



APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS PARA A MODELAGEM DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Caetano Alcantara Borges^{1*}, Keiji Yamanaka¹, Florisvaldo Cardozo Bomfim Junior¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - A modelagem de uma função de transferência pode ser feita através de métodos convencionais, como Smith, Sundaresan e Krishnaswamy, Nishikawa e Harriot, e também pode ser feito por métodos utilizando algoritmos de inteligência computacional. O objetivo deste trabalho é comparar resultados da modelagem da função de transferência através dos métodos convencionais, o método que utiliza o Algoritmo Genético (AG) e o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Os resultados obtidos pelos métodos inteligentes provaram serem melhores que os métodos convencionais, e o PSO teve um melhor desempenho que o AG.

Palavras-Chave – Automação, Controle, Enxame de Partículas, Função de Transferência, PSO.

PARTICLE SWARM OPTMIZATION APPLICATION FOR MODELING TRANSFER FUNCTION

Abstract – The modeling of a transfer function can be done by conventional methods, such as Smith, Sundaresan and Krishnaswamy, Nishikawa and Harriot, also can be done by methods using computational intelligence algorithms. The objective of this paper is to compare the results of modeling the transfer function by conventional methods, using the Genetic Algorithm (GA) and the Particle Swarm Optimization (PSO). The results obtained by the intelligent methods proved to be better than the conventional methods, and the PSO had better results than the GA.

Keywords – Automation, Control, Particle Swarm Optimization, PSO, Transfer Function.

NOMENCLATURA

AG - Algoritmo Genético;
PSO - Particle Swarm Optimization;
K - Ganho da função;
 θ - Atraso;
 τ - Constante de tempo.

I. INTRODUÇÃO

O ambiente tecnológico internacional aumentou significativamente desde a terceira revolução industrial, trazendo consigo novos desafios. Atualmente, é possível encontrar diferentes máquinas, principalmente no setor industrial, que realizam o mesmo trabalho de vários operários em um menor período. Desde então um dos maiores problemas industriais é o não aproveitamento total das máquinas, pois em geral elas sofrem alterações por diversos fatores (seja tempo, temperatura, declividade, etc.). Esse baixo rendimento, se não for controlado, pode causar um impacto negativo, tanto financeiramente quanto ambientalmente.

Visando a solucionar esta questão, conhecer a função de transferência de um sistema pode ser essencial para obter um melhor controle e ajuste de seu rendimento. A função de transferência fornece uma descrição completa das características dinâmica do sistema, sendo eles representados pelas expressões algébricas da variável complexa “s”. Ela é obtida a partir da relação saída/entrada, e se comparada com o sistema de supervisão da operação, é possível determinar se o instrumento está corretamente calibrado ou necessita de manutenção (caso haja desvios significativos) [4].

A função de transferência de um sistema linear invariante no tempo (LTI – Linear Time Invariant), em geral, é definida como sendo a relação entre as Transformadas de Laplace da saída e da entrada, com todas as condições iniciais nulas.

Porém, dificilmente é fornecida a equação de entrada da planta pelo fabricante. A partir disso foram desenvolvidos vários métodos convencionais para melhor representar o modelo da planta.

Esse trabalho tem como o objetivo analisar e comparar cinco métodos diferentes, sendo os métodos convencionais: o método de Smith, Sundaresan e Krishnaswamy e Harriot, e os métodos não convencionais: o método que utiliza Algoritmo Genético (AG), e o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO - Particle Swarm Optimization), desenvolvido neste trabalho.

*caetanoalcantara@ufu.br

O principal ponto negativo dos métodos convencionais são que a maioria deles aproxima-se para uma função de primeira ordem com atraso. Ou seja, se o sistema for de segunda ou terceira ordem, ele será reduzido para um sistema de primeira ordem com atraso.

Outra falha que os métodos convencionais apresentam é a necessidade de interrupção do instrumento para efetuar o ajuste, pois em geral esses métodos têm como ambiente um sistema de malha fechada (estrutura de controle onde há a comparação da variável desejada com a variável controlada).

Já os métodos não convencionais conseguem modelar uma função de transferência representando a ordem real do sistema e não há necessidade de interrupção da máquina para efetuar o ajuste [1].

Este artigo tem o intuito de encontrar uma alternativa diferente em relação ao AG, usando o PSO que foi introduzido por Kennedy e Eberhart (1995) [2]. A utilização do algoritmo do PSO foi escolhida devido a cooperação entre as partículas do enxame, diferente da população do AG em que existe uma luta por sobrevivência dos indivíduos. Ultimamente a utilização do PSO vem crescendo na resolução de problemas de otimização.

II. REVISÃO LITERÁRIA

Em geral, para os métodos convencionais, a função de transferência é expressa pela Equação 1 [4].

$$F(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (1)$$

Onde:

- F(s) – Função de Transferência.
- K – Ganho do sistema em regime permanente.
- θ – Atraso da função.
- τ – Constante tempo.
- s – Variável do domínio da frequência.

A. Método de Smith para primeira ordem

Em 1972, o Dr. Cecil Smith propôs que os valores de θ e τ sejam escolhidos de acordo com dois pontos de inflexão, onde as respostas reais coincidem e possuam uma elevada taxa de variação. São definidos dois tempos, quando a resposta ao degrau unitário atinge 28% e 63% do seu valor final, e com esses valores é possível calcular os coeficientes da função de transferência, de acordo com o conjunto de equações 2 [3].

$$K = \frac{\delta Y(t)}{\delta u(t)} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot (t_{63\%} - t_{28\%})$$

$$\theta = t_{63\%} - \tau$$

B. Método de Sundaesan e Krishnaswamy para primeira ordem

Sundaesan e Krishnaswamy propuseram que encontrasse os tempos de dois pontos de inflexão, quando a

resposta ao degrau unitário alcançar 35,3% e 85,3% do valor final dela mesma, para encontrar o valor de θ e τ com o conjunto de equações 3 [3].

$$K = \frac{\delta Y(t)}{\delta u(t)} \quad (3)$$

$$\tau = 0,67233 \cdot (t_{85,3\%} - t_{35,3\%})$$

$$\theta = 1,29273 \cdot t_{35,3\%} - 0,29273 \cdot t_{85,3\%}$$

C. Método de Smith para segunda ordem

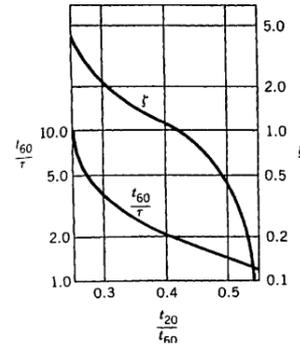
Assumindo o modelo da equação 4, o método de Smith obtém os valores dos coeficientes da função de transferência com o gráfico de Smith, representado na Figura 1. E o ganho pode ser calculado pela Equação 5 [3].

$$F(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1} \quad (4)$$

$$K = \frac{Y(t)'}{u(t)'} \quad (5)$$

Determinando os tempos em que a resposta ao degrau atinge 20% e 60% do valor final, é possível obter os valores de ζ e τ no gráfico de Smith.

Figura 1: Gráfico de Smith (Adaptado de Seborg et al. [6]).



D. Método de Harriot para segunda ordem

Harriot encontrou um ponto, de aproximadamente 73% do valor final da resposta ao degrau unitário, da resposta fracionária de segunda ordem, sem atraso, em que todas as curvas se coincidem, e neste ponto $\frac{t}{\tau_1 + \tau_2}$ é igual a 1,3. Considerando o modelo de transferência da Equação 6, é possível calcular seus coeficientes [3].

$$F(s) = \frac{K}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)} \quad (6)$$

$$K = \frac{Y(t)'}{u(t)'}$$

$$\tau_{tot} = \frac{t_{23\%}}{1,3}$$

$$\tau_1 = \tau_{rat} \cdot \tau_{tot}$$

$$\tau_2 = \tau_{tot} - \tau_1$$

E. Método utilizando Algoritmo Genético

O algoritmo genético proposto por Bomfim Junior [1], utiliza a heurística do algoritmo genético para otimizar os coeficientes de um modelo de função de transferência, para qualquer ordem, representado na Equação 7. Este método não convencional, conseguiu ótimos resultados, superando os métodos convencionais.

$$F(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\theta \cdot s}}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (7)$$

F. Método utilizando o PSO

Para este trabalho foi desenvolvido um algoritmo de PSO, baseado no AG desenvolvido por Bomfim Junior [1], utilizando o mesmo modelo de função de transferência da Equação 7 para estimar os coeficientes.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

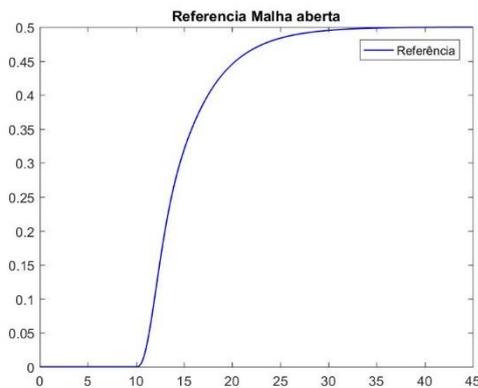
A. Considerações sobre os resultados

O trabalho de Bomfim Junior [1] criou o método que modela a função de transferência utilizando algoritmo genético. Os resultados produzidos que serão comparados neste artigo tiveram como referência os resultados do trabalho do Bomfim Junior [1].

Os experimentos foram realizados baseados em uma função de transferência de 3ª ordem com atraso, usando a curva de resposta ao degrau unitário como única referência para a aplicação do método. A curva de resposta tem 4500 pontos, de 1 a 450, com espaçamento de 0,1. A função transferência de referência para as simulações pode ser observada na Equação 8 e a curva de resposta ao degrau unitário pode ser observada na Figura 2.

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10 \cdot s}}{2 \cdot s^3 + 4 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1} \quad (8)$$

Figura 2: Referência para malha aberta



Os resultados do método deste artigo foram comparados com os métodos convencionais de obtenção da função de transferência, o método de Smith, de Sundaresan e

Krishnaswamy e o de Harriot, e com o método de modelagem que utiliza o Algoritmo Genético [1].

Usando a curva de resposta ao degrau unitário, foram obtidas funções de transferência de primeira, segunda e terceira ordem que representam o sistema, tanto para malha aberta, quanto para malha fechada.

E para avaliar a qualidade de cada resposta, foi utilizado o método do erro quadrático, comparando a curva de resposta ao degrau unitário da função de transferência estimada com a curva de referência, de acordo com a Equação 9. Este cálculo do erro foi escolhido justamente para poder comparar os resultados deste artigo com o trabalho que utilizou o algoritmo genético, que utilizou o erro quadrático como método de comparação das curvas [1].

$$EQ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (R(i) - M(i))^2} \quad (9)$$

Onde:

$R(i)$ - Valores de referência;

$M(i)$ - Valor do modelo gerado.

1) Considerações sobre o Algoritmo Genético e a Otimização por Enxame de Partículas

A estrutura do cromossomo e da partícula representará a função transferência modelada, alterando de acordo com a ordem desejada. O modelo da função de transferência utilizada é mostrado na Equação 7, e o cromossomo é baseado nesta equação, alterando seu tamanho de acordo com a ordem da função de transferência.

Representação: $[\theta, K, a_n, a_{n-1}, \dots, a_0]$

Onde:

a_n - Coeficientes da ordem n ;

θ - Atraso (*Dead time*);

K - Ganho da função.

A função de avaliação do cromossomo e da partícula, será feita a partir do cálculo do erro quadrático em todos os pontos da curva de saída da função de transferência que o cromossomo representa, após aplicada uma entrada de degrau unitário, com a curva de referência de acordo com a Equação 9. Os dois algoritmos têm o objetivo de encontrar a função de transferência que melhor representa o sistema, obtendo o menor erro possível com a função de transferência original.

Tanto o AG quanto o PSO foram executados trinta vezes com os mesmos parâmetros, para tirar uma média dos resultados.

Parâmetros do algoritmo genético:

- Tamanho da população: 200;
- Número de gerações: 30;
- Método de seleção: Torneio;
- Números de indivíduos de torneio: 3;
- Probabilidade de recombinação: 95%;
- Probabilidade de mutação: 15%;
- Método de Crossover: SBX.

Parâmetros do PSO:

- Tamanho da população: 200;
- Número de gerações: 1000;
- Valor do coeficiente de inercia: 1 (com redução de 1% por geração);
- Valor do coeficiente cognitivo: 2;
- Valor do coeficiente social: 2.

2) Apresentação dos resultados

Os resultados serão apresentados de acordo com a ordem da modelagem da função de transferência e da situação da malha, se aberta ou fechada, apresentando os resultados de cada método estudado.

B. Resultados para modelagem em primeira ordem em malha aberta

1) Método de Smith

Para o método de Smith foram estimados os tempos dos dois pontos de inflexão (28% e 63%), e aplicando na curva referência, têm-se que:

$$\begin{aligned} t_{1(28\%)} &= 12,4 \\ t_{2(63\%)} &= 15 \\ \tau &= \frac{3}{2} \cdot (15 - 12,4) = 3,9 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta = 15 - 3,9 = 11,1$$

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-11,1s}}{3,9 \cdot s + 1}$$

2) Método de Sundaresan e Krishnaswamy

O método de Sundaresan e Krishnaswamy determina o tempo dos dois pontos de inflexão (35,3% e 85,3%), e aplicando na curva de referência, têm-se que:

$$\begin{aligned} t_{1(28\%)} &= 12,8 \\ t_{2(63\%)} &= 18,8 \\ \tau &= 0,672 \cdot (18,8 - 12,8) = 4,03 \\ \theta &= 1,292 \cdot 12,8 - 0,293 \cdot 18,8 = 11,04 \end{aligned} \quad (11)$$

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10,98s}}{4,03 \cdot s + 1}$$

3) Método utilizando Algoritmo Genético

A função de transferência modelada pelo AG está representada na Equação 12.

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10,93s}}{4,06 \cdot s + 1} \quad (12)$$

4) Método utilizando PSO

A estrutura da partícula é a mesma para o cromossomo do AG. A função de transferência modelada pelo PSO está representada na Equação 13.

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10,93s}}{4,06 \cdot s + 1} \quad (13)$$

5) Comparação dos resultados

A Tabela I apresenta os resultados de cada método para a modelagem de 1ª ordem, com o erro quadrático sendo calculado a partir da Equação 9. Observa-se que os métodos não convencionais obtiveram melhores resultados que os métodos convencionais, tendo os dois algoritmos inteligentes resultados muito próximos

Tabela I: Comparação dos resultados para modelagem em 1ª ordem em malha aberta.

Método	Função Modelada	Erro Quadrático
Smith	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-11,1s}}{3,9 \cdot s + 1}$	0,0762
Sundaresan e Krishnaswamy	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10,98s}}{4,03 \cdot s + 1}$	0,0680
Algoritmo Genético	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10,93s}}{4,06 \cdot s + 1}$	0,04536
PSO	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10,93s}}{4,06 \cdot s + 1}$	0,04521

C. Resultados para modelagem de segunda ordem em malha aberta

1) Método de Smith

Para o método de Smith para segunda ordem, foram estimados os tempos em que a resposta ao degrau unitário, corresponde à 20% e 60% do valor final de resposta desconsiderando o atraso, e utilizando o gráfico de Smith na Figura 1, obtêm-se o valor de ζ , modelando a função de transferência representada na Equação 14.

$$\begin{aligned} t_{20\%} &= 1,93 \\ t_{58\%} &= 4,58 \\ \frac{t_{20\%}}{t_{60\%}} &= 0,4214 \end{aligned}$$

Com $\frac{t_{20\%}}{t_{60\%}} = 0,4214$, no gráfico de Smith, obtêm que:

$$\begin{aligned} \frac{t_{60\%}}{\tau} &= 2 \\ \zeta &= 1 \\ \tau &= 2,29 \end{aligned}$$

Modelando a função de transferência:

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{5,244 \cdot s^2 + 4,58 \cdot s + 1} \quad (14)$$

2) Método de Harriot

O método de Harriot determina as constantes de tempo quando a resposta do sistema ao degrau atinge 73% do valor final. Desconsiderando o atraso, o tempo para uma resposta à 73% do valor final é de 6,24 segundos. Então a modelagem da função de transferência é mostrada na Equação 15.

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{3,686 \cdot s^2 + 4,8 \cdot s + 1} \quad (15)$$

3) Método utilizando o Algoritmo Genético

Para um sistema de segunda ordem, o cromossomo terá mais um fator a ser calculado e a função de avaliação será a mesma, modelando a função transferência da Equação 16.

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10.59s}}{1,474 \cdot s^2 + 4,39 \cdot s + 1} \quad (16)$$

4) Método utilizando o PSO

Para um sistema de segunda ordem, a partícula terá mais um fator a ser calculado e a função de avaliação será a mesma, modelando a função transferência da Equação 17.

$$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10.55s}}{1,622 \cdot s^2 + 4,42 \cdot s + 1} \quad (17)$$

5) Comparação entre os resultados.

A Tabela II apresenta os resultados de cada método para a modelagem de 2ª ordem, com o erro quadrático sendo calculado a partir da Equação 9. Observa-se que os métodos não convencionais obtiveram melhores resultados que os métodos convencionais, tendo os dois algoritmos inteligentes resultados muito próximos

Tabela II: Comparação dos resultados para modelagem em 2ª ordem em malha aberta.

Método	Função Modelada	Erro Quadrático
Smith	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{5,244 \cdot s^2 + 4,58 \cdot s + 1}$	0,1855
Harriot	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{3,686 \cdot s^2 + 4,8 \cdot s + 1}$	0,09811
Algoritmo Genético	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10.59s}}{1,474 \cdot s^2 + 4,39 \cdot s + 1}$	0,0347
PSO	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10.55s}}{1,622 \cdot s^2 + 4,42 \cdot s + 1}$	0,0341

D. Resultados para terceira ordem em malha aberta

Os autores não encontraram nenhum método convencional para modelagem de funções de transferência, assim a comparação será apenas com os métodos inteligentes.

Os dois algoritmos usaram a mesma representação do cromossomo e partícula, acrescentando mais um termo para ser otimizado, e a função de avaliação também foi a mesma.

Tabela III: Comparação dos resultados para modelagem em 3ª ordem em malha aberta.

Método	Função Modelada	Erro Quadrático
Algoritmo Genético	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-9,9778s}}{2,095 \cdot s^3 + 4,09 \cdot s^2 + 5,023 \cdot s + 1}$	$2,074 \cdot 10^{-3}$
PSO	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{2,000 \cdot s^3 + 4,000 \cdot s^2 + 5,000 \cdot s + 1}$	$9,3650 \cdot 10^{-14}$

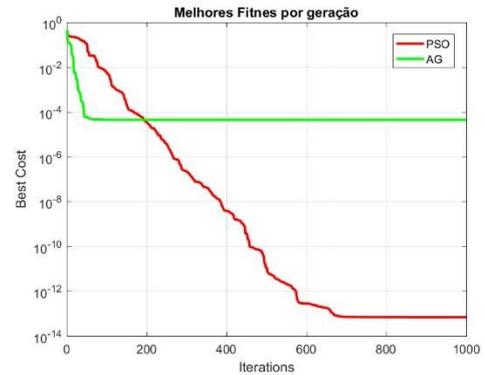
Tabela IV: Comparação da função modelada pelo PSO com a desejada, para modelagem em 3ª ordem de malha aberta.

Função Modelada	Função desejada
$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{2,0 \cdot s^3 + 4,0 \cdot s^2 + 5,0 \cdot s + 1}$	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10s}}{2 \cdot s^3 + 4 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}$

O PSO obteve resultados muito melhores quando o algoritmo modela uma função de transferência da mesma ordem que a real, chegando a praticamente zero de erro,

modelando uma função de transferência igual à real como mostra a Tabela IV. A Figura 3 mostra a evolução dos dois algoritmos de acordo com as iterações, onde o eixo Y representa o erro quadrático do resultado, mostrando que o PSO tem uma convergência mais lenta, porém o AG não desenvolve além de um certo ponto, enquanto o PSO consegue chegar a um erro muito inferior.

Figura 3: Comparação dos algoritmos inteligentes (Iterações x Erro Quadrático).



E. Resultados em malha fechada

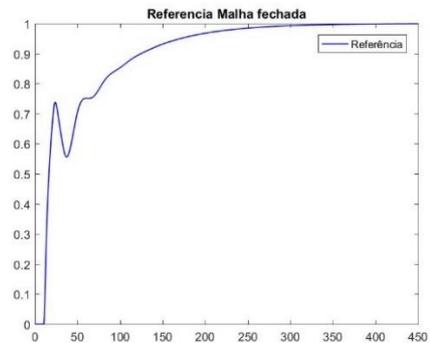
Para um sistema de malha fechada, foi necessário calcular previamente os parâmetros de controle PID. Assim, para obtermos uma referência, foi utilizado o método da síntese direta na equação de 1ª ordem em malha aberta para determinar os parâmetros do controlador PID, com os valores mostrados na Equação 18.

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

$$PID(s) = 1,215 + \frac{0,0422}{s} + 0 \cdot s \quad (18)$$

Após aplicar este controle PID na função de transferência estudada com uma entrada de degrau unitário, obtemos a curva de referência da Figura 4.

Figura 4: Curva de resposta de referência para malha fechada



A estrutura do AG e do PSO não mudaram, apenas alterando a referência que deve ser atingida, atingindo os resultados das Tabelas V, VI e VII para primeira, segunda e terceira ordem, respectivamente. Observa-se que, assim como em malha aberta, quando a modelagem é em 3ª ordem, o

algoritmo do PSO conseguiu uma aproximação muito melhor, modelando a função de transferência alvo, como mostra a tabela VIII.

Tabela V: Resultados para modelagem de primeira ordem em malha fechada.

Método	Função Modelada	Erro Quadrático
Algoritmo Genético	$F(s) = \frac{0,501 \cdot e^{-10,8 \cdot s}}{4,205 \cdot s + 1}$	0,090
PSO	$F(s) = \frac{0,4997 \cdot e^{-10,909 \cdot s}}{4,08 \cdot s + 1}$	0,0631

Tabela VI: Resultados para modelagem de segunda ordem em malha fechada.

Método	Função Modelada	Erro Quadrático
Algoritmo Genético	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-9,988 \cdot s}}{4,018 \cdot s^2 + 4,984 \cdot s + 1}$	0,1098
PSO	$F(s) = \frac{0,4997 \cdot e^{-10,617 \cdot s}}{1,249 \cdot s^2 + 4,362 \cdot s + 1}$	0,0461

Tabela VII: Resultados para modelagem de terceira ordem em malha fechada.

Método	Função Modelada	Erro Quadrático
Algoritmo Genético	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-9,951 \cdot s}}{1,999 \cdot s^3 + 4,004 \cdot s^2 + 5,000 \cdot s + 1}$	0,0495
PSO	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10 \cdot s}}{2,000 \cdot s^3 + 4,000 \cdot s^2 + 5,000 \cdot s + 1}$	$1,500 \cdot 10^{-14}$

Tabela VIII: Comparação da função modelada pelo PSO com a desejada, para modelagem em 3ª ordem de malha fechada.

Função Modelada	Função desejada
$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10 \cdot s}}{2,0 \cdot s^3 + 4,0 \cdot s^2 + 5,0 \cdot s + 1}$	$F(s) = \frac{0,5 \cdot e^{-10 \cdot s}}{2 \cdot s^3 + 4 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}$

IV. CONCLUSÕES

O método de modelagem que utiliza o Algoritmo Genético já havia conseguido ótimos resultados em comparação aos métodos convencionais para descobrir a função de transferência de plantas industriais. Mas os resultados mostraram que o algoritmo de otimização por enxame de partículas obteve resultados ainda melhores. Quando calculado para primeira e segunda ordem, tanto para malha aberta e malha fechada, os dois algoritmos tiveram resultados bastante parecidos, porém quando a modelagem era para terceira ordem, que é a ordem real da função de transferência alvo, o PSO obteve resultados mais significativos, com erros muito próximos de zero.

Com esses resultados é possível afirmar que a ferramenta que utiliza o PSO para a modelagem de plantas industriais, em malha aberta e malha fechada, é mais eficiente que a que utiliza o AG, ou os métodos convencionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores, que sem eles não seria possível o desenvolvimento de qualquer pesquisa.

Agradeço aos meus amigos e familiares que me apoiam, e minha companheira Flavya que me auxiliou em todos os momentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] BOMFIM JUNIOR, Florisvaldo Cardozo. “Modelagem de Funções de Transferência de Plantas Industriais em Malha Aberta e Fechada utilizando Algoritmos Genéticos”. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
- [2] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proceedings of the Sixth International Symposium on, Nagoya, 1995, pp. 39-43.
- [3] MARLIN, T. E. (2014). “Process Control: designing processes and control systems for dynamic performance”. McGraw-Hill, Inc., 2 ed.
- [4] OGATA, Kastuhiko et al. “Engenharia de Controle Moderno”; tradução Paulo Álvaro Maya; revisão técnica Fabrizio Leonardi.[et. al] São Paulo: Prentice Hall, v. 12, 5ª ed.
- [5] SEBORG, D. E. et al. Process dynamics and control. Wiley Series in Chemical Engineering, 1989.
- [6] SMITH, Cecil L. “Advanced Process Control: Beyond Single Loop Control”. John Wiley & Sons, 2011.