

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO ENXAME DE PARTÍCULAS NA SINTONIA DOS PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PID PARA O CONTROLE DE UM SISTEMA PÊNDULO DE FURUTA

GUSTAVO E. SANCHES¹, GRACILIANO A. DAMAZO², BRUNO R. GAMINO³

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia da Computação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Birigui, gustavo.esperanca@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor em Engenharia Elétrica, Professor, IFSP, Campus Birigui, graciliano@ifsp.edu.br

³ Doutor em Engenharia Elétrica, Professor, IFSP, Campus Birigui, bruno.rafael@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.08.02.02-4 Programação Linear, Não-Linear, Mista e Dinâmica

RESUMO: O presente trabalho sugeriu utilizar dois métodos para a sintonia de um controlador proporcional-integral derivativo (PID), no qual é envolvida a técnica clássica de Ziegler-Nichols e o algoritmo enxame de partículas (PSO) aplicado ao Pêndulo de Furuta, que é considerado um sistema fortemente não linear e instável. O sistema possui um braço com uma de suas extremidades acopladas ao eixo de um motor e a outra a um pêndulo, no qual uma perturbação é aplicada a ele, alterando sua posição angular. Sendo assim, o ângulo do braço é constantemente modificado para retornar o pêndulo ao seu arranjo inicial. Para realizar o controle, foi utilizado o PID e seus parâmetros foram ajustados mediante ambos os artifícios. O primeiro método é utilizado para sintonizar controladores PID, já o PSO é uma técnica que auxilia na resolução de problemas de otimização. Por fim, foram comparados os resultados para estudar a eficácia e a vantagem de um método perante o outro. Via simulações, nota-se que os parâmetros encontrados através do algoritmo enxame de partículas (PSO) proporcionaram um melhor controle do sistema. Já o método de Ziegler-Nichols, por ser uma técnica elementar, não pode ser aplicado, devido à natureza do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo enxame de partículas; Pêndulo de Furuta; Controlador PID; Técnica clássica de Ziegler-Nichols; Otimização.

USE OF THE PARTICLE SWARM ALGORITHM IN TUNING THE PARAMETERS OF A PID CONTROLLER FOR THE CONTROL OF A FURUTA PENDULUM SYSTEM

ABSTRACT: The present work suggested to use two methods for tuning a proportional-integral derivative controller (PID), in which the classical Ziegler-Nichols technique and the particle swarm algorithm (PSO) applied to the Furuta Pendulum, which is considered a strongly nonlinear and unstable system, are involved. The system has an arm with one of its ends attached to the axis of a motor and the other to a pendulum, in which a disturbance is applied to it, changing its angular position. Thus, the angle of the arm is constantly modified to return the pendulum to its initial arrangement. To perform the control, the PID was used and its parameters were adjusted by both devices. The first method is used to tune PID controllers, while PSO is a technique that helps in solving optimization problems. Finally, the results were compared to study the effectiveness and advantage of one method over the other. Via simulations, it is noted that the parameters found through the particle swarm algorithm (PSO) provided a better control of the system. Since the Ziegler-Nichols method is an elementary technique, it cannot be applied due to the nature of the system.

KEYWORDS: Algorithm particle swarm; Furuta Pendulum; PID Controller; classical Ziegler-Nichols Technique; Optimization.

INTRODUÇÃO

Conforme Cruz, Guzman e Ortigoza (2018), o estudo do sistema Pêndulo de Furuta é considerado um avanço na área de controle devido à semelhança com braços robóticos. O sistema é constituído por um pêndulo equilibrado verticalmente e, quando ocorre alguma variação angular devido a qualquer tipo de perturbação, o braço que tem uma de suas extremidades acopladas a ele e a outra num motor altera constantemente sua posição angular para retornar o pêndulo novamente ao equilíbrio. Tal sistema é considerado instável em malha aberta, pois, sem as devidas correções de erros durante sua operação ele simplesmente fará um movimento favorável a gravidade e ficará em uma posição totalmente contrária a inicial. Assim configura-se como um sistema em malha fechada, ou seja, para ocorrer o controle efetivo, o controlador terá que analisar as respostas da saída e compará-las com a entrada.

Para a realização do controle, existem vários tipos de controladores. De acordo com Astrom e Hagglund (1995), mais da metade dos controladores industriais são os controladores PID/PID modificados. Este elevado índice de uso se deve à sua simplicidade em questão de manipulação e sintonização de seus parâmetros.

Segundo Ogata (2010), o controlador PID pode ser sintonizado por diversos métodos encontrados na literatura, um dos métodos mais clássicos é conhecido como método de Ziegler-Nichols, porém pode-se utilizar das meta-heurísticas, como o algoritmo de enxame de partículas (PSO) (Luke, 2015). Diante disto, o objetivo deste trabalho é sintonizar o controlador PID através dos métodos citados para controlar o sistema do Pêndulo de Furuta. Foi realizada uma comparação dos controles no tópico de resultados e discussão para analisar qual sintonia é considerada melhor e por quê, fundamentando-se no máximo sobressinal, tempo de estabilização e comportamento inicial de cada resposta.

MATERIAIS E MÉTODOS

Devido à complexidade do sistema, o Pêndulo de Furuta foi representado em espaço de estados. Na Figura 1 é evidenciada a representação do sistema (Moreira et al., 2021).

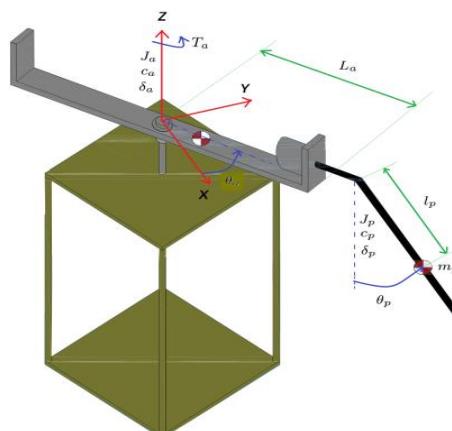


FIGURA 1. Representação do Pêndulo de Furuta.

Na Equação (1) é exibida a matriz A da representação em espaço de estados, adiante são apresentadas as matrizes B e C através da Equação (2) e Equação (3) respectivamente. A primeira matriz representa a matriz de transição de estado, ou seja, ela descreve a dinâmica interna do sistema. Já as matrizes B e C representam a matriz de entrada e de saída do sistema por essa ordem (Moreira et al., 2021).

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{m_p^2 l_p^2 L_a g}{\Delta} & -\frac{\lambda_p c_a}{\Delta} & -\frac{l_p m_p L_a c_p}{\Delta} \\ 0 & \frac{\lambda_a m_p l_p g}{\Delta} & -\frac{m_p l_p L_a c_a}{\Delta} & -\frac{\lambda_a c_p}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\overline{B_u} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_T \lambda_p}{\Delta} \\ \frac{K_T m_p l_p L_a}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\overline{C_y} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3)$$

Nas matrizes descritas com o sistema linearizado, são expostos os seguintes parâmetros: m_p , representa massa da haste; l_p , caracteriza a posição do centro de massa da haste; L_a , reproduz o comprimento do braço; J_p , configura o momento de inércia da haste; J_a , corresponde momento de inércia do braço; c_p e c_a , se equivalem ao coeficiente de atrito viscoso da haste e coeficiente de atrito viscoso do braço respectivamente; K_T descreve a contante de torque equivalente; por fim, g , descreve a aceleração da gravidade (Moreira et al., 2021). Finalmente, são apresentados também os seguintes parâmetros: λ_a , λ_p e Δ caracterizados através da Equação (4), Equação (5) e Equação (6) respectivamente.

$$\lambda_a = m_p L_a^2 + J_a \quad (4)$$

$$\lambda_p = m_p l_p^2 + J_p \quad (5)$$

$$\Delta = J_p m_p L_a^2 + J_a m_p l_p^2 + J_a J_p \quad (6)$$

Adiante, Nise e Ribeiro (2009) demonstram que a função de transferência do sistema é alcançada a partir da forma de espaço de estados mediante a Equação (7).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (7)$$

A função de transferência do sistema será a função utilizada para realizar o estudo de sua estabilidade e a tentativa de seu controle. Para a aplicação dela, será considerada a matriz D como matriz nula.

Empregando a Equação (7) com as matrizes apresentadas é encontrada a função de transferência do sistema representada pela Equação (8).

$$\frac{s^2(K_T \lambda_p) + \frac{S}{\Delta^2}(\lambda_a \lambda_p K_T c_p - m_p^2 l_p^2 L_a^2 c_p K_T) + \frac{1}{\Delta^2}(m_p^3 l_p^3 L_a^2 K_T g - \lambda_a \lambda_p K_T m_p l_p g)}{s^4 + \frac{S^3}{\Delta}(\lambda_a c_p + \lambda_p c_a) + \frac{S^2}{\Delta^2}Z + \frac{S}{\Delta^2}(m_p^3 l_p^3 L_a^2 c_a g - \lambda_a \lambda_p m_p l_p c_a g)} \quad (8)$$

Considerando a Equação (9) que representa Z , para fins de simplificação.

$$Z = \lambda_a \lambda_p c_a c_p - \Delta \lambda_a m_p l_p g - m_p^2 l_p^2 L_a^2 c_a c_p \quad (9)$$

Ademais, considera-se a Equação (10) que indica a função de transferência do controlador PID (Ogata, 2010).

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (10)$$

O controlador possui três tipos de parâmetros. Na Equação (10) são apresentados K_p , que é o ganho proporcional do controlador e T_i , T_d referenciando o tempo integral e derivativo respectivamente. Por fim, com a conquista das funções de transferência podem-se aplicar os métodos de Ziegler-Nichols e o algoritmo PSO para a sintonização dos parâmetros do PID. Para aplicar o método de Ziegler-Nichols será preciso considerar o controlador PID somente com o controlador proporcional ativo (parâmetros $K_p > 0$, $T_i \rightarrow \infty$ e $T_d = 0$) em malha fechada. Em seguida será aplicado o critério de Routh-Hurwitz para encontrar para qual valor de K_p o sistema será marginalmente estável, obtendo o K_{cr} (ganho crítico) e P_{cr} (período crítico), possibilitando sintonizar os 3 parâmetros do controlador (Ogata, 2010). Já o algoritmo PSO é inspirado no comportamento social de animais, como pássaros em um bando ou peixes em um cardume. Ele é usado para encontrar soluções ótimas em problemas de otimização, mediante um processo iterativo que envolve o movimento e a atualização das partículas no espaço de soluções. Para implementá-lo, foi utilizado o software livre GNU Octave e a elaboração foi realizada através do autor. Sua implementação baseia-se na criação randômica de n partículas que possuirão uma velocidade igualmente randômica. Posteriormente, através da função objetivo, é calculada a diferença entre a entrada desejada para o sistema e a saída que ele está retornando, se tratando do erro absoluto ao longo do tempo (IAE). A análise no algoritmo também será feita com o sistema junto ao controlador em malha fechada. Com a função objetivo, é possível determinar qual a melhor posição da partícula que compõe o enxame e qual a melhor posição ocupada por cada partícula, denominadas G_{best} e P_{best} respectivamente. Por fim, para cada partícula é analisada nesta função e é verificado se foram encontradas melhores G_{best} e P_{best} para atualizá-los, ou caso contrário, só será atualizada a posição de cada partícula. Conclui-se o algoritmo exibindo como solução G_{best} que será a melhor partícula do enxame. Como o algoritmo tentará auxiliar na sintonização do controlador PID, G_{best} retornará os parâmetros K_p , T_i e T_d . (Yarat; Senan; Orman, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores adotados para cada parâmetro estão exibidos na Tabela 1, consequentemente aplicando-os na função de transferência do sistema, Equação (8), obtemos a Equação (11) que será utilizada para as devidas simulações e análise de estabilidade utilizando os métodos de controle citados.

TABELA 1. Valores adotados para os parâmetros do sistema pêndulo de Furuta.

Parâmetro físico	Valor	Unidade (SI)
m_p	0,098	K_g
l_p	0,111	m
L_a	0,210	m
J_p	0,00219	$K_g \cdot m^2$
J_a	0,00777	$K_g \cdot m^2$
c_p	0,000243	$N \cdot m \cdot s/rad$
c_a	0,00272	$N \cdot m \cdot s/rad$
K_t	0,3589	$N \cdot m/A$

$$G(s) = \frac{34s^2 + 2.432s + 1067}{s^4 + 0.3396s^3 + 35.96s^2 + 8.085s} \quad (11)$$

Utilizando a Equação (11) e realizando a retroalimentação do sistema, verifica-se seu comportamento através da Figura 2 na primeira simulação. Da mesma forma, foi iniciado o método de Ziegler-Nichols, entretanto quando foi analisada a condição para que K_p torne o sistema marginalmente estável, resultou em um ganho complexo, o que não existe, portanto o método clássico infelizmente não foi aplicável ao sistema. Entretanto, para ter um resultado para comparação, foi encontrado o valor de cada parâmetro através de tentativa e erro, buscando o melhor comportamento possível para um sistema que recebeu a entrada degrau de 0,5 rad. Através das tentativas, chegou-se em $K_p = 0,5$, $T_i = 0,556$ segundos e $T_d = 0,16$ segundos. Agora no que se refere ao algoritmo PSO, foram realizados vários

testes, pois como advertido, cada execução normalmente fornecerá respostas diferentes, sendo assim, foi escolhida a melhor resposta, considerando cada parâmetro apresentado e ponderando as possibilidades de implementação. Após os testes do PSO, foi encontrado um $K_p = 9,7665$, $T_i = 3,3747$ segundos e $T_d = 1,2934$ segundos, considerando K_p limitado entre 0,5 e 100, T_i e T_d entre 0 e 20 segundos $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ e $T_d = \frac{K_d}{K_p}$. Na Figura 2 também é exibido o comportamento do sistema com os parâmetros do controlador sintonizados através de ambos os métodos.

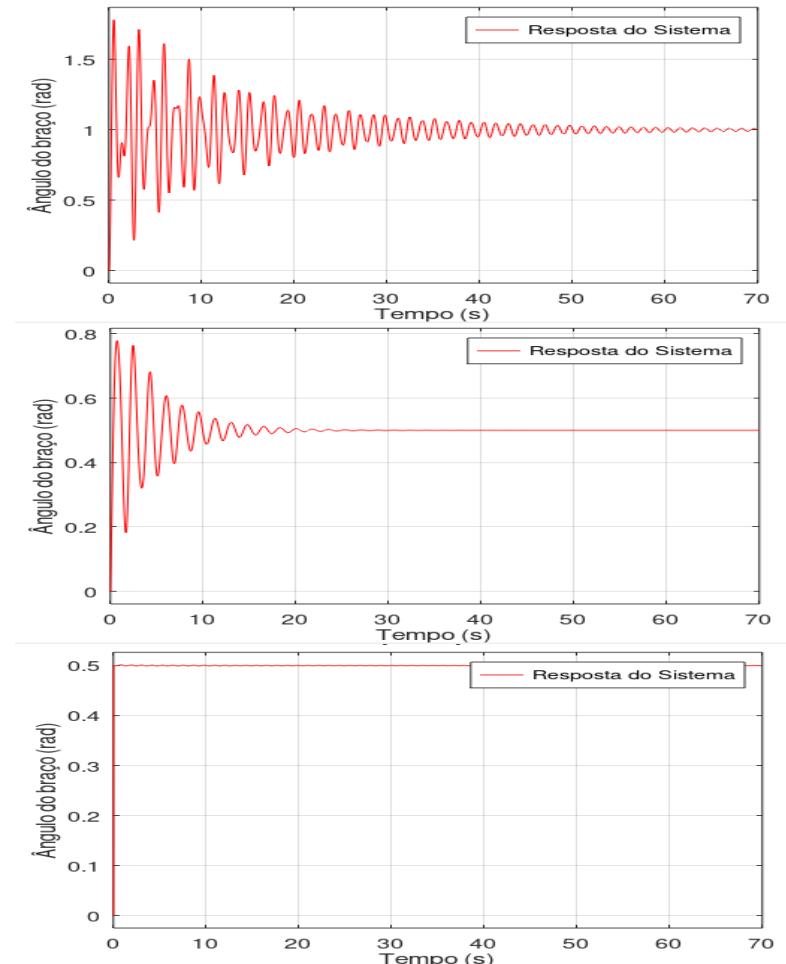


FIGURA 2. Resposta do sistema Pêndulo de Furuta em malha fechada sem controle e com PID sintonizado por tentativa e erro/PSO.

Nota-se através da Figura 2 (primeira simulação) que o sistema apresenta muitas oscilações e, por mais que elas diminuam, ele não se estabilizou durante os 70 segundos simulados. Por mais que houve diminuição na amplitude de cada oscilação, ele continua tentando se estabilizar. Além disso, na Figura 2, nota-se que, através da tentativa e erro (segunda simulação), o sistema é controlado pelo PID, entretanto, possui uma resposta inicial inconsistente, expõe um máximo sobressinal de aproximadamente 56% e o seu tempo de estabilização está por volta dos 35 segundos. Porém, no que se refere ao algoritmo PSO (terceira simulação), nota-se que agora o sistema controlado expõe um máximo sobressinal de aproximadamente 1%, tempo de estabilização por volta dos 20 segundos e uma resposta inicial moderada mediante a entrada degrau de 0,5 rad.

CONCLUSÕES

Confrontando os resultados obtidos nota-se que devido à natureza instável e fortemente não linear do sistema, além de toda a sua complexidade foi inviável a aplicação do método clássico de Ziegler-Nichols, entretanto quando aplicado o algoritmo PSO foi propiciado um melhor controle, com um máximo sobressinal expressivamente menor e um tempo de estabilização inferior comparado com os

parâmetros obtidos via tentativa e erro que substituiu a técnica clássica. Com isso, nota-se que o algoritmo de enxame de partículas é uma ferramenta importante na sintonização do controlador PID, ou seja, futuramente poderá ser utilizado até mesmo para a sintonização de um controlador mais robusto, capaz de realizar um melhor controle, pois utilizando o PID por mais que o tempo de estabilização foi menor, ainda é um tempo considerável, visto que, se trata de um sistema rápido e como o controlador em questão é mais utilizado em indústrias controlando sistemas mais lentos como o de controle de temperatura, implica que o controlador recebe uma informação da posição do pêndulo, porém ele já está em outro ponto de operação, dificultando a estabilização e podendo tornar a ação de controle ineficaz.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Gustavo Esperança Sanches procedeu com a pesquisa, elaborou a escrita e realizou os cálculos e simulações do trabalho. Graciliano Antonio Damazo atuou como orientador, fornecendo suporte integral para a execução do trabalho com foco na modelagem matemática do sistema e na aplicação do método de Ziegler-Nichols. Bruno Rafael Ghamo atuou como colaborador, cooperando através do suporte fornecido para a execução do trabalho, com ênfase na escrita do projeto e no desenvolvimento do Algoritmo enxame de partículas (PSO).

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSP e ao programa PIBIFSP pelo auxílio financeiro, tornando possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANTONIO-CRUZ, Mayra; HERNANDEZ-GUZMAN, Victor Manuel; SILVA-ORTIGOZA, Ramon. Limit cycle elimination in inverted pendulums: Furuta pendulum and pendubot. **IEEE Access**, v. 6, p. 30317-30332, 2018.

KARL JOHAN °ASTRÖM; TORE HÄGGLUND. **PID controllers [theory, design, and tuning]**. [s.l.] Research Triangle Park, Nc Instrument Society Of America, 1995.

LUKE, S. **Essentials of metaheuristics : a set of undergraduate lecture notes**. San Francisco: Editor No Identificat, 2015.

MOREIRA, Ângelo MF; ORDOÑEZ, Bernardo; ARAÚJO, Humberto X. Estabilização e controle do pêndulo furuta: estudo das técnicas controle H2, controle H? e LQR via LMI. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI**. 2021.

NISE, N.; RIBEIRO, F. **Engenharia de sistemas de controle**. Rio De Janeiro: Ltc, 2009.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2010. 824 p.

SERHAT YARAT; SIBEL SENAN; ORMAN, Z. A Comparative Study on PSO with Other Metaheuristic Methods. **International series in management science/operations research**, p. 49–72, 1 jan. 2021.