

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA A SINTONIA FINA DE CONTROLADOR PID APLICADO A UM PÊNDULO FÍSICO AMORTECIDO

MARCELO S. PINHEIRO, BRUNNA S. VASCONCELLOS, ADEMAR G. COSTA JUNIOR

Laboratório de Instrumentação, Sistemas de Controle e Instrumentação (LINSICA)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

João Pessoa – PB

*E-mails: pinheiro84@yahoo.com.br, brunna_vasconcellos@hotmail.com,
ademar.costa@ifpb.edu.br*

Abstract—The Proportional Integral-Derivative (PID) controllers are commonly used in industrial processes because of their potential applications and simple structure. However, the main challenge related to PID controllers in industry applications is to obtain an appropriate tuning of PID parameters which result in a satisfactory system response, when related to the guarantee of the disturbances rejection that the control system can undergo. The different tuning methods of PID controller parameters do not always guarantee correct values, but it can result in a starting point for a fine tuning of these parameters. The Genetic Algorithm (GA) has become a great allied of the parameter tuning of the PID controller, since it is a bioinspired optimization method that uses crosses and mutations of the values, looking for the best tuning of the parameters. The purpose of this paper is the development of a PID controller, with the tuning of its parameters performed initially using experimental methods based on the reaction curve of a damped physical pendulum, and the refinement of this tuning by GA. The simulated and experimental results for the PID controller applied to the dynamic system are evaluated, both graphically and through system performance indexes.

Keywords—Genetic Algorithm, PID controller, damped physical pendulum PID, Controller tuning.

Resumo—Os controladores Proporcional – Integral – Derivativo (PID) são comumente utilizados nas indústrias de processos por causa das suas potenciais aplicações e sua estrutura simples. No entanto, o principal desafio relacionado aos controladores PID na indústria é a sintonia adequada de seus parâmetros para a produção de uma resposta satisfatória do sistema, no que se refere à garantia de rejeição de perturbações que o sistema controlado possa ser submetido. Os diversos métodos de sintonia dos parâmetros do controlador PID, nem sempre garantem os valores adequados, porém podem resultar em um ponto de partida para uma sintonia refinada desses parâmetros. O Algoritmo Genético (GA) tem se tornado um grande aliado da sintonia de parâmetros do controlador PID, já que é um método de otimização bioinspirado que utiliza cruzamentos e mutações dos valores, buscando a melhor sintonia dos parâmetros. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um controlador PID, com a sintonia dos seus parâmetros realizada, inicialmente, com métodos experimentais baseada na curva de reação de um pêndulo físico amortecido, e o refinamento dessa sintonia por meio de GA. Os resultados simulados e experimentais obtidos para o projeto do controlador PID aplicado ao sistema dinâmico são avaliados, tanto de forma gráfica, como por meio de índices de desempenho do sistema.

Palavras-chave—Algoritmo Genético, controlador PID, pêndulo físico amortecido, sintonia de controlador PID.

1 Introdução

Ao longo dos anos, inúmeros métodos foram propostos para a sintonia de controladores PID, podendo ser citadas as abordagens clássicas, como a de Ziegler e Nichols (1942), Cohen e Coon (1953), o controle via modelo interno (IMC), a resposta em frequência, a síntese direta, dentre muitas outras (Campos and Teixeira, 2010).

Entretanto, o PID possui algumas limitações, em que algumas situações, se torna difícil obter o desempenho desejado na presença de não linearidades desconhecidas, como, por exemplo, o tempo de atraso, perturbações, bem como variações de parâmetros do sistema. Geralmente, por não atingirem esses níveis desejados de eficiência, os controladores PID dependem do conhecimento do processo por parte do projetista, para um posterior ajuste fino dos ganhos (Santos Neto and Gomes, 2010).

Aliado a isso, a busca por procedimentos mais elaborados tem conduzido, continuamente, à ascensão da Inteligência Computacional (IC), que utiliza técnicas computacionais de forma inteligente com o objetivo de simular o comportamento humano.

O Algoritmos Genéticos (GAs – *Genetic Algorithms*), técnica de IC objeto do estudo apresentado neste trabalho, é um algoritmo de busca e otimização, inspirado em conceitos biológicos e na teoria evolutiva descrita por Charles Darwin, buscando pelas melhores soluções de um determinado problema por meio da estratégia de sobrevivência do mais apto (Holland, 1975).

Na área de sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos de controle PID e suas modificações provaram sua utilidade conferindo um controle satisfatório, embora que, em muitas situações, eles possam não proporcionar um controle ótimo. Dessa forma, a sintonia dos parâmetros do controlador PID, a partir de técnicas utilizando GAs, torna-se atrativa e realizável (Jinhua *et al.*, 2009; Castro *et al.*, 2016; Wei and Söffker, 2016; Ribeiro *et al.*, 2017).

O objetivo deste artigo consiste em desenvolver um controle de posição de um pêndulo físico amortecido, por meio de um controlador PID. A sintonia dos parâmetros desse controlador é realizada utilizando métodos conhecidos na literatura, para um posterior ajuste refinado por meio da utilização do

GA, para melhorar o desempenho do controlador PID utilizado.

O artigo está dividido dessa forma: na Seção 2 são apresentados de forma sucinta os métodos utilizados nesse trabalho para a sintonia do PID e os algoritmos genéticos (GA); na Seção 3 é apresentada a metodologia empregada no trabalho, descrevendo como o GA foi utilizado para a sintonia dos parâmetros do controlador PID aplicado ao sistema de um pêndulo físico amortecido; nas Seções 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos e as considerações finais do trabalho, respectivamente.

2 Referencial Teórico

Nesta seção são descritos os principais conceitos necessários para o entendimento da sintonia de controladores PID otimizada com Algoritmo Genético (GA), experimento proposto nesse trabalho. A topologia utilizada para o controlador PID é a forma paralela, cuja função de transferência é dada pela Equação (1):

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

com K_p , T_i e T_d sendo os parâmetros de sintonia do controlador PID e sua variação do controlador PI.

2.1 Sintonia de Controladores PID

Neste trabalho são utilizados os métodos de Ziegler-Nichols em malha aberta (ZN) e o de Chien-Hrones-Reswick (CHR) sem sobressinal. Posteriormente, é realizado um ajuste fino dos parâmetros do controlador PID por meio de GA.

Método Ziegler-Nichols (ZN)

O método de Ziegler-Nichols (1942) *apud* Campos and Teixeira (2010) sugere regras para a sintonia dos parâmetros dos controladores PID, baseadas na resposta experimental ao sinal do tipo degrau na entrada de um sistema dinâmico. As regras de sintonia de Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de K_p , T_i e T_d .

Ziegler-Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d , como função da constante de tempo T e do atraso de transporte L obtidas a partir da resposta ao degrau em malha aberta. Os parâmetros são calculados, de acordo com as equações da Tabela 1, onde K é a relação de amplitudes da saída e da entrada do sistema dinâmico.

Método Chien, Hrones e Reswick (CHR)

O método CHR sugere modificações no método de ZN em malha aberta, utilizando dois critérios de desempenho. Um com 20% de sobressinal e outro

sem sobressinal, sendo esse último adotado como o método para a sintonia dos parâmetros do controlador PID, com as equações ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1. Cálculo dos parâmetros do controlador PID baseado no método de ZN e de CHR sem sobressinal, de acordo com a resposta ao degrau do sistema dinâmico em malha aberta (Campos and Teixeira, 2010).

| Tipo de controlador | K_p | T_i | T_d |
|-------------------------|----------------------------|-------|---------------|
| PID ZN | $1,2 \frac{T}{K \times L}$ | $2L$ | $0,5L$ |
| PID CHR sem sobressinal | $0,6 \frac{T}{K \times L}$ | T | $\frac{L}{2}$ |

Ao analisar os métodos de sintonia ZN e CHR sem sobressinal, por meio da Tabela 1, tem-se o valor de K_p menor no CHR em relação ao ZN. Na prática não é necessária para a maioria dos processos industriais uma resposta muito rápida e oscilatória. A vantagem é que, por se escolher um ganho mais baixo, o sistema dinâmico é mais robusto, estando mais longe da instabilidade, podendo absorver mais variações na dinâmica do sistema devido, por exemplo, as não linearidades, a desgastes dos equipamentos, entre outros (Campos and Teixeira, 2010).

2.2 Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (GA – *Genetic Algorithm*) é uma técnica de busca, com o objetivo de chegar a um determinando estado, em que determinada condição é satisfeita. Esse estado é uma especificação de certos aspectos da realidade que são importantes ao problema (Linden, 2012).

Em termos gerais, o que um GA realiza é a criação de uma população de possíveis respostas ao problema a ser tratado, para depois submetê-la ao processo de evolução, constituído pelas etapas da Figura 1 (Deep and Sivanandam, 2008).

A partir desse fluxograma, tem-se as seguintes etapas de execução do GA como técnica de otimização:

- Início: gera-se uma população aleatória de n indivíduos. Quando já se tem alguma informação sobre o problema, podem-se introduzir soluções adequadas para iniciar a população com um valor de aptidão alto, ou adequado;
- Avaliação: é associado a cada cromossomo, o seu valor de aptidão na população;
- Seleção: os pais são selecionados de acordo com o seu valor de aptidão, em que quanto melhor o valor de aptidão, maior a chance desses pais serem selecionados;
- Cruzamento: de acordo com a probabilidade de ocorrer o cruzamento, as informações entre os pais são trocadas, formando-se os filhos. Se a operação de cruzamento não a-

conter, os filhos serão exatamente iguais aos pais (clones);

- **Mutação:** com certa probabilidade, geralmente bem menor do que a probabilidade de ocorrer o cruzamento, a mutação pode ocorrer em cada gene dos descendentes. Os filhos são colocados na nova população;
- **Troca:** substitui a antiga população pela nova população (módulo população);
- **Teste:** a aptidão é calculada, e se a condição de parada é satisfeita, o programa deve retornar a melhor solução encontrada na população atual.

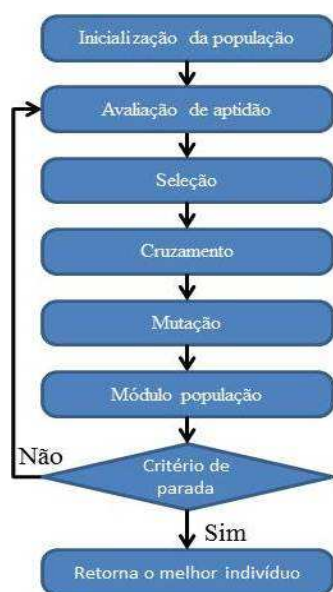


Figura 1. Funcionamento típico de um GA. Fonte: Adaptado de Deep and Sivanandam, 2008.

3 Metodologia

O GA proposto tem por objetivo obter os parâmetros do controlador PID que aprimore os parâmetros de resposta, tais como máximo sobressinal, tempo de subida e tempo de acomodação, no controle de posição de pêndulo físico amortecido.

De acordo com o fluxograma da Figura 1, inicialmente é criada uma população aleatória, onde cada indivíduo é constituído por valores dos ganhos K_p , K_i e K_d referentes ao controlador PID, os quais são avaliados e submetidos aos operadores genéticos até atingir o número de gerações desejadas.

A função de avaliação (fa) é o parâmetro que determina a qualidade de um cromossomo, o qual permite a obtenção de melhores respostas para o sistema. Em sistemas de controle, deseja-se obter respostas que se aproximem ao máximo da referência estabelecida, além de minimizar o tempo de acomodação e sobressinal da curva de resposta. Desse modo, são utilizadas comumente em sistemas de controle, funções de avaliação que minimizem os índices de desempenho (Campos and Teixeira, 2010) ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2. Índices de desempenho usado como função de avaliação no GA.

| Índice de desempenho | Equação |
|--|----------------------------------|
| ITAE – <i>Integral Time Absolute Error</i> | $ITAE = \int t \times e(t) dt$ |
| IAE – <i>Integral of Absolute Error</i> | $IAE = \int e(t) dt$ |
| ISE – <i>Integral of Squared Error</i> | $ISE = \int e^2(t) dt$ |

onde $e(t)$ é o sinal de erro proveniente da diferença entre o sinal de saída e o sinal de referência.

A função de avaliação (Equação 2) é definida como a combinação dos índices de desempenho, e o peso de cada, definidos empiricamente, como:

$$fa = 16,04 \times ITAE + 59,87 \times IAE + 527,15 \times ISE \quad (2)$$

Após toda a avaliação da população, os pais responsáveis pela geração da próxima população de indivíduos são selecionados por meio do método do ranqueamento, com a finalidade de combinar os cromossomos dos dois pais, originando um novo indivíduo, ou concebendo um clone de um indivíduo da geração anterior.

Ao final da primeira geração de descendentes, os filhos são avaliados e, caso o critério de parada não tenha sido atingido, o indivíduo mais apto da antiga população será integrado à nova população, processo de elitismo, para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população. Após essa etapa, a nova população substituirá a antiga.

Terminada a etapa de elitismo, o processo é repetido até que seja atingido o critério de parada, que nesse trabalho foi adotado o número de gerações, cujo número foi escolhido de forma empírica, após se verificar a convergência dos filhos em torno de 20 gerações. A Tabela 3 ilustra os parâmetros do GA implementando no projeto.

Tabela 3. Parâmetros do GA implementado.

| Parâmetros | Valores |
|-----------------------------------|--------------------|
| Número de indivíduos da população | 100 |
| Número de gerações | 25 |
| Probabilidade de cruzamento (%) | 80 |
| Probabilidade de mutação (%) | 0,5 |
| Indivíduos do elitismo | 1 |
| Critério de parada | Número de gerações |

Para o estudo da aplicação do GA para a sintonia dos ganhos de um controlador PID, foi utilizado um pêndulo físico amortecido para o controle da posição angular, com a Figura 3 ilustrando o sistema dinâmico utilizado.

O controle da posição angular é realizado por meio da variação de tensão no motor CC (entrada do sistema). A posição angular do pêndulo é medida por

um acelerômetro (saída do sistema), localizado na parte fixa do eixo, como ilustrado na Figura 3.

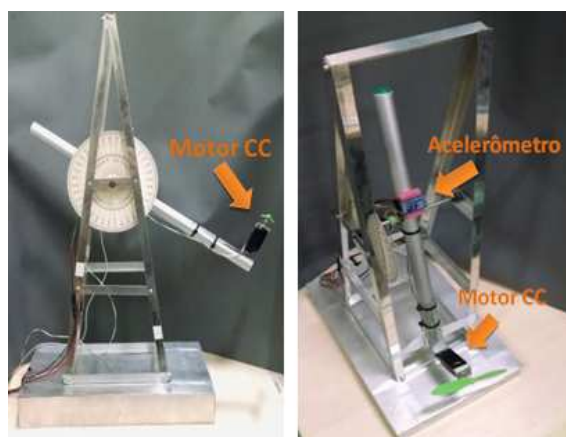


Figura 3. Sistema dinâmico utilizado.

Para a sintonia do controlador PID otimizada com GA aplicado ao pêndulo físico amortecido, foi necessário identificar o sistema com a intenção de obter modelos matemáticos para a simulação e a aplicação experimental do método.

O sistema foi identificado pelos métodos de Ziegler-Nichols e Smith de primeira ordem (Coelho and Coelho, 2004) e os modelos matemáticos identificados são ilustrados na Tabela 4.

Tabela 4. Modelos matemáticos obtidos pelos métodos de Ziegler-Nichols e Smith de primeira ordem.

| Método | Modelo matemático |
|-------------------------|--|
| Ziegler-Nichols | $G_{ZN}(s) = \frac{0,20742}{35s + 1} e^{-14s}$ |
| Smith de primeira ordem | $G_{SM}(s) = \frac{0,20742}{16,5s + 1} e^{-13,5s}$ |

As funções transferências que representam modelos matemáticos do pêndulo físico amortecido são necessários tanto para a simulação do sistema dinâmico, como para o cálculo da função de avaliação do GA utilizado.

4 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o controle de posição do pêndulo físico amortecido.

4.1 Simulação

As simulações do sistema dinâmico foram realizadas por meio do Matlab. Para utilização do controlador PID na topologia clássica (ou paralela – Equação 1), foi necessário sintonizar os ganhos K_p , K_i e K_d do controlador PID. A Tabela 5 contém os valores dos ganhos obtidos pelos métodos de Ziegler-Nichols e CHR, a partir do uso do método da curva

de reação de Ziegler-Nichols em malha aberta e o de Smith de primeira ordem, com base na Tabela 1.

Tabela 5. Ganhos do controlador PID.

| Ziegler-Nichols em malha aberta | | | |
|---------------------------------|--------|--------|---------|
| Método de sintonia | K_p | K_i | K_d |
| Ziegler-Nichols | 3,0000 | 0,1071 | 21,0000 |
| CHR | 7,2316 | 0,2066 | 50,6212 |
| Smith de primeira ordem | | | |
| Ziegler-Nichols | 1,4667 | 0,0543 | 9,9000 |
| CHR | 3,5354 | 0,2143 | 23,8643 |

A Figura 4 ilustra o gráfico comparativo entre as respostas do sistema em malha fechada com o controlador PID, ao ser aplicado um sinal do tipo degrau com a mudança da posição angular de 23° para 65°, faixa escolhida para a região de trabalho, para cada método de sintonia. Os valores dos parâmetros do controlador PID sintonizados utilizados nessa comparação estão indicados na Tabela 5.

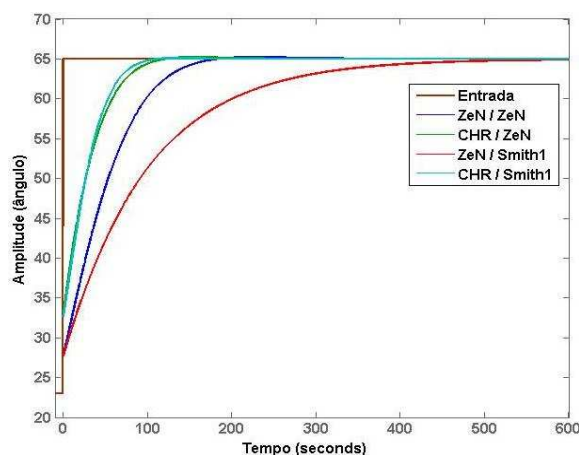


Figura 4. Gráfico da resposta ao degrau para cada controlador PID.

Para a escolha do controlador PID a ser empregado para a sintonia fina por GA, foram utilizados os índices de desempenho da Tabela 2. Os resultados são ilustrados na Tabela 6, em que o melhor controlador é o que apresenta um menor valor, destacados na cor cinza.

Após analisar o desempenho dos controladores à reposta ao sinal do tipo degrau, de acordo com os valores ilustrados na Tabela 6, os melhores controladores são os que foram sintonizados pelo método de CHR, comparados pelos índices IAE, ITAE e ISE. Por isso, esses controladores, considerando o modelo matemático correspondente, foram escolhidos para aplicar o GA e refinar a sintonia dos ganhos do controlador PID utilizado.

Para realizar o ajuste fino por meio do GA aos valores dos ganhos do controlador PID, foi necessário definir o espaço de busca. As configurações foram definidas para a variação de 50% e 95% em relação ao valor encontrado pelos métodos calculados.

Tabela 6. Índices de desempenho dos controladores convencionais.

| Ziegler-Nichols em malha aberta | | | |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Método de sintonia | IAE ($\times 10^2$) | ITAE ($\times 10^4$) | ISE ($\times 10^2$) |
| Ziegler-Nichols | 9,1172 | 3,7006 | 4,6970 |
| CHR | 4,8115 | 1,3325 | 2,0128 |
| Smith de primeira ordem | | | |
| Ziegler-Nichols | 17,6470 | 16,9430 | 7,9362 |
| CHR | 4,5530 | 1,0854 | 2,0337 |

Após a aplicação do GA foram encontrados os novos parâmetros para cada controlador escolhido pelos índices de desempenho da Tabela 6. A Tabela 7 contém os novos valores dos ganhos encontrados pelo GA respeitando seus espaços de busca.

Tabela 7. Sintonia fina realizada pelo GA para os ganhos do controlador PID.

| Ziegler-Nichols em malha aberta | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|
| Método de sintonia | K_p | K_i | K_d |
| CHR | 7,2316 | 0,2066 | 50,6212 |
| GA-50% | 9,6857 | 0,3014 | 33,2572 |
| GA-95% | 12,0587 | 0,3937 | 8,55893 |
| Smith de primeira ordem | | | |
| CHR | 3,5354 | 0,2143 | 23,8643 |
| GA-50% | 4,3546 | 0,3072 | 15,8124 |
| GA-95% | 6,8662 | 0,3919 | 4,0160 |

O gráfico da Figura 5 ilustra a comparação entre os controladores original (sem o GA) e os dois controladores com algoritmo genético considerando cada espaço de busca distinto.

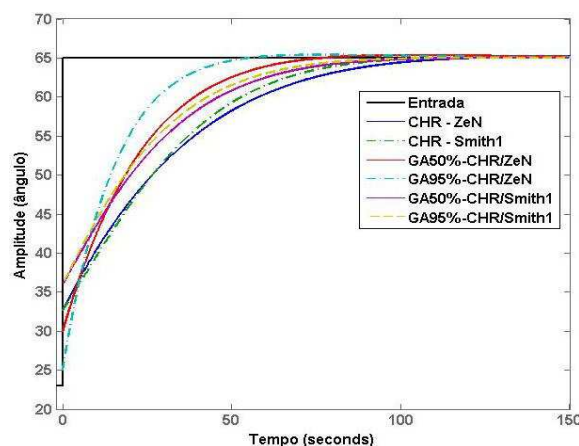


Figura 5. Gráfico da resposta ao degrau para os controladores PID sintonizados pelo GA.

Os índices de desempenho da Tabela 2 foram utilizados para verificar o desempenho dos controladores PID projetados. Os resultados são exibidos na Tabela 8, em que o melhor controlador é destacado na cor cinza.

Tabela 8. Índices de desempenho dos controladores PID - resultados simulados.

| Ziegler-Nichols em malha aberta | | | |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Método de sintonia | IAE ($\times 10^2$) | ITAE ($\times 10^3$) | ISE ($\times 10^2$) |
| CHR | 4,8115 | 13,325 | 2,0128 |
| GA-50% | 3,4268 | 6,9661 | 1,5067 |
| GA-95% | 2,6762 | 4,0895 | 1,3055 |
| Smith de primeira ordem | | | |
| CHR | 4,5530 | 10,854 | 2,0337 |
| GA-50% | 3,2893 | 5,5900 | 1,5512 |
| GA-95% | 2,4650 | 3,2753 | 1,1599 |

Com os resultados indicados na Tabela 8, percebe-se que os controladores PID com sintonia refinada com o GA de 95% obtiveram os melhores desempenhos, utilizando os três índices de desempenho avaliados (IAE, ITAE e ISE), que já era esperado por possuir um espaço de busca maior. Todos os controladores refinados pelo GA melhoraram seus índices com relação ao controlador sem GA.

4.2 Resultados Experimentais

Os resultados obtidos experimentalmente para o controle de posição angular do pêndulo físico amortecido, utilizando o controlador PID com e sem o refinamento do algoritmo genético são apresentados.

A implementação do sistema foi realizada para o controlador ajustado pelo método do CHR e com a sintonia por GA de 95%, para o método de SN e Smith de primeira ordem. Foram realizados dois experimentos para cada modelo matemático para servir de comparação entre os controladores.

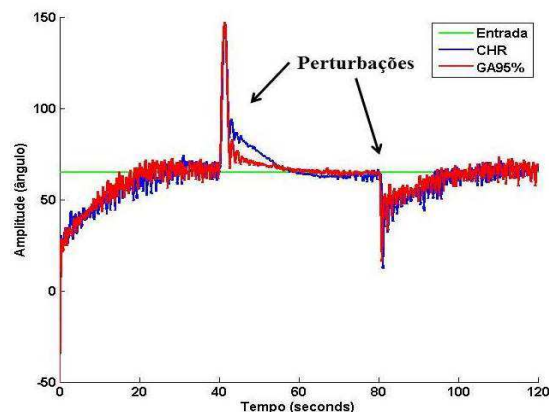


Figura 6. Gráfico da resposta ao degrau para os controladores PID CHR sem e com o ajuste GA de 95% para o modelo Ziegler e Nichols.

O gráfico da Figura 6 ilustra a resposta ao degrau, de 65°, do sistema para o modelo matemático Ziegler-Nichols com os controladores CHR sem o ajuste GA e com o ajuste GA de 95%. Os sistemas conseguiram seguir a referência, em 65°, mesmo frente a perturbações de 85° e -45° aplicadas nos instantes 40 s e 80 s respectivamente.

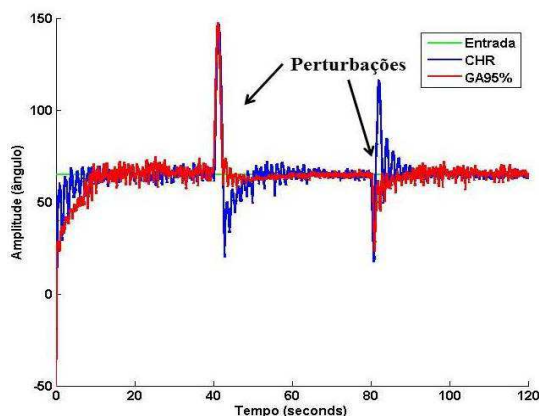


Figura 7. Gráfico da resposta ao degrau para os controladores PID CHR sem e com o ajuste GA de 95% para o modelo Smith.

O gráfico da Figura 7 ilustra a resposta ao degrau, de 65°, do sistema para o modelo matemático Smith e os controladores CHR sem o ajuste GA e com o ajuste GA de 95%. Os sistemas conseguiram seguir a referência, em 65°, mesmo frente a perturbações. Comparando as duas figuras, percebe-se que com a utilização do ajuste por GA de 95%, há um tempo de estabilização menor em torno do valor de *setpoint* desejado.

Além da comparação gráfica, também foram calculados os índices de desempenho para avaliar o melhor controlador. Na Tabela 9 contém os valores dos índices para cada controlador aplicado na planta real.

Tabela 9. Índices de desempenho dos controladores PID - resultados experimentais.

| Ziegler-Nichols em malha aberta | | | |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Método de sintonia | IAE ($\times 10^5$) | ITAE ($\times 10^7$) | ISE ($\times 10^7$) |
| CHR | 3,7877 | 2,3301 | 2,4606 |
| GA-95% | 3,6544 | 2,2443 | 2,3375 |
| Smith de primeira ordem | | | |
| CHR | 3,8124 | 2,3147 | 2,4928 |
| GA-95% | 3,7589 | 2,2917 | 2,4190 |

O controlador para o modelo Ziegler-Nichols, com ajuste do GA, obteve o melhor desempenho nos três índices de desempenho avaliados IAE, ITAE e ISE. Todos os controladores ajustados com o GA obtiveram os melhores desempenhos sobre seus controladores originais.

5 Considerações Finais

A utilização de técnicas de GA para o ajuste fino dos parâmetros do controlador PID, se torna uma solução viável para melhorar o desempenho do sistema, como mostraram os resultados obtidos nesse trabalho, uma vez que o controlador sintonizado com o GA obteve uma resposta mais rápida e com um desempenho melhor que os métodos clássicos.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos outras técnicas de otimização, como o PSO (*Particle Swarm Optimization* – Otimização por enxame de partículas), o algoritmo de colônia de formigas (*Ant Colony Optimization*), entre outros. Os divisores de PWM podem ser melhor estudados para a utilização do Arduino, além do uso de outras plataformas de prototipagem eletrônica como o Raspberry Pi e o Beaglebone, que possua uma arquitetura e um tempo de processamento suficiente para suportar o projeto em tempo real.

Agradecimentos

Os autores do presente artigo agradecem ao Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), pelo apoio e contribuição para que essa pesquisa fosse realizada.

Referências Bibliográficas

- Campos, M. C. M. M. and Teixeira, H. C. G. (2010). Controladores típicos de equipamentos e processos industriais. São Paulo: Blucher.
- Castro, F. A. *et al.* (2016). Comparison of fractional and integer PID controllers tuned by genetic algorithm. In: 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Curitiba (Brazil).
- Coelho, A. A. R. and Coelho, L. S. (2004). Identificação de sistemas dinâmicos lineares. Florianópolis – SC: Ed. UFSC.
- Deep, S. N. and Sivanandam, S. N. (2008). Introduction to genetic algorithms. Springer, New York.
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley.
- Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Ann Arbor (United States): University of Michigan Press.
- Jinhua, Z. *et al* (2009). Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers. Information Sciences, v. 179, p. 1007-1018.
- Linden, R. (2008). Algoritmos genéticos, 2a edição. São Paulo: Brasport.
- Ribeiro, J. M. S. *et al.* (2017). Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms. In: 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC), Sinaia (Romania).
- Santos Neto, A. F. and Gomes, F. J. (2010). Controladores PID: introduzindo inteligência computacional no controle industrial. Em: XXXVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (Cobenge 2010), Fortaleza (CE).
- Wei, C. and Söffker, D. (2016). Optimization strategy for PID-controller design of AMB rotor systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 24, n. 3, p. 788-803.