

Controladores com Ações PID Baseado em Métodos Adaptativos Aplicado em Processos de Solda por Fricção para ser Embarcado em CLP

José Pinheiro de Moura * João Viana da Fonseca Neto **

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

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

Abstract: This article presents a hybrid system for tuning PID controllers, combining the practical methods used in the industry (Ziegler-Nichols) with the adaptive methods based on fuzzy rules and structured artificial neural networks (RNA-E), applied in a plant for an industrial friction welding process. The parameters of the controller gain vector with proportional, integral and derivative (PID) actions, are determined by the second method of Ziegler-Nichols (ZN) and by an RNA-E with online adjustments using a fuzzy system. The performance of PID controllers is evaluated through computational experiments based on mathematical models described by transfer functions.

Resumo: Apresenta-se neste artigo um método de sintonia de controladores PID, combinando os métodos práticos usados na indústria (*Ziegler-Nichols*) com os métodos adaptativos baseados em redes neuronais artificiais estruturadas (RNA-E), aplicado em uma planta de um processo industrial de soldagem por fricção. Os parâmetros do vetor de ganhos do controlador com ações proporcionais, integrais e derivativas (PID), são determinados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* (ZN) e por uma RNA-E com ajustes *onlines* por regras *fuzzy*. O desempenho dos controladores PID, é avaliado por meio de experimentos computacionais baseados em modelos matemáticos descritos por funções de transferências.

Keywords: Hybrid System; PID Controller; Conventional and Adaptive Methods; Fuzzy Rules; Structured Artificial Neural Networks.

Palavras-chaves: Sistemas Híbridos; Controlador PID; Métodos Convencionais e Adaptativos; Regras *Fuzzy*; Redes Neuronais Artificiais Estruturadas.

1. INTRODUÇÃO

O projeto de controle é um problema complexo que requer considerações de muitos problemas. Tais como: redução da carga de perturbação, rastreamento do ponto de ajuste, robustez em relação às variações/incertezas do processo operacional da planta e efeitos de ruídos de medição.

Apesar da popularidade dos controladores PID, na prática, muitas vezes, são sintonizados manualmente por procedimentos de tentativa e erro. Isto faz com que o ajuste do processo seja difícil ou ineficiente (de Moura et al., 2019b) e (MOURA, 2019). Em muitas situações, os controladores PID são substituídos por controladores PI, onde a parte da ação derivativa (K_D) é retirada, podendo comprometer o desempenho e a eficiência da operação por um processo rápido e mais fácil de ser sintonizado (Moura et al., 2020).

A sintonia de controladores PID, não é uma tarefa trivial e métodos convencionais com ganhos fixos, na maioria dos casos, não atendem os requisitos de plantas com alta complexidade de controle. Em diversas situações reais, adota-se ganho nulo para o parâmetro K_D , facilitando a sintonia por métodos de tentativa e erro. Porém, isso pode comprometer a eficiência do controlador.

A contribuição do método proposto, consiste em determinar os parâmetros do vetor de ganhos K_P , K_D e K_I (K^{pid}) por uma

rede neuronal artificial estruturada (RNA-E) com ajustes *onlines* por regras *fuzzy*. Além de ter a vantagem de alcançar o ponto de operação especificado pelo projetista, por meio do produto interno de uma matriz de propagação formada pelos zeros das funções de transferências com o vetor de ganhos K^{pid} associado com os pólos.

Para resolver esse problema, diversas técnicas têm sido desenvolvidas para a sintonia de controladores PID (Vilanova and Visioli, 2012), (Åström et al., 2006). Se o desempenho requerido não é rigoroso, os métodos convencionais de sintonia de controladores PID são suficientes em muitos sistemas de controle industrial (da Fonseca Neto et al., 2013) e (MOURA, 2019). Porém, devido ao crescimento da concorrência comercial os sistemas estão se tornando estruturas mais complexas de serem controladas e com os requisitos de desempenho mais rígidos, onde métodos de sintonia mais eficientes são necessários (Gaidhane et al., 2018).

Neste artigo apresenta-se um método de sintonia de controladores PID adaptativo com base em inteligência computacional (IC), usando-se uma RNA-E e regras *fuzzy* para, futuramente, serem embarcados em microcontroladores ou controladores lógicos programáveis (CLP). Os resultados são obtidos de simulações no *software MATLAB/SIMULINK* para avaliações em respeito a seguir o valor de referência e em respeito a resistência aos sinais de perturbações inseridos nos parâmetros das funções de transferências da planta durante o processo operacional. Ainda

neste contexto, faz-se uma comparação do comportamento do controlador proposto, com os controladores PID sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e com o controlador PID com os parâmetros do vetor de ganhos determinados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e ajustados por regras *fuzzy*.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 apresenta-se a planta e uma breve descrição da mesma. Na Seção 3 a formulação do problema PID é apresentada. O segundo métodos de sintonia de *Ziegler-Nichols*, o método de sintonia PID ajustado por regras *fuzzy* e o método de sintonia PID combinando RNA-E com regras *fuzzy* são apresentados na Seção 4. Na Seção 5, apresenta-se os experimentos computacionais com os resultados experimentais simulados e por fim, a conclusão é apresentada na Seção 6.

2. PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO

Nesta Seção apresenta-se uma prévia do processo de soldagem por fricção da planta em estudo, para avaliação do método de sintonia de controladores PID, combinando RNA-E com regras *fuzzy*.

2.1 Descrição da planta

O foco deste artigo é apresentar um sistema híbrido de sintonia de controladores com ações PID baseado em métodos adaptativos para processo de solda por fricção. Em (Garpinger, 2015) a planta do processo de soldagem por fricção que é usada para avaliação do método de sintonia proposto é apresentada.

No controle de temperatura de um processo de soldagem por fricção industrial (*friction stir welding* - FSW). Uma ferramenta rotativa não consumível, consistindo de uma sonda cônica e um ressalto, é mergulhada no metal de solda e atravessa ao longo da linha de solda, conforme Figura 1. O calor de fricção é gerado entre a ferramenta e o metal de solda, fazendo com que o metal amoleça, normalmente sem atingir o ponto de fusão, e permitindo que a ferramenta atravesse a linha da solda. Os três parâmetros de entrada mais comuns são: i) taxa de rotação da ferramenta; ii) velocidade de soldagem ao longo da solda e iii) força axial da ferramenta de soldagem.

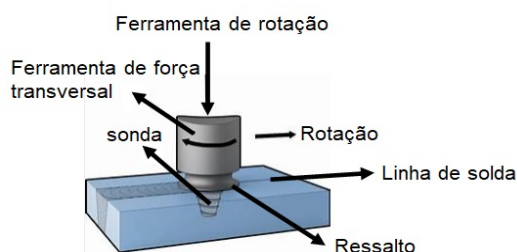


Figura 1. Ferramenta rotativa de soldagem por fricção
Fonte: Adaptação (www.manufacturingguide.com).

O controle de temperatura pode ser uma parte importante do processo FSW, se tiver condições de contorno térmico não uniformes ou se for usado em um material com uma faixa de temperatura permitida menor, a chamada janela do processo. Se a temperatura de soldagem ficar muito alta por um longo período de tempo, existe o risco de fratura da sonda. Da mesma forma, temperaturas muito baixas podem resultar em descontinuidades

na solda. Um estudo apresentado por (Cederqvist and Öberg, 2008) mostrou que a taxa de rotação da ferramenta de soldagem é o sinal de controle mais adequado para o controle da temperatura da solda.

2.2 Especificações de Projetos

Para a planta, são dadas três funções de transferências (FTs)¹. Sendo: $G_1(s)$ a taxa de rotação da ferramenta, $G_2(s)$ a velocidade de soldagem ao longo da solda e $G_3(s)$ a força axial da ferramenta de soldagem, que são dadas por:

$$G_1(s) = \frac{1}{0,01s^3 + 0,21s^2 + 1,2s + 1}, \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{s^4 + 3s^3 + 3s^2 + 1s + 0.1}, \quad (2)$$

$$G_3(s) = \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.5s + 0.01}. \quad (3)$$

Os modelos de controle PID adaptativos fornecem vetores de ganhos K_P , K_D e K_I (K^{pid}) que assumem compromissos entre as especificações de projetos. Neste artigo, os requisitos de projetos, são especificados em separados para cada função de transferência da planta, da seguinte forma: i) *overshoot* no máximo 20%, tempo de subida em torno de 3 segundos e regime estacionário em torno de 5 segundos para a taxa de rotação da ferramenta de solda, representada pela função de transferência dada na Eq. (1); ii) *overshoot* no máximo 20%, tempo de subida em torno de 5 segundos e regime estacionário em torno de 10 segundos para a velocidade de soldagem, representada pela função de transferência dada na Eq. (2) e iii) *overshoot* no máximo 20%, tempo de subida em torno de 5 segundos e regime estacionário em torno de 15 segundos para a força axial da ferramenta de solda, representada pela função de transferência dada na Eq. (3).

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA PID-FUZZY-RNA

No intuito de contribuir para o atendimento de novas exigências de mercado e com o desenvolvimento tecnológico, novos métodos baseados em modelos matemáticos para a sintonia *online* e ótima de controladores PID em sistemas industriais são apresentados nesta Seção.

Os valores dos parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} são determinados: i) em primeira instância, pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* denominado de controlador PID-ZN; ii) em segunda instância os valores dos parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} determinado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* são ajustado por regras *fuzzy*, sendo chamado de controlador PID-Fuzzy e iii) em terceira instância, os valores dos parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} são determinados por uma RNA-E e ajustados por regras *fuzzy*, que é denominado de controlador PID-Fuzzy-RNA.

¹ As funções de transferências usadas neste artigo, foram retiradas da *PhD Thesis: "Analysis and Design of Software-Based Optimal PID Controllers"* (Garpinger, 2015) e rearrumadas para os experimentos com a metodologia proposta.

3.1 Problema PID-RNA

O problema de ajuste do controlador PID com base nas divergências paramétricas do ponto de operação especificado, é formulado baseada na referência (Moura et al., 2020), onde os autores apresentam o desenvolvimento de modelos para o ajuste *online* e ótimo, baseado em abordagens de IC. Especificamente, a formulação do problema é adequada para a aplicação de abordagens de RNA-E em plantas industriais.

Para fins de projeto no domínio da frequência em s , os modelos da planta são representados por FTs do controlador PID e dos sistemas dinâmicos. Os modelos são representados na forma de produto interno \langle, \rangle , que é uma notação, amplamente usada neste artigo como produto de dois vetores, (produto interno) (de Moura, 2021). A forma do produto interno é adequada para análise, permitindo ao projetista observar os parâmetros livres de impacto, como: K_p e K_i , na saída do sistema dinâmico.

3.2 Modelo PID-RNA

A partir do modelo PID, em termos das equações diferenciais integrais e da transformada de *Laplace*, obtém-se a FT do controlador PID em termos do produto interno, que é dado por

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

onde K^{pid} é o vetor de ganhos dos parâmetros do controlador PID e é dado por

$$K^{pid} = [K_d K_p K_i]^T, \quad (5)$$

e s^{pid} é alimentado por vetores no domínio em s dos parâmetros de ganhos vetor K^{pid} associados com o numerador das FTs, que é fornecido por

$$s^{pid} = [s^2 s^1 s^0]^T, \quad (6)$$

onde s^2 está associado com K_d , s^1 está associado com K_p e s^0 está associado com K_i .

3.3 Vetor do produto interno da planta

Considerando a inserção das características da planta em seus pólos e zeros, na forma de operador do produto interno \langle, \rangle , sua representação matemática é dada por

$$G_P^{s_{ip}} = K \frac{\langle b_i, s^m \rangle}{s^n + \langle a_i, s^{n-1} \rangle}, \quad (7)$$

onde $G_P^{s_{ip}}$ é a FT da planta na forma de produto interno e os coeficientes a_i , com $i = 1, \dots, n$ e b_i com $i = 0 \dots, m$.

3.4 Polinômio característico

Em termos de produto interno, a forma polinomial geral do polinômio do numerador de malha fechada é dada por

$$N^{MF}(s) = \sum_{i=0}^{m_{MF}} \langle K^{pid}, \bar{b}_{i-1} \rangle s^{m_{MF}-i}, \quad (8)$$

onde $m_{MF} = m + m^{pid}$ e o vetor \bar{b}_i do polinômio dos zeros do sistema de malha fechada é dado por

$$\bar{b}_i = [b_i \ b_{i-1} \ b_{i-2}]. \quad (9)$$

A forma geral do polinômio do denominador de malha fechada é dada por

$$P^{MF}(s) = s^{n_{MF}} + \sum_{i=1}^{n_{MF}-1} (a_i + \langle K^{pid}, \bar{b}_{i-1} \rangle) s^{n_{MF}-i} \quad (10)$$

Onde $P^{MF}(s)$ é a forma geral do polinômio do denominador do sistema de malha fechada e n_{MF} é a ordem do polinômio característico.

3.5 Matriz de propagação com ações PID

A matriz de propagação (\bar{B}) de ganhos e o polinômio característico são os principais tópicos da formulação do problema. A matriz de propagação estabelece as ações do controlador PID e o polinômio característico fornece um meio para projetar os ganhos do controlador com base em um ponto de operação especificado, que é imposto por novos pólos e zeros das FTs.

Com base na definição da matriz de propagação, é apresentada a formulação do problema proposto. A matriz \bar{B} é uma consequência da interação entre os ganhos K^{pid} do controlador PID e os parâmetros b_i da planta. Essa matriz é obtida a partir dos coeficientes do polinômio do numerador apresentado na Eq. (8), que é dado por

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 \\ b_1 & b_0 & 0 \\ b_2 & b_1 & b_0 \\ b_3 & b_2 & b_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ b_m & b_{m-1} & b_{m-2} \\ 0 & b_m & b_{m-1} \\ 0 & 0 & b_m \end{bmatrix}. \quad (11)$$

4. MÉTODOS DE CONTROLES

A crescente complexidade dos processos industriais modernos tornou-se difícil projetar sistemas de controle, sendo que a aplicação de procedimentos de controle com ganhos fixos são muitas vezes inadequados (Moura et al., 2020) e (de Moura and da Fonseca Neto, 2016).

4.1 Segundo método de Ziegler-Nichols

O segundo método de *Ziegler-Nichols*, define-se $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Usando-se, somente, a ação de controle proporcional². Aumentando K_p de 0 ao valor de de ganho crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada do início ao fim do intervalo de amostragem (Ziegler and Nichols, 1943) e (Ogata, 2010). Então, calcula-se o K_{cr} e o período crítico P_{cr} experimentalmente. Nas Figuras 2-4 mostram os K_{cr} e w_{cr} associados com as Eqs. (1)-(3) usados para os cálculos dos valores de ganhos do vetor K^{pid} pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*.

² Para maiores informações sobre esse método, veja (Ogata, 2010).

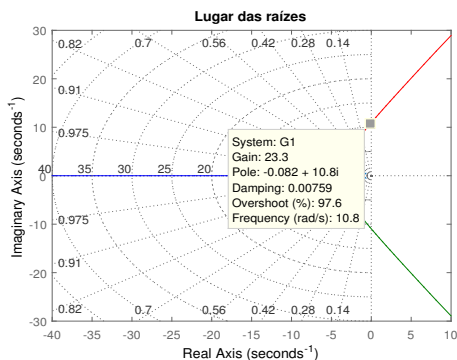


Figura 2. Lugar das raízes associado com a Eq. (1)

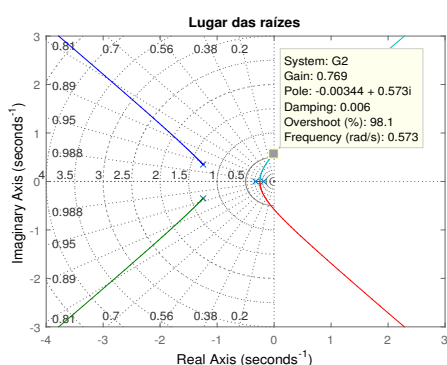


Figura 3. Lugar das raízes associado com a Eq. (2)

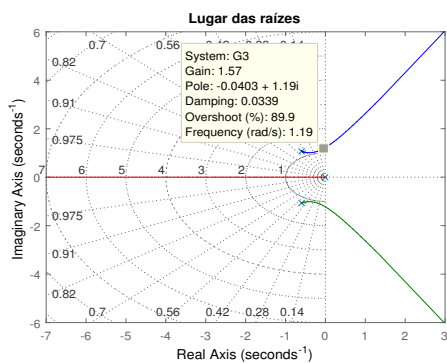


Figura 4. Lugar das raízes associado com a Eq. (3)

Onde $Gain = K_{cr}$ e $Frequency = w_{cr}$.

Se o sistema tem um modelo matemático conhecido em forma de FT, pode-se usar o método do lugar das raízes para encontrar o ganho (K_{cr}) e a frequência de oscilações (w_{cr}) sustentadas³. Onde o período crítico é dado por

$$P_{cr} = 2\pi/\omega_{cr} \quad (12)$$

³ Esses valores podem ser encontrados a partir dos pontos de cruzamentos dos ramos do lugar das raízes com o eixo imaginário

4.2 Sintonia de controladores PID baseada em regras fuzzy

Neste método, os parâmetros do vetor de ganho K^{pid} são determinados pelo segundo método de Ziegler-Nichols e ajustados por regras fuzzy em intervalos precritos de (K_{pmin} , K_{pmax}) e (K_{dmin} , K_{dmax}) de acordo com as variações paramétricas da planta, de forma a garantir que o sistema de controle seja mantido estabilizado independente de algumas mudanças em seus requisitos. O modelo de controlador PID-Fuzzy apresentado neste artigo foi proposto por (Zhao et al., 1993). Este, foi customizado para os processos operacionais da planta avaliada. O modelo de controle PID-Fuzzy usa um sistema baseado em regras fuzzy para sintonizar o controlador PID, agendando os parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} .

O sistema fuzzy assume os valores K_p , K_i e K_d determinados pelo segundo método de Ziegler-Niechols. Onde o erro $e(t)$ e a derivada do erro $\dot{e}(t)$ são as entradas do sistema fuzzy e as saídas são K'_p , K'_d e K'_i , sendo que o ganho K'_i é determinado por meio de uma transformação linear usando valores constantes de $\alpha = 2, 3, 4, 5$ (Zhao et al., 1993) e (de Moura et al., 2019a).

4.3 Sintonia de controladores PID-RNA

Apresenta-se nesta Subsecção, o controlador PID com os parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} determonados por uma RNA-E e ajustado online por regras fuzzy.

4.4 Solução proposta com base em RNA-E

Em termos da solução proposta por RNA-E para ajuste dos parâmetros do PID, o sistema na forma escalar dada na Eq. (10) pode ser escrito na forma matricial como

$$\bar{B}K^{pid} = \bar{a}, \quad (13)$$

onde $\bar{a} = [a_1^e \ a_2^e \ \dots \ a_i^e \ \dots \ a_n^e \ a_{n+1}^e]^T$, com $a_i^e = a_i^{Esp} - a_i$.

A RNA-E é formulada para atuar diretamente nos ajustes dos coeficientes a_i e indiretamente nos coeficientes b_i da FT da planta, determinando os parâmetros do vetor de de ganho K^{pid} .

A solução geral proposta, é desenvolvida para determinar o vetor de ganho K^{pid} que atenda às especificações do projeto. O procedimento consiste em calcular os elementos do vetor K^{pid} , que devem atender aos novos parâmetros a_i^{Esp} da FT da planta.

O sistema de equações que possui um vetor desconhecido K^{pid} e as especificações de projeto a_i^{Esp} , $i = 1; 2; \dots; n+1$ é montado. Na forma escalar, esse sistema de equações é representado por

$$a_i + \langle K^{pid}, \bar{b}_i \rangle = a_i^{Esp}. \quad (14)$$

A formulação do problema apresentada na Eq. (14) é o ponto de partida para o desenvolvimento da solução de problemas de variação paramétrica das FTs, bem como para estabelecer os pontos de operação do sistema de controle⁴.

4.5 Estrutura da RNA-E

Resolvendo o sistema de equações, onde o número de equações é maior que o número de incógnitas ($n > m$), por meio do método dos mínimos quadrados, encontra-se

⁴ Em (Moura et al., 2020) os autores apresentam detalhadamente o método baseado em RNA-E

$$\min_{0 < K^{pid} < \infty} \|e(K^{pid})\|_2^2, \quad (15)$$

onde $e(K^{pid})$ é a função de erro, que é dada por

$$e(K^{pid}) = \bar{B}^T \bar{B} K^{pid} - \bar{B}^T \bar{a}. \quad (16)$$

A solução baseada no princípio de correção de erros, ou seja, as quantidades medidas são comparadas e as estratégias de controle K^{pid} são responsáveis por corrigir ou impor novas condições para os novos pontos de operação do sistema de controle.

Com base na solução pelo método do gradiente, os ganhos de K^{pid} são otimizados, em termos de correção de erros, para compensar o desvio paramétrico da planta. Para minimizar o erro da estrutura de otimização fornecido na Eq. (15), a função de custo do erro é montada a partir da norma euclidiana da Eq. (16). Onde o erro é minimizado pela seguinte função de custo dada por

$$\mathcal{E}(K^{pid}) = \frac{1}{2} \|\bar{B}^T \bar{B} K^{pid} - \bar{B}^T \bar{a}\|_2^2. \quad (17)$$

Inspirado no método de descida mais íngreme, a solução desse problema é fornecida pela regra de treinamento da RNA, que é dada por

$$\frac{\partial \mathcal{E}(K^{pid})}{\partial t} = -\mu \nabla \mathcal{E}(K^{pid}), \quad (18)$$

onde μ é a taxa de aprendizado. O gradiente $\nabla \mathcal{E}(K^{pid})$ da Eq. (18), obtido a partir das derivadas da Eq. (17), é dado por

$$\nabla \mathcal{E}(K^{pid}) = \bar{B}^T \bar{B} (\bar{B}^T \bar{B} K^{pid} - \bar{B}^T \bar{a}). \quad (19)$$

Substituindo o gradiente da Eq. (18) na Eq. (19), obtém-se a equação da regra de treinamento que governa o cálculo do vetor de ganho K^{pid} para os novos parâmetros \bar{a} do polinômio característico, que é dado por

$$\frac{\partial \mathcal{E}(K^{pid})}{\partial t} = -\mu (\mathbb{A} K^{pid} - \mathbb{B} \bar{a}), \quad (20)$$

Sendo $\mathbb{A} = \bar{B}^T \bar{B} \bar{B}^T \bar{B}$ and $\mathbb{B} = \bar{B}^T \bar{B} \bar{B}^T$.

5. EXPERIMENTOS

Nesta Seção apresenta-se os resultados dos experimentos simulados no *software MATLAB*.

5.1 Experimentos no *software MATLAB*

A partir de experimentos simulados baseados em modelos matemáticos descritos em funções de transferências para avaliar o comportamento em respeito a seguir o valor de referência dos controladores PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA.

5.2 Resultados computacionais/simulados

Os resultados experimentais mostram, que o controlador PID-Fuzzy-RNA, obtém o melhor desempenho em respeito a alcançar o objetivo de controle, mantendo-se em regime, sem variações em torno do regime estacionário.

Seguidor de referência: Nas Figuras de 5 - 7, apresenta-se o desempenho dos controladores PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA em seguir o valor de referência para as FTs dadas na Eqs. (1), (2) e (3). Onde pode-se observar que, o controlador PID-ZN, o controlador PID-Fuzzy e o controlador PID-Fuzzy-RNA, alcançaram o objetivo de controle. Porém, o controlador PID-Fuzzy-RNA, obtém o melhor desempenho, para as FTs avaliadas, atendendo as especificações de projetos. Já o controlador PID-ZN aplicado às FTs das Eqs. ((2) e (3)) e o controlador PID-Fuzzy associado com a Eq. (3)), oscilam muito no início, atingindo um *overshoot* acima de 20%, ultrapassando o valor especificado em projetos.

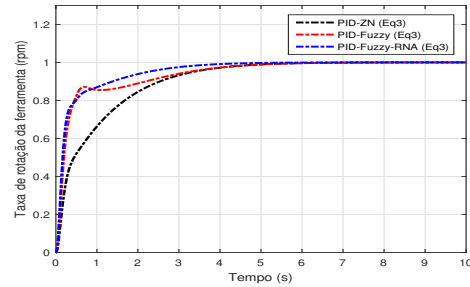


Figura 5. PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA - Eq. (1)

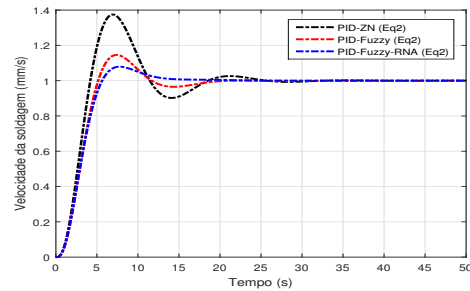


Figura 6. PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA - Eq. (2).

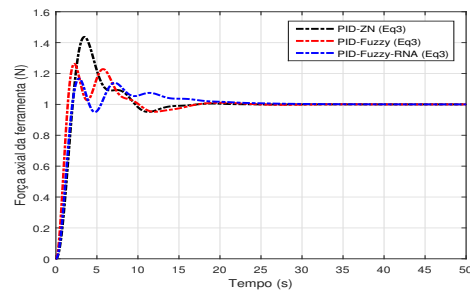


Figura 7. PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA - Eq. (3).

Sinal de perturbação: Nas Figuras de 8 - 10, apresenta-se o desempenho em respeito a resistência às perturbações para os controladores PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA para as FTs dadas na Eqs. (1), (2) e (3). Onde pode-se observar que, o controlador PID-Fuzzy-RNA obtém o melhor desempenho, com pequenas variações em torno do valor de referência.

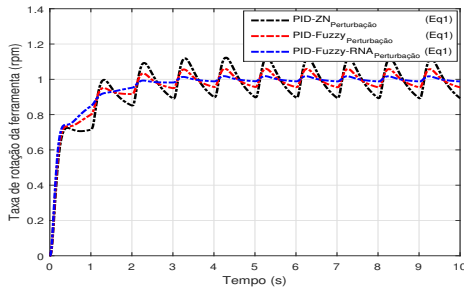


Figura 8. PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA - Eq. (1)

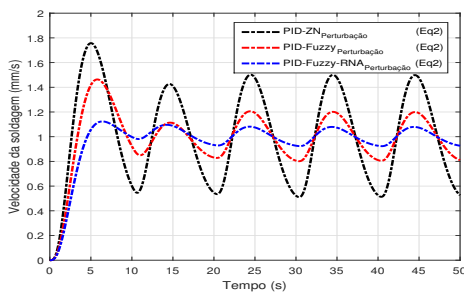


Figura 9. PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA - Eq. (2)

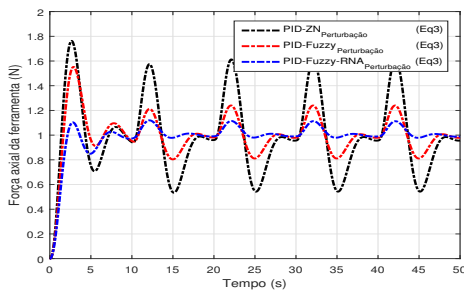


Figura 10. PID-ZN, PID-Fuzzy e PID-Fuzzy-RNA - Eq. (3)

6. CONCLUSÃO

A indústria, geralmente, têm seus processos automatizados em microcontroladores ou CLPs, onde os mais modernos, já trazem embutidos em suas estruturas, um módulo de controle PID e um módulo de sistema *fuzzy*. A sintonia de controlador PID não é uma tarefa trivial, quando pretende-se usar as ações P, I e D simultâneas, pois, qualquer alteração nos parâmetros da planta, pode desestabilizar o sistema de controle. Portanto, o controlador PID-Fuzzy-RNA mostrou-se eficiente e pode ser uma alternativa para resolver esse problema. Pois, a RNA-E determina os parâmetros do vetor de ganhos K^{pid} com base em parâmetros especificados pelo projetista e as regras *fuzzy* promovem uma sintonia fina nos parâmetros K_P , K_I e K_D , garantindo a eficiência do controlador proposto, tanto em relação a alcançar objetivo de controle, quanto a resistir as variações paramétricas inerentes ao processo operacional da planta.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Departamento de Engenharia de Computação da UEMA e ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFMA

pela contribuição técnico/científicos para o desenvolvimento deste trabalho. Reconhecemos a CAPES por promover e apoiar as pesquisas científicas. Também, somos especialmente gratos à FAPEMA pelo incentivo à pesquisa no Estado do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- Åström, K.J., Hägglund, T., and Astrom, K.J. (2006). *Advanced PID control*, volume 461. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society Research Triangle.
- Cederqvist, L. and Öberg, T. (2008). Reliability study of friction stir welded copper canisters containing sweden's nuclear waste. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(10), 1491–1499.
- da Fonseca Neto, J.V., Ferreira, E.F., and Rego, P.H.M. (2013). Online optimal dlqr-dfkg control system design via recursive least-square approach and state heuristic dynamic programming for approximate solution of the hjb equation. 3174–3179.
- de Moura, José Pinheiro, d.F.N.J.V. (2021). *Adjustment of the PID Gains Vector Due to Parametric Variations in the Plant Model in Terms of Internal Product*. IntechOpen.
- de Moura, J.P. and da 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.
- de Moura, J.P., da Fonseca Neto, J.V., and Rêgo, P.H.M. (2019a). A neuro-fuzzy model for online optimal tuning of pid controllers in industrial systems applications to the mining sector. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.
- de Moura, J.P., Rego, P.H.M., and da Fonseca Neto, J.V. (2019b). Online discrete-time lqr controller design with integral action for bulk bucket wheel reclaimer operational processes via action-dependent heuristic dynamic programming. *ISA transactions*, 90, 294–310.
- Gaidhane, P.J., Nigam, M.J., Kumar, A., and Pradhan, P. (2018). Design of interval type-2 fuzzy precompensated pid controller applied to two-dof robotic manipulator with variable payload. *ISA transactions*.
- Garpinger, O. (2015). *Analysis and design of software-based optimal PID controllers*. Lund University.
- Moura, J.P., Neto, J.V.F., Ferreira, E.F.M., 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, J.P.d. (2019). 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) - Tese de doutorado - UFMA. Orientador: João Viana da Fonseca Neto.
- 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.
- Vilanova, R. and Visioli, A. (2012). *PID control in the third millennium*. Springer.
- Zhao, Z.Y., Tomizuka, M., and Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of pid controllers. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(5), 1392–1398.
- Ziegler, J. and Nichols, N. (1943). Process lags in automatic control circuits. *Trans. ASME*, 65(5), 433–443.