

**DINCON 2017**CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Sintonia de controlador PID através de algoritmos de otimização por enxame de partículas.

Luisa H. B. Liboni¹

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Sertãozinho, SP.

Eduardo Coelho Marques da Costa²

Departamento de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

Resumo. Este trabalho realiza a aplicação de um algoritmo de otimização por enxame de partículas, do inglês, *particle swarm optimization* (PSO) para o ajuste automático dos parâmetros de um controlador proporcional, integral e Derivativo (PID), objetivando o controle da variável de saída, de forma a minimizar o índice de desempenho ISE (integral of time multiplied by absolute errors). O trabalho tem como objetivo analisar a eficiência da sintonia PID realizada pelo algoritmo proposto, comparando-se os resultados com técnicas tradicionais de sintonia, mas especificamente o método de Ziegler-Nichols.

Palavras-chave. PID, controlador, PSO, enxame de partículas, sintonia, otimização

1 Introdução

O controlador do tipo PID representa a grande maioria dos controladores automáticos utilizados no controle industrial, principalmente no controle de variáveis contínuas no tempo. Sua grande presença na indústria traduz o seu desempenho robusto e eficiente para a maioria dos sistemas de controle em malha fechada. A função básica deste tipo de controlador é executar um algoritmo de atuação sobre o processo, de forma a manter a variável controlada em um nível desejado ou *setpoint* (SP). Um controlador PID é capaz de melhorar as respostas transitórias de um sistema através da redução de sobressinal ou *overshoot* (M_p), rápido tempo de subida (t_r) e tempo de pico (t_p) e redução do tempo de estabelecimento da variável (t_s), como definidos na Figura 1, mas para que isso seja possível, o algoritmo PID necessita estar apropriadamente sintonizado.

Sintonizar um controlador PID significa atribuir valores aos parâmetros do controlador de forma a otimizar a resposta do controle frente a um distúrbio, tal que a volta da variável controlada ao seu ponto de operação ou SP seja rápida, sem sobressinais excessivos e de forma menos oscilatória possível [1]. Um controlador mal ajustado poderá causar grandes problemas no controle da planta industrial, em alguns casos, pode levar à uma oscilação da variável controlada ou então realizar um controle lento frente ao tempo mínimo exigido para o processo. Obviamente, a sintonia

¹ luisa.liboni@usp.br, luisa.liboni@ifsp.edu.br

² educosta@usp.br

PID deve ser considerada uma prática que exige compromisso entre estabilidade e desempenho e para cada processo o nível de exigência da resposta do sistema em malha fechada é diferente.

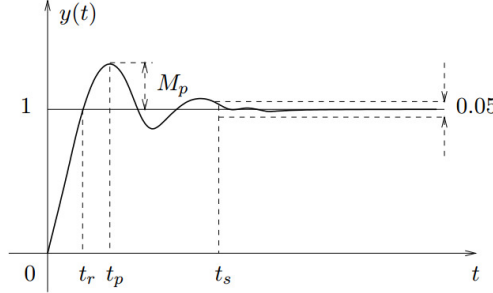


Figura 1: Definições da resposta transitória

Apesar de décadas de pesquisas e implementações de métodos de sintonia PID, segundo Ender (1993), em seus testes de controladores, em inúmeras indústrias, 30% dos controladores instalados operavam em modo manual e 65% das malhas fechadas eram sintonizadas ineficientemente [1]. Além disso, segundo Dwyer (2006) mais de 408 métodos de sintonia PID são documentados [2]. A grande maioria destes métodos aproximam os processos em sistemas de primeira ordem, causando um mal dimensionamento quando de sua aplicação em processos mais complexos. Como uma primeira aproximação, estes métodos podem ser extremamente úteis, porém em processos em que a resposta ao degrau não é possível ou processos em condições críticas de estabilidade, não devem ser utilizados como um sintonizador fino.

Neste artigo, o algoritmo de otimização baseado em enxame de partículas é aplicado como técnica de busca dos três parâmetros existentes no controlador PID representado. Além disso, uma avaliação de desempenho em relação à regra clássica de sintonia de Ziegler-Nichols é realizada.

2 Definição do Problema

O algoritmo de controle PID possui em sua saída três ações ou funções combinadas que dependem diretamente do erro entre a variável controlada e o SP. As ações combinadas se dividem em ação proporcional ao erro, integral ao erro e derivativa ao erro, e o controlador tem sua função de transferência dada por (1).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

A sintonia do controlador consiste, portanto, em atribuir valores para os parâmetros K_p , K_i e K_d de forma a otimizar a resposta do sistema de controle e atender a índices de desempenho. Dentre os índices de desempenho mais comumente utilizados está o índice *Integral Squared Error* (ISE), que contabiliza o erro com o passar do tempo em um período T, onde T é o tempo esperado de estabelecimento da resposta.

Na prática os instrumentistas e engenheiros de campo, na maioria das vezes, realizam os ajustes dos controladores através de métodos empíricos, valendo-se do conhecimento prévio da contribuição de cada ação do controle PID. Porém em muitos processos, este método de “tentativa e erro” não é aceitável, como por exemplo, processos que trabalham no limite de sua estabilidade,

ou então, processos com dinâmica muito lenta no qual o instrumentista ou engenheiro de campo leva muito tempo para obter a resposta do sistema a cada troca de parâmetros da sintonia. Fica claro que o ajuste PID realizado por métodos empíricos consegue localizar ótimos locais das respostas dos sistemas de controle, porém a busca por uma resposta globalmente ótima não é o foco deste tipo de sintonia.

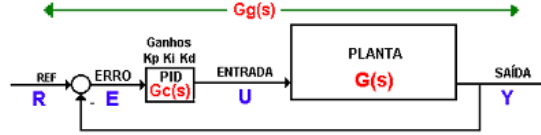


Figura 2 – Malha de controle PID. [3]

Outros métodos de sintonia baseiam-se em respostas experimentais do processo, como a resposta ao degrau. O método de Ziegler Nichols é o mais tradicional destes métodos. É utilizado, na maioria das vezes, quando o modelo matemático da planta não é conhecido. Quando um modelo matemático é conhecido, pode-se aplicar, além de Ziegler Nichols, outros métodos de sintonia.

O modelo utilizado em métodos de sintonia que levam em consideração a modelagem matemática do processo é de extrema importância, já que a sintonia PID e a acurácia do controle dependem do modelo do processo. Sabe-se que processos complexos podem ser aproximados em seus modelos por processos de primeira ou segunda ordem acrescida de um tempo morto [4]. Esta prática é amplamente utilizada na indústria.

Desta maneira, o trabalho propõe a utilização de algoritmos PSO para a sintonia dos parâmetros associados a um controlador PID, com modelo matemático de processo conhecido. O processo a ser controlado possui a função de transferência dada por (2).

A utilização de sistemas de otimização inteligentes para a parametrização do controlador PID tem sido crescente na literatura correlata [5,6]. Diversos índices de desempenho podem ser otimizados. Mostra-se em [6] que, apesar de diferentes índices de desempenhos serem utilizados para a otimização da sintonia PID resultarem em diferentes parametrizações, o índice ISE mostra-se bastante eficiente pela busca por uma solução ótima global. Desta forma, para a otimização da sintonia, o algoritmo deste trabalho minimiza o índice de desempenho ISE, definido por (3).

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 6s^2 + 5s} \quad (2)$$

$$ISE = \int_0^T e(t)^2 dt \quad (3)$$

A viabilidade de implementação do algoritmo é analisada comparando-se os resultados obtidos aos resultados do método de Ziegler-Nichols.

3 Solução do problema

3.1 Otimização por enxame de partículas

Otimização por exame de partículas ou *particle swarm optimization* (PSO) é um algoritmo

computacional baseado na interação social entre indivíduos de um determinado grupo. Sua teoria se fundamenta na observação do comportamento de grupos de animais como pássaros, peixes, entre outros, que realizam interessantes tarefas de otimização na execução de atividades simples, como a busca por alimentos [5,6].

Uma população de organismos através de interações simples conduz a resolução de problemas globais complexos. Do ponto de vista de implementação, o algoritmo PSO possui esforço computacional bastante reduzido e simplicidade de implementação, apresentando resultados promissores.

Um enxame ou um *swarm* consiste de indivíduos denominados partículas, os quais representam, individualmente, diferentes soluções da função a ser otimizada. O enxame é inicializado aleatoriamente e as partículas se movimentam no espaço multidimensional de busca dos parâmetros, ajustando sua posição de acordo com a sua experiência individual e a experiência coletiva do bando. Desta forma, uma solução ótima é almejada no espaço de busca através do movimento do enxame rumo ao ponto ótimo. À cada iteração, as partículas se movimentam levando em consideração a melhor solução encontrada em iterações anteriores, convergindo para um ponto de mínimo ou máximo do espaço de busca. A performance de cada indivíduo é medida através de uma função *fitness* relacionada com o problema a ser otimizado.

O PSO é um algoritmo que possui um vetor de velocidades e outro vetor de posição, sendo representativos da posição e velocidade de cada partícula. Seja D a dimensão do espaço de busca, tem-se, $X_i = [x_i^1 x_i^2 \dots x_i^D]$, $V_i = [v_i^1 v_i^2 \dots v_i^D]$, onde X_i representa o vetor de posições e V_i representa o vetor de velocidades de determinada partícula i .

Os valores de *fitness* são calculados para cada partícula a cada iteração, e a posição que reflete o melhor *fitness* P_{besti} de cada partícula até o momento é atribuída à variável xP_{besti} . A posição do melhor *fitness* conseguido entre todas as partículas até o momento G_{best} é atribuída à variável xG_{best} . Valores de velocidade máxima, V_{max} e mínima $-V_{max}$ são utilizados como limitadores, garantindo-se que o sistema de convergência não se torne instável no espaço de busca. A partir dessas definições iniciais o processo iterativo do algoritmo é iniciado. Cada partícula atualiza sua posição e velocidade conforme (4) e (5), onde k é o número de iterações.

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + C_1 \cdot r_1 \cdot (xP_{besti} - X_i^k) + C_2 \cdot r_2 \cdot (xG_{best}^k - X_i^k) \quad (4)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot \Delta t \quad (5)$$

Em (5) e (6), w representa a inércia das partículas e possui a função de balancear a busca localmente ou globalmente, r_1 e r_2 são número aleatórios entre [0,1] e C_1 e C_2 são constantes positivas que representam a cognição particular e a cognição do enxame respectivamente.

Caso a velocidade adquirida por uma partícula ultrapasse o limite estabelecido, esta velocidade é saturada conforme (7).

$$V_i^k = \begin{cases} -v_{max}, & \text{se } v_i^k \leq -v_{max} \\ v_{max}, & \text{se } v_i^k \geq v_{max} \end{cases} \quad (6)$$

O critério de parada do PSO pode ser definido com relação a um número máximo de iterações ou quando a posição das partículas não estiverem mais sendo modificadas.

O algoritmo pode ser representado através do fluxograma da figura 2.

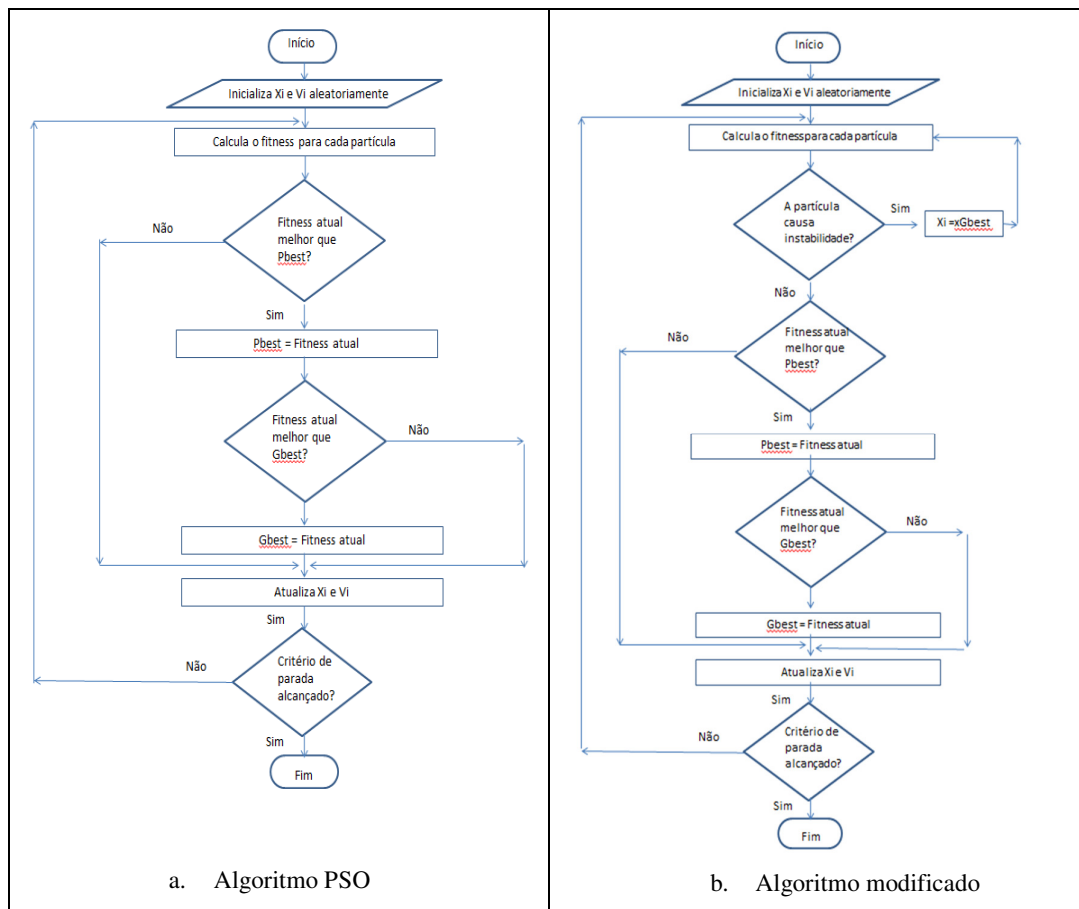


Figura 2. Algoritmos PSO

3.2 PID sintonizado por PSO – Implementação do algoritmo

Para a implementação do algoritmo, os parâmetros do PSO descritos na seção 3.1 devem ser definidos. Sabe-se que esses parâmetros influenciam os resultados da otimização, como por exemplo, o número de partículas deve ser definido de forma a conciliar a busca pelo máximo global com o custo computacional. A velocidade máxima afeta a habilidade do sistema de escapar de mínimos locais, refinando o resultado e, por fim, a inicialização do enxame deve ser feita dentro dos valores máximos e mínimos de busca. Os valores adotados neste trabalho estão descritos na tabela 1. Como critério de parada, além do número máximo de iterações, adotou-se o critério da estagnação do enxame, ou seja, se 98% das partículas não mudarem mais suas posições, o critério de parada é estabelecido.

Tabela 1: Parâmetros do PSO

População	Iterações máximas	C_1	C_2	w	K_p	K_i	K_d
100	100	1	3	0.3	Inicializado entre [1,20]	Inicializado entre [0,10]	Inicializado entre [0,10]

Para esta simulação, uma modificação no algoritmo PSO foi implementada. Uma minimização do ISE pode significar a instabilidade da resposta de controle, pois não é calculado a priori a margem de estabilidade do sistema

Para não haver convergência para a minimização do ISE que resulte em resposta instável, o fluxograma original que representa o algoritmo do PSO foi alterado como é mostrado na figura 2b. A cada iteração, os polos da função de transferência em malha fechada são analisados e se esses tiverem parte real positiva, a partícula tem sua posição alterada para a melhor posição atingida pelo grupo, conseguindo sair da posição de instabilidade.

Todo o algoritmos e simulações foram realizadas no software MATLAB.

4 Resultados

Realizando o algoritmo descrito na seção anterior, obtém-se a geração inicial das partículas no espaço tridimensional de K_p, K_i, K_d conforme a figura 3. Na iteração 4 observa-se que o enxame convergiu para um ponto ótimo da função ISE. A resposta do sistema para esta tripla otimizada em $K_p = 14.3676, K_i = 2.9465, K_d = 11.1311$ é apresentada na figura 4.

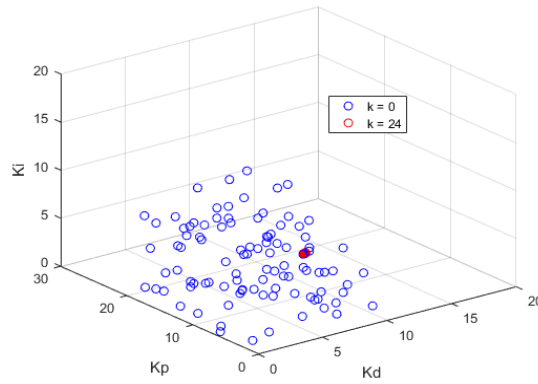


Figura 2. Swarm inicial e convergência do bando na iteração 24.

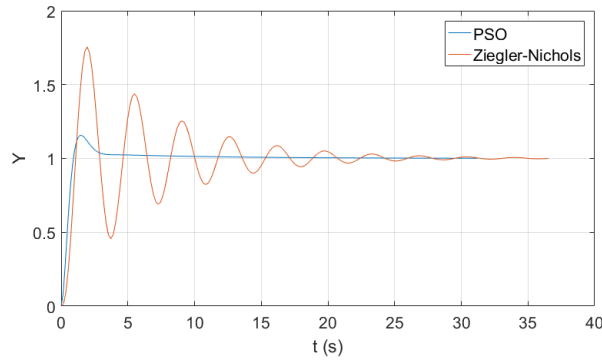


Figura 4. Resposta ao degrau com PID otimizado por PSO e Ziegler-Nichols.

Para analisar o desempenho da sintonia PSO comparou-se a sua resposta à sintonia Ziegler-Nichols. Para a sintonia Ziegler-Nichols utilizou-se o método de oscilação sustentada, que pode ser consultado em [3].

Os valores encontrados para a tripla de parâmetros foram $K_p = 18, K_i = 1.4050, K_d = 0.3513$. A resposta do sistema sintonizado por Ziegler-Nichols é também apresentada na figura 4 e as comparações entre os índices ISE são apresentados na tabela 2 juntamente com as respostas dinâmicas dos dois métodos de sintonia.

Tabela 2 – Comparação ISE e dinâmica

	Ziegler-Nichols	PSO
ISE	34,24	0.66
Tempo de pico (s)	1,96	1,15
<i>Overshoot</i> (%)	75,5	14,5
Tempo de subida (s)	1,08	0,94
Tempo de estabelecimento (s)	25	11,45

5 Conclusões

Neste artigo um método de otimização de sintonia PID baseado em PSO é proposto. Mostrou-se analiticamente e graficamente que há melhora substancial no tempo de subida, *overshoot* e tempo de estabelecimento quando da utilização deste método. A performance indicada pelo critério de desempenho ISE mostrou-se bem melhor no método apresentado, do que no utilizado pelo critério de Ziegler-Nichols. A utilização de PSO para ajuste de parâmetros PID apresenta vantagens frente a outros métodos, já que, permite que o projetista saiba pouco sobre a planta e inclusive utilize a aproximação de primeira ou segunda ordem mais tempo morto. Mesmo com a aproximação, o algoritmo estará bem mais próximo do ótimo global do que os métodos tradicionais de sintonia, resultando em grande segurança ao projetista. Pode-se utilizar o algoritmo da figura 2, sem a implementação modificada da figura 3, desde que este algoritmo seja implementado dentro das margens de estabilidade do sistema.

6 Referências

- [1] David B. "Process control performance: Not as good as you think." Control Engineering (1993)
- [2] Dwyer, A. The PI and PID controller tuning rules handbook. Imperial College Press, 2006
- [3] Amaral, J. Franco M., M. A. C. Pacheco, and R. Tanscheit. "Sintonia de Controladores PID utilizando Algoritmos Genéticos." Rica, Rio de Janeiro 08, (2010)
- [4] Ogata, Katsuhiko, Engenharia de Controle Moderno, 5ª ed. São Paulo: Pearson - Prentice Hall, (2010)
- [5] Y. Hsu, Design of a Self-Tuning PI Controller for a STATCOM Using Particle Swarm Optimization, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 2, pp. 702-715 (2010).
- [6] F. Kudlačák and T. Krajčovič, Error behaviour in PID controll systems with dynamic processes, 2016 International Conference on Applied Electronics (AE), pp. 141-144, (2016)