



Sintonia de controladores PID: estado da arte

Felipe Tozim Demiti¹ – felipetozim2@gmail.com
Cid Marcos Gonçalves Andrade¹ – cmgandrade@uem.br

1 – Universidade Estadual de Maringá – UEM Maringá

Resumo: Este trabalho tem o objetivo de fazer uma curta revisão sobre o uso de algoritmos evolutivos na sintonia de controladores com ação Proporcional Integral Derivativa (PID). Inicialmente é feita uma breve introdução sobre controle e sintonia de controladores PID. Após são apresentadas as principais características dos algoritmos evolutivos que serão objeto de estudo, ou seja, algoritmos genéticos, algoritmos de evolução diferencial e otimização por enxame de partículas. Em seguida são apresentados alguns trabalhos que abordam a sintonia de PID com esses tipos de algoritmos. Por fim, com base nos trabalhos analisados, concluiu-se que esses algoritmos evolutivos são eficazes para a sintonia de controladores PID.

Palavras-chave: Sintonia de controlador PID; Métodos evolutivos; Otimização; Revisão.

1. Introdução

O PID é o controlador mais usado na indústria (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011). A sintonia de um controlador PID consiste em determinar os ganhos da ação proporcional, da integral e da derivativa, ou seja, K_p , K_i e K_d respectivamente. Eles podem ter seus valores determinados de muitas formas. O método tradicional mais encontrado na literatura é o de Ziegler-Nichols (ZN)(ÅSTRÖM;HÄGGLUND, 1995). Uma desvantagem desse método é a necessidade de se conhecer a dinâmica do processo, o que pode ser muito custoso, no caso de problemas reais (SOUZA et al., 2011).

Com o intuito de aperfeiçoar essa busca e conseguir um controle mais eficiente, algoritmos heurísticos como o de Evolução Diferencial (ED), Algoritmo Genético (AG) e o algoritmo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), são uma alternativa.

Este trabalho tem o intuito de apresentar as principais características desses algoritmos, bem como seus principais conceitos. Entretanto o foco principal é a abordagem de alguns trabalhos que fazem uso dessas técnicas na sintonia de controladores PID e seus respectivos resultados. Ao final, é apresentada uma conclusão, destacando as características e a aplicabilidade de cada método para a sintonia de controladores PID.

2. Algoritmos de computação evolutiva

Os algoritmos de computação evolutiva são algoritmos bioinspirados, ou seja, eles têm sua dinâmica pautada em padrões encontrados na natureza e muitas vezes estudados pela biologia.

2.1. Algoritmo genético

Os Algoritmos Genéticos (AG) foram inventados por John Holland na década de 1970 (HOLLAND, 1975). Eles são algoritmos matemáticos que se baseiam no princípio da seleção natural, proposto por Darwin além do conceito de herança genética, desenvolvidos no trabalho de Gregor Mendel.

Os principais termos que apresentam relação com AGs, são (CASTRO, 2001): cromossomo (cada cromossomo corresponde a uma solução do problema), gen ou gene (é a unidade formadora do cromossomo, cada gene representa uma variável do problema), população (conjunto de cromossomos ou soluções), geração (quantidade de iterações realizadas pelo algoritmo), operações genéticas (operações executadas pelo algoritmo em cada cromossomo), espaço de busca ou região viável (espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado) e função objetivo ou de avaliação (função que se deseja otimizar).

As operações fundamentais dessa técnica são: seleção, reprodução, cruzamento e mutação (CASTRO, 2001). Na etapa de seleção os indivíduos mais aptos são favorecidos, para em seguida serem reproduzidos. Uma parte dos indivíduos reproduzidos cruza permitindo a troca de suas características genéticas. As mutações têm a finalidade de garantir a variabilidade genética da população. Elas podem acontecer em pequena escala e produzir uma modificação aleatória no material genético. A evolução faz com que o algoritmo convirja para regiões mais prósperas do espaço de busca.

Entre as principais vantagens dos AGs está o fato de serem uma técnica de busca global, permitirem a otimização de problemas mal estruturados e não necessitarem de uma formulação matemática precisa do problema (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010). Em síntese, é uma técnica robusta que pode ser empregada em vários problemas, sendo também eficaz e eficiente, pois em um tempo razoável, é capaz de determinar soluções ótimas (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010).

2.2 Algoritmo de evolução diferencial

O algoritmo ED, é uma das principais técnicas utilizadas na resolução de problemas de otimização (SOUZA et al., 2011). Foi proposto por Storn e Price em 1995. Ele é uma técnica baseada em população, e está diretamente relacionada com os algoritmos evolutivos. Suas características simples e diretas, fazem dele uma ótima opção para a otimização numérica (COELHO; PESSÔA, 2011). O algoritmo DE é um otimizador global que funciona de modo confiável em ambientes não-lineares e multimodais (COELHO; PESSÔA, 2011).

O grande diferencial deste algoritmo está no modo de atualização de cada indivíduo, que ocorre por meio da realização de operações vetoriais. Essencialmente, a diferença ponderada entre dois indivíduos da população é adicionada a um terceiro indivíduo da mesma população (SOUZA et al., 2011). Desse modo, o indivíduo produzido por meio destas operações vetoriais é avaliado através da função objetivo, podendo nas gerações seguintes, substituir

indivíduos mal sucedidos.

Entre as vantagens do ED estão uma estrutura simples e compacta, fácil uso, elevada robustez e convergência (COELHO; PESSÔA, 2011).

2.3 PSO

O PSO foi proposto por James Kennedy e Russell Elberhart em 1995 (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013). Seu desenvolvimento foi baseado no “comportamento social” verificado em várias espécies de pássaros e de peixes (SERAPIÃO, 2009).

Esta técnica não utiliza operadores evolucionários em suas manipulações, tais como mutações e cruzamentos e o principal elemento, são as chamadas partículas (FALCUCCI et al., 2007). Cada partícula de um grupo de partículas tem sua própria experiência, além da capacidade de avaliar a qualidade dessa experiência. Por causa da característica social de cada partícula, elas também conhecem o comportamento de seus vizinhos. Então, a tomada de decisão de determinada partícula está diretamente relacionada ao seu desempenho e de seus vizinhos.

O PSO procura um ponto de equilíbrio entre a inteligência social e a cognitiva dos indivíduos. Se a individualidade é priorizada, a procura em diferentes regiões do espaço de busca é intensificada. Porém, se isso for valorizado excessivamente, torna-se mais difícil encontrar o ótimo global. Quando a sociabilidade é aumentada, a partícula aprende mais com a experiência da sua vizinhança. Mas, se ela for muito elevada, pode ocorrer de todas as partículas convergirem para o primeiro mínimo encontrado, que é possível que seja um mínimo local (LOPES, 2017).

3. Aplicações e resultados

3.1 AG

Este artigo abordará os trabalhos que apresentam o AG aplicado em sistemas que aferem a quantidade de oxigênio dissolvido na água (BO; JIANG, 2012), controle em plantas teóricas (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010) e uma unidade de craqueamento catalítico (ARRUDA et al., 2008).

No sistema que aferi a quantidade de

oxigênio dissolvido na água, o AG otimizou o algoritmo de controle Fuzzy (BO; JIANG, 2012), presente no PID do sistema. Esta otimização ocorreu no grau de associação da função, nas regras de controle Fuzzy além dos fatores quantitativos e fatores de escala (BO; JIANG, 2012). A aplicação dessa técnica em um sistema de tratamento de esgoto reduziu o consumo de energia elétrica e aumentou a capacidade produtiva (BO; JIANG, 2012).

Quando aplicado no controle de plantas teóricas por meio de simulação, o AG mais uma vez obteve bons resultados (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010). O objetivo era minimizar a diferença entre a resposta desejada e a resposta obtida, ou seja, reduzir o erro (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010). Três diferentes tipos de plantas, com diferentes níveis de complexidade foram usadas nos testes. Os resultados foram comparados com a sintonia feita segundo o método de ZN, sendo confirmado que o AG obteve melhores resultados que esse método tradicional (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010). Ajustes após o processo de otimização via AG não foram necessários (AMARAL; PACHECO; TRANSCHEIT, 2010).

Na aplicação em uma unidade de craqueamento catalítico o AG realizou uma otimização multiobjetivo em um processo multivariável. A vantagem de um sistema de controle multivariável com diversas malhas independentes, é que a sintonia de todos os controladores pode ser feita de modo unificado e racional (ARRUDA et al., 2008).

Como critério independente que à ser minimizado, foi considerado o desempenho de cada malha (ARRUDA et al., 2008). Os critérios Erro Quadrático Ponderado pelo Tempo (ITSE) e variância mínima são agregados pela função de avaliação de desempenho. Depois, a função que avalia cada malha é reunida numa abordagem de soma ponderada e o usuário tem a possibilidade de atribuir prioridades entre as malhas (ARRUDA et al., 2008).

Uma contribuição desse trabalho é a aplicação de um algoritmo genético alterado pela introdução da técnica de nicho e castas em um problema de otimização multiobjetivo (ARRUDA et al., 2008).

São usados quatro diferentes nichos, o objetivo é limitar a competição aos indivíduos com potenciais semelhantes. Com o uso de duas castas (elitista e de reprodução) foi produzida uma boa relação entre a diversidade da população e a pressão seletiva (ARRUDA et al., 2008). Terminado o processo de evolução, a casta elitista determinou não só a melhor sintonia, mas um grupo de sintonias, com a guarda de 10% dos melhores indivíduos da população (ARRUDA et al., 2008). Um experimento com 100 indivíduos e 100 gerações foi executado em cerca de uma hora. Quantidade de tempo inferior a outros exemplos citados na literatura para o controle de unidades de craqueamento catalítico (ARRUDA et al., 2008).

3.2 Algoritmo ED

A otimização por algoritmos de evolução diferencial será abordada com base em três trabalhos. Um deles trata da sintonia de controladores PI/PID em um processo térmico (SOUZA et al., 2011), outro estuda a sintonia de controladores PI/PID com algoritmos de evolução diferencial combinados com mapas caóticos de Zaslavskii (COELHO; PESSÔA, 2011) e o último trata da sintonia de controladores PID na automação de ensaios em cabos condutores de energia elétrica (COELHO; MANNALA, 2005).

No estudo de caso de um processo térmico, foi simulado um processo em malha fechada de aquecimento de corrente de água por meio de um trocador de calor. Foram testados em controladores PI e PID. O algoritmo ED usado foi desenvolvido por Storn e Price em 1995. Ele possibilita a escolha do tipo de estratégia a ser usada no processo evolutivo (SOUZA et al., 2011). Estas estratégias são dependentes do vetor que será perturbado, da quantidade de vetores que serão considerados para a perturbação além do tipo de cruzamento que será utilizado (SOUZA et al., 2011).

Os resultados encontrados com o algoritmo ED foram confrontados com os dados fornecidos pela sintonia realizada por meio dos métodos clássicos de Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). A qualidade da sintonia com o algoritmo ED foi considerada equivalente a

qualidade das técnicas clássicas de sintonia, com base no índice de desempenho proposto (2) (SOUZA et al., 2011).

$$\eta_d = \frac{(t_s/t) + OS}{2} \quad (2)$$

t_s representa o tempo de assentamento, t é o tempo total de simulação e OS é o *overshoot*. Para o controlador PI, o menor valor do índice de desempenho ($\eta_d = 0.009491$) foi com o uso do método ED. Com o controlador PID, o algoritmo ED obteve $\eta_d = 0.006993$, o segundo menor valor. O menor valor foi de $\eta_d = 0.006494$ usando a sintonia por ZN por curva de reação.

Em outro trabalho o ED foi combinado com os mapas caóticos de Zaslavskii (EDCZ). A sintonia dos controladores PI e PID com algoritmo EDCZ foi aplicada em uma coluna de destilação binária simulada. Os resultados foram comparados com os dados obtidos usando o ajuste baseado em ED e AG.

O caos apresenta uma característica de não repetitividade, o que permite realizar pesquisas globais mais rapidamente do que pesquisas ergódicas estocásticas de cunho probabilístico (COELHO; PESSÔA, 2011). Por apresentarem uma implementação simples além da habilidade para evitar ficar preso em ótimos locais, o caos e os algoritmos baseados nele podem ser uma opção interessante para garantir a diversidade de busca em procedimentos de otimização estocástica (COELHO; PESSÔA, 2011).

As simulações forneceram resultados que apresentaram o EDCZ com o melhor desempenho, seguido do ED e do AG, em relação a função objetivo mínima e média, para 30 execuções (COELHO; PESSÔA, 2011). Esses resultados e comparações também indicaram que o EDCZ é uma abordagem promissora em relação a qualidade da solução (COELHO; PESSÔA, 2011).

No trabalho referente a automação de ensaios em cabos condutores de energia elétrica, o objetivo era realizar o controle de temperatura no ensaio de um cabo do tipo CAA 636 MCM (Grosbeak). Inicialmente o processo foi modelado. Ele apresenta quatro entradas e

quatro saídas. São utilizados quatro PID, que foram inicialmente sintonizados com algoritmos ED via simulação.

A otimização com ED foi também comparada com o método clássico de ZN. Os ganhos obtidos através de cada método foram diferentes (COELHO; MANNALA, 2005). Por meio de uma análise gráfica constatou-se que o controlador PID otimizado por ED obteve desempenho superior ao sintonizado por ZN para dois dos quatro PID utilizados, gerando um comportamento com menos oscilação no sinal de saída (COELHO; MANNALA, 2005).

Houve diferença no comportamento da saída dos processos reais e simulados. Mesmo funcionando, os controladores em sua maioria, apresentaram um comportamento liga-desliga, que não foi produzido nas simulações (COELHO; MANNALA, 2005). Ainda sim, todos os controladores foram capazes de garantir o controle da temperatura, inclusive quando submetidos a dinâmicas não-modeladas (COELHO; MANNALA, 2005).

3.3 PSO

A utilização da otimização por enxame de partículas será destacada por meio de três trabalhos: PSO aplicado à sintonia do controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didática industrial (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013), determinação dos parâmetros ótimos de um controlador PID aplicado na regulação de tensão de geradores síncronos através do método de otimização por enxame de partículas – PSO (FALCUCCI et al., 2007) e Sintonia de controlador pid utilizando os métodos R2W e PSO (LOPES, 2017).

No caso da aplicação prática do PSO em um controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didática industrial, o PSO foi utilizado como uma meta-heurística de otimização. O propósito era aperfeiçoar o ajuste dos ganhos, refinando os parâmetros do controlador, inicialmente obtidos com o método clássico Chien-Hrones-Reswick (CHR).

Nesse trabalho foi utilizado o critério (CHR 0%), ou seja, resposta rápida e sem sobressinal (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013). Foram realizadas dois tipos de sintonia, uma no controlador PI ($N = 2$) e outra no PID

($N = 3$), sendo N o número de variáveis do vetor que define a posição de cada partícula. Após a obtenção dos ganhos o PSO foi utilizado para refiná-los.

A produção aleatória dos vetores solução do PSO foi feita admitindo um intervalo com a adição de até 50% dos valores determinados via CHR 0% inicialmente (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013). A função de custo aplicada nas simulações do PSO era constituída de uma parcela fundamentada no índice de desempenho *Integral of Time multiplied by Absolute value of Error* (ITAE) e a outra é focada em minimizar a ação de controle do sistema (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013).

A análise do controlador foi feita considerando três situações. Na primeira a referência era de 150 mm, na segunda foi aplicado um degrau após 60 s em 220 mm e no último foi acionada a válvula de distúrbio do sistema, em cerca de 115 s (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013).

Os resultados obtidos via gráficos e tabelas, no caso da sintonia para o controlador PI, permite inferir que tanto o método PSO quanto o CHR solucionaram o problema e apresentaram desempenho semelhante (ANDRADE; COSTA; ANGÉLICO, 2013).

Em relação ao trabalho que utilizou o PSO na regulação de tensão de geradores síncronos foram utilizadas partículas de dimensão 3 (FALCUCCI et al., 2007). A escolha dos prováveis valores é feita de forma aleatória, o que pode gerar instabilidade no PID. Para evitar isso, é feita a verificação da estabilidade através do critério de presença de polos com parte real positiva (FALCUCCI et al., 2007).

A análise da eficiência da otimização foi feita com base nos seguintes parâmetros (FALCUCCI et al., 2007): M_p : sobressinal do sinal da resposta; t_R : tempo de subida, é o tempo que a resposta ao degrau utiliza para ir de 10% a 90% do valor de estabilização; t_s : tempo de estabilização, tempo necessário para que o sinal de resposta permaneça dentro de uma faixa máxima de erro ($\pm 2\%$); E_{ss} : erro em regime permanente para uma entrada do tipo degrau unitário.

Esses parâmetros compõem (3) que avalia as partículas. β é um fator que tem a

função de equilibrar os critérios M_p e E_{ss} com os tempos t_s e t_R .

$$F(x) = (1 - e^{-\beta}) \cdot (M_p + E_{ss}) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_R) \quad (3)$$

Após a realização de vários testes, foram definidos os melhores parâmetros para a procura da melhor resposta, como por exemplo, número de partículas igual à 10 e número de gerações igual à 30 (FALCUCCI et al., 2007). Consequentemente, os ganhos do controlador foram $K_p = 44,1$; $K_i = 2,9$ e $K_d = 0,08$ (FALCUCCI et al., 2007).

Nesse trabalho, o PSO foi considerado um método robusto para a sintonia de controladores PID (FALCUCCI et al., 2007). Isto foi justificado pela obtenção de respostas ao degrau unitário com características estáveis e constantes, mesmo com todas as variações dos parâmetros do PSO (FALCUCCI et al., 2007).

O último trabalho considerado realizou a sintonia de controladores PID por meio de PSO e de R2W (*Random Restricted Window*), com a finalidade de comparar os dois métodos. A sintonia foi feita para três plantas distintas, com a avaliação na saída do controlador do sobressinal, tempo de resposta e erro em regime permanente (LOPES, 2017). Em todos os testes, com relação ao tempo de subida, o método PSO obteve um valor inferior ao R2W, mas para o tempo de acomodação e o sobressinal os resultados do R2W foram melhores (LOPES, 2017). Quanto ao número de iterações, o PSO precisou de um valor menor que o R2W para determinar seu melhor resultado, entretanto eles foram inferiores aos obtidos pelo R2W (LOPES, 2017). Por fim, de um modo geral, o R2W obteve melhores resultados que o PSO em quase todos os 6 testes realizados para cada uma das três plantas.

4. Conclusão

Após a revisão e análise de diversos trabalhos é possível constatar a versatilidade dos algoritmos AG, PSO e ED, em especial para a sintonia de controladores PID. Os trabalhos mostraram que eles são capazes de apresentar resultados satisfatórios nas diversas aplicações em que foram empregados.

Com relação ao método do AG, os três

trabalhos abordados destacam e demonstram o desempenho superior desse método quando comparado com as técnicas clássicas de sintonia. O ED se destacou pela fácil implementação e bons resultados. A modificação dessa técnica, como o uso dos mapas caóticos de Zaslavskii, mostrou-se um recurso muito útil para elevar a qualidade dos resultados. Em comparação com o método de ZN o algoritmo ED determinou melhores resultados. Os trabalhos sobre PSO estudados permitem inferir que ele é um bom método para sintonia de controladores PI e PID. Assim como os outros métodos, quando comparado a técnicas tradicionais de sintonia, seus resultados foram superiores. Apenas na comparação com o método R2W, seu desempenho, de um modo geral, foi inferior.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar o estudo de técnicas que combinadas com os algoritmos evolutivos são capazes de melhorar a eficácia e a eficiência desses algoritmos. Outra sugestão é a utilização em uma aplicação prática dos métodos AG, ED e PSO a fim de compará-los em termos de desempenho e qualidade dos resultados.

5. Referências

- AMARAL, J. F. M.; PACHECO, M. A. C.; TRASCHEIT, R. **Sintonia de controladores PID utilizando algoritmos genéticos**. ICA Revista. nº 8, Jul. 2010.
- ANDRADE, L. H. S.; COSTA, B. L. G.; ANGÉLICO, B. A. PSO aplicado à sintonia do controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didática industrial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 11., 2013, Fortaleza. Anais eletrônicos. Disponível em: <<http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/7935.pdf>>. Acesso em 08 mar. 2018.
- ARRUDA, L. V. R.; SWIECH, M. C. S.; JÚNIOR, F. N.; DELGADO, M. R. **Um Método Evolucionário Para Sintonia De Controladores Pi/Pid Em Processos Multivariáveis**. Revista Controle & Automação. vol. 19, nº 1, pp. 1-17, Mar. 2008.
- ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. (1995). PID Controllers: Theory. Design and Tuning. Instrument Society of America, USA.
- CASTRO, R. E. **Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos**. 206 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- COELHO, L. S.; MANNALA, M. J. **Sintonia de Controladores PID Baseada em Evolução Diferencial Aplicada à Automação de Ensaio em Cabos Condutores De Energia Elétrica**. Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN). vol. 3, nº 2, pp. 71-83, 2005.
- COELHO, L. S.; PESSÔA, M. W. **A tuning strategy for multivariable PI and PID controllers using differential evolution combined with chaotic Zaslavskii map**. Elsevier. Expert Systems with Applications, vol. 38, pp. 13694-13701, 2011.
- FALCUCCHI, Marcelo; JÚNIOR, J. N. R. S.; BRAGA, A. P. S.; NASCIMENTO, J. A. Determinação dos parâmetros ótimos de um controlador pid aplicado na regulação de tensão de geradores síncronos através do método de otimização por enxame de partículas – PSO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL, 1., 2007, Florianópolis. Anais.
- HOLLAND, John H. Adaptation in natural and artificial systems. **An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence**. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- LI, L.; BO, W.; JIANG, B. **Study on PID Control System Based on Genetic Algorithms**. The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling, Atlantis Press, pp. 510-513, 2012.
- LOPES, F. R. Sintonia de controlador pid utilizando os métodos R2W e PSO. ENGEVISTA. vol.19, pp. 482-497, Maio 2017.
- NATIONAL INSTRUMENTS. Artigos. Explicando a Teoria PID. 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/wHITE-paper/3782/pt/>>. Acesso em: 08 mar. 2018.
- SERAPIÃO, Adriane Beatriz de Souza. **Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral**. Revista Controle & Automação, Rio Claro, v. 20, n. 3, p. 271-304, jul./ago./set. 2009.
- SOUZA, D. L.; MAIA, L. F. S.; LOBATO, F. S.; ALMEIDA, G. M., **Sintonia de controladores pid com o algoritmo de evolução diferencial**. X Brazilian Intelligent Automation Symposium, Annals, pp. 105-110, Sept. 2011.