura 1 Controlador Lógico Programável



Fonte: LG Automação Industrial, 2023.

Tabela 1 Estado atual da norma IEC 61131

Parte	Título	Conteúdo	Publicação
Parte 1	<i>General Information</i>	Definição da terminologia e conceitos.	2003 (2ª Ed.)
Parte 2	<i>Equipment requirements and tests</i>	Teste de verificação e fabricação eletrônica e mecânica.	2003 (2ª Ed.)
Parte 3	<i>Programmable Languages</i>	Estrutura do software do CLP, linguagens e execução de programas.	2003 (2ª Ed.)
Parte 4	<i>User guidelines</i>	Orientações para seleção, instalação e manutenção de CLP's.	2004 (2ª Ed.)
Parte 5	<i>Communications</i>	Funcionalidades para comunicação com outros dispositivos.	2000 (1ª Ed.)
Parte 7	<i>Fuzzy Control Programming</i>	Funcionalidades de software, incluindo blocos funcionais padrões para tratamento de lógica nebulosa dentro de CLP.	2000 (1ª Ed.)
Parte 8	<i>Guidelines for the Application and</i>	Orientações para implementação das linguagens IEC 1131-3.	2003 (2ª Ed.)

	<i>Implementation of Programming Languages</i>		
--	--	--	--

As linguagens de programação para CLPs são normatizadas pelo padrão internacional *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61131. Isto significa que suas sintaxes e semânticas foram definidas, removendo o uso de dialetos na implementação dos algoritmos. Uma vez aprendida, é possível a criação de sistemas baseados na norma.

A terceira parte da norma IEC 61131 define cinco linguagens de programação, que são:

i) *Structured Text (ST)* - Texto Estruturado;

Trata-se de uma linguagem de alto nível com raízes em Ada, Pascal e “C”. Contém todos os elementos essenciais de uma linguagem de programação moderna, incluindo condicionais (IF-THEN-ELSE e CASE OF) e iterações (FOR, WHILE e REPEAT). É uma linguagem excelente para a definição de blocos funcionais complexos, os quais podem ser usados em qualquer outra linguagem IEC.

ii) *Instruction List (IL)* - Lista de Instruções;

A lista de instruções é uma linguagem textual e se assemelha à linguagem *assembler*.

iii) *Ladder Language (LD)* - Linguagem Ladder;

É baseada na representação gráfica da Lógica de Relés.

iv) *Function Block Diagram (FBD)* - Diagrama de Bloco

A linguagem FBD usada na indústria de processos. Expressa o comportamento de funções, blocos funcionais e programas como um conjunto de blocos gráficos interligados, como nos diagramas de circuitos eletrônicos. Similar a um sistema em termos do fluxo de sinais entre elementos de processamento.

v) *Sequential Flow Chart (SFC)* - Diagrama de Fluxo ou *Grafcet*

O SFC descreve graficamente o comportamento sequencial de um programa de controle. É derivado das redes de Petri e da norma IEC 848 *Grafcet*, com as alterações

necessárias para converter a representação de uma documentação padrão para um conjunto de elementos de controle de execução (PLCopen, 2022). A linguagem de programação SFC é utilizada para programar uma sequência diretamente no CLP. Uma sequência no CLP representa a descrição passo a passo, que deve ser usada para executar uma tarefa. O Grafcet descrito em detalhes na Norma IEC 848 é usado para a modelagem da dinâmica de sistemas para eventos discretos e em razão de suas capacidades de modelagem é utilizado para desenvolver acionamentos sequenciais ou dependentes do tempo. Para CLPs que não possuem essa característica, o *Grafcet* pode ser traduzido para *Ladder*, tornando-se assim uma ferramenta para elaboração de comandos sequenciais.

Projetos de controle atuais apresentam construções mais elaboradas e que exigem bons sistemas de controle, os quais, comumente, são construídos usando sistemas de linguagem mista, normalmente linguagem *Ladder*, texto estruturado e lista de instruções. Existem alguns problemas notáveis no que tange à tentativa de programar aplicações de controle com mais complexidade em CLP, como por exemplo a limitação do número de sub-rotinas ou blocos de programas, quando a programação é feita em linguagem de programação *Ladder*. Essa característica dificulta a divisão de programas mais extensos de forma hierárquica. Outro ponto relevante é a passagem de parâmetros entre blocos de programas, sendo uma tarefa difícil a divisão de um programa muito extenso em partes menores e que mantenham interfaces claras entre si.

2.2 Plataforma de desenvolvimento e Simulação *CodeSys*

Os sistemas de controle utilizados neste trabalho são orientados à implementação em CLP de um controlador PID sintonizado pelo método de produto interno. Esta Seção aborda detalhes sobre a plataforma de desenvolvimento e simulação CodeSys. O CodeSys (*Controller Development System*) é um software de código aberto utilizado como uma ferramenta de programação de sistemas de automação. É baseado na norma internacional IEC 61131-3, a plataforma é indicada

para verificação de controle de máquinas as quais necessitem de CLP, pois possui recursos técnicos eficientes e acessíveis. É um recurso que vem se destacando positivamente no espaço da automação industrial nos últimos anos.

O *CodeSys Group* é o fabricante do CodeSys, o principal software de automação seguindo toda as orientações da IEC 61131-3 e independente de hardware para aplicações de controlador de desenvolvimento e engenharia, sendo a marca CODESYS® uma marca registrada. O *CodeSys Group* é também uma organização focada em desenvolvimento de softwares. A plataforma relaciona dois *softwares* principais: o primeiro é um ambiente de desenvolvimento integrado conhecido como IDE (*Integrated Development Environment*) que é o ambiente de desenvolvimento do CodeSys e o *Runtime software* que executa as aplicações desenvolvida no IDE e fornece as visualizações das aplicações aos clientes em seus dispositivos e IHM. Para o desenvolvimento das aplicações, a IDE baseia-se na IEC 61131-3, facilitando tanto a construção dos programas, quanto flexibilizando a utilização em outras plataformas de programação de CLP. O *Runtime* normalmente é instalado em CLP, mas também pode ser instalado em qualquer dispositivo inteligente, como por exemplo um *Raspberry Pi*.¹ Quando um dispositivo é compatível com o CodeSys, o *runtime* pode ser instalado sem problemas e assim executar as aplicações desenvolvidas dentro da IDE sendo uma característica importante a possibilidade de que programadores e engenheiros de controle possam desenvolver programas independentes de hardwares (Real Pars, 2022).

A independência de hardwares é a principal característica do CodeSys, tendo a adaptabilidade a diferentes requisitos de sistema e ambiente. O grupo CodeSys é uma empresa de software que em suma desenvolve a IDE e o *runtime* e gera receitas licenciando o *runtime* para os fabricantes de CLP, sem fabricar *hardwares* (Codesys Group, 2022), desta forma se diferencia de empresas tradicionais do ramo da automação industrial como *Rockwell* e *Siemens* as quais desenvolvem seu IDE e seus *hardwares*. Esta característica, embora pareça pequena, traz algumas vantagens para fabricantes, programadores e estudantes. Para os fabricantes, ao iniciarem uma parceria com o CodeSys, podem direcionar seus recursos e esforços para melhorias

¹ O *Raspberry Pi* é um computador de baixo custo, que se conecta a um monitor de computador ou TV e usa teclado e mouse padrão. É um pequeno dispositivo que permite programação em linguagens como *Scratch* e *Python*. Ele atua como um computador desktop e tem a capacidade de interagir com o mundo exterior. Este recurso tem sido usado em uma ampla variedade de projetos (Raspberry Pi Foundation, 2022).

em seus *hardwares*, redução de custos e investimentos mais assertivos, podendo inclusive refletir estes ganhos no valor cobrado aos usuários, enquanto o desenvolvimento do *software* é realizado pelo Grupo CodeSys, empresa já especializada no desenvolvimento de *softwares* de controle. Quanto aos programadores e estudantes, surge a flexibilidade para uso de aplicações de controle em qualquer dispositivo compatível com o ambiente CodeSys, tendo suas habilidades mais transferíveis por meio de programação em ambientes de diversos fabricantes e marcas, sem a necessidade de aprendizado de características de programação a cada mudança de marca, além de usufruírem de características como monitoramento de dados, verificação de erros de aplicativo (depuração), dentre outras (Real Pars, 2022).

Nesse ambiente de desenvolvimento, é possível visualizar processos industriais, utilizando uma Interface Homem-Máquina (IHM). Algumas versões do software permitem ainda o acompanhamento via *web*, por meio de *tablets* e *smartphones*. O software é orientado como uma ferramenta de programação com um bom desempenho ao ser direcionada para aplicações de controle em máquinas e processos de integração de sistemas. Além de ser uma ferramenta de programação para ser utilizada como simulador ou como plataforma de desenvolvimento de controle em aplicações que necessitem de um CLP ou HMI com várias conexões de barramento de campo, é utilizado em diferentes aplicações, como por exemplo para automatizar máquinas seriais e máquinas para fins especiais para a produção de todos os tipos de bens e produtos diferentes.

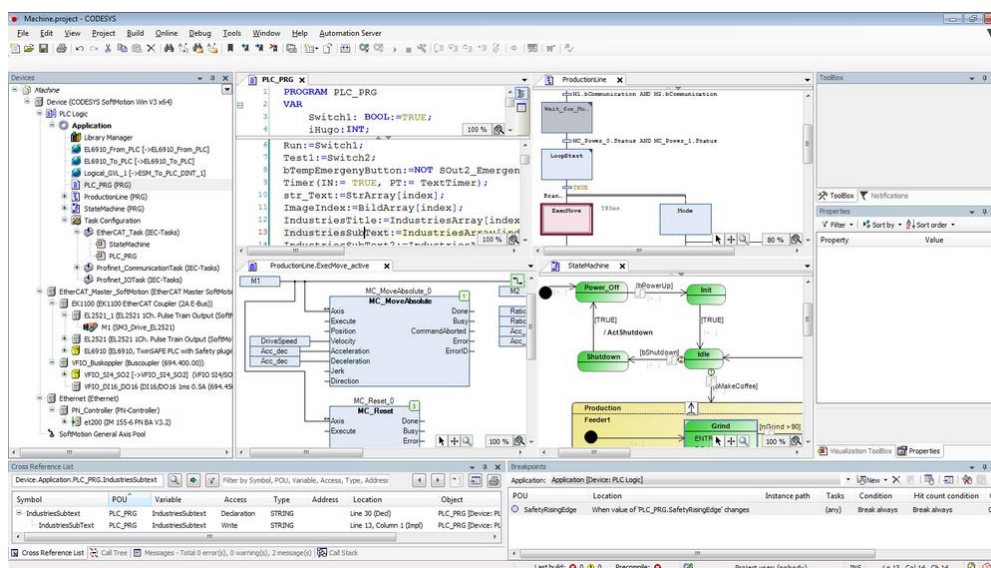
A presença do *Software* CodeSys está se ampliando cada vez mais e não apenas como um simulador, mas como plataforma de desenvolvimento, pois oferece um bom ambiente de desenvolvimento com funções de *back-end* totalmente integradas, como compiladores, depuradores simulação e rastreamento variável.

Muitas tarefas na automação de fábrica, como a configuração do *fieldbus*, a criação de telas de visualização modernas para operação da máquina, planejamento e execução de controle de movimento complexos, implementação de aplicações de segurança, dentre outras, podem ser realizadas com a ferramenta integrada. O CodeSys também é amplamente utilizado por escolas e universidades para treinamento de futuros técnicos e engenheiros, pois após o *download* gratuito e instalação da plataforma, o *runtime* pode ser utilizado por duas horas seguidas sem

interrupções, um tempo suficiente para a maioria dos estudos e testes em simulações (Codesys Group, 2023)

Diversos controladores de fabricantes distintos como o *Eaton Group*, *Allen Bradley*, *Wago*, dentre outros, já podem ser programados com CodeSys. A plataforma possui fácil adaptação a diferentes requisitos de sistema e ambientes, combinando recursos técnicos sofisticados e de manuseio simplificado. É um sistema de programação muito utilizado por diversos fabricantes, com utilização para verificação de performance em mais de 1.000 controladores diferentes em todo o mundo. CodeSys oferece uma seleção de fabricantes que fornecem dispositivos compatíveis, o que significa que cada usuário final tem um vasto conjunto de dispositivos de automação para optar para seu projeto de automação.

Figura 2 Interface do software CodeSys



Fonte: CodeSys Group,2023.

Para o desenvolvimento de dispositivos de controle para fins especiais que requerem adaptação no local pelo engenheiro de aplicação, CodeSys é uma plataforma de desenvolvimento de fácil acesso e com ampla aplicação, por exemplo, para controladores em compressores industriais, pesagem e dosagem industrial e tecnologia médica, dentre outros.

Figura 3 Modelo de desenvolvimento CodeSys



Fonte: Adaptado de Real Pars, 2023.

Com a ampla utilização dos CLPs nos ambientes industriais, além do desenvolvimento de dispositivos de automação inteligente que possuam despesas calculáveis e alta aceitação no mercado, os fabricantes de componentes inteligentes se beneficiam dos amplos recursos da plataforma *CodeSys* no desenvolvimento de seus dispositivos. O *CodeSys* passa a ser uma boa escolha para usuários e fabricantes de dispositivos industriais.

2.2.1 Características do CodeSys

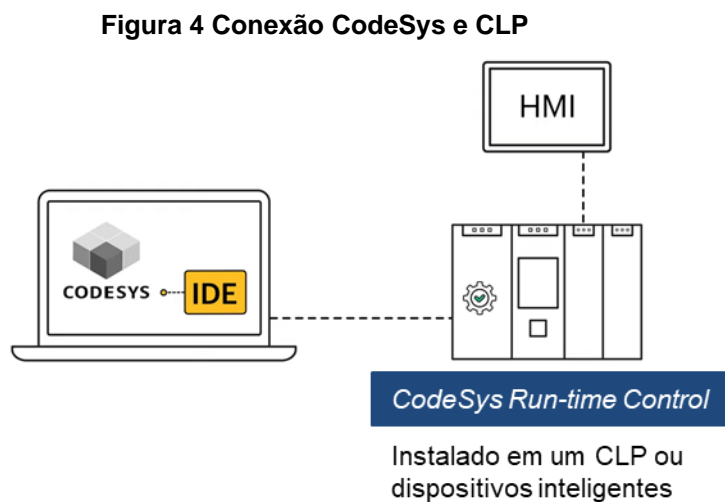
A principal característica da plataforma *CodeSys* é sua adaptabilidade a diferentes requisitos de sistema e ambiente, possibilitando o alcance de alguns benefícios para fabricantes de dispositivos, como a utilização de uma plataforma para uso dos dispositivos de automação inteligentes, com despesas calculáveis e alta aceitação de mercado: Os fabricantes de componentes inteligentes utilizam os amplos recursos do *CodeSys* no desenvolvimento de seus dispositivos.

O Grupo *CodeSys* destaca as principais características:

- Produto disponível como um sistema modular de execução de fonte única para diferentes plataformas de dispositivos;
- Suporte para todos os processadores e sistemas operacionais comuns para sistemas industriais, incluindo uso nativo de arquiteturas multicore (suporte multicore);

- Despesas de desenvolvimento projetáveis: desenvolvimento de controladores industriais com características técnicas pronunciadas por meio de interfaces definidas e suporte de adaptação qualificado;
- Numerosos sistemas e plataformas de referência disponíveis (por exemplo, para os populares Arm® Cortex® ou sistemas embarcados);
- Implementação fácil de propriedades específicas do dispositivo por meio de módulos de biblioteca (por exemplo para funções de E/S próprias);
- Adaptação e extensibilidade da interface do usuário por módulos plug-in específicos do fabricante (por exemplo, modelos, editores, configuradores, etc.);
- Integração em arquiteturas de sistemas existentes por meio de interfaces ou padrões proprietários enxutos, como OPC / OPC UA, com possibilidade de conexão com o Matlab.

A figura 4 ilustra a conexão do CodeSys com o CLP.



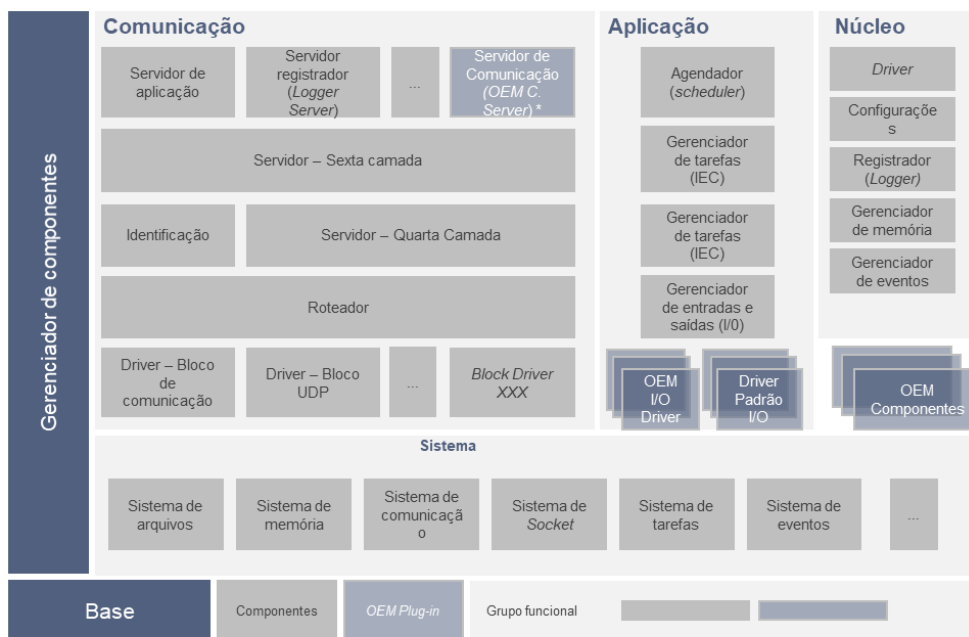
Fonte: Adaptado de Real Pars, 2023.

O CodeSys conta com funções integradas para dispositivos de automação orientados para a prática, em que são destacadas pelo fabricante as seguintes funções:

- Configuração de sistemas *fieldbus* populares, módulos de E/S próprios ou drives (por exemplo, para CANopen®, EtherCAT® ou PROFINET);

- Visualização integrada disponível como extensão opcional: geração e exibição de interfaces de usuário orientadas para a prática, por exemplo diretamente na tela do dispositivo, com telas conectadas ou via navegador da *web*;
- Numerosos produtos adicionais opcionais para escalonamento rápido do escopo funcional do dispositivo como controlador de movimento, controle de painel ou *gateway* de comunicação;
- Produtos de software pré-certificados para estender o controlador padrão em um controlador de segurança compatível com IEC 61508 (61508 NORM, 2023);
- Configuração e engenharia de projeto de protocolos de comunicação específicos da indústria;
- Interface opcional para integração de código C existente ou gerado;

Figura 5 Principais características da aplicação



* OEM (Original Equipment Manufacturer) Communication Server

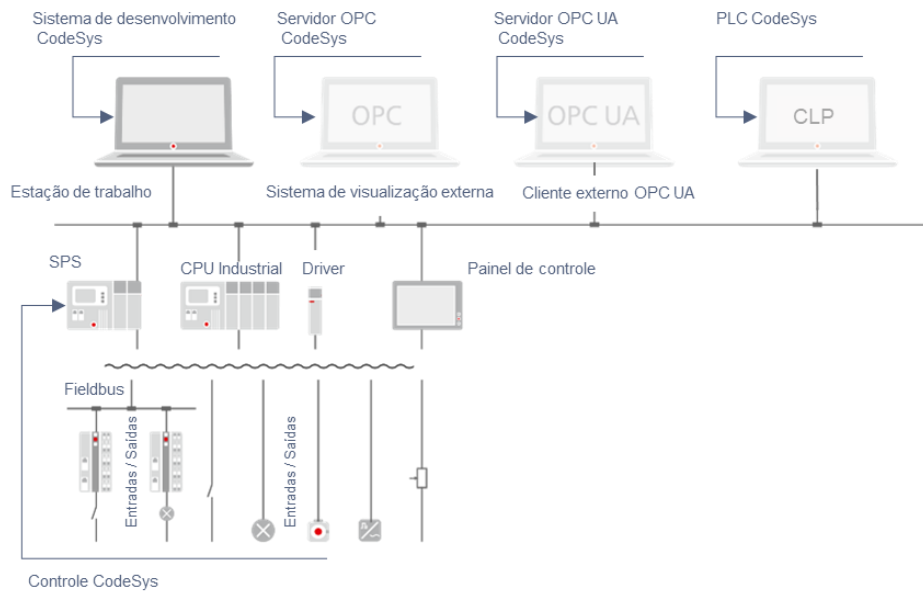
Fonte: CodeSys Group, 2023

2.2.2 Benefícios para os usuários

Os usuários finais empregam o *CodeSys* para a criação bem-sucedida de aplicativos de automação simples e sofisticados para controladores industriais usados em fábricas, máquinas móveis, sistemas de energia e automação predial, bem como em muitas outras áreas. Vários recursos e propriedades do sistema auxiliam neste trabalho. Há integração em uma única interface de usuário, em que o usuário pode se beneficiar das seguintes características:

- O *CodeSys* possui um sistema completo de programação IEC 61131-3 – desde a programação CLP clássica até a programação do controlador orientado a objetos;
- Recursos abrangentes para engenharia de projeto conveniente e comissionamento de aplicativos de automação, como monitoramento de dados, verificação de erros de aplicativo (depuração) e alteração do aplicativo durante a operação (alteração on-line);
- Módulos complementares opcionais para desenvolvimento metódico de aplicativos: UML®, gerenciamento de versão, análise de código estático, criação de perfil e automação de teste;
- Configuração e comissionamento dos sistemas *fieldbus* industriais mais importantes ou sistemas de E/S específicos do fabricante;
- Integração perfeita de componentes adicionais opcionais para engenharia de projeto: visualização, controle de movimento robótica, módulos de segurança;
- Instalação, manutenção e treinamento necessários apenas para uma única interface de usuário: minimização do esforço de engenharia;
- Gama de funções extensível através de produtos adicionais disponíveis na loja online e com ferramentas integradas (programação de funções ou bibliotecas de comunicação nas linguagens IEC 61131-3);
- Conexão com plataformas da Indústria 4.0 para gerenciar cenários de controle por nuvem.

Figura 6 Conexões da plataforma CodeSys



Fonte: Adaptado de CodeSys Group, 2023.

A descrição com detalhes sobre as características da plataforma, pode ser encontrada no site oficial do grupo CodeSys (CodeSysGroup, 2023).

Figura 7 Vantagens para usuários e fabricantes de hardwares



Fonte: Adaptado de Real Pars, 2023.

2.3 Considerações Finais

Nesta seção apresentaram-se os principais elementos do sistema de controle utilizados neste trabalho, o qual está orientado à implementação em CLP de um controlador PID sintonizado pelo método de produto interno. Esta Seção abordou detalhes sobre os controladores lógicos programáveis, seu padrão de linguagem internacional alcançado por meio da norma IEC 61131-3, bem como as principais características da plataforma CodeSys, plataforma utilizada para o desenvolvimento e simulação, além de sinalizar a possibilidade de conexões via plataforma de comunicação aberta (OPC e OPC UA). Apresentaram-se também os principais benefícios da utilização da plataforma CodeSys e suas funções integradas para dispositivos de automação orientados para a prática.

Capítulo 3

CONTROLADORES PID E MÉTODO DE SINTONIA POR PRODUTO INTERNO

Esta Seção aborda detalhes sobre os controladores PID, bem como distintos métodos de sintonia para alcance de um controle satisfatório em tarefas de automatização de processos industriais.

3.1 Controladores PID

Ao longo das últimas décadas, teorias matemáticas dedicadas ao controle ótimo e ao controle robusto têm produzido importantes resultados, indispensáveis nas aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e similares. Contudo, algumas arquiteturas especiais que utilizam controladores PID têm mostrado notável eficácia e praticidade no controle de processos industriais. Controladores PID, ainda mais quando inseridos em computadores industriais e em CLP, mantêm-se como um dos principais equipamentos de controle (Castrucci, 2011).

Os controladores PID mantiveram-se populares, a despeito de muitas mudanças tecnológicas, desde a pneumática até os microprocessadores, passando por tubos eletrônicos, transistores e circuitos integrados. O microprocessador teve uma influência dramática no controlador PID e isso gerou oportunidades para fornecer recursos adicionais, como ajuste automático, agendamento de ganho e adaptação contínua (Åstrom, K.J., Hägglund, 1995). A capacidade dos controladores integral

proporcional (PI) e derivado integral proporcional (PID) de compensar a maioria dos processos industriais práticos foi a grande impulsionadora quanto à aceitação em aplicações industriais (O'Dwyer, Aidan, 2009). As técnicas de controle clássico já estão consolidadas no ambiente industrial, principalmente quanto ao uso de controladores do tipo PID, sendo a técnica de controle realimentado mais utilizada em aplicações industriais (Vinagre et al., 2007). Os controladores PI e PID estão no centro da prática de engenharia de controle há quase dez décadas e foram sugeridos como o segundo instrumento de comunicação e decisão de controle mais importante do século XX (Rhinehart, R. Russell, 2000).

Um controlador PID é um controlador de três termos, que tem uma longa história no campo de controle automático, começando no início do século passado (Bennett, 2000), (Ogata, 2010) (Franklin et al., 2013). Devido à sua intuitividade e relativa simplicidade, além do desempenho satisfatório que é capaz de fornecer a uma ampla gama de processos, tornou-se na prática o controlador de destaque em ambientes industriais (Moura, 2021b). O PID evoluiu acompanhando o progresso da tecnologia e atualmente é muitas vezes implementado de forma digital em vez de componentes analógicos, pneumáticos ou elétricos. Ele pode ser encontrado em, praticamente, todos os tipos de equipamentos de controle, seja como um controlador autônomo (estação única) ou como um bloco funcional em CLP e Sistemas de Controle Distribuídos (SCD) (Visioli, 2006). A figura 8, figura 9 e figura 10 mostram modelos de controladores PID comercializados.

Figura 8 Controlador PID de processos/temperatura modelos WEST 6100+ | P6100+.



Fonte: West Control, 2023

Os métodos de controle avançados estão ganhando espaço no setor industrial e se tornando um caminho atrativo para o alcance de desempenho ótimo com segurança operacional em aplicações de controle, porém a presença do controlador

PID ainda é significativa em diversos setores e por isso é importante analisar as características de implementação direta em lógica de programação via CLP, viabilizando aplicações de baixo custo, funcionais, como a aplicação proposta neste artigo, e que sejam motivadoras para o desenvolvimento de técnicas de implementação de controle moderno em parques industriais (Moura, 2021a).

Figura 9 Controladores PID – Modelos N1100, N2000, N1030



Fonte: Novus, 2022.

Figura 10 Controlador PID indicador – Modelo YS1500 - YOKOGAWA Europe - para montagem em painel



Fonte: Yokogawa, 2022.

A perspectiva atual do uso de técnicas de controle, inclusive para implementação de controles clássicos como PID, é voltada para o uso de algoritmos que sejam funcionais para uma boa sintonia em vez de sintonia por tentativa e erro (Moura, 2021a). No mercado atual, são também comercializados instrumentos de controle de variáveis como temperatura, pressão, velocidade, os quais permitem a

escolha do modo de controle em sua interface frontal. É possível selecionar o tipo de controle *ON-OFF*, PID, ou ainda combinações das ações PID. Por sua relevância, praticidade e popularização, ao passo que o controlador PID permanece com expressiva utilização atualmente, é notável a técnica do produto interno, propondo melhores performances para os sistemas de controle com utilização do PID, bem como alcance de pontos de operação estratégicos. Os modelos e plantas utilizados neste trabalho foram extraídos de Moura (2021).

Nesta seção será apresentada uma FT genérica para ilustrar o problema de sintonia de um controlador PID, o qual também será descrito em termos de uma FT.

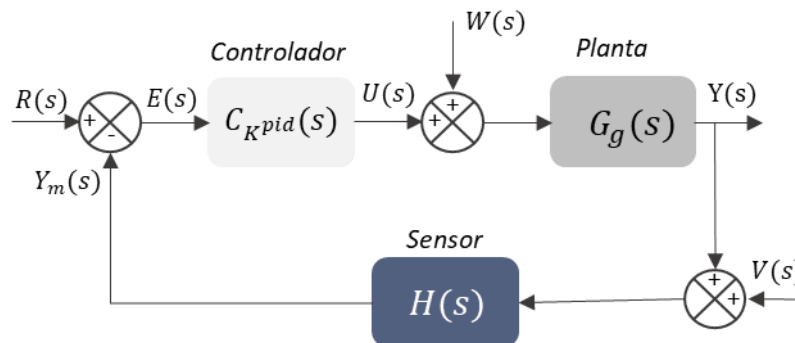
3.2 Modelos Matemáticos para implementação do controle

Esta seção tem como objetivo a descrição dos modelos matemáticos utilizados como premissa para a implementação do controle na planta.

3.2.1 Modelo Matemático de uma planta em termos de FT

Seja o sistema dinâmico de uma planta descrito em (Moura, 2021) em que a planta é representada por equações diferenciais ordinárias (EDO), descritas por FT no domínio S (em transformada de Laplace), conforme diagrama da figura 11, onde o sistema em malha fechada relaciona os sinais de entrada e saída. Este diagrama de blocos será utilizado como modelo de função de transferência do sistema de controle em questão.

Figura 11 Diagrama de blocos canônico do sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Adaptado de Moura,2021.

Dada a figura 11, tem-se que $R(s)$ é a entrada de referência, $W(s)$ é o sinal de perturbação e $V(s)$ é o sinal de ruído, $Y(s)$ é a saída da planta e $Y_m(s)$ é a saída da planta medida pelo sensor, $U(s)$ e $E(s)$ são o sinal de controle e o erro de malha fechada, respectivamente, que são variáveis internas de desempenho do sistema de controle. A FT em transformada de Laplace é dada por

$$G_g(s) = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo $G_g(s)$ a FT geral do diagrama de blocos do sistema de controle, n a ordem do modelo da planta e o número de polos que são inseridos no sistema e m o número de zeros, que está associado com as ações PID do controlador.

3.2.2 Modelo do Controlador PID

As ações de um controlador PID são representadas em função do tempo como apresentado na equação 2 e sua representação no domínio de Laplace é dada pela equação 2.a e 2.b.

$$C_{Kpid}(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_P T_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$C_{Kpid}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad \text{Eq. (2.a)}$$

$$C_{Kpid}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad \text{Eq. (2.b)}$$

Em que C_{Kpid} representa o modelo do controlador associado à FT apresentada na Eq. 1, K_D representa o ganho derivativo, K_I o ganho integral e K_P o ganho proporcional.

Existem diversas formas de ajuste de ganhos para um controlador PID. Por um lado, a sintonia de controladores PID têm a vantagem da facilidade de cálculo dos parâmetros do controlador (quando comparadas a métodos de projeto de controladores mais analíticos como), por outro lado, o uso da sintonia por tentativa e erro é muito comum e é claro que as muitas regras de ajuste de controladores propostas na literatura impactam na prática industrial. Uma razão é que as regras de sintonia não são muito acessíveis, estando espalhadas por toda a literatura de controle. Além disso, a notação utilizada não é unificada (Vilanova, Visioli, 2012). A edição do livro *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules* (O'Dwyer, 2009) compilou um total de 1.731 métodos de sintonia, 60% delas foram especificadas para um modelo de processo autoajustável (estável), 30% foram especificadas para um modelo de processo não-autoajustável e os 10% restantes foram regras de ajuste não específicas de modelos. E mesmo após a publicação da terceira edição, regras de sintonia continuam a propostas com o objetivo de alcançar boa performance com simplicidade. Os parâmetros dos controladores PID são ajustados para se adequar às necessidades de sintonia em uma combinação de proporcionalidade associada à ação proporcional, avanço associado à ação derivativa e atraso associado à ação integral do sinal de erro.

3.3 Métodos de Sintonia de Controladores PID

A sintonia de ganhos de controladores com parcelas proporcionais, integrativas e derivativas tem sido amplamente utilizada ao longo dos anos. Mais da metade dos

controladores industriais em uso atualmente emprega esquemas de controle PID ou PID modificado. Como a maioria dos controladores PID passa por um ajuste em campo, diferentes tipos de regras de sintonia vêm sendo propostas na literatura para auxiliar ajustes finos no controlador em campo. Além disso, métodos de sintonia automática vêm sendo desenvolvidos e alguns controladores PID têm a capacidade de fazer sintonia automática on-line (Ogata, 2010).

A sintonia de ganhos de controladores com ações PID tem tido relevante aplicações em processos industriais ao longo dos anos devido sua boa aplicabilidade, (Vilanova, Visioli, 2012). Estruturas PID modificadas, como o controle I-PD e o controle PID com vários graus de liberdade, atualmente estão em uso na indústria e sua aplicabilidade e proporciona um vasto alcance devido ao seu manuseio popularizado. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis. Na área dos sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos de controle PID e os controles PID modificados provaram sua utilidade, conferindo um controle satisfatório, embora em muitas situações eles possam não proporcionar um controle ótimo (Ogata, 2010).

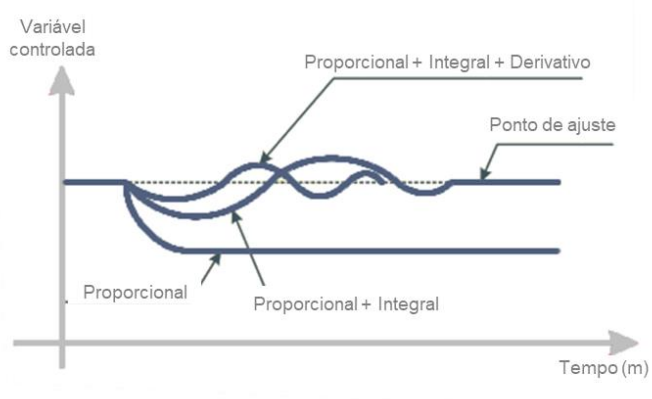
Diversos métodos aplicados para a sintonia de controladores PID foram propostos nos últimos 70 anos, como por exemplo o método da curva de reação, em que Ziegler Nichols avalia a resposta de controle um sistema em relação ao tempo, quando este é excitado por uma entrada do tipo degrau unitário em um processo qualquer em malha aberta (Ziegler, 1942). O segundo método proposto por Ziegler Nichols, conhecido como Método da Oscilação ou Método da Sensibilidade, se baseia na observação de que muitos sistemas podem ser levados à instabilidade através do aumento do ganho proporcional em malha de realimentação com controlador proporcional, o que coloca o sistema em uma que coloca o sistema em oscilação harmônica (Ziegler, 1943).

Praticamente todos os novos controladores PID anunciados em 1995 já tinham alguma capacidade de ajuste automático. O ajuste e a adaptação poderiam ser feitos de várias maneiras diferentes. O controlador simples tornou-se, de fato, um banco de testes para muitas novas ideias de controle (Åström, K.J., Hägglund, 1995).

Diante deste fato, diversos métodos de sintonia de ganhos de controladores foram inseridos no contexto de controle de processos, no entanto não tiveram tanta repercussão quanto os métodos de Ziegler Nichols. Como exemplo, tem-se o método

de Cohen-Coon (Cohen, 1953), o Modelo de Controle Interno (*Internal Model Control – IMC*) (Chien, 1990), o Erro Absoluto Ótimo Integral para mudança de *setpoint* (IAE-*setpoint*) e para resposta a perturbações de carga (IAE-*load*) (Shinskey, 1979), (Kaya, 1988). De forma similar, tem-se o Método do Erro Absoluto Ótimo ponderado no tempo integral para mudança de *setpoint* (ITAE-*setpoint*) e para resposta de perturbação de carga (ITAE-*load*), fórmula de ganho e margem de fase (Ho et al., 1995), dentre outros citados em (Ho, 1996). Este trabalho realiza a comparação direta entre o primeiro método de sintonia proposto por Ziegler Nichols, com o método proposto em (Moura, 2019).

Figura 12 Comparação das ações P, I, D e PID



Fonte: Adaptado de Bayer, 2011.

Tabela 2 Comparação das ações Proporcionais, Integral e derivativa

Controle	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de estabilização	Erro em regime estacionário
P	Diminui	Aumenta	Não altera	Diminui, mas não elimina
I	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina

D	Altera	Diminui	Diminui	Altera
---	--------	---------	---------	--------

Fonte: Adaptado de Ogata, 2010.

A figura 12 demonstra a comparação entre as ações de controladores P, PI e PID. A tabela 2 resume as ações das parcelas de um controlador PID.

3.3.1 Método do ganho crítico de Ziegler Nichols

O método de sintonia por ganho crítico foi proposto por Ziegler-Nichols em 1942, com a proposta de regras para se determinar os valores dos parâmetros proporcional, integrativo e derivativo de um PID a partir das características da resposta temporal de uma determinada função de transferência. O trabalho inicial desenvolvido por Ziegler e Nichols (1942) constitui a primeira tentativa de projeto sistemático de um controlador PID com base em informações mínimas de processo (Visioli, 2012).

Este método de sintonia começa zerando os ganhos integral e diferencial e então aumentando o ganho proporcional até que o sistema fique instável. O valor de K_p no ponto de instabilidade é denominado K_{MAX} ou K_{cr} ; a frequência de oscilação é f_0 e o período crítico P_{cr} . O método então diminui o ganho proporcional em um valor predeterminado e define os ganhos integral e diferencial como uma função de P_{cr} . (Ellis, 2012). Os ganhos P, I e D são definidos de acordo com a Tabela 3

Tabela 3 Sintonia de ganhos PID pelo método do ganho crítico de Ziegler-Nichols

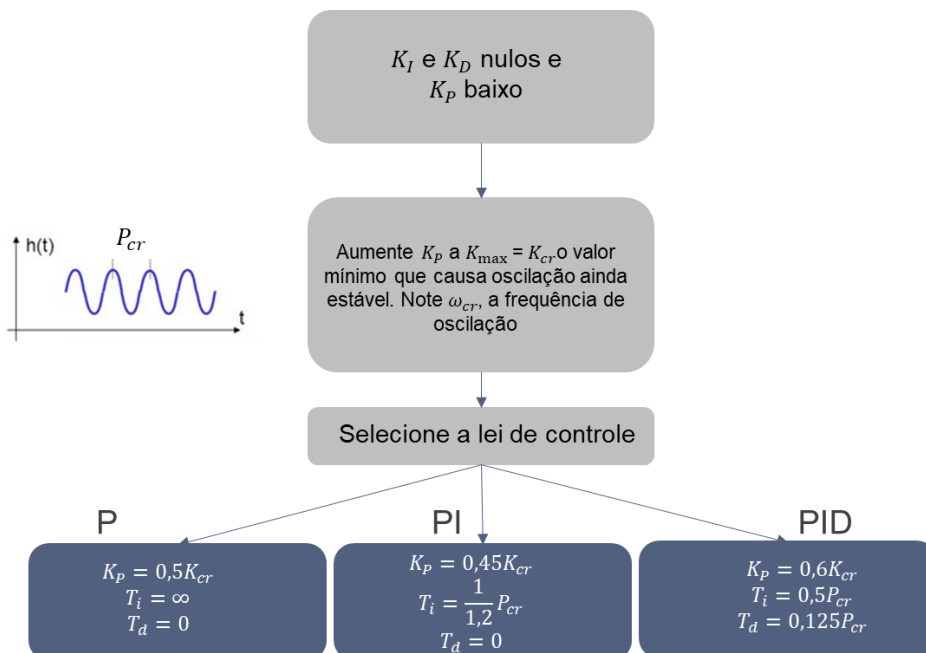
	K_p	T_i	T_d
Controlador P	$0,50K_{cr}$	∞	0
Controlador PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
Controlador PID	$0,60K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Adaptado de Ogata, 2010.

A figura 13 mostra um fluxograma das etapas de sintonia dos ganhos de um controlador PID pelo método de sintonia por ganho crítico de Ziegler-Nichols. No método do ganho crítico, também conhecido como segundo método de Ziegler-

Nichols, define-se o $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Usando somente a ação de controle proporcional, o valor de K_p deve ser elevado de 0 ao valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez. Se a saída não exibe uma oscilação sustentada para qualquer valor que K_p possa assumir, então esse método não se aplica. Portanto, o ganho crítico K_{cr} e o período P_{cr} correspondente são determinados experimentalmente. Por fim, a escolha dos valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d pode ser feita de acordo com a fórmula mostrada na figura 13.

Figura 13 Método de sintonia por Ziegler-Nichols para controlador P, PI e PID



Fonte: Adaptado de Elis, 2012.

Ao considerar que a instabilidade ocorre quando o ganho de malha for 0 dB a $\angle -180^\circ$, a margem de estabilidade pode então ser quantificada quando a frequência for a frequência de cruzamento no ganho em 0 dB . Especificamente, a margem de fase é a diferença entre a atual fase e -180° . A margem de ganho é a diferença entre o ganho atual e 0 dB . De posse dessas informações, entende-se que havendo a possibilidade de mensurar a margem de ganho e a frequência de cruzamento de fase por meio de um analisador de sinal dinâmico, não há necessidade de aumentar o

ganho até a instabilidade, visto que é possível aumentar o ganho até que o sistema esteja próximo à instabilidade, medir a margem de ganho e adicioná-la ao ganho.

3.3.2 Método de Sintonia PID - Produto Interno

A sintonia de ganhos de controladores com ações proporcionais, integrativas e derivativas prevalece no setor industrial quanto às técnicas de controle disponíveis para os processos. Em boa parte dos casos práticos, a adequação dos ganhos é dada por métodos clássicos como o de Ziegler Nichols ou tentativa e erro. O problema desses métodos é a pouca confiabilidade no que tange à performance satisfatória, principalmente quando os pré-requisitos dos projetos são mais exigentes ou quando possuem expressiva complexidade em sua construção, além de ser conhecida a necessidade da expertise de um técnico ou engenheiro para o alcance de performance por tentativa e erro.

Diversos métodos para ajuste de ganhos de controladores, visando a uma melhor performance do sistema de controle, foram propostos ao longo dos anos (Ogata, 2010) e, para resolver o problema de sintonia em processos industriais de alta complexidade, (Moura e Fonseca, 2019) propuseram um método para ajuste dos ganhos de controladores PID baseado em um produto interno de seus termos, em que uma matriz de propagação é gerada pelos coeficientes dos numeradores da função de transferência da planta.

Durante o amadurecimento das técnicas de controle, percebe-se que a sintonia de controladores PID requeria conhecimento específico da planta, modelo ou processo para que a sintonia por tentativa e erro fosse mais assertiva. A técnica de sintonia via produto interno, intenciona simplificar o processo de ajuste dos ganhos, mas garantindo uma performance mais adequada, de acordo com os pré-requisitos de controle (Chen, Chi-Tsong, 1998).

Nesse contexto, o ajuste de ganhos de controladores PID por meio de um produto interno foi apresentado visando a uma aprimoração do processo e desempenho de sintonia desses controladores aplicados em plantas de alta complexidade do controle e a vantagem da metodologia de sintonia do controlador PID baseada no produto interno dos termos PID que gera a matriz de propagação (PM) é que um vetor dos parâmetros especificados de um polinômio característico

pode ser projetado e um vetor de erro é obtido na comparação com os parâmetros do polinômio característico da planta, permitindo assim a correção e diminuição entre os parâmetros operacionais desejados.

O método de sintonia via produto interno proposto por Moura e Fonseca minimiza o erro dos parâmetros especificados, facilitando assim o projeto de um controlador PID de alto desempenho. O método também possibilita a alocação dos polos por substituição direta por meio de parâmetros especificados, garantindo assim o ponto de operação desejado do sistema de controle e é baseado no produto escalar dos termos do PID, já que a matriz de propagação do próprio erro é gerada pelos coeficientes do numerador da FT da planta em questão.

O problema a solucionar por meio do método proposto é o controle de sistemas complexos que sofre variações paramétricas e necessita de performance satisfatória. O método para ajuste dos ganhos de controladores PID baseado em um produto interno dos termos PID baseia-se em um produto interno dos termos PID e na criação de uma matriz de propagação gerada pelos coeficientes do numerador da função de transferência da planta (Moura e Fonseca, 2019). O produto interno é feito com os parâmetros do vetor de ganhos PID do controlador e das linhas da matriz de propagação e passa a representar as mudanças no comportamento da planta que são determinadas pelas variações paramétricas nos coeficientes do polinômio característico da função de transferência.

Como **vantagens** para o método tem-se:

- Alocação de polos utilizando parâmetros especificados para assim alcançar o ponto de operação desejado pelo sistema;
- Ganhos para um controlador com performance assertiva;
- O método quando aplicado com técnicas de inteligência computacional contribui com o avanço da indústria 4.0.

Como **desvantagens** para o método tem-se:

- Difícil implementação para plantas de ordem superior à quarta ordem;
- Solução mais demorada para plantas de ordem superior ou com mais de 3 zeros;
- Dificuldade em implementação de espaço de estados no CLP.

O produto interno é apropriado para análises, permitindo ao projetista observar o impacto dos parâmetros do vetor de ganho K^{pid} na saída do sistema dinâmico associados aos coeficientes polinomiais do denominador da FT.

Durante a verificação do método de sintonia, os autores da técnica utilizaram plantas do setor da mineração, especificamente plantas de recuperadoras de granéis sólidos e viradores de vagões (Moura, 2019a). A aplicação deste método tem como característica a influência tanto dos coeficientes do numerador como do denominador da FT do controlador. A técnica de sintonia via produtos internos busca melhores performances para os controladores PID por meio do ajuste adequado aos polos e zeros da sua função de transferência.

Para este método a FT é especificada na forma fatorada, isto é, pelas raízes dos polinômios do numerador e do denominador associados à Eq. 1. A FT na forma fatorada é representada em termos de produto, onde o projetista insere o valor especificado ou desejado parâmetros. FT na forma de um produto é dada pela Eq. 3

$$G_g(s) = K \frac{\prod_{k=1}^m (s - s_{zk})}{\prod_{i=1}^n (s - s_{pi})} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde $s_{pi} = \omega_{di}$ são os pólos e $s_{zk} = \sigma_k \omega_{dk}$ são os zeros do sistema dinâmico. Os pólos e zeros do sistema são representados pelo par (ζ, ω_n) , o primeiro componente é o fator de amortecimento e o segundo é a frequência natural não amortecida, $\sigma_i = \zeta_i \omega_{ni}$ e $\omega_{di} = \omega_{ni} \sqrt{1 - \zeta_i^2}$.

Sendo formulado com base na diferença paramétrica entre os coeficientes especificados e os coeficientes originais do polinômio do denominador da FT, o método do produto interno conta com a imposição dos valores dos ganhos do controlador, onde os autores apresentam o desenvolvimento de modelos de otimização *online* otimizados baseados em abordagens de inteligência computacional (Moura et al. 2019) (Moura et al. 2020).

Como esta imposição dos valores dos ganhos do controlador, os coeficientes a_i e b_k tornam-se parâmetros ajustáveis com o objetivo de compensar as variações paramétricas da planta. Na formulação da técnica em questão, os coeficientes b_k são mantidos constantes e ajustes são feitos apenas no parâmetro a_i

Para a formulação do problema de sintonia do controlador PID via produto interno, tem-se como modelo a FT da figura 11. Os modelos são representados na forma de produto interno \langle, \rangle , conforme a Eq. 4 do controlador e a Eq.7 da planta. O objetivo ao usar a notação em produto interno é possibilitar ao projetista a observação do impacto dos parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} (K_D, K_P e K_I) na saída do sistema dinâmico associado aos coeficientes polinomiais do denominador da FT da planta.

$$C_{K^{pid}}(s) = \frac{\langle K^{pid}, s^{pid} \rangle}{s} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$K^{pid} = [K_D \ K_P \ K_I]^T \quad \text{Eq. (5)}$$

Na Eq. 4, o vetor s^{pid} é composto pelas potências em s dos ganhos PID associados ao numerador da função de transferência, sendo dado por

$$s^{pid} = [s^2 \ s^1 \ s^0] \quad \text{Eq. (6)}$$

Então, para expressar as características da planta através dos valores dos coeficientes dos polinômios do numerador e do denominador (polos e zeros), os quais estão associados aos modelos matemáticos em termos de FT dados na Eq. 1, usa-se a forma de produto interno na Eq. (3), a qual genericamente é apresentada pela Eq. 7

$$G_p(s) = K \frac{\langle b_k, s^m \rangle}{s^n + \langle a_i, s^{n-1} \rangle} \quad \text{Eq. (7)}$$

A Eq.7 representa o modelo apresentado na Eq.1, mas agora sendo apresentada em termos de produto interno. O numerador da Eq.7 conta com a combinação dos coeficientes b_k com k variando de 0 a m , onde m é a ordem dos zeros da planta. De igual forma, tem-se em seu denominador a combinação dos coeficientes a_i com i variando de 1 a n , onde n é a ordem do polinômio característico da planta. Portanto, sendo uma combinação dos polos s_{pi} e zeros s_{zk} da planta expressa em termo de produto interno.

3.3.2.1 A FT em malha aberta em Produto Interno

A planta em malha aberta junto ao controlador pode ser representada a partir da multiplicação dos dois produtos vetoriais apresentados pelas E.4 e Eq.7, sendo então representada pela Eq.8

$$G_p^{MF}(s) = K \frac{\langle K^{pid}, s^{pid} \rangle \langle b_k, s^m \rangle}{s^{n+1} + s \langle a_i, s^{n-1} \rangle} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde $G_p^{MF}(s)$ é a FT da planta em malha aberta e K o ganho da planta e $n > m$.

A estrutura de FT é determinada pela relação $n + 1 \geq 2 + m$. Para $n + 1 = 2 + m$, o sistema é próprio, para $n + 1 > 2 + m$ o sistema é estritamente próprio, sendo o grau do polinômio denominador maior que o grau do polinômio numerador.

Dessa forma, é estabelecida uma relação geral entre a ordem do controlador PID e a ordem da dinâmica da planta (Chen, Chi-Tsong, 1998).

Essa relação garante que a estrutura do sistema seja adequada. A relação do sistema em malha fechada é dada por

$$n_{MF} = m^{PID} + n \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde m^{PID} assume apenas valores de 0 ou 1. Se o sistema em malha fechada for de ordem $n + 1$ e o numerador for de ordem $m^{PID} + m$, o PID imporá, desta forma uma FT própria ao sistema (Moura, 2021a).

De acordo com o diagrama de blocos da Figura 11 e considerando nulos os efeitos de perturbação e ruídos do sensor, tem-se:

$$G_p^{MF}(s) = \frac{C_{K^{pid}}(s)G(s)}{1 + C_{K^{pid}}(s)G(s)H(s)} \quad \text{Eq. (10)}$$

3.3.2.2 A Matriz de propagação dos termos PID e coeficientes da FT

O desenvolvimento dos polinômios do numerador (zeros) e do denominador (polos) em fatores de produtos internos causa a propagação do vetor de ganho K^{pid} do controlador pelos coeficientes do numerador (b_k) associados aos coeficientes do denominador (a_i) FT da planta (Moura, 2021a). Logo, ao substituir as Eq. 1 e 2 na Eq. 10, obtém-se o polinômio numerador do FT em malha fechada, que é dado por

$$N^{MF}(s) = C_{K^{pid}}(s)G(s) \quad \text{Eq. (11)}$$

Expandindo e ordenando esse numerador, tem-se

$$\begin{aligned} N^{MF}(s) = & (b_0K_D + b_{-1}K_P + b_{-2}K_I)s^{m+m^{pid}} \\ & + (b_1K_D + b_0K_P + b_{-1}K_I)s^{m+m^{pid}-1} \\ & + (b_2K_D + b_1K_P + b_0K_I)s^m \\ & + (b_3K_D + b_2K_P + b_1K_I)s^{m-1} + \dots \\ & + (b_mK_D + b_{m-1}K_P + b_{m-2}K_I)s^2 \\ & + (b_{m+1}K_D + b_mK_P + b_{m-1}K_I)s^1 \\ & + (b_{m+2}K_D + b_{m+1}K_P + b_mK_I)s^0 \end{aligned} \quad \text{Eq. (12)}$$

Simplificando e escrevendo em termos de somatórios, o polinômio da FT em malha fechada escrito em termos de produto interno

O equacionamento do problema é dado na forma de um produto interno que pondera os coeficientes do polinômio de zeros em malha fechada e aditivo à dinâmica da função de transferência em malha fechada é dado por

$$N^{MF} = \sum_{i=0}^{m_{MF}} \langle K^{pid}, \bar{b}_{k-1} \rangle s^{m_{MF}-i} \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde $m_{MF} = m + m^{PID}$ e o vetor \bar{b}_k é dado por

$$\bar{b}_k = [b_k \quad b_{k-1} \quad b_{k-2}] \quad \text{Eq. (14)}$$

De maneira similar à Eq.13, é obtido o polinômio do denominador em malha fechada, sendo dado por

$$D_{MF}(s) = s^{n+n_{D-pid}} + \sum_{i=0}^{n+n_{Dpid}-1} (b_k K_D + b_{k-1} K_P + b_{k-2} K_I + a_{i+1}) s^{n+n_{Dpid}-1} \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde $n_{Dpid} = 0$ ou 1 . Quando $n_{Dpid} = 0$, a estrutura do controlador PID tem os termos derivativo e proporcional. Quando $n_{Dpid} = 1$, a estrutura do controlador PID possui um termo integrador que aumenta a ordem do sistema em 1, começando com os três termos proporcional, derivativo e integrativo (MOURA et al., 2020).

Em Moura et al. (2020), o objetivo quando $n_{D-pid} = 0$ é especificar um coeficiente a_i^s adicional, para garantir que o controlador PID tenha os três termos. Assim, a forma geral do polinômio do denominador em malha fechada é apresentada na Eq.16, onde P^{MF} representa a forma geral da função polinomial da planta em malha fechada com n_{MF} sendo sua respectiva ordem. Da Eq.17, tem-se o polinômio característico da malha fechada. A representação do problema na forma de um produto interno que relaciona os coeficientes do polinômio nulo com os coeficientes da dinâmica da planta fechada é a base para a obtenção do polinômio característico em malha fechada (Moura, 2021a).

$$P^{MF}(s) = s^{n_{MF}} + \sum_{i=1}^{n_{MF}-1} (a_i + \langle K^{pid}, \bar{b}_{k-1} \rangle) s^{n_{MF}-i} \quad \text{Eq. (16)}$$

$$P_p^{MF}(s) = 1 + C_{K^{pid}}(s)G(s) \quad \text{Eq. (17)}$$

Em suma, tem-se a construção de um vetor de parâmetros especificados, espelho de um polinômio característico, e um vetor de erro obtido por meio da comparação entre eles, com o intuito de minimizar o erro entre os parâmetros especificados.

O produto escalar dos parâmetros do vetor de ganho com as linhas das matrizes de propagação representam as mudanças no comportamento da planta, ou seja, representa as variações paramétricas nos coeficientes do polinômio

característico (Moura, 2021a). Com isso, o método possibilita a alocação dos polos por substituição direta, utilizando parâmetros pré-definidos, de forma que seja configurado um novo ponto de operação desejado para o sistema de controle (Moura, 2020), (Moura et al., 2019). O equacionamento do problema é dado na forma de um produto interno que pondera os coeficientes do polinômio de zeros e o adiciona à dinâmica da FT em malha fechada.

A ideia principal proposta por (Moura, 2021a) é a construção da matriz de propagação \bar{B} , a qual permitirá ao projetista a configuração de novos pontos de operação e a partir deste pressuposto as alterações de ordem e de coeficientes no polinômio característicos poderão ser observadas por meio do produto interno entre o vetor de zeros da planta e o vetor de ganhos do controlador PID, ou seja, a matriz \bar{B} é consequência da interação entre os parâmetros do vetor de ganho K_{pid} $K^{pid} = [K_D K_P K_I]^T$ com os coeficientes do numerador FT da planta, esta matriz é representada por (Moura et al., 2019).

A MP, vista na Eq.18, é gerada a partir do produto escalar entre os termos do vetor de rendimentos K^{pid} com os coeficientes do numerador b_k associados aos coeficientes do denominador a_i da FT da planta. O produto da matriz de propagação associado aos coeficientes do numerador FT da planta, dá origem a um novo polinômio característico baseado em novos pontos de operação especificados, que são impostos por novos zeros e novos polos. (Moura, 2021a).

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 \\ b_1 & b_0 & 0 \\ b_2 & b_1 & b_0 \\ b_3 & b_2 & b_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ b_m & b_{m-1} & b_{m-2} \\ 0 & b_m & b_{m-1} \\ 0 & 0 & b_m \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (18)}$$

As diagonais da matriz \bar{B} não se repetem e variam de acordo com a ordem n do polinômio característico do sistema. A propagação dos ganhos é ponderada pelos coeficientes do polinômio numerador.

A lei de formação da matriz de propagação (18) é regida por $m + 2$ linhas e 3 colunas. As linhas representam a ordem do sistema, começando com a propagação na

dinâmica de ordem da planta em malha fechada até a ordem nula. As colunas representam os ganhos do controlador nos polos e zeros da dinâmica da planta.

De posse dos parâmetros desejados para o sistema em forma da especificação do vetor a_i^s com $i = 1, 2, 3, \dots, n + 1$, monta-se um sistema de equação o qual possui como incógnita o vetor desconhecido K^{pid} , desenvolvendo, tem-se:

$$a_i + \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle = a_i^s \Rightarrow \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle = a_i^s - a_i \Rightarrow a_i^e = \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle \quad \text{Eq. (19)}$$

Em que o vetor b_k é montado com as linhas da matriz \bar{B} . O sistema de equações a ser resolvido é dado por

$$a_i^e = \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle \Rightarrow \begin{cases} K_D b_0 + K_P 0 + K_I 0 = a_1^e \\ K_D b_1 + K_P b_0 + K_I 0 = a_2^e \\ K_D b_2 + K_P b_1 + K_I b_0 = a_3^e \\ K_D b_m + K_P b_{m-1} + K_I b_{m-2} = a_4^e \\ K_D b_0 + K_P b_m + K_I b_{m-1} = a_5^e \\ \vdots + \vdots + \vdots = \vdots \\ K_D 0 + K_P 0 + K_I b_0 = a_n^e \end{cases} \quad \text{Eq. (20)}$$

Após a determinação dos novos parâmetros a_i^s do polinômio característico e do produto escalar dos parâmetros do vetor de ganho K^{pid} com as linhas da matriz B, associadas aos parâmetros a_i originais do polinômio característico e aos parâmetros a_i^s especificados, para então obter a correção do erro entre o ponto de operação real e desejado, encontra-se novos ganhos proporcionais, integrais e derivativos para o controlador PID.

3.4 Descrição Operacional da planta

Nesta Seção, apresenta-se a descrição da planta a ser controlada, bem como as características do seu processo operacional. A planta em questão foi obtida por meio de técnicas de identificação de sistemas e com uso de dados de uma planta industrial coletados durante o processo produtivo via PIMS – do inglês *Plant Information Management System* – de uma mineradora situada no estado do Maranhão. O modelo em espaço de estados para a planta em questão foi construído

com dados reais de um VV a partir da utilização do método dos mínimos quadrados e do algoritmo de busca *Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification* (N4SID) (Overschee, P. V., Moor, B. D., 2012) por meio do software *Matlab*® os detalhes da planta foram obtidos em (Moura, 2019).

No setor da mineração, o processo operacional de descarregamento de graneis sólidos é realizado por meio de VVs. O descarregamento do minério é iniciado pelo recebimento dos trens carregados, chamados de composições. Cada composição é composta de 330 vagões, tendo composições de até 660 vagões, e são divididas em três lotes de 110 vagões, os quais são posicionados nos VVs por meios de locomotivas.

Após o posicionamento do lote, a locomotiva é separada dos vagões e inicia-se o passo de entorno do minério nos silos de abastecimentos. Os vagões são conjugados em pares, ou seja, contam com estruturas móveis nas extremidades de cada par de vagões, as quais possibilitam o giro dos pares sem a necessidade de desacoplá-los. Um VV é uma estrutura robusta capaz de prender um par de vagões por vez e girá-los em até 180° em torno de seu próprio eixo, para que o minério seja despejado em silos. Além disso, um VV tem capacidade de movimentação de até 8.000 toneladas de minério por hora (t/h) em cada alimentador (Moura, 2021a). Na Figura 14, mostra-se um virador de vagões. A taxa de fluxo de descarregamento em t/h varia de acordo com as características físico-químicas dos produtos.

Figura 14 Virador de Vagões



Fonte: Moura, 2019.

Uma vez entornado nos silos, o material é transferido para as rotas de correias transportadoras que irão direcioná-lo para os pátios de estocagem. Cada rota é composta por alimentadores de esteiras de aço (AL), correias transportadoras (CT) e empilhadeiras (EP) (Coelho et al., 2019).

Figura 15 Vista superior de um pátio de estocagem

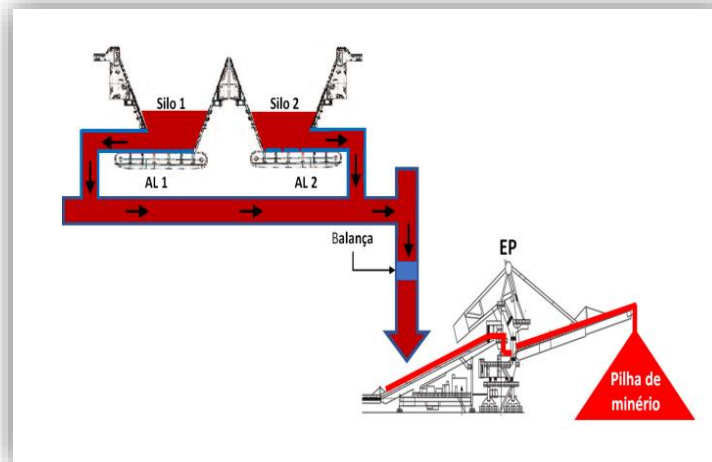


Fonte: Acervo do autor

Os silos apresentam um papel relevante no processo de descarregamento do material, pois as suas dimensões construtivas restringem o recebimento do máximo de carga equivalente a quatro vagões (em torno de 400 toneladas), a fim de manter o nível dentro de uma faixa segura. Na Figura 17, ilustra-se a vista lateral de um silo de abastecimento com um AL na parte inferior do silo e na figura 18 a vista superior de um AL. O nível de material no silo e a vazão do fluxo de saída são variáveis de processo que variam ao longo da operação e requerem monitoramento contínuo do operador, por meio de um sistema de supervisão (Moura, 2016).

O sinal de entrada da planta é a referência de velocidade dos AL e como sinal de saída a vazão da carga medida pela balança (de Moura et al.). O tempo de transferência da carga dos AL até a balança é cerca de 40 segundos. A figura 16 ilustra o fluxo da carga destacado em vermelho e a balança destacada em azul. O nível de material no silo e a vazão do fluxo de saída são variáveis de processo que variam ao longo da operação.

Figura 16 Fluxo de carga dos AL até a pilha no pátio de estocagem.



Fonte: Moura, 2016.

Figura 17 Vista lateral de um silo de abastecimento com um AL



Fonte: Acervo do autor

Figura 18 Vista superior de um silo de abastecimento com um AL



Fonte: Acervo do autor

O sinal de entrada da planta é a referência de velocidade dos AL e como sinal de saída a vazão da carga medida pela balança (Moura, 2019). O tempo de transferência da carga dos AL até a balança é cerca de 40 segundos.

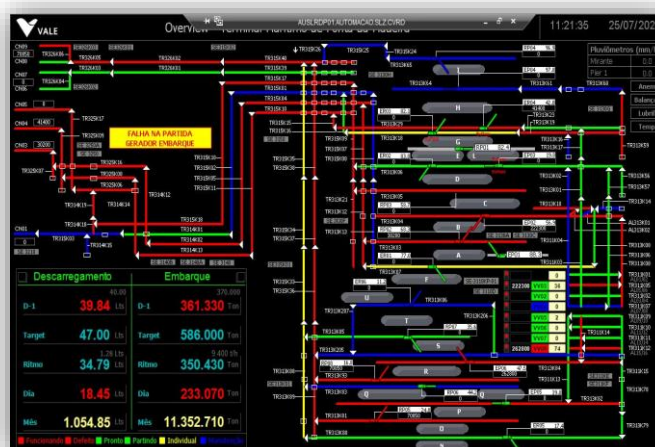
Figura 19 IHM para Operação de Virador de Vagões



Fonte: Acervo do autor

A figura 19 representa a IHM (Interface Homem Máquina) utilizada na operação dos viradores de vagões pelos operadores para controle de fluxo automático, semiautomático ou manual. A IHM, além de possibilitar o controle de vazão de sólidos, permite a configuração dos modos de operação, tipo de vagões de acordo com suas características físicas já pré-definidas. Durante as operações, todo o processo é monitorado por telas em centro de controles, como a apresentada na figura 20, as quais fornecem uma visão ampla de toda planta, desde o descarregamento, estocagem e embarque do minério.

Figura 20 Overview geral de uma planta do setor de mineração



Fonte: Acervo do autor

Capítulo 4

EXPERIMENTOS E CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta os experimentos realizados e principais resultados obtidos, bem como limitações encontradas e conclusões.

4.1 Experimentos

Os experimentos são simulados com dados reais de uma planta de segunda ordem, para atuar no controle da velocidade de um AL de um VV. A simulação é feita com algoritmos desenvolvidos e validados no software MATLAB/SIMULINK e embarcados em um CLP, por meio do software de simulação CodeSys com linguagens de texto estruturado e bloco de funções.

O modelo da planta de um VV é estimado por meio de dados de intensidade da corrente elétrica dos motores de acionamentos dos ALs, a qual é relacionada com a vazão do fluxo medida por balanças dinâmicas. Os dados para estimação do modelo foram extraídos do sistema gerencial de informação *Plant Information Management System* (PIMS) (Moura, 2019a), um software adaptado para armazenar em tempo real os dados de eventos dos sensores cadastrados em sua base (Moura, 2016). Usando o *Tolbox System Identification* do Matlab como ferramenta de apoio, encontrou-se um modelo genérico de FT a qual é descrita em detalhes em (Moura,2021a) onde foi obtida para um VV com um AL, sendo dada por

$$FT_{VV}^g(s) = \frac{b_0}{a_0s^2 + a_1s + a_2} \quad \text{Eq. (21)}$$

A FT_{VV}^G trata-se de um FT genérica obtida com dados reais da planta de um VV com um AL coletado pelo PIMS.

O modelo matemático da planta em termos de FT em malha aberta, conforme Eq. 21 foi obtido pelo *Matlab-toolbox: system identification* (Moura, 2019a), (Moura, 2021a).

$$FT_{VV}^g(s) = \frac{0,438}{s^2 + 0,0861s + 0,0421} \quad \text{Eq. (22)}$$

A FT da planta em malha fechada com o controlador PID é dada por

$$G_{VV}^{MF}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \left(\frac{b_0}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \right) \quad \text{Eq. (23)}$$

Sendo reorganizada, tem-se

$$G_{VV}^{MF}(s) = \frac{K_p b_0 + K_i b_0 + K_d b_0 s}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s} \quad \text{Eq. (24)}$$

O controle do fluxo da carga de minério descarregado é realizado por meio do acionamento do AL. O fluxo desejado é configurado pelo operador de VV via IHM e então, em campo, é alterada a frequência dos inversores que controlam a velocidade do motor do AL. Em outras palavras, a velocidade do AL controla a quantidade de fluxo que seguirá para uma CT e sua respectiva rota. O *setpoint* é o valor desejado, enquanto que sua diferença em relação ao valor medido compõe o sinal de erro, que será tratado com o controlador PID. A variável de processo é a velocidade do AL que sofrerá a ação de controle por meio da frequência de trabalho do inversor que controla o acionamento do AL.

4.2 Projeto do Controlador PID-Produto-Interno

Sabendo que o vetor K^{pid} é construído pelos ganhos do PID, enquanto o vetor s^{pid} corresponde a um vetor no domínio da frequência em s dos ganhos associados ao numerador da FT. A FT da planta em questão escrita na forma de produto interno é dada por

$$G_P(s) = \frac{\langle b_k, s^m \rangle}{s^n + \langle a_i, s^{n-1} \rangle} \quad \text{Eq. (25)}$$

O projeto do controlador PID para aplicação no sistema de controle de um VV é iniciado pelo produto do numerador da FT da planta associada à Eq. 21, que é dado por

$$[C(s)GP(s)]_N = (K_d s^2 + K_p s + K_i) b_k \quad \text{Eq. (26)}$$

Substituindo na Eq. 26 os valores numéricos dados pela Eq. 22, tem-se

$$[C(s)GP(s)]_N = K_d 0,438 s^2 + K_p 0,438 s + K_i 0,438 \quad \text{Eq. (27)}$$

Para o denominador, tem-se

$$[C(s)GP(s)]_D = s(a_0 s^2 + a_1 s + a_2) = s^3 + 0,0861 s^2 + 0,0421 s \quad \text{Eq. (28)}$$

O polinômio característico da planta em malha fechada associado a Eq.21, é dado por

$$P_p^{MF} = s^3 + (a_1 + K_d b_k) s^2 + (a_2 + K_p b_k) s + K_i b_k \quad \text{Eq. (29)}$$

Da Eq.29 é construído um sistema de equações na forma $AX = B$, que é dado por

$$a_i^e = \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle \Rightarrow \begin{cases} a_1 + K_d b_0 = a_1^s \\ a_2 + K_p b_0 = a_2^s \\ a_3 + K_i b_0 = a_3^s \end{cases} \quad \text{Eq. (30)}$$

$$\text{Sendo } a_i = \begin{cases} a_1 = 0,0861 \\ a_2 = 0,0421 \\ a_3 = 0 \end{cases} \text{ e } a_i^s = \begin{cases} a_1^s = 861 \\ a_2^s = 421 \\ a_3^s = 0,01 \end{cases}$$

Sendo a_i os parâmetros do denominador da Eq.21 e a_i^s os parâmetros especificados 2 . Os valores a_1^s e a_2^s são multiplicados por 10^2 , como neste caso, a^3 é zero, o valor especificado de a_3^s é a soma de $a_3 + 0,01$. Substituindo os valores numéricos de a_i e a_i^s no sistema de Eq.30, encontram-se os valores numéricos do vetor de ganhos K^{pid} . Com $[K_d, K_p, K_i] = [19,4610 \quad 9,5158 \quad 0,0228]$. É importante ressaltar que os valores de a_i^s devem ser diferentes dos valores de a_i , de forma que o a_i^e seja diferente de zero e positivo.

4.3 Projeto do Controlador por Ziegler- Nichols

Para efeitos de comparação do PID-Produto-Interno com o PID-ZN, primeiro obteve-se o lugar das raízes no Matlab e na sequência, plotou-se o gráfico do lugar das raízes, conforme Figura 21.

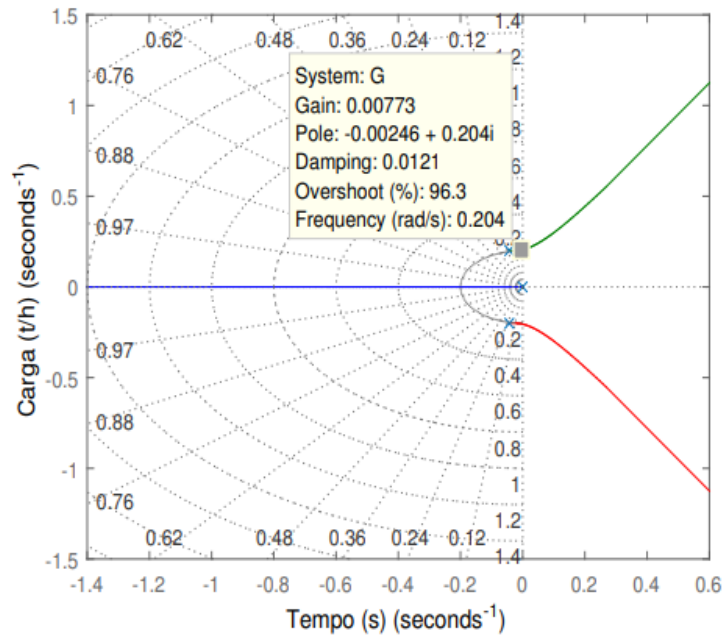
Sendo o ganho crítico $K_{cr} = 0,00773$ e a frequency ω_{cr} de oscilações críticas $\omega_{cr} = 0,204$. De acordo com o K_{cr} e ω_{cr} associados a Figura 21, determina-se primeiro P_{cr} que é dado por

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_{cr}} \quad \text{Eq. (31)}$$

Substituindo por valores numéricos, tem-se:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{0,204} = 307999 \quad \text{Eq. (32)}$$

Figura 21 Lugar das raízes



Fonte: Acervo do Autor

Na Tabela 3, apresentam-se as regras para os cálculos dos parâmetros de sintonia do segundo método de Ziegler-Nichols baseadas no ganho crítico e no período crítico.

Substituindo o ganho crítico e o período crítico na terceira linha da Tabela 3, encontra-se K_p , T_i e T_d . Em que

$$K_p = 0,60 \times 30,7999 = 18,4799 \quad \text{Eq. (33)}$$

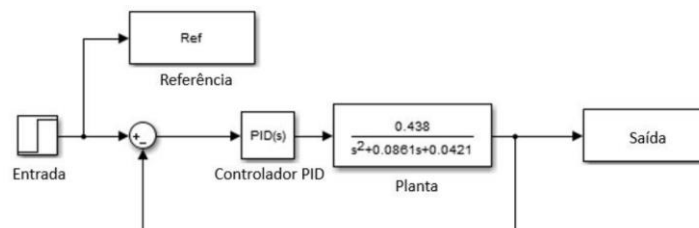
$$T_i = 0,5 \times 30,7999 = 15,4 \Rightarrow Ki = \frac{Kp}{Ti} = \frac{18,4799}{15,4} = 1,2 \quad \text{Eq. (34)}$$

$$T_d = 0,125 \times 30,7999 = 3,8500 \Rightarrow$$

$$K_d = K_p \times T_d = 0,125 \times 30,7999 = 3,85 \quad \text{Eq. (35)}$$

No *Simulink* é possível criar simuladores para o comportamento de uma planta por meio de testes do sistema em condições que, de alguma forma, são muito arriscadas ou demoradas para serem testadas em sistemas físicos reais. O desenvolvimento pode ser testado, validado com testes de hardware-em-loop e prototipagem rápida, mantendo a rastreabilidade de requisitos do código do desenvolvido. Na Figura 22, mostra-se o simulador desenvolvido no *Simulink*, usado nos testes e validação da proposta apresentada neste artigo. Sendo *Ref* a referência igual a entrada que é o valor do *setpoint* e o erro é igual a saída menos a entrada.

Figura 22 Simulador da planta em forma de diagrama de blocos



Fonte: Acervo do Autor

4.4 Implementação do código no Simulador Codesys

O software de simulação *CodeSys* é um simulador/emulador de código aberto para CLP. O primeiro passo para a elaboração dos experimentos é a criação de um novo projeto no *CodeSys*. Neste caso, criou-se um programa em diagrama de blocos, com programação em texto estruturado, chamado de PLC_PRG. Nesta rotina serão conectados, em forma de blocos de função, todos os componentes do sistema de controle em questão. Na prática, sistemas de controle digital por vezes possuem diferentes períodos de amostragem e/ou diferentes períodos em diferentes caminhos

de realimentação, mas nesta implementação, assume-se um tempo de amostragem T fixo em $100ms$.

Para a simulação do controlador, fez-se a discretização da FT do controlador PID, encontrando a equação a diferença, Eq.36, para o controlador digital por meio da técnica de equivalente discreto usando o Método de *Tustin* (Franklin et al., 2013). A equação a diferença do controlador PID embarcado no algoritmo de controle é dada por

$$u[k] = u[k - 1] + q_0 e[k] + q_1 e[k - 1] + q_2 e[k - 2] \quad \text{Eq. (36)}$$

Em que

$$q_0 = K_p \left[1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right] \quad \text{Eq. (37)}$$

$$q_1 = -K_p \left[1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T_s} \right]. \quad \text{Eq.(38)}$$

$$q_2 = \frac{K_p T_s}{T_s}. \quad \text{Eq.(39)}$$

Na Figura 23, apresenta-se a declaração de variáveis do controlador PID para implementação no CodeSys.

Na Figura 24, apresenta-se o algoritmo do controlador PID de um virador de vagões, desenvolvido na linguagem de programação texto estruturado.

Figura 25, apresenta-se o diagrama de blocos do projeto de controle embarcado no CLP, configurado para o controlador PID-ZN e o controlador PID-Produto-Interno, respectivamente.

Figura 23 Declaração das variáveis do algoritmo de controle

```

1 FUNCTION_BLOCK Controlador_PID
2
3 VAR_INPUT
4   Svv:REAL;           // Saída - Fluxo do W
5   Ref:REAL;          // Referência de fluxo
6   Kp:REAL;           // Ganho proporcional
7   Ti:REAL;           // Tempo integral
8   Td:REAL;           // Tempo derivativo
9   MAN_ON:BOOL;       // Modo Manual
10  MAN:REAL;          // Auxiliar
11  UMAX:REAL;         // Ação Máxima
12  UMIN:REAL;         // Ação Mínima
13  Ta:REAL;           // Tempo de amostragem - sample time
14
15 END_VAR
16 VAR_OUTPUT
17   uk:REAL;           // Ação de controle PID
18
19 END_VAR
20
21 VAR
22   uk_1:REAL;         // Ação de controle PID na amostragem k-1
23   Erro:REAL;         // Erro atual na amostragem k
24   Erro_1:REAL;       // Erro na amostragem k-1
25   Erro_2:REAL;       // Erro na amostragem k-2
26   q0:REAL;          // Auxiliar da parcela Proporcional
27   q1:REAL;          // Auxiliar da parcela Integrativa
28   q2:REAL;          // Auxiliar da parcela Derivativa
29   up:REAL;          // Ação de controle Proporcional
30   ui:REAL;          // Ação de controle Integrativa
31   ud:REAL;          // Ação de controle Derivativa
32
33 END_VAR
    
```

Fonte: Acervo do Autor

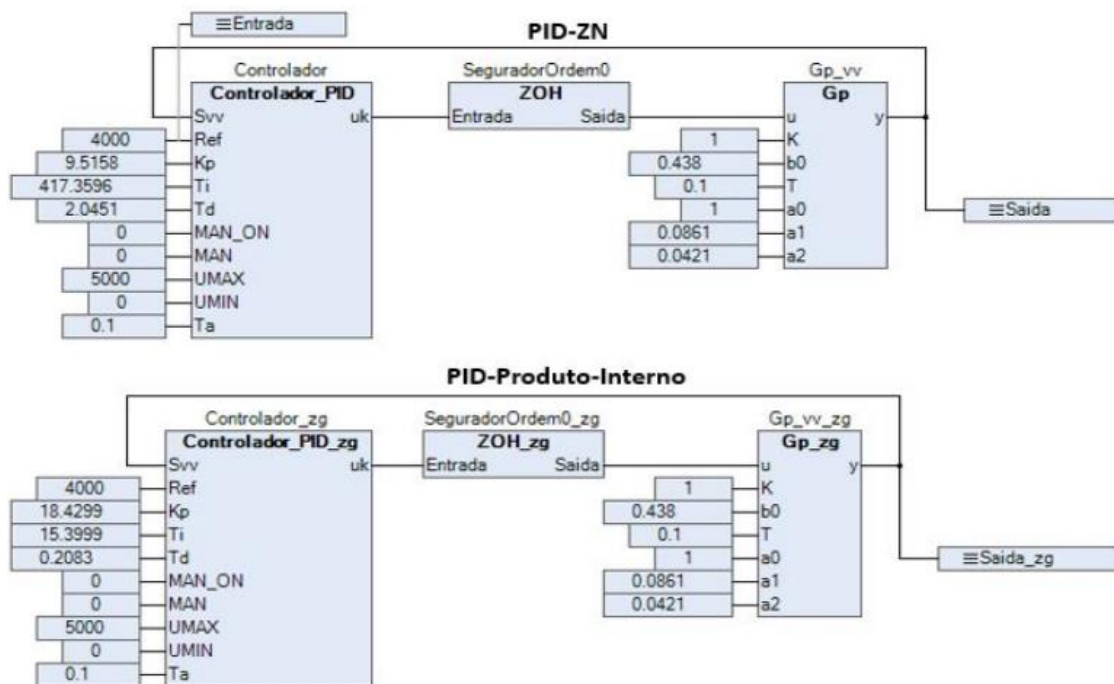
Figura 24 Algoritmo de controle PID

```

1 Erro := Ref-Svv;
2 // Controle em Modo Manual
3 IF MAN_ON = TRUE THEN
4   uk:=MAN;
5   ui:=0;
6   ud:=0;
7 ELSE
8   q0 := Kp*(1+(Ta/(2.0*Ti)))+(Td/Ta);
9   q1 := -Kp*(1-(Ta/(2.0*Ti)))+(2.0*Td/Ta);
10  q2 := (Kp*Td)/Ta;
11  up := q0*Erro; //Ação Proporcional
12  ui := q1*Erro_1; //Ação Integrativa
13  ud := q2*Erro_2; //Ação derivativa
14  uk := uk_1+up+ui+ud; //Ação PID Discretizada
15  uk_1 := uk;
16  Erro_1 := Erro;
17  Erro_2 := Erro_1;
18
19 END_IF
20 // Limitação para o sinal de saída do controlador
21 IF uk > UMAX THEN
22   uk := UMAX;
23 ELSIF uk < UMIN THEN
24   uk := 0;
25 END_IF
26
    
```

Fonte: Acervo do Autor

Figura 25 Sistema de controle PID embarcado no CLP

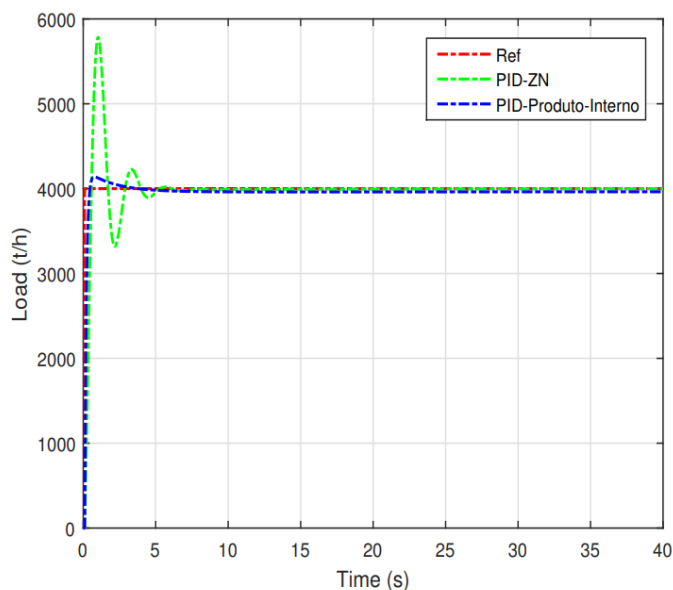


Fonte: Acervo do Autor

4.5 Resultados

Os resultados são apresentados em termos de controle, com o objetivo de seguir o valor de referência. Na Figura 26, apresenta-se o resultado simulado no Matlab/Simulink, sendo o valor de referência 4.000 t/h. De acordo com os resultados simulados no Matlab/Simulink, mostrados na Figura 26, observa-se que o controlador *PID-Produto-Interno* com os parâmetros especificados a_i^s obteve melhor desempenho, alcançando o valor de referência em torno de 5s e permaneceu sem perda de sua trajetória. Enquanto o *PID-ZN* com os parâmetros de ganhos determinados pelo segundo método de Ziegler-Nichols, alcançou o objetivo de controle, porém, oscilou consideravelmente no início, atingindo *overshoot* superior a 20% do valor de referência, demorando mais tempo para entrar em regime de erro permanente.

Figura 26 Resultados simulados no MATLAB/SIMULINK

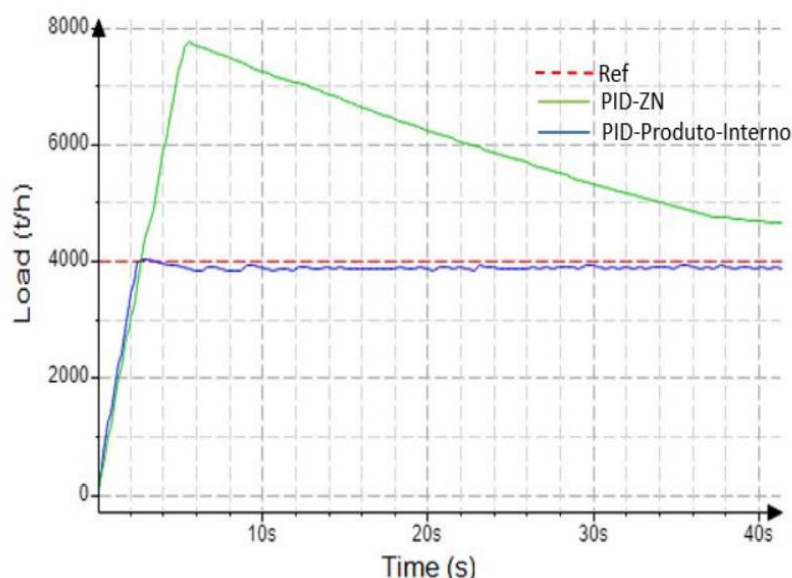


Fonte: Acervo do autor

A partir da figura 27, observa-se que o PID-Produto-Interno obteve melhor desempenho, com menor tempo de subida, menor *overshoot* e alcançou o objetivo de controle em menor tempo e permaneceu sem perda na trajetória em comparação com o PID-ZN. Observa-se que o controlador *PID-Produto-Interno* alcançou o objetivo de controle e permaneceu sem perda da trajetória alcançada. Identificou-se um tempo de subida de $t_r = 2s$ (do inglês como *rise time*), que representa o tempo em que o sistema leva até atingir as proximidades de sua referência.

Considerando o alcance de 90% do valor de referência, o fluxo de 3600 ton/h foi alcançado em menos de 2s, indicando um tempo de subida satisfatório, tendo em vista o grande porte do equipamento a ser controlado. Neste sistema, o controlador *PID-Produto Interno* apresentou um tempo de acomodação $t_s = 2s$ (do inglês *settling time*). O t_s indica o tempo necessário para que as oscilações transitórias permaneçam dentro de uma faixa de 2% em torno do valor final do regime permanente, o que no estudo de caso apresentado exibe um fluxo de 3920 ton. Já o controlador PID-ZN apresentou um *overshoot* quase o dobro do valor de referência, observa-se, também, a tendência de estabilidade, porém com um tempo muito grande para entrar em regime de erro permanente.

Figura 27 Comportamento do sistema de controle PID sintonizado por Produto Interno embarcado em CLP



Fonte: Acervo do Autor

Para a aplicação do método, a principal limitação foi encontrada quanto a capacidade de processamento de cálculos dentro do CLP. Um CLP é composto por uma unidade de processamento e centrais de entradas e saídas as quais são acompanhadas por sensores e atuadores. A capacidade de processamento de um CLP para cálculos complexos é limitada, alguns usam instruções matemáticas básicas em série, enquanto outros usam a longa e complexa com instruções através do ciclo de varredura, no entanto, independentemente de como o sistema funciona, as rotinas são formadas por funções com adição, subtração, inversão de sinal, multiplicação, divisão, raiz quadrada e valor absoluto. As instruções matemáticas possuem formas e tamanhos com base na plataforma do CLP escolhida, no entanto, a realização de cálculos complexos com utilização não é comum, em virtude da ausência de suporte de processamento no software, portanto para a utilização de técnicas de controle adaptativo diretamente no CLP não houve alcance de resultados. Existe a possibilidade de conexão via software Matlab via conexão OPC-UA que poderá ser explorada em trabalhos futuros.

4.6 Conclusões

A automação e controle de processos industriais possui o compromisso de promover o alcance de boas performances operacionais aliadas à padrões de segurança operacional, bom desempenho e baixos custos. No decorrer dos séculos, diversos métodos de sintonia de controle PID foram propostos com o intuito de alcançar tais objetivos e aprimorar aplicações de controle de processos. A técnica de produto interno mostrou-se satisfatória em desempenho e aplicável em tecnologias já existentes no ambiente industrial. O método em questão quando comparado à técnicas de controle clássico obteve boa performance e foi possível constatar experimentalmente que sua aplicação pode contribuir significativamente no que tange à sintonia de controladores em aplicações práticas de controle industrial, já que trata-se de uma abordagem que requer o uso de operações matemáticas solucionáveis em algoritmos embarcados em CLP.

O método de sintonia de controladores PID via produto interno se implementado junto a técnicas de identificação de sistemas e controle adaptativo pode apresentar significativos ganhos de automação, pois com a variabilidade de parâmetros operacionais, tem-se a necessidade de utilização de técnicas adaptativas que possam compensar a mudança de parâmetros por meio da adequação de ganhos. Em trabalhos futuros, pretende-se realizar a implementação de técnicas de identificação de sistemas e controle adaptativo associadas à sintonia por produto interno com aplicação em controle de processos industrial em plantas do setor de mineração.

A contribuição deste trabalho consiste em apresentar a técnica de sintonia de controladores PID por produto interno como um método simples e prático para alcance rápido do ponto de operação desejado em casos de sistemas de ordem inferior à quarta ordem, além de sugeri-la como uma opção funcional para aplicações de controle no setor da mineração e com possibilidade de aprimoração das técnicas de implementação se aplicada junto a técnicas de identificação de sistemas e recursos computacionais. Foram ainda publicados dois artigos no XXIV Congresso Brasileiro de Automática: “Algoritmo de Controlador PID Sintonizado pelo Método de Produto Interno e Embarcado em CLP por meio da Plataforma de Simulação CodeSys” e

“Algoritmos com Ações PID Embarcados em CLPs para Controle de Velocidade de Alimentadores de Esteiras de Aço de um Virador de Vagões”.

Como ponto relevante para a comunidade acadêmica tem-se o esclarecimento sobre a ferramenta de desenvolvimento de *software* para CLP CodeSys para fins de teste de controle, avaliação de sintonia de controladores e principalmente para fins de pesquisa.

REFERÊNCIAS

Astrom, K. (1995). PID controllers. Theory, design and tuning. Bennett, S. (2000). The past of PID controllers. IFAC Proceedings Volumes, 33(4), 1–11.

Åström, K.J., Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, North Carolina, USA (1995)

Bayer, F. M. et al. Controle Automático de Processos. UFSM. Santa Maria - RS, Brasil, 2011

Bennett, S. A brief history of automatic control. IEEE Control Syst., vol. 16, no. 3, pp. 17–25, Jun. 1996, doi: 10.1109/37.506394.

Big-Picture-Reports-2022-EYP-Metals-Mining-Download-Demo-Request.html.

Acesso em: 19 mar. 2023.

Cano, Salvador & Vilanova, Ramon & Ferré, Carles. (2020). PID Tuning: A Modern Approach via the Weighted Sensitivity Problem. 10.1201/9780429325335.

Castrucci, P.; Bittar, A.S.R.M. (2011). Controle automático. Rio de Janeiro: LTC, c2011. XV, 476 p.

Chen, Chi-Tsong. Linear System Theory and Design. Inc. 3rd. Oxford University Press, New York, NY, USA, 1998.

Chien, I.L. (1990). Consider IMC tuning to improve controller performance. Chem. Eng. Prog. 86, 33–41.

CodeSys Group (Germany). Codesys Development System. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.codesys.com/products/codesys-engineering/development-system.html>. Acesso em: 1 jan. 2023

Codesys Group (Germany). CodeSys Group: Codesys® is the leading manufacturer-independent IEC 61131-3 automation software for engineering control systems. Disponível em: <https://www.codesys.com>. Acesso em: 01 abr. 2023.

Codesys Group (Germany). Codesys Runtime. In: CODESYS GROUP (Germany). CODESYS RUNTIME. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.codesys.com/products/codesys-runtime.html>. Acesso em: 3 ago. 2022.

Codesys Group (Germany). Why CodeSys? The right choice for users and device manufacturers across all industries. The right choice for users and device manufacturers across all industries. 2023. Disponível em: <https://www.codesys.com/the-system/why-codesys.html>. Acesso em: 01 abr. 2023.

Coelho, B.F., de Moura, J.P., Neto, J.V.D.F., RÊGO, P.H.M. (2019). Sintonia online de controladores PID sintonizado por regras fuzzy em sistemas industriais com aplicação em processo operacional de viradores de vagões. Congresso Brasileiro de Automática-CBA, volume 1.

Cohen, G. (1953). Theoretical consideration of retarded control. *Trans. Asme*, 75, 827–834

Dlamini, Nomusa Nomhle. Johnston, K. (2016). The use, benefits and challenges of using the internet of things (IOT) in retail businesses: A literature review. In 2016 international conference on advances in computing and communication engineering (ICACCE), 430–436. IEEE.

Ellis, George. (2012). *Control System Design Guide*. 10.1016/B978-0-12-237470-8.50008-9.

Franklin, G.F., Powell, J.D., and Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de controle para engenharia*. Bookman Editora.

Groover, M.P. (2016). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Pearson Education India.

Group, C. (2022). CODESYS: The comprehensive software suite for automation technology. Disponível em: <https://www.codesys.com/the-system.html>. Acesso em: 04 fev. 2022.

Ho, W. (1996). Gain, phase, and performance margins of well-known PID tuning formulas. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 4, 473–477.

Ho, W.K., Hang, C.C., and Cao, L.S. (1995). Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications. *Automatica*, 31(3), 497–502.

Jatti Júnior, M. et al. (2021). Compensação reativa através de bancos de capacitores chaveados automaticamente.

Jörgen Sandström [S.L]. World Economic Forum (ed.). Mining and Metals: industry transformation. Industry transformation. 2021. Disponível em: <https://www.weforum.org/communities/mining-and-metals>. Acesso em: 19 dez. 2021.

K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li. PID control system analysis, design and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4): 559–576, 2005

K. J. Åström and T. Hägglund. The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 9(11): 1163–1175, 2001.

Kaya, A. Scheib, T. (1988). Tuning of PID controls of different structures. *Control Engineering*, 35(7), 62–65. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., and Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.

Lewis, F. L. *Applied Optimal Control and Estimation: digital design and implementation*. New Jersey: Prentice Hall, 1992. 648 p. (Prentice Hall and Texas Instruments Digital Signal Processing Series).

Lewis, R.W. (1998). *Programming industrial control systems using IEC 1131-3*. 50.

LG Automação Industrial (São Paulo) (org.). CLP: controlador lógico programável. Controlador Lógico Programável. 2023. Disponível em: [https://lgautomacao.com.br/servicos/clp/..](https://lgautomacao.com.br/servicos/clp/) Acesso em: 01 jan. 2023.

Liu, D.; Zhang, H.; Wang, Y. Adaptive dynamic programming: An introduction. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. [S.l.], vol. 4, n. 2, p. 39–47, Maio 2009.

LIU, Derong Et Al. *Adaptive Dynamic Programming with Applications in Optimal Control*. [S.L]: Springer, 2017. 609 p. (Advances in Industrial Control).

Ljung, L. *System Identification — Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987

Majdoul, R., Touati, A., Ouchatti, A., Taouni, A., and Abdelmounim, E. (2022). Comparison of backstepping, sliding mode and pid regulators for a voltage inverter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(1), 166.

Martins, G. M. *Princípios de automação industrial*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2007.

Mayr, O., *The Origins of Feedback Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1970.

Minorski, N. Directional stability of automatically steered bodies *Journal of American Society of Naval Engineers*, 34 (1922), pp. 280-309

Moura, José Pinheiro and Neto, João Viana Fonseca and Ferreira, Ernesto Franklin Marçal and Araujo Filho, Evandro Martins. *On the Design and Analysis of Structured-ANN for Online PID-Tuning to Bulk Resumption Process in Ore Mining System*. *Neurocomputing*. Elsevier, 2020.

Moura, José Pinheiro de. *Metodologias de sintonia online e ótima para controladores com ações PID baseadas em modelos Neuro-Fuzzy e guiadas por dados de sensores (Data-Driven Ótima)*. 2019. 246 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, 2021, 2019.

Moura, José Pinheiro e da Fonseca Neto, J.V. (2021b). Sistema híbrido de sintonia de controladores com ações PID baseado em métodos adaptativos para processo de solda por fricção. In *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI*, volume 1.

Moura, José Pinheiro, F.N.J.V. (2021a). Adjustment of the PID Gains Vector Due to Parametric Variations in the Plant Model in Terms of Internal Product. *IntechOpen*.

Moura, José Pinheiro, Fonseca Neto, João Viana and Rêgo, Patrícia Helena M. *Models for Optimal Online Tuning Based on Computational Intelligence of PID Controllers Applied to Operational Processes of Bulk Reclaimers*, issn: 2195– 3899, doi:10.1007/s40313-018-00438-7. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. Springer, 2019.

Moura, José Pinheiro. Fonseca Neto, J.V. (2016). Fuzzy controller in the cargo control wagons dump. In *Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, 2016 IEEE Conference on, 10–16. IEEE

Moura, J. P.; Fonseca Neto, J. Viana da ; Veras, B. F. L. . Algoritmos com Ações PID Embarcados em CLPs para Controle de Velocidade de Alimentadores de Esteiras de Aço de um Virador de Vagões. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2022, Fortaleza. XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022) - CT/UFC, 2022.

Novus (Rio Grande do Sul) (org.). Controle e Indicações de Processos: controladores. Controladores. 2022. Disponível em: <https://www.novus.com.br/site/default.asp?Idioma=55&TroncoID=508083&SecaoID=547383&SubsecaoID=727292>. Acesso em: 01 abr. 2023.

O'Dwyer, A.: *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, 3rd ed. Imperial College Press, London (2009)

O'Dwyer. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. Imperial College Press, 2nd ed., Covent Garden, London, 2006.

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

Oliver Schuh (New York). Fitch Rating. Base Metals Demand Growth Supports Global Mining Sector Outlook. 2021. Disponível em: <https://www.fitchratings.com/research/corporate-finance/base-metals-demand-growth-supports-global-mining-sector-outlook-13-12-2021>. Acesso em: 19 dez. 2021.

Oliver Schuh (New York). Fitch Rating. Base Metals Demand Growth Supports Global Mining Sector Outlook.2023.<https://pages.marketintelligence.spglobal.com/Big-Picture-Reports-2022-EYP-Metals-Mining-Download-Demo-Request.html>. Acesso em: 19 mar. 2023.

Petruzella, Frank D. *Controladores lógicos programáveis*, 4. ed. Porto Alegre, 2014.

PLCopen. IEC 61131-3: A norma para programação. A norma para programação. 2013. Disponível em: https://plcopen.org/sites/default/files/downloads/intro_iec_marc

h04_portuguese.pdf. Acesso em: 01 abr. 2022.

R. Vilanova, A. Visioli (2012) PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control, DOI 10.1007/978-1-4471-2425-2_5, © Springer-Verlag London Limited 2012

Rabiee, M. and Fardo, S.W. (2002). Programmable logic controllers: Hardware and programming. Goodheart-Willcox Co.

Raspberry PI Foundation. What is a Raspberry Pi?. In: What is a Raspberry Pi? [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/help/what-%20is-a-raspberry-pi/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

Real Pars (Rotterdam). What is CODESYS and Why is it Important?. In: REALPARS (Rotterdam). What is CODESYS and Why is it Important?. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://realpars.com/codesys-basics/>. Acesso em: 3 ago. 2023.

Rhinehart, R. Russell. (2000). The century's greatest contributions to control practice. ISA transactions. 39. 3-13. 10.1016/S0019-0578(00)00010-0.

Silver, D.; Huang, A.; Maddison, C. J.; Guez, A.; Sifre, L.; Driessche, G. V. D.; Schrittwieser, J.; Antonoglou, I.; Panneershelvam, V. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature. 529: 484–489. 28 jan. 2016.

Solutions, West Control. CONTROLADOR DE TEMPERATURA E PROCESSOS WEST 6100+ | P6100+. 2023. Disponível em: <https://www.west-cs.com.br/produto/west-6100-controlador-de-processos-p6100/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

The 61508 Association. What is IEC 61508? Site © Copyright The 61508 Association 2023. Disponível em: <https://www.61508.org/index.php>. Acesso em: 01 abr. 2023.

Van Overschee, Peter; MOOR, Bart de. Subspace Identification for Linear Systems: theory, implementation, applications. New York, NY: Springer, 2012. 272 p.

Veras, B. F. L.; Fonseca Neto, J. Viana Da; Moura, J. P. . Algoritmo de Controlador PID Sintonizado pelo Método de Produto Interno e Embarcado em CLP por meio da

Plataforma de Simulação CodeSys. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2022, Fortaleza. XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022) - CT/UFC, 2022.

Yokogawa. Control devices. 2023. Disponível em: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/control/control-devices/>. Acesso em: 01 abr. 2022.

Ziegler, J.G., Nichols, N.B.: Optimum settings for automatic controllers. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 64, 759–768 (1942)
