

Algoritmo de Controlador PID Sintonizado pelo Método de Produto Interno e Embarcado em CLP por meio da Plataforma de Simulação CodeSys

Bianca Fontenele Lemos Veras * João Viana da Fonseca Neto **
José Pinheiro de Moura ***

* *Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, Brasil*
bianca.lemos@discente.ufma.br

** *Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, Brasil*
joao.fonseca@ufma.br

*** *Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, MA, Brasil*
josepinheiro@professor.uema.br

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 (PLCs), it is still under explored, which promotes the importance of discussing control implementations in PLCs. In this article, we present the simulation of a PID control system embedded in a PLC, designed in the CodeSys simulation 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.

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/portuário foram propostas como métodos de sintonia eficientes. 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 artigo, apresenta-se a simulação de um sistema de controle PID embarcado em um CLP, concebida na plataforma de simulação 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 do setor de mineração/portuário, o controle da vazão de sólidos à 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.

Keywords: Control systems, PID, Industrial processes, PLC, Simulation software CodeSys, Car dumper.

Palavras-chaves: Sistemas de controles, PID, CLP, Software de simulação CodeSys, Virador de Vagões.

1. INTRODUÇÃO

2. DESCRIÇÃO DA PLANTA

No contexto de desenvolvimento da automação de processos industriais, os controladores lógicos programáveis (CLPs) 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 and 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, 2022).

Em plantas industriais do setor de mineração/portuário, é de suma importância o uso de sistemas automáticos com um controle funcional e com sintonia rápida, tendo em vista que uma boa logística de transporte do material depende de um controle de fluxo assertivo. 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 and Fonseca Neto, 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 Alimentadores (AL).

Neste artigo, apresenta-se um sistema de controle PID sintonizado pelo método de produto interno entre o vetor de ganhos do controlador PID com os zeros associados aos pólos da Função de Transferência (FT), (Moura and Fonseca Neto, 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 and Fonseca Neto, 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/portuário.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2, descreve-se o processo operacional da planta, com suas características operacionais e representação matemática do modelo em FT. Na Seção 3, discute-se sobre os sistemas de controle abordados neste trabalho. A Seção 4 é direcionada para a apresentação dos experimentos. Por fim, na Seção 5, apresentam-se as conclusões.

Nesta Seção, apresenta-se a descrição da planta a ser controlada, bem como as características do seu processo operacional.

2.1 Processo Operacional

No setor de mineração/portuário, 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 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.

O 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 4.000 toneladas de minério por hora (t/h) em cada alimentador (Moura and Fonseca Neto, 2021a). Na Figura 1, mostra-se um virador de vagões.



Figura 1. Virador de Vagões.

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 ALs, correias transportadoras (CT) e empilhadeiras (EP) (Coelho et al., 2019). 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 à quatro vagões (em torno de 400 toneladas), a fim de manter o nível dentro de uma faixa segura. Na Figura 2, ilustra-se a vista superior de um silo de abastecimento com um AL na parte inferior do silo. 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 através de um sistema de supervisório (Moura, 2016).



Figura 2. Vista superior de um silo de abastecimento com um AL.

3. SISTEMAS DE CONTROLE

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 automação de processos industriais.

3.1 Controladores Lógicos Programáveis

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 et al., 2020).

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, eliminando a chance de dialetos na implementação dos algoritmos. Uma vez aprendida, é possível o uso de uma variedade de sistemas baseados nesta norma. A terceira parte da norma IEC 61131 define cinco linguagens de programação, que são: i) Structured Text (ST) - Texto Estruturado; ii) Instruction List (IL) - Lista de Instruções; iii) Ladder Language (LD) - Linguagem Ladder; iv) Function Block Diagram (FBD) -

Diagrama de Bloco e v) Sequential Flow Chart (SFC) - Diagrama de Fluxo ou Graficet (Lewis, 1998).

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.

3.2 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 utilizando PID têm mostrado notável eficácia e praticidade no controle de processos industriais. Controladores PID, principalmente quando inseridos em computadores industriais e em CLPs, mantêm-se como um dos principais equipamentos de controle (Castrucci, 2011). As técnicas de controle clássico já estão consolidadas no ambiente industrial, principalmente quanto ao uso de controladores do tipo PID, a qual é a técnica de controle realimentado mais utilizada em aplicações industriais (Vinagre et al., 2007).

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 and Fonseca Neto, 2021b). O PID evoluiu acompanhando o progresso da tecnologia e hoje em dia 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).

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 and Fonseca Neto, 2021a). 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 and Fonseca Neto, 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.

3.3 Métodos de sintonia de controladores PID

Diversos métodos de sintonia de controladores PID foram propostos nos últimos 70 anos, como o método da curva de reação e o método do ganho limite (Ziegler, 1942), (Ziegler, 1943), os quais foram consolidados como mais populares junto a métodos como o método de *Cohen-Coon* (Cohen, 1953), o Modelo de Controle Interno (*Internal Model Control – IMC*) (Chien, 1990), Erro absoluto ótimo integral para mudança de *setpoint* (*IAE-setpoint*) e para resposta a perturbações de carga (*IAE-load*) (Shinsky, 1979), (Kaya, 1988). 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).

3.4 Método de Sintonia PID - Produto Interno

O ajuste de ganhos de controladores PID por meio de um produto interno foi apresentado visando uma aprimoração do processo e desempenho de sintonia desses controladores aplicados em plantas de alta complexidade do controle. O método de sintonia proposto por Moura & Fonseca é baseado no produto escalar dos termos do PID em que uma matriz de propagação (MP) é gerada pelos coeficientes do numerador da FT da planta em questão. A aplicação deste método tem como característica a influência tanto dos coeficientes do numerador como do denominador da FT.

Um vetor de parâmetros especificados de um polinômio característico é construído e um vetor de erro é obtido por meio da sua comparação com os parâmetros do polinômio característico da planta com 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 and Fonseca Neto, 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 et al., 2020), (Moura, 2019a).

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. O polinômio característico, de forma geral, é dado por

$$P^{MF} = s^m + \sum_{i=0}^{n_{MF}} (a_i + \langle K^{pid}, \bar{b}_{k-1} \rangle) s^{n_{MF}-i}. \quad (1)$$

Em que n^{MF} indica a ordem do referido polinômio. K^{pid} representa o vetor de propagação de ganhos, dado por $[K_D \ K_P \ K_I]^T$, enquanto que o vetor $S_{PID} = [s^2 \ s^1 \ s^0]^T$ corresponde a um vetor no domínio da frequência em s referente aos ganhos

associados ao denominador da FT. b_{k-1} é o vetor de coeficientes dos zeros e os termos a_i os respectivos coeficientes dos polos da FT da planta. K^{pid} é construído pelos ganhos do PID enquanto que o vetor $s^{n_{MF}-i}$ corresponde a um vetor no domínio da frequência em s dos ganhos associados ao numerador da FT.

A ideia principal proposta por (Moura and Fonseca Neto, 2021a) é a construção da MP \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 (Moura, 2019a).

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} b_k & 0 & 0 \\ \vdots & b_k & 0 \\ b_{k_{n-3}} & \vdots & b_k \\ b_{k_{n-2}} & b_{k_{n-3}} & \vdots \\ b_{k_{n-1}} & b_{k_{n-2}} & b_{k_{n-3}} \\ b_{k_n} & b_{k_{n-1}} & b_{k_{n-2}} \\ 0 & b_{k_n} & b_{k_{n-1}} \\ 0 & 0 & b_{k_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A partir da matriz \bar{B} dada em (2), um sistema de equações na forma matricial é gerado, de tal forma que seja estabelecida uma relação direta entre o vetor K^{pid} e as especificações de projeto definidas como a_i , com $i = 1, 2, 3, \dots, n + 1$, para que desta forma o erro do comportamento do sistema seja obtido através da diferença entre os parâmetros atuais a_i e novos parâmetros especificados a_i^e , sendo dado por

$$a_i + \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle = a_i^e \Rightarrow \langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle = a_i^e - a_i = a_i^e. \quad (3)$$

Sendo \bar{b}_k constituído pelas linhas da matriz de propagação \bar{B} e a_i^e representando o erro.

O cálculo do vetor de ganhos K^{pid} é dado por

$$\langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle = \begin{bmatrix} K_d b_k + 0 + 0 \\ \vdots + K_p b_k + 0 \\ K_d b_{k_{n-3}} + \vdots + K_i b_k \\ K_d b_{k_{n-2}} + K_p b_{k_{n-3}} + \vdots \\ K_d b_{k_{n-1}} + K_p b_{k_{n-2}} + K_i b_{k_{n-3}} \\ K_d b_{k_n} + K_p b_{k_{n-1}} + K_i b_{k_{n-2}} \\ 0 + K_p b_{k_n} + K_i b_{k_{n-1}} \\ 0 + 0 + K_i b_{k_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^e \\ a_2^e \\ a_3^e \\ \vdots \\ a_n^e \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

4. EXPERIMENTOS

Os experimentos são simulados com dados reais de uma planta de segunda ordem, para atuar no controle da velocidade de AL de 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.

4.1 Modelo Matemático da Planta

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, 2019b), 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 FT¹ obtido para um VV com um AL, que é dado por

$$FT_{VV}^g(s) = \frac{b_0}{a_0s^2 + a_1s + a_2}, \quad (5)$$

sendo FT_{VV}^g a 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. (6) foi obtido pelo *Matlab-toolbox: system identification* (Moura, 2019b), (Moura and Fonseca Neto, 2021a).

$$FT_{VV}^{MA}(s) = \frac{0,438}{s^2 + 0,0861s + 0,0421}. \quad (6)$$

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

$$G_{VV}^{MF}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \left(\frac{b_0}{a_0s^2 + a_1s + a_2} \right). \quad (7)$$

Reorganizando a Eq. (7) tem-se

$$G_{VV}^{MF}(s) = \frac{K_p b_0 + K_i b_0 + K_d b_0 s}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s} \quad (8)$$

O controle do fluxo da carga de minério descarregado é realizado por meio do acionamento do AL. O fluxo desejado é selecionado pelo operador de VV via IHM e então, em campo, é alterada a frequência dos inversores que controlam a velocidade de rotação 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 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

Para o cálculo da diferença paramétrica entre os coeficientes especificados e os coeficientes reais da FT, define-se

$$C(s) = \frac{\langle K^{pid}, s^{pid} \rangle}{s}. \quad (9)$$

Onde,

$$K^{pid} = [K_d \ K_p \ K_i]^T, \quad (10)$$

$$s^{pid} = [s^2 \ s^1 \ s^0]^T. \quad (11)$$

¹ A Eq. 5 é apresentada na sua íntegra em (Moura and Fonseca Neto, 2021a).

A FT da planta escrita na forma de produto interno é dado por

$$G_P(s) = \frac{\langle b_k, s^m \rangle}{s^n + \langle a_i, s^{n-1} \rangle}. \quad (12)$$

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. (5), que é dado por

$$[C(s)G_P(s)]_N = (K_d s^2 + K_P s + K_i) b_k. \quad (13)$$

Substituindo na Eq. (13) os valores numéricos dados pela Eq. (6), tem-se

$$[C(s)G_P(s)] = K_d 0,438 s^2 + K_P 0,438 s + K_i 0,438. \quad (14)$$

De semelhante modo, o produto do denominador da FT da Planta, dada pela Eq. (6), associado ao denominador da FT do controlador, é dado por

$$[C(s)G_P(s)]_D = s(a_0 s^2 + a_1 s + a_2). \quad (15)$$

Substituindo na Eq. (15) os valores numéricos dados na Eq. (6), tem-se

$$[C(s)G_P(s)]_D = s^3 + 0,0861 s^2 + 0,0421 s. \quad (16)$$

O polinômio característico da planta em malha fechada associado à Eq. (6), é dado por

$$P_P^{MF} = s^3 + (a_1 + K_d b_k) s^2 + (a_2 + K_p b_k) s + K_i b_k. \quad (17)$$

Da Eq. (17), é construído um sistema de equações na forma $Ax = b$, que é dado por

$$\langle K^{pid}, \bar{b}_k \rangle = a_i^e = \begin{cases} a_1 + K_d b_0 = a_1^s \\ a_2 + K_p b_0 = a_2^s \\ a_3 + K_i b_0 = a_3^s \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Sendo } a_i = \begin{cases} a_1 = 0,0861 \\ a_2 = 0,0421 \\ a_3 = 0 \end{cases} \quad \text{e} \quad a_i^s = \begin{cases} a_1^s = 8,61 \\ a_2^s = 4,21 \\ a_3^s = 0,01 \end{cases}$$

Sendo a_i os parâmetros do denominador da Eq. (6) e a_i^s são os parâmetros especificados². 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 foi a soma de $a_3 + 10^2$.

Substituindo os valores numéricos de a_i e a_i^s no sistema de Eqs. (18), encontra-se os valores numéricos do vetor de ganhos $K^{pid} = [K_d, K_p, K_i] = [19,4610 \ 9,5158 \ 0,0228]$.

4.3 Simulações no MATLAB/SIMULINK

Para efeitos de comparação do PID-Produto-Interno com o PID-ZN, primeiro obteve-se o lugar das raízes no *MATLAB* e em seguida plotou-se o gráfico do lugar das rízes, conforme Figura 3.

² Os valores de a_i^s devem ser diferentes dos valores a_i , de forma que o a_i^e seja diferente de zero e positivo.

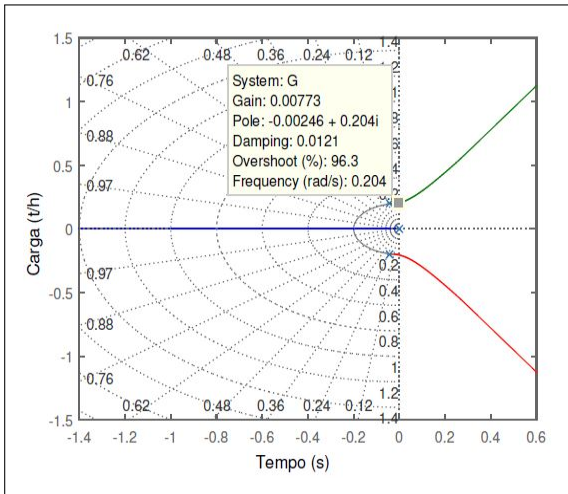


Figura 3. Lugar das raízes.

Sendo o $Gain$ o ganho crítico (K_{cr}) = 0,00773 e $Frequency$ a frequência de oscilações críticas (W_{cr}) = 0,204. De acordo com o K_{cr} e W_{cr} associados com a Figura 3, determina-se primeiro P_{cr} que é dado por:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{W_{cr}}. \quad (19)$$

Substituindo os valores numéricos na Eq.(19), tem-se:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{0,204} = 30,7999.$$

Na Tabela 1, apresenta-se as regras para os cálculos dos parâmetros de sintonia do segundo método de *Ziegler-Nichols* baseadas no ganho crítico e no período crítico.

Tabela 1. Regra de sintonia de *Ziegler-Nichols*.

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

Fonte: (Ogata, 2010)

Substituindo o ganho crítico e o período crítico na terceira linha da Tabela 1, encontra-se o K_p , o T_i e o T_d .

$$K_p = 0,60 \times 30,7999 = 18,4799$$

$$T_i = 0,5 \times 30,7999 = 15,4 \Rightarrow K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{18,4799}{15,4} = 1,2$$

$$e T_d = 0,125 \times 30,7999 = 3,8500 \Rightarrow K_d = K_p \times T_d = 18,4799 \times 30,7999 = 71,1476$$

No MATLAB/SIMULINK é possível criar simuladores para simular 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 4, mostra-se o simulador desenvolvido no SIMULINK, usado nos testes e validação da proposta apresentada neste artigo. Onde Ref é a referência, que é igual a entrada que,

consequentemente, é o valor do *Setpoint* e o erro é igual a saída menos a entrada.

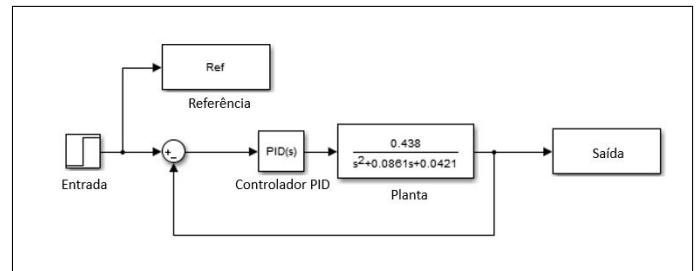


Figura 4. Simulador da planta em forma de diagrama de blocos desenvolvido no SIMULINK.

4.4 Implementação do Código Desenvolvido 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 blocos de função contínuo - *Continuous Function Chart (CFC)* – 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. A equação a diferença do controlador embarcado no algoritmo de controle é dada por

$$u[k] = u[k - 1] + q_0 e[k] + q_1 e[k - 1]. \quad (20)$$

Em que $q_0 = K - p[1 + \frac{T}{T_i}]$ e $q_1 = -K_p[1 - \frac{T}{T_i}]$.

Na Figura 5, apresenta-se a declaração de variáveis do controlador PID.

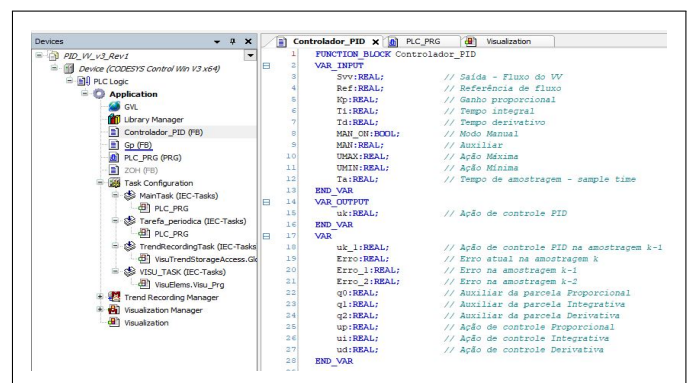


Figura 5. Declaração das variáveis do algoritmo de controle.

Na Figura 6, apresenta-se o algoritmo do controlador PID de um virador de vagões, desenvolvido na linguagem de programação texto estruturado.

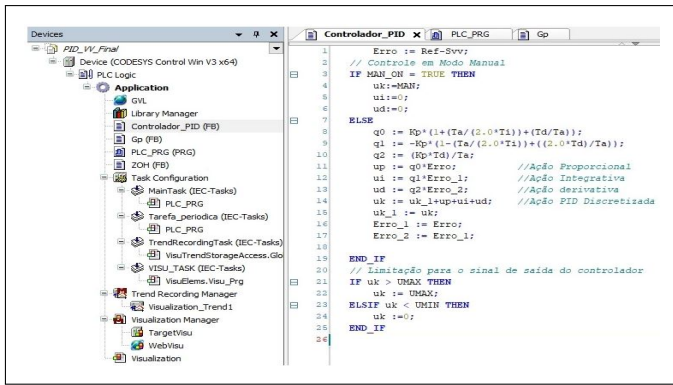


Figura 6. Algoritmo de controle PID.

Para a simulação do controlador, fez-se a discretização da FT do controlador PID, encontrando a equação a diferença, Eq. (20), para o controlador digital por meio da técnica de equivalente discreto usando o Método de Tustin (Franklin et al., 2013). Na Figura 7, apresenta-se o diagrama de blocos do projeto de controle embarcado no CLP, configurado para o controlador PID-Produto-Interno (bloco superior) e o controlador PID-ZN (bloco inferior).

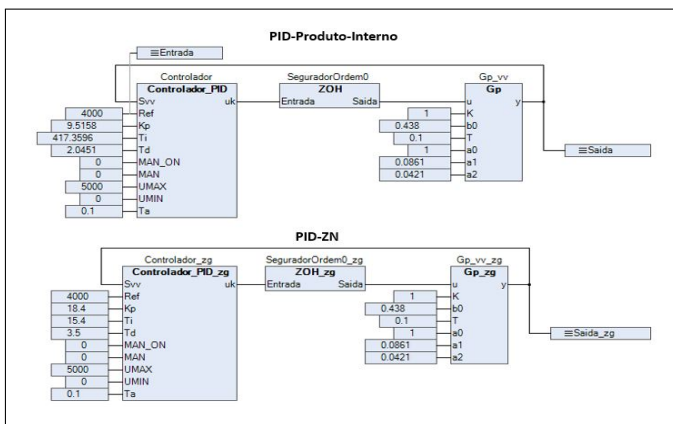


Figura 7. Diagrama de blocos desenvolvido no software de simulações CodeSys.

4.5 Resultados

Os resultados são apresentados em termos de controle, com o objetivo de seguir o valor de referência. Na Figura 8, apresenta-se o resultado simulado no MATLAB/SIMULINK, sendo o valor de referência 4.000 t/h. Observa-se que o PID-Produto-Interno obteve melhor desempenho, com menor tempo de subida, menor overshoot e alcançou o objetivo de controle mais rápido, além de permanecer sem perda na trajetória em comparação com o PID-ZN.

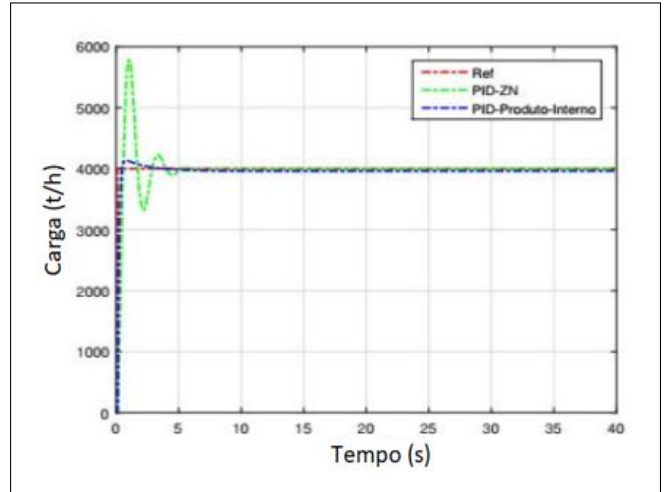


Figura 8. Resultados simulados no MATLAB/SIMULINK do controlador PID-Produto-Interno x controlador PID-ZN.

De acordo com os resultados simulados, 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 que o PID-ZN, com os parâmetros de ganhos determinados pelo segundo método de Ziegler-Nichols, alcançou o objetivo de controle, porém com considerável oscilação no início da trajetória, atingindo overshoot superior a 20% do valor de referência e demorando mais para entrar em regime de erro permanente.

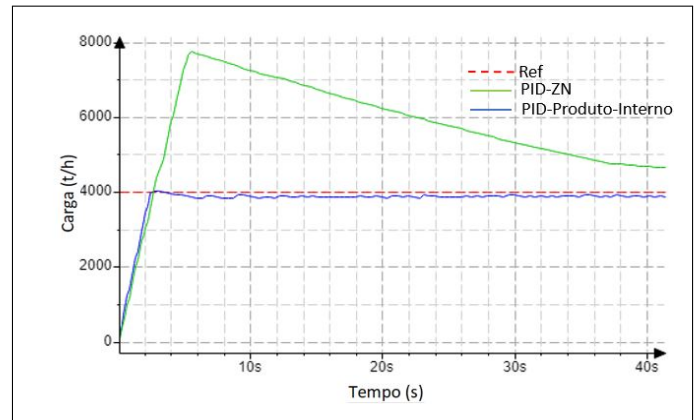


Figura 9. Comportamento dos sistemas de controles PID-Produto-Interno x PID-ZN embarcados em CLP por meio do software de simulações CodeSys.

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 *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 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.

5. CONCLUSÃO

A aplicação do método apresentado pode contribuir significativamente no que tange à sintonia de controladores em aplicações de controle operacional em sistemas industriais, já que trata-se de uma abordagem que requer o uso de operações matemáticas solucionáveis em algoritmos a serem embarcados em CLP. Ainda neste contexto, o método de sintonia por meio do controlador PID-Produto-Interno tem a vantagem de não necessitar de ajuste fino nos parâmetros do vetor de ganhos do controlador PID como ocorre, em muitas vezes, nos métodos de sintonia de Ziegler-Nichols. O método de sintonia proposto implementado junto à técnicas de identificação de sistemas e controle adaptativo pode apresentar significativos ganhos de automação em plantas industriais. Em trabalhos futuros, pretende-se realizar a implementação de técnicas de identificação de sistemas e controle adaptativo associadas ao método de sintonia por produto interno com aplicação em controle de processos industrial em plantas do setor de mineração/portuário.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UFMA-PPGEE, o Laboratório de Sistemas Embarcado e Controles Intelgentes (LABSECI) e à UEMA, em especial ao Departamento de Engenharia de Computação e o laboratório de automação por tornarem essa pesquisa possível e pelas contribuições técnico/científicas dadas para o desenvolvimento deste trabalho. Reconhecemos a CAPES e ao CNPq por promoverem e apoiarem os estudos avançados que contribuíram para a realização deste trabalho. Também, somos especialmente gratos à FAPEMA pelo incentivo à pesquisa de alto nível no Estado do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- Bennett, S. (2000). The past of pid controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(4), 1–11.
- Castrucci, P.; BITTAR, A.S.R.M. (2011). *Controle automático*. Rio de Janeiro: LTC, c2011. XV, 476 p.
- Chien, I.L. (1990). Consider imc tuning to improve controller performance. *Chem. Eng. Prog.*, 86, 33–41.
- Coelho, B.F., Pinheiro de Moura, J., Fonseca Neto, J.V., and Moraes Rêgo, P.H. (2019). Sintonia online de controladores pid sintonizado por regras fuzzy em sistemas industriais com aplicação em processo operacional de viradores de vagões. In *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.
- 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.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.
- Ho, W. (1996). Gan op, tay eb, ang el. *Performance and gain and phase margins of well-known PID tuning formulas*. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 4, 473–477.
- Jatti Júnior, M. et al. (2021). Compensação reativa através de bancos de capacitores chaveados automaticamente.
- 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, R.W. (1998). *Programming industrial control systems using IEC 1131-3*. 50. Iet.
- Moura, José Pinheiro. Fonseca Neto, J.V.F., Marçal, E.F., and Araujo Filho, E.M. (2020). On the design and analysis of structured-ann for online pid-tuning to bulk resumption process in ore mining system. *Neurocomputing*.
- 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, José Pinheiro. Fonseca Neto, J.V.R.P.H.M. (2019a). Models for optimal online tuning based on computational intelligence of pid controllers applied to operational processes of bulk reclaimers. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30(2), 148–159.
- Moura, José Pinheiro. Fonseca Neto, J.V.R.P.H.M. (2019b). A neuro-fuzzy model for online optimal tuning of pid controllers in industrial systems applications to the mining sector. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.
- Moura, J.P. and Fonseca Neto, J.V. (2021a). *Adjustment of the PID Gains Vector Due to Parametric Variations in the Plant Model in Terms of Internal Product*. IntechOpen.
- Moura, J.P. and 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.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*, volume 5. Tradutora: Heloísa Coimbra de Souza - Revisor Técnico: Eduardo AounTannury, Editora: Prentice Hall 5. Ed. São Paulo.
- Rabiee, M. and Fardo, S.W. (2002). *Programmable logic controllers: Hardware and programming*. Goodheart-Willcox Co.
- Shinsky, F.G. (1979). *Process control systems*. McGraw-Hill, Inc.
- Vinagre, B.M., Monje, C.A., Calderón, A.J., and Suárez, J.I. (2007). Fractional pid controllers for industry application. a brief introduction. *Journal of Vibration and Control*, 13(9-10), 1419–1429.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. Springer Science & Business Media.
- Ziegler, John G e Nichols, N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11).
- Ziegler, JG e Nichols, N. (1943). Process lags in automatic control circuits. *Trans. ASME*, 65(5), 433–443.