

Otimização Multiobjetivo Aplicada no Controle de um Sistema Não Linear do Tipo Aeropêndulo

Ricardo Massao Kagami* Miguel Angonese Ramon Martinez Pereira* Sullivan Patrick von Ganter* Gilberto Reynoso-Meza* Roberto Zanetti Freire***

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS), Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, PR, (e-mail:ricardo.zanotto@pucpr.br; ramonrmp@gmail.com; sullivan.ganter@gmail.com; g.reynosomeza@pucpr.br; roberto.freire@pucpr.br).*

***Escola Técnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (TECPUC), PUCPR, Curitiba, PR, (e-mail: miguel.angonese@tecuc.com.br)*

Abstract: Control tuning is a constantly studied problem, both for applications in the industrial and academic areas. The use of multiobjective optimization, supported by metaheuristics to aid in this task has been increasingly common, since it enables the achievement of multiple solutions in a simpler and faster procedure when compared to classical methods. In this paper, Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is used to obtain the gains of a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller with aims to stabilize an Aeropendulum nonlinear system, identified by a Hammerstein-Wiener model. The obtained set of solutions by the NSGA-II algorithm was not viable for individual analysis and simulation, due to its high quantity, therefore the multicriteria decision-making method Analytic Hierarchy Process (AHP) was adopted, the solution suggested as preferential by the AHP method presented quick settling time and minimum overshoot.

Resumo: A parametrização de controladores é um problema constantemente estudado, tanto para aplicações na área industrial, quanto acadêmica. A utilização da otimização multiobjetivo, apoiada por metaheurísticas no auxílio a esta tarefa tem sido cada vez mais comum, visto que possibilita a obtenção de múltiplas soluções de maneira mais simples e rápida, quando confrontada por métodos clássicos. Neste artigo, o Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada II (NSGA-II) é utilizado para a obtenção dos ganhos de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) cujo propósito é estabilizar um sistema não linear aeropêndulo, identificado por um modelo Hammerstein-Wiener. O conjunto de soluções obtido pelo algoritmo NSGA-II mostrou-se inviável para análise e simulação individual devido à grande quantidade de soluções encontradas, de modo que o método de auxílio à tomada de decisão multicritério Processo Analítico Hierárquico (AHP), foi adotado, a solução apontada como preferencial pelo método AHP apresentou rápido tempo de estabilização e mínimo de sobressinal.

Keywords: Multiobjective Optimization; PID Control; Hammerstein-Wiener model; NSGA-II; Nonlinear System; AHP.

Palavras-chaves: Otimização Multiobjetivo; Controle PID; Modelo Hammerstein-Wiener; NSGA-II; Sistema Não Linear; AHP.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de controladores do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é tida como uma das principais soluções empregadas envolvendo problemas industriais de controle, alguns dos interesses por seu emprego que podem ser mencionados são a simplicidade de projeto, a eficiência na aplicação, a usabilidade e a robustez da solução (Castrucci et al., 2011).

Sendo diversas as técnicas de parametrização clássica de ganhos de controladores PID, desde a apresentada por Ziegler & Nichols (1942), e estando ainda como uma das mais conhecidas juntamente às técnicas de Chien; Hrons & Reswick

(1952), Cohen & Coon (1953) e Método do Modelo Interno (Garcia & Morari, 1982), ainda assim, o estudo de estratégias de parametrização de controladores PID, tem permanecido em constante relevância nas áreas, tanto acadêmica, quanto industrial (Åström & Hägglund, 2001; Shahrokhii & Zomorodi, 2010; Sen et al., 2015; Chidambaram & Saxena, 2018).

Contudo, tais métodos de sintonia direta de controladores, quando confrontados com problemas não lineares, não são capazes de atender critérios de desempenho estabelecidos para o correto funcionamento de tais sistemas, sendo portanto necessária a utilização de estratégias mais elaboradas para sua

execução, tais como a utilização de métodos de otimização apoiados por metaheurísticas (Mendes et al., 2017).

A aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo na parametrização de controladores acabou por tornar-se uma importante ferramenta para a engenharia de controle, estando sujeita à essência de um problema de otimização multiobjetivo (Reynoso-Meza et al., 2014).

Pode-se citar ainda, como uma das principais vantagens de utilização de procedimentos de otimização multiobjetivo, a capacidade de obtenção de múltiplas soluções potenciais em uma única execução, reduzindo a complexidade apresentada por diversos problemas multiobjetivo (Coello et al., 2007).

O presente trabalho apresenta um problema referente a um sistema aeropêndulo com comportamento não linear, cujo objetivo é controlá-lo através de um controlador PID com ganhos estáticos, sendo utilizado para tal, procedimentos de otimização apoiados por uma metaheurísticas multiobjetivo, das principais contribuições apresentadas neste trabalho, tem-se ainda a utilização da identificação do sistema por um modelo Hammerstein-Wiener de modo a simplificar o procedimento de modelagem, quando comparado aos métodos apresentados na literatura, ressaltando que estruturas simples de controle como o PID apresentam bom desempenho quando empregados processos de parametrização adequados.

A combinação da estrutura não linear e a utilização da otimização multiobjetivo possibilita a obtenção de múltiplas soluções que satisfaçam diversos critérios em diferentes níveis, permitindo a escolha da solução mais adequada de acordo com as preferências do projetista.

A próxima seção deste artigo apresenta a descrição do problema não linear de um sistema aeropêndulo, considerado para a realização deste trabalho. A seção 3 apresenta a formulação do problema multiobjetivo bem como a técnica de otimização adotada para a resolução do problema. Na seção 4 são descritos os resultados desta pesquisa e, na sequência as conclusões e trabalhos futuros na seção 5.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA AEROPÊNDULO

O sistema não linear do tipo aeropêndulo é um problema clássico da engenharia de controle, sendo diversos os trabalhos envolvendo sua aplicação (Enikov et al., 2010; Enikov & Campa, 2012; Gonçalves et al., 2016; Habib et al., 2013, 2017; Job & Jose, 2015), contudo, os procedimentos apresentados e relacionados à resolução do problema dispõem grande esforço na modelagem do sistema não linear e estimação de seus parâmetros, adotando técnicas clássicas para a obtenção dos ganhos dos controladores.

De modo a obter um controlador PID, focando-se na otimização do desempenho do processo a ser controlado, uma planta foi desenvolvida e testes em malha aberta foram realizados com intuito de obter seu comportamento através de um método de identificação de sistemas não lineares, sendo apresentados nas subseções seguintes.

2.1 Descrição do Processo

O sistema aeropêndulo considerado neste estudo foi modelado conforme Fig. 1(a) enquanto a planta real apresentou pequenas variações de projeto, conforme Fig. 1(b), constando com uma estrutura de hélice alternativa e um sistema de contrapeso para alteração da dinâmica do processo e limitação do ângulo de atuação.

O sistema, alimentado por uma tensão de 30 VDC é controlado por um sistema de modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) no intervalo [0, 255] fornecido através de um microcontrolador e uma ponte H para amplificação da corrente.

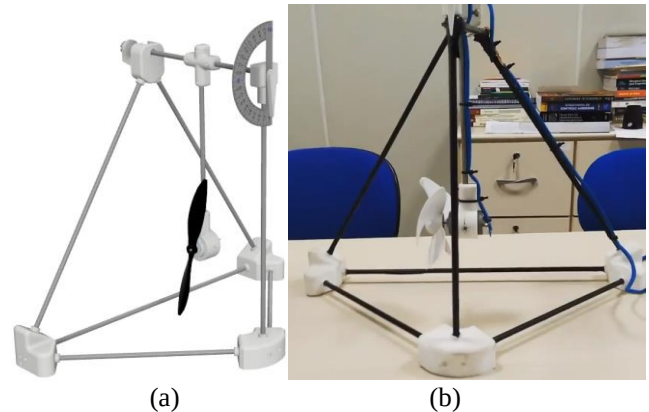


Fig. 1. Apresentação do aeropêndulo: (a) projeto; (b) planta.

O transdutor de saída é constituído por um potenciômetro implementado como um divisor de tensão, com tensão contínua variando de 0 a 5 V, sendo lido como um sinal digital no intervalo [0, 1023], possuindo o potenciômetro intervalo de atuação de 270°, cada degrau do sinal analógico corresponde a uma amplitude de aproximadamente 0,2637°. Contudo, devido à forma de construção, o intervalo de operação do aeropêndulo se limitou a 109°, sendo 100° de atuação efetiva (482 na leitura do sinal digital), e um recuo de 9° (76 no sinal digital), em relação ao estado de repouso 0° (113 para o sinal digital), conforme apresentado na Fig. 2.

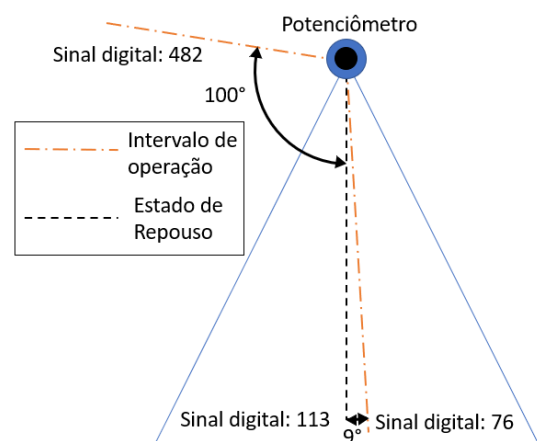


Fig. 2. Intervalo de operação do aeropêndulo em relação ao estado de repouso.

2.2 Identificação do Sistema Não Linear

Para obtenção da resposta do sistema optou-se pela utilização de um sinal aleatório, com período de amostragem de 100 ms,

restrito à amplitude do PWM, a cada 10 s, tempo este suficiente para a estabilização da planta, com tempo total de 1240 s de teste. Ambos sinais, de entrada PWM e de saída do sinal digital podem ser vistos através da Fig. 3 para os primeiros 200 s.

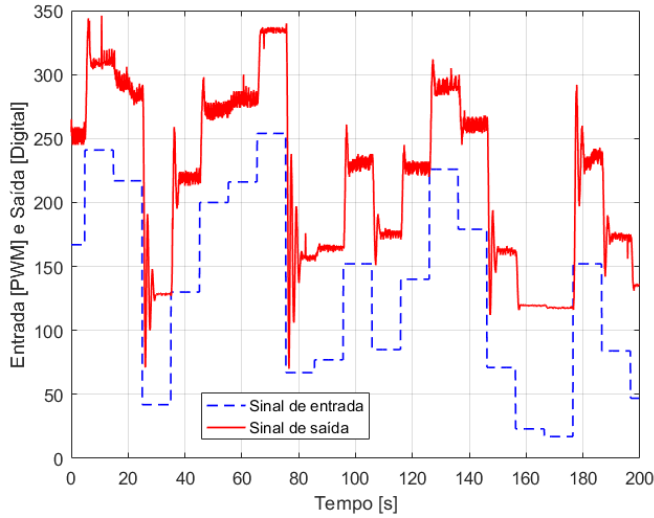


Fig. 3. Sinais de entrada e saída obtidos do aeropêndulo para a identificação do sistema.

Apesar da existência de diversos modelos não lineares possível de aplicação na identificação de sistemas deste tipo, certamente os modelos orientados a blocos são os mais utilizados, principalmente devido ao fato de serem estruturas simples e facilmente interpretáveis, apresentando ainda bom desempenho confrontados com sistemas reais (Giri & Bai, 2010; Schoukens et al., 2015).

Dentre os modelos orientados a blocos mais populares estão os sistemas Hammerstein (Castro-Garcia et al., 2018; Cheng et al., 2018, 2019) e os sistemas Wiener (Trinh et al., 2019). A estrutura chamada de Hammerstein-Wiener é um modelo orientado por blocos composto por duas partes não lineares, uma na entrada e uma na saída, e uma parte linear entre os dois blocos (Zhu, 2001), sendo sua utilização bem estabelecida na área de identificação, presentes nos mais diversos estudos (Li & Ren, 2018; Schoukens et al., 2015).

Em posse dos dados obtidos conforme o método descrito, optou-se pela utilização da estrutura de um modelo Hammerstein-Wiener, tal como representado na Fig. 4.



Fig. 4. Representação de um modelo Hammerstein-Wiener.

O processo de identificação do modelo apresentou um Erro Final de Predição de 93,86 e Erro Médio Quadrático de 93,09, aproximando-se em 87,1% dos dados originais conforme apresentado na Fig. 5, para os primeiros 200 s. A estrutura de não linearidade de entrada é apresentada pela Fig. 6, seguida pela resposta ao degrau unitário da parte linear do modelo Hammerstein-Wiener através da Fig. 7.

Nota-se ainda, através das Figs. 6 e 7 descontinuidades em u_{NL} e y_{NL} , na entrada e na saída, nas proximidades dos valores 50 e 1, respectivamente. Tais comportamentos são caracterizados pelo método de estimação do modelo, buscando realizar a aproximação das não linearidades através de partições lineares nos conjuntos de dados.

Finalmente, na Fig. 8, é apresentada a estrutura de aproximação das não linearidades de saída. A função de transferência da parte linear do modelo Hammerstein-Wiener obtido é descrito por:

$$FT(s) = \frac{10,72s^5 - 275,6s^4 + 5571s^3 - 5,798e4s^2 + 2,713e5s + 385,2}{s^6 + 16,14s^5 + 356s^4 + 2546s^3 + 6591s^2 + 2,028e4s + 26,93} \quad (1)$$

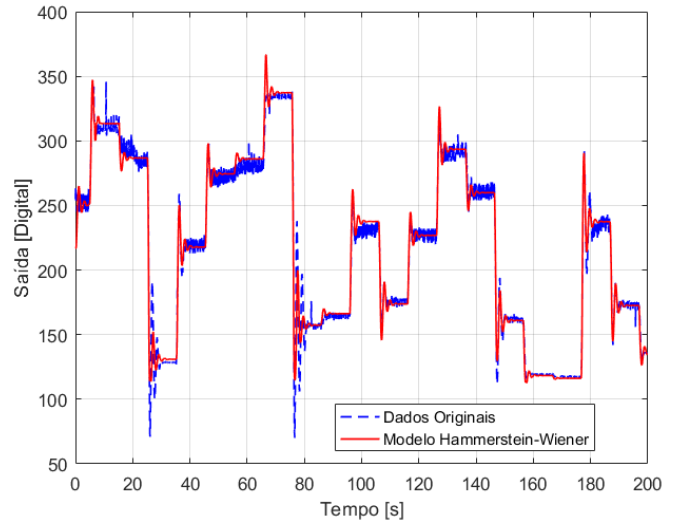


Fig. 5. Aproximação dos dados originais pelo modelo Hammerstein-Wiener.

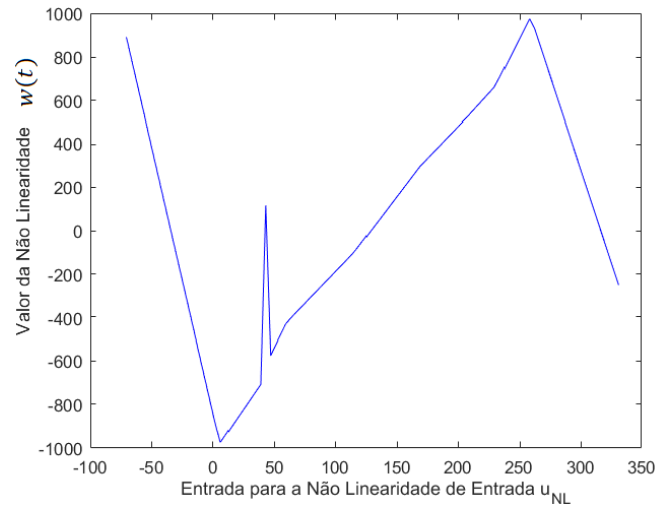


Fig. 6. Estrutura de não linearidade de entrada.

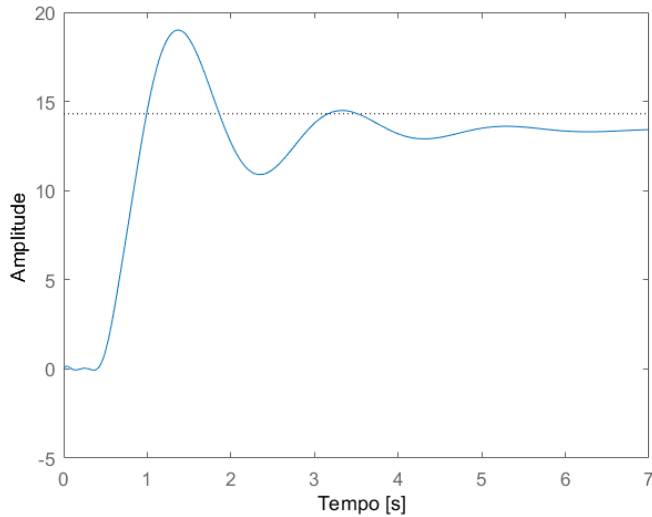


Fig. 7. Resposta ao degrau unitário da parte linear do sistema.

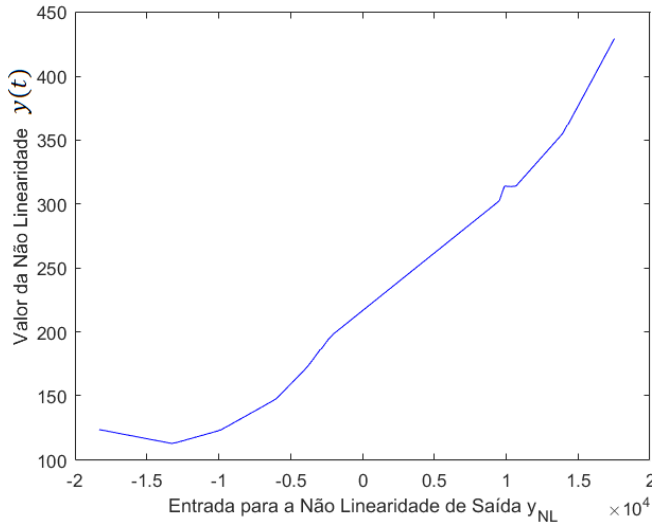


Fig. 8. Estrutura de não linearidade de saída.

Para integração da parcela linear às parcelas não lineares do modelo, foi utilizado o software MATLAB.

3. OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO NA PARAMETRIZAÇÃO DE CONTROLADORES

Nesta seção é descrita a estratégia de parametrização do controlador PID, foco deste estudo. Para tal, considerou-se os procedimentos para projeto de otimização multiobjetivo para parametrização de controladores, apresentado por Reynoso-Meza et al. (2017), o qual consiste de três macro etapas: a formulação do problema multiobjetivo, a qual considera o modelo paramétrico e relaciona as funções custo de otimização; o processo de otimização multiobjetivo através de um algoritmo evolucionário multiobjetivo e consequente obtenção do conjunto de possíveis soluções; e a etapa de tomada de decisão multicritério, apoiada por um método de auxílio à tomada de decisão sobre o conjunto de soluções não dominadas, com objetivo de selecionar uma única solução factível a ser aplicada, tais etapas são apresentadas nas subseções seguintes.

3.1 Definindo o Problema Multiobjetivo

Tendo-se o modelo do sistema conforme apresentado na subseção 2.2, pode-se estruturar o modelo paramétrico que será utilizado no processo de otimização através da estrutura em diagrama de blocos apresentada na Fig. 9.

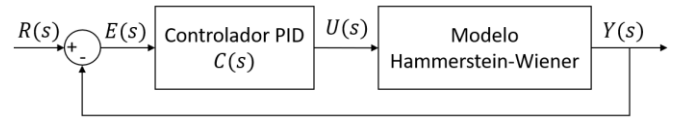


Fig. 9. Diagrama de blocos do modelo paramétrico.

No diagrama de blocos, $R(s)$ representa o sinal de referência, $E(s)$ o erro, que é calculado através da diferença entre o sinal de referência e o sinal de resposta do sistema $Y(s)$. O termo $U(s)$ o sinal de controle fornecido ao sistema pelo controlador $C(s)$ do tipo PID, descrito conforme:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \frac{N}{s + N} \quad (2)$$

onde K_p é o ganho proporcional, K_i o ganho da parte integral, K_d o ganho derivativo e N o filtro derivativo.

Com o objetivo de obter um controlador PID com parâmetros otimizados, duas funções custo foram consideradas, o valor da integral do erro absoluto (IAE) e a variação total do sinal de controle (IAVU), respectivamente representados por $J_1(\theta)$ e $J_2(\theta)$:

$$J_1(\theta) = \int |e(t)| dt \text{ e } J_2(\theta) = \int \left| \frac{dU(s)}{dt} \right| dt. \quad (3)$$

A definição do problema de otimização é dada então por:

$$\min_{\theta} J(\theta) = [J_1(\theta), J_2(\theta)] \quad (4)$$

onde θ denota o vetor de parâmetros:

$$\theta = [K_p, K_i, K_d, N], \quad (5)$$

estando sujeitos ao intervalo de restrição $[0,10]$, definido a partir do ganho crítico do lugar das raízes.

3.2 Processo de Otimização Multiobjetivo

Sendo diversas e interessantes as aplicações e resultados apresentados através da aplicação do algoritmo genético de classificação não dominada II (NSGA-II – *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*), relacionados à área de engenharia de controle (Esmaili et al., 2018; Deng et al., 2019; Kagami et al., 2020), optou-se por sua utilização no desenvolvimento desta pesquisa, considerando o algoritmo NSGA-II multiobjetivo original, conforme apresentado no Algoritmo 1 (Deb et al., 2002).

Fora considerado, para o tamanho da população, como 100 indivíduos, o critério de parada baseado no número de gerações, igual a 100, e a probabilidade das operações genéticas foram consideradas conforme o proposto por Deb et al. (2002), sendo para o cruzamento de 90% e, para mutação, o inverso do número de variáveis de decisão, portanto, 25%; considerou-se ainda 10 repetições do processo de otimização, de modo a melhor povoar o conjunto de soluções não dominadas, evitando assim manter-se preso a mínimos locais.

Algoritmo 1 NSGA-II

- 1: Inicializa a população
- 2: Avalia as funções custo para os indivíduos
- 3: Classifica os indivíduos baseado na não dominância
- 4: Calcula a distância entre os indivíduos
- 5: **Enquanto** (Critério de Parada não satisfeito)
- 6: Seleciona os indivíduos usando torneio binário para o grupo de acasalamento
- 7: Aplica os operadores genéticos, cruzamento e mutação ao grupo de acasalamento
- 8: Avalia as funções objetivo para os novos indivíduos
- 9: Combina os novos indivíduos com a geração atual
- 10: Classifica os indivíduos baseado na não dominância
- 11: Calcula a distância entre os indivíduos
- 12: Seleciona as melhores soluções até completar o tamanho da população
- 13: **Fim Enquanto**
- 14: Entrega as soluções não dominadas

Através dos procedimentos descritos anteriormente, obteve-se um conjunto de soluções não dominadas composto por 251 possíveis soluções cuja distribuição sobre os eixos das funções custo é apresentada na Fig. 11.

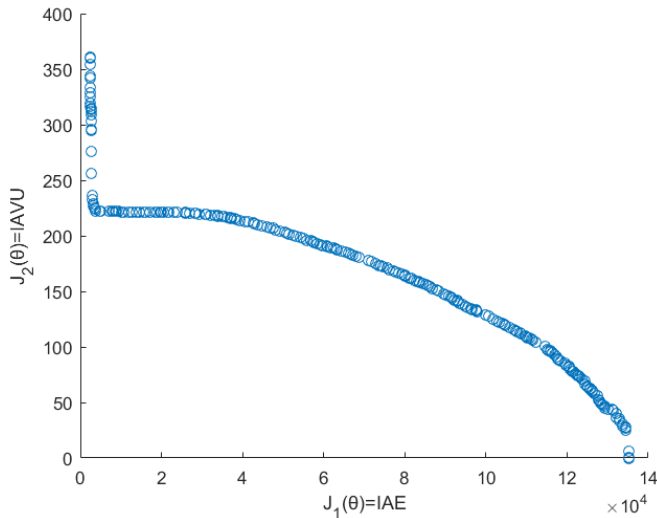


Fig. 11. Conjunto de soluções não dominadas para as funções custo otimizadas.

3.3 Tomada de Decisão Multicritério

Tendo-se o conjunto de soluções não dominadas, conforme apresentado anteriormente na Fig. 11, a etapa de tomada de decisão multicritério refere-se à utilização de metodologias e técnicas que possibilitem a escolha de uma única solução factível para implementação, em geral, os métodos de auxílio à tomada de decisão refletem as preferências do tomador de decisão para com o conjunto de possíveis soluções.

De modo a reduzir o conjunto de soluções a ser avaliado, aplicou-se um critério de poda, segundo o qual, todas as possíveis soluções cujo valor da função custo IAE apresentasse-se acima do limiar de 36.000 foram excluídas,

pois podem ser consideradas como soluções não factíveis, uma vez que o tempo de resposta, para que o sistema atinja a referência, é significativamente superior a 60 s, não sendo desejável para a aplicação.

O novo conjunto de possíveis soluções, obtido após a poda, relativo aos eixos das funções custo, é apresentado na Fig. 12. Após o procedimento realizado, existem ainda 72 alternativas factíveis para aplicação no sistema, sendo inviável a análise individual para seleção da solução.

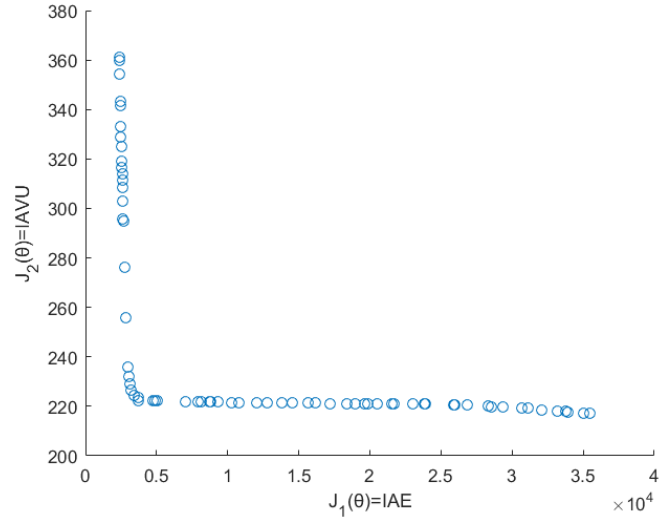


Fig. 12. Conjunto das soluções factíveis para as funções custo otimizadas.

Partindo-se dos critérios de *IAE* e *IAVU* utilizados como critérios de otimização para as funções custo do algoritmo NSGA-II, foram incluídas outros três critérios para análise, *Rt* [s] referente ao tempo de subida que o sistema leva para que a resposta saia de um patamar de 10% para 90% do valor em estado estacionário; *Mp* [%] o máximo valor alcançado pelo sistema após a mudança da referência; e *Tst_{2%}* [s] o tempo de estabilização, ou seja, o tempo que o sistema leva para que, após uma mudança na referência, o mesmo atinja um erro menor que 2% de erro do valor desejado.

O acréscimo de três novos critérios de avaliação enriquece o ambiente de decisão, permitindo a utilização de métodos de auxílio à tomada de decisão mais sofisticados. Neste sentido, optou-se pela adoção do método de Processo Analítico Hierárquico (AHP - *Analytic Hierarchy Process*).

O método AHP, fora apresentado inicialmente por Saaty (1990) como sendo um método de auxílio à tomada de decisão multicritério hierárquico cuja estrutura principal, dá-se na comparação dos critérios par-a-par, considerando este princípio, a estrutura para a seleção do controlador é apresentada na Fig. 13, sendo que as alternativas são apresentadas no Nível 3 e o objetivo é obtido quando chega-se no Nível 0, sendo que as comparações acontecem entre níveis de 3 a 1, inclusive.

Como mencionado, o método AHP constitui-se de uma estrutura de comparação por pares, através de um valor atribuído entre estes, variando de [1, 9], sendo 1 o valor representativo de igual importância entre os critérios comparados e 9 o valor de extrema importância de um critério

em relação ao outro, de acordo com as preferências do tomador de decisão (Saaty, 2008).

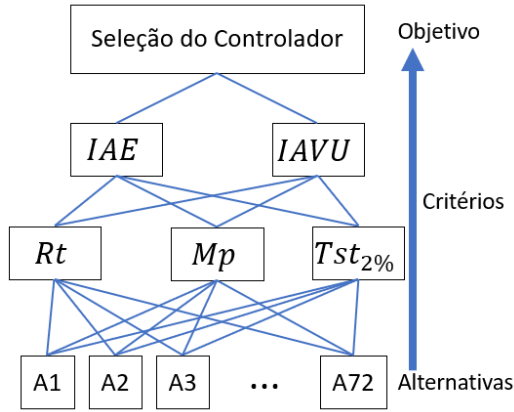


Fig. 13. Estrutura AHP para a seleção do controlador.

Para a estrutura apresentada, iniciando-se no Nível 1, foram atribuídos *IAE* fortemente mais importante (valor 5) que *IAVU*; no Nível 2, *Rt* fortemente mais importante (valor 5) que *Mp*, *Rt* moderadamente mais importante (valor 3) que *Tst_{2%}*, e *Tst_{2%}* fortemente mais importante (valor 5) que *Mp*. Para o terceiro nível, a comparação por pares das alternativas não foi necessária, uma vez que, sendo todos os critérios quantitativos, estes foram normalizados conforme a definição apresentada pelo método (Saaty, 1990):

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad \text{onde } j = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

sendo a o valor do critério i para a alternativa j .

Para uma explicação detalhada do funcionamento do método AHP, veja (Saaty, 2008).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Considerando os procedimentos descritos ao longo deste artigo, a obtenção dos ganhos do controlador PID sujeitos à otimização das funções custo, bem como o acréscimo dos demais critérios para avaliação de desempenho, possibilitou-se a aplicação do método AHP para o apoio à tomada de decisão multicritério, obtendo-se assim o controlador com a estrutura e ganhos:

$$C(s) = 0,0191 + \frac{0,7532}{s} + 0,0127s \frac{1,8767}{s + 1,8767}, \quad (7)$$

o qual apresentou, conforme os critérios avaliados, *IAE* o valor de 3740, *IAVU* de 222,4, *Rt* de 2,6 s, *Tst_{2%}* de 5,7 s, não apresentando sobressinal na resposta ao degrau de amplitude de 45°, utilizado como referência durante o processo de otimização. A resposta do sistema à entrada previamente mencionada é apresentada na Fig. 14 e o sinal de controle na Fig. 15.

De modo a validar a solução, o sistema apresentado foi testado com um novo sinal, abrangendo diversas das dinâmicas não lineares do sistema, sendo estas diferentes das utilizadas durante o processo de otimização, a resposta do sistema ao sinal de validação é apresentada na Fig. 16 e seu respectivo sinal de controle é apresentado na Fig. 17, ambas as respostas

foram obtidas a partir do modelo Hammerstein-Wiener, sendo ainda necessário o teste *in loco* do controlador obtido.

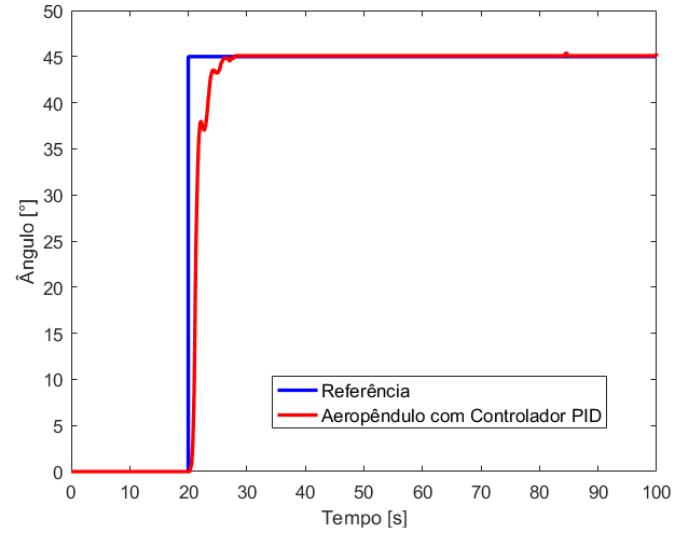


Fig. 14. Resposta do sistema ao degrau utilizado no processo de otimização.

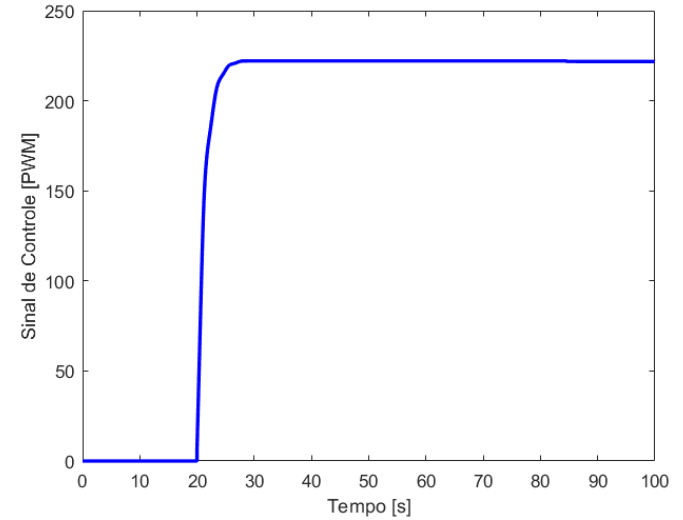


Fig. 15. Sinal de controle para a entrada degrau utilizado no processo de otimização.

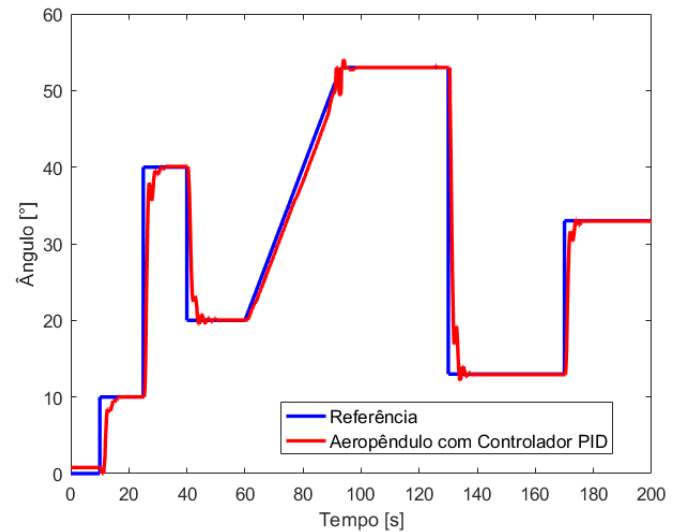


Fig. 16. Resposta do sistema ao sinal de validação.

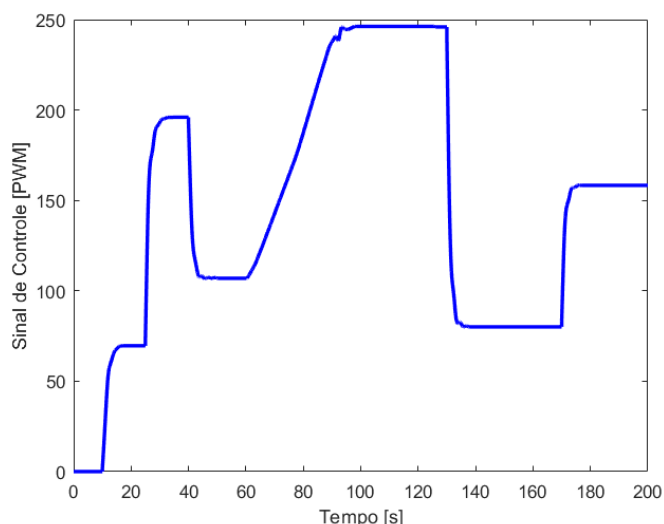


Fig. 17. Sinal de controle para o sinal de validação.

Nota-se um desempenho interessante quanto ao tempo de resposta, desde a mudança de referência até sua estabilização, bem como a amplitude irrelevante do sobressinal, contudo, um comportamento oscilatório pode ser percebido durante o estado transitório do sistema, tal comportamento é caracterizado pelas não linearidades do sistema, sendo uma limitação da utilização de um sistema linear para seu controle, no caso específico, a utilização de um controlador PID com ganhos estáticos.

5. CONCLUSÕES

Conforme apresentado ao longo deste trabalho, ressalta-se que o método de otimização multiobjetivo para a parametrização de controladores apresenta interessantes resultados quanto à sua aplicação em sistemas não lineares, para o caso específico, este identificado através de um modelo com estrutura Hammerstein-Wiener, gerando múltiplas possíveis soluções, possibilitando ao tomador de decisão a análise, sem uma limitação em relação à variedade.

O método AHP de auxílio à tomada de decisão mostrou-se interessante para aplicação na seleção dos parâmetros dos controladores, uma vez que a grande quantidade de alternativas inviabiliza uma análise individualizada, contudo, a análise por pares de critérios, provida pelo método garante que todas as alternativas sejam comparadas com reduzido tempo e esforço.

As próximas etapas deste trabalho referem-se à utilização dos procedimentos de otimização multiobjetivo para obtenção e aprimoramento de controladores não lineares, bem como a aplicação de outras metaheurísticas na obtenção das soluções, possibilitando uma comparação do desempenho de algoritmos multiobjetivo quando confrontados por sistemas não lineares. Por fim, outro trabalho refere-se à comparação do controlador obtido conforme a metodologia apresentada neste artigo com outras técnicas presentes na literatura, aplicadas para a sintonia de controladores em plantas do tipo aeropêndulo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) –

Código de Financiamento 001, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processo: 304783/2017-0) e a Fundação Araucária (FAPPR), este estudo foi parcialmente financiado pelos códigos: 310079/2019-5-PQ2, 437105/2018-0-Univ, 51432/2018-PPP, 016-20/FA-PPP e PRONEX-042/2018.

REFERÊNCIAS

- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2001). The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 9(11), 1163–1175.
- Castro-Garcia, R., Tiels, K., Agudelo, O. M., & Suykens, J. A. K. (2018). Hammerstein system identification through best linear approximation inversion and regularisation. *International Journal of Control*, 91(8), 1757–1773.
- Castrucci, P. de L., Bittar, A., & Sales, R. M. (2011). *Controle Automático*. LTC.
- Cheng, S., Wei, Y., Sheng, D., Chen, Y., & Wang, Y. (2018). Identification for Hammerstein nonlinear ARMAX systems based on multi-innovation fractional order stochastic gradient. *Signal Processing*, 142, 1–10.
- Cheng, S., Wei, Y., Sheng, D., & Wang, Y. (2019). Identification for Hammerstein nonlinear systems based on universal spline fractional order LMS algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 79, 104901.
- Chidambaram, M., & Saxena, N. (2018). *Relay Tuning of PID Controllers*. Springer Singapore.
- Chien, K. L., Hrons, J. A., & Reswick, J. B. (1952). On the Automatic Control of Generalized Passive Systems. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineering - ASME*, 74, 175–185.
- Coello, C. C. A., Lamont, G. B., & Veldhuizen, D. A. Van. (2007). Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. In *Genetic and evolutionary computation* (Vol. 139, Issue 4). Springer US.
- Cohen, G. H., & Coon, G. A. (1953). Theoretical Consideration of Retarded Control. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineering - ASME*, 75, 827–834.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Deng, T., Lin, C., Luo, J., & Chen, B. (2019). NSGA-II multi-objectives optimization algorithm for energy management control of hybrid electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(4), 1023–1034.
- Enikov, E. T., & Campa, G. (2012). Mechatronic aeropendulum: Demonstration of linear and nonlinear

- feedback control principles with MATLAB/Simulink real-time windows target. *IEEE Transactions on Education*, 55(4), 538–545.
- Enikov, E. T., Polyzoev, V., & Gill, J. (2010). Low-Cost Take-Home Experiment on Classical Control Using Matlab/Simulink Real-Time Windows Target. In *Proceedings of the 2010 American Society for Engineering Education Zone IV Conference, May*, 322–330.
- Esmaili, M., Shayeghi, H., Aryanpour, H., & Nooshyar, M. (2018). Design of new controller for load frequency control of isolated microgrid considering system uncertainties. *International Journal of Power and Energy Conversion*, 9(3), 285.
- Garcia, C. E., & Morari, M. (1982). Internal model control. A unifying review and some new results. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 21(2), 308–323.
- Giri, F., & Bai, E. W. (2010). Block-oriented nonlinear system identification. In *Lecture notes in control and information sciences* (Issue 404).
- Gonçalves, T. M. M., Machado, J. M., & Esteves, J. S. (2016). Aero-stabilizer workbenches for the teaching of PID control. *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, 2016(49), 10–14.
- Habib, G., Miklos, A., Enikov, E. T., Stepan, G., & Rega, G. (2017). Nonlinear model-based parameter estimation and stability analysis of an aero-pendulum subject to digital delayed control. *International Journal of Dynamics and Control*, 5(3), 629–643.
- Habib, G., Miklós, Á., Enikov, E. T., Stépán, G., & Rega, G. (2013). Experimental validation of the act-and-wait control concept through the aeropendulum. *Proceedings of the 11th International Conference on Vibration Problems, September*, 150.
- Job, M. M., & Jose, P. S. H. (2015). Modeling and control of mechatronic aeropendulum. *ICIIECS 2015 - 2015 IEEE International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems*, 1–5.
- Kagami, R. M., Kovalski, G., Uhlmann, T. S., Mendes, L. A., & Freire, R. Z. (2020). A Generic WebLab Control Tuning Experience Using the Ball and Beam Process and Multiobjective Optimization Approach. *Information*, 11(3), 132.
- Li, L., & Ren, X. (2018). Identification of nonlinear Wiener-Hammerstein systems by a novel adaptive algorithm based on cost function framework. *ISA Transactions*, 80(July), 146–159.
- Mendes, L. A., Freire, R. Z., Coelho, L. dos S., & Moraes, A. S. (2017). Minimizing computational cost and energy demand of building lighting systems: A real time experiment using a modified competition over resources algorithm. *Energy and Buildings*, 139, 108–123.
- Reynoso-Meza, G., Blasco Ferragud, X., Sanchis Saez, J., & Herrero Durá, J. M. (2017). *Controller Tuning with Evolutionary Multiobjective Optimization* (J. Mukherjee (ed.); Vol. 85). Springer International Publishing.
- Reynoso-Meza, G., Blasco, X., Sanchis, J., & Martínez, M. (2014). Controller tuning using evolutionary multi-objective optimisation: Current trends and applications. *Control Engineering Practice*, 28(1), 58–63.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Schoukens, J., Pintelon, R., Rolain, Y., Schoukens, M., Tiels, K., Vanbeylen, L., Van Mulders, A., & Vandersteen, G. (2015). Structure discrimination in block-oriented models using linear approximations: A theoretic framework. *Automatica*, 53, 225–234.
- Sen, R., Pati, C., Dutta, S., & Sen, R. (2015). Comparison Between Three Tuning Methods of PID Control for High Precision Positioning Stage. *MAPAN - Journal of Metrology Society of India*, 30(1), 65–70.
- Shahrokhi, M., & Zomorodi, A. (2010). A Comparison of PID Controller Tuning Methods. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83(4), 712–722.
- Trinh, V.-V., Alamir, M., & Bonnay, P. (2019). *Data-driven Explicit Nonlinear Model Predictive Control via Wiener Regression and Reduced-Set Support Vector Machines*. June, 1–25.
- Zhu, Y. (2001). Multivariable System Identification For Process Control. In *Multivariable System Identification For Process Control*. Elsevier.
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *TRANSACTIONS OF THE A.S.M.E.*, 759–765.