

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PID UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Roberto Batista Neto, Vinicius Santana P. Silva, Luciano Coutinho Gomes, Darizon A. Andrade,
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), Uberlândia – MG,
netobatistaroberto@gmail.com, vinicius.santana@gmail.com, lcgomes@ufu.br, darizon@ufu.br

Resumo - Controladores PID no campo de sistemas de controle de processos possuem vital importância. São utilizados em processos industriais em geral como controle de nível de líquidos, temperatura, pressão, fluxo, entre outros. Este artigo apresenta um Algoritmo Genético (AG) para sintonia automática de um controlador PID e que resulte em respostas otimizadas em relação aos métodos clássicos. Desenvolveu-se um ambiente computacional com interface simples e objetiva, que possibilita ao usuário obter, através do algoritmo desenvolvido, os melhores ganhos do controlador e compará-los com parâmetros obtidos por outros métodos.

Palavras-Chave - PID, sistemas de controle, algoritmos genéticos, otimização.

OPTIMIZATION OF PID PARAMETERS USING GENETIC ALGORITHMS

Abstract - PID controllers in the field of process control systems are vitally important. Its use in industrial processes usually appears as control of liquid levels, temperature, pressure, flow, among others. This paper presents a Genetic Algorithm (GA) for automatic tuning of a PID controller, which results in optimized response when compared to classical methods. A computational environment has been created, with clean and simple interface, which enables the user to obtain, through the developed algorithm, the best controller gains and compare them with values obtained by other methods.

Keywords - PID, control systems, genetic algorithms, optimization.

I. INTRODUÇÃO

Controladores PID (Proporcional-integral-derivativo) são largamente utilizados na indústria devido à sua simplicidade, funcionalidade e facilidade de implementação. É destacado que mais de 96% das malhas de controle empregam controladores PID convencionais [1], [2]. O projeto destes controladores é de suma importância para o bom

funcionamento dos processos em que a malha de controle atua.

A popularidade do controlador PID é ofuscada, no entanto, pela falta de desempenho em algumas aplicações. Neste sentido, relata-se que uma parcela significativa dos PIDs é operada no modo manual e que aproximadamente 65% dos sistemas que operam em modo automático apresentam maior variação em malha fechada do que em malha aberta [3]. Isto muito se deve a uma sintonia precária dos parâmetros do controlador, muitas das vezes causadas por falta de conhecimento dos operadores, utilização de métodos genéricos de sintonia ou pela grande variedade de estruturas de controladores existentes.

Embora a sintonia dos parâmetros do PID aparente em um primeiro momento ser conceitualmente intuitiva, pode se tornar uma tarefa árdua na prática, caso se deseje atingir múltiplos objetivos, que algumas das vezes são conflitantes, como respostas rápidas e alta estabilidade.

Diversos métodos foram propostos para solucionar os problemas impostos na sintonia de um controlador PID. Notoriamente, destaca-se o método heurístico de Ziegler-Nichols [4] que, apesar de proporcionar respostas aceitáveis para a maioria dos processos, apresenta suas limitações principalmente no que se refere ao *overshoot* (sobressinal) da variável de controle do sistema.

O advento dos métodos computacionais possibilitou tratar do problema de sintonia do PID sob a ótica dos métodos de computação evolutiva, que é um ramo de pesquisa de Inteligência Artificial que propõe um novo paradigma para solução de problemas inspirado na Teoria Evolutiva de Darwin. Nesta linha de pensamento, surgiram então propostas de uso de algoritmos de otimização no intuito de encontrar soluções ótimas para sintonia de controladores PID [5], [6].

Neste trabalho apresenta-se a implementação de um algoritmo baseado em um método de computação evolutiva, a saber, Algoritmos Genéticos (AG), que tem como saída um conjunto de parâmetros utilizados para sintonia de um controlador PID que leve a uma resposta ótima para um determinado processo.

II. CONTROLADOR PID

O controlador PID pode ser considerado uma forma extrema de um compensador de avanço-atraso de fase com um polo na origem e outro no infinito [7]. Baseia-se em ações de controle Proporcional, Integral e Derivativa, tendo uma função de transferência que pode ser representada pela “forma paralela” (1) ou pela “forma ideal” (2)

$$G_{PID}(s) = P + I + D \quad (1)$$



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

$$= \frac{U(s)}{E(s)} \quad (2)$$

$$= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (3)$$

$$G_{PID}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) \quad (4)$$

onde K_p é o ganho proporcional, K_i o ganho integral, K_d o ganho derivativo, T_i a constante de tempo integral e T_d a constante de tempo derivativa. A ação de cada termo pode ser entendida como se segue:

- O termo proporcional – provê uma ação de controle geral proporcional ao sinal de erro.
- O termo integral – reduz erros de regime permanente através da compensação em baixa frequência por um integrador.
- O termo derivativo – aprimora a resposta transitória através da compensação em alta frequência por um diferenciador.

O conceito do controlador PID é baseado na teoria do controle por realimentação, a estrutura de um PID em paralelo é apresentada na Fig.1.

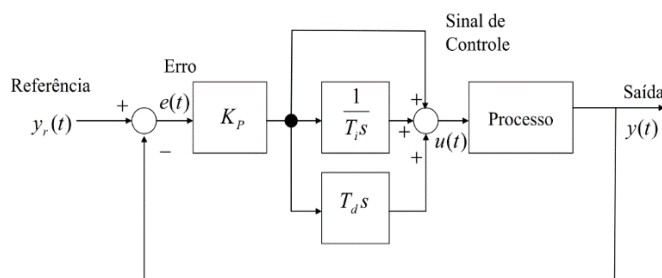


Fig. 1. Estrutura de Realimentação de um PID em paralelo.

Como se observa, o controlador atuará sobre o sinal de erro, enviando um sinal de controle para o processo.

III. SINTONIA PELO MÉTODO ZIEGLER-NICHOLS

ZIEGLER e NICHOLS [4] observaram que os parâmetros do controlador podem ser determinados pelo conhecimento de um ponto da curva de Nyquist do sistema em malha aberta. Esta estratégia aborda dois métodos: um baseado na resposta do processo em malha aberta a uma excitação em degrau (1º método) e outro baseado no ganho crítico $K_{crítico}$ e período crítico $P_{crítico}$ em malha fechada (2º método) [7].

A. Método 1 – Procedimento de sintonia em malha aberta

O procedimento de sintonia em malha aberta assume um modelo matemático de 1ª ordem com atraso de transporte para o processo. As etapas para aplicação do 1º método são:

- aplicar um sinal de entrada no processo;

- aguardar a saída se estabilizar, sempre registrando a saída $y(t)$, em que são obtidos os seguintes valores:

d : tempo morto ou atraso de transporte (em minutos);

T_s : constante de tempo (em minutos);

K : ganho do processo; sendo

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (5)$$

Em que:

$$\Delta y = y_{máximo} - y_{mínimo}$$

$$\Delta u = u_{máximo} - u_{mínimo}$$

A variação máxima da saída do processo é Δy , Δu e é a variação máxima da entrada do controlador. Com os dados obtidos do processo, utiliza-se a Tabela para determinação de parâmetros de controle P, PI ou PID.

Tabela I – Determinação dos parâmetros do controlador

TIPO	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{T}{K \cdot d}$	∞	0
PI	$1,1 \cdot \frac{T}{K \cdot d}$	$3,33 \cdot d$	0
PID	$0,8 \cdot \frac{T}{K \cdot d}$	$2,00 \cdot d$	$0,50 \cdot d$

Fonte: OGATA [7].

B. Método 2 – Procedimento de sintonia em malha fechada

Este método de sintonia é baseado nas características da resposta transitória do processo para a determinação dos parâmetros K_p , T_i e T_d , e requer que o processo seja mantido em oscilação para obtenção da resposta do sistema em malha fechada. As etapas para utilização deste método são:

- usar um controlador proporcional para o controle deste método de sintonia em malha fechada, com valor de K_p escolhido de forma heurística;
- inserir no sistema uma variação no sinal de controle, de tal forma que a onda quadrada entre o valor da saída atual e a saída de referência gere uma resposta oscilante estável e constante em função do tempo;
- armazenar os dados de entrada e saída; e multiplicar os valores de $K_{crítico}$ e $P_{crítico}$ pelos fatores apresentados na Tabela II dos parâmetros do controlador.

Tabela II - Determinação dos parâmetros do controlador

TIPO	K_p	K_i	K_d
P	$0,5 \cdot K_{crítico}$	∞	0
PI	$0,45 \cdot K_{crítico}$	$0,833 \cdot P_{crítico}$	0
PID	$0,6 \cdot K_{crítico}$	$0,5 \cdot P_{crítico}$	$0,125 \cdot P_{crítico}$

Fonte: OGATA [7].

IV. METODOLOGIA

Desenvolveu-se um *software* dotado de interface gráfica destinado à sintonia dos parâmetros do PID utilizando algoritmos genéticos. Utilizou-se a plataforma MATLAB® para a codificação do programa.

A interface gráfica do programa pode ser vista na Fig. 2. A mesma contempla três análises: resposta a um degrau do sistema em estudo com realimentação unitária, sintonia heurística do controlador PID e sintonia utilizando o Algoritmo Genético desenvolvido.

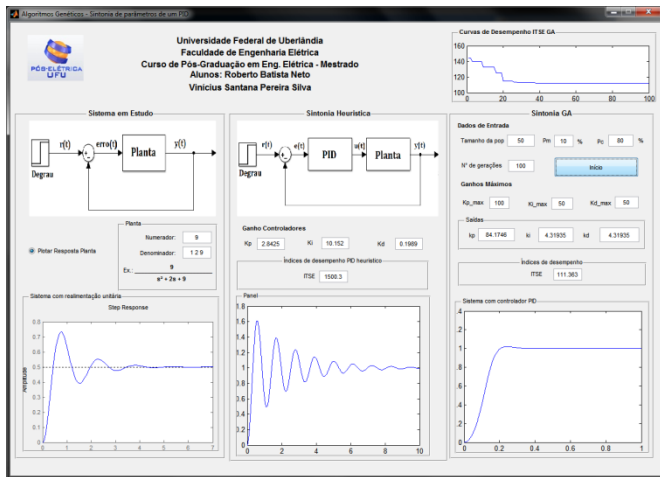


Fig. 2. Interface gráfica do programa.

A primeira análise consiste na avaliação do comportamento de uma determinada planta a ser definida pelo usuário. O usuário entra, então, com parâmetros da função de transferência do processo referente à planta. Por padrão uma função de transferência é pré-selecionada, a título de exemplo, com a seguinte estrutura:

$$G(s) = \frac{9}{s^2 + 2s + 9} \quad (6)$$

O gráfico mostrado nessa primeira seção representa a resposta do processo a um degrau em um sistema com realimentação unitária como pode ser visualizado na Fig. 3.

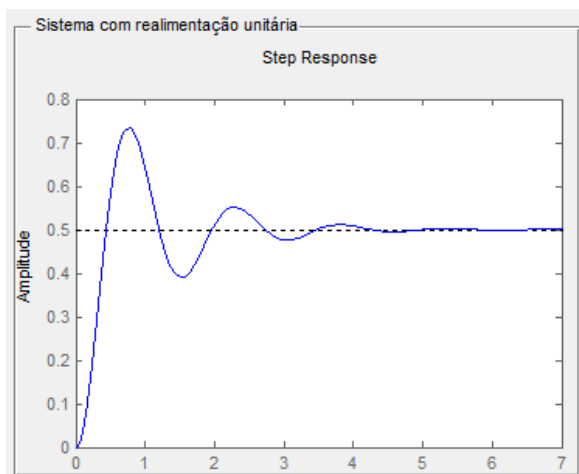


Fig. 3. Resposta do sistema estudado a um degrau unitário com realimentação unitária.

Nota-se que, para este exemplo, a saída do sistema não alcança a referência de entrada, estabilizando-se por volta de 50% do valor desejado. Além disso, o sistema apresenta oscilações transitórias com alto tempo de estabilização em relação ao sistema sob ação do controlador com os parâmetros calculados pelo AG que será explanado a seguir. Pode-se perceber que a inserção do controlador PID nesse sistema será uma boa alternativa desde que sintonizado adequadamente.

A segunda análise, a sintonia heurística, corresponde ao mesmo sistema da seção anterior acrescido de um controlador PID para o controle do processo. Os parâmetros do PID, sejam eles os ganhos do controlador, podem ser definidos pelo usuário. Para os campos de cada parâmetro foram inseridos valores-padrão obtidos através da *toolbox SISO Tool* do MATLAB® com a opção de sintonia pelo método clássico de Ziegler-Nichols, de modo a permitir a comparação das respostas obtidas com o sistema implementado com Algoritmos Genéticos. Observa-se na Fig. 4 que a resposta do sistema consegue atingir a referência, entretanto, o tempo de estabilização é alto e há ocorrência de *overshoots* acentuados.

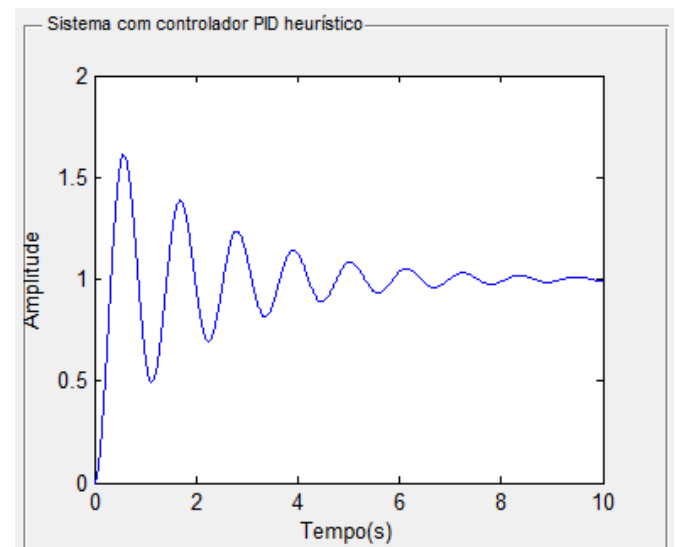


Fig. 4. Resposta do sistema estudado utilizando um controlador PID com parâmetros obtidos pelo método de Ziegler-Nichols.

A terceira seção contempla a sintonia do PID utilizando Algoritmos Genéticos, nesta seção os parâmetros do PID não são inseridos pelo usuário, somente seus ganhos máximos serão necessários, os valores são calculados pelo AG de modo a apresentar a melhor resposta do sistema estudado. Uma visão geral sobre Algoritmos Genéticos é mostrada no item A.

A. Algoritmos Genéticos

A forma mais comum de utilização de Algoritmos Genéticos é descrita por Goldberg [8]. AGs são algoritmos estocásticos de busca baseados no mecanismo de seleção natural. O AG, diferente das técnicas de busca convencional, começa com um conjunto inicial de soluções aleatórias, chamado de população, que satisfaz alguns limites impostos pelo operador e/ou restrições do problema.

Cada indivíduo na população é representado por um cromossomo, que é uma solução para o problema naquele instante. O cromossomo é uma sequência de símbolos normalmente, mas não necessariamente, representada por códigos binários, sendo que, alternativamente, sua representação pode ser feita utilizando parâmetros contínuos.

Os cromossomos evoluem ao longo de sucessivas iterações, chamadas de gerações. A cada geração, os cromossomos são avaliados, utilizando uma função de avaliação (*fitness*). Para se criar a próxima geração, novos cromossomos, chamados de filhos (ou prole), são formados, ou pela combinação de dois cromossomos da geração atual (neste caso chamados de pais) e/ou pela modificação de um cromossomo através de um operador de mutação.

Uma nova geração é formada por seleção, de acordo com os valores de aptidão (*fitness*), sendo alguns provenientes da população original, alguns provenientes da operação de cruzamento (*crossover*) e/ou mutação, e outros rejeitados, de modo que o tamanho da população se mantenha constante. Cromossomos com maior aptidão (maior valor de *fitness*) tem maior chance de serem selecionados. Dessa forma, após várias gerações, o algoritmo converge para o melhor cromossomo que, provavelmente, representará a solução ótima para o problema.

Demonstrando o funcionamento de um AG por um algoritmo de alto nível, temos a seguinte sequência:

1. Inicialize a população de cromossomos.
2. Avalie cada cromossomo na população.
3. Selecione os pais para gerar novos cromossomos.
4. Aplique os operadores de cruzamento e mutação a estes pais de forma a gerar os indivíduos da nova geração.
5. Rejeite os cromossomos não utilizados.
6. Avalie todos os cromossomos e insira-os na nova geração população.
7. Se o número de iterações chegou ao fim acabou, ou se o melhor cromossomo satisfaz os requerimentos de desempenho, retorne-os, caso contrário, volte para o passo 2.

Os passos acima descritos podem ser observados no fluxograma representado pela Fig. 5.

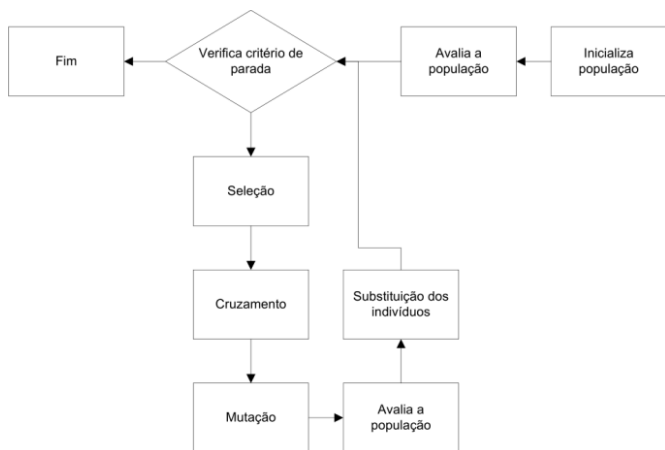


Fig. 5. Fluxograma de um AG.

Para o presente programa, o usuário deverá inserir como entrada alguns dados como tamanho da população, probabilidade de mutação (P_m), probabilidade de *crossover* (P_c) e número de gerações, além dos ganhos máximos do controlador.

B. Representação dos Indivíduos

Os indivíduos são representados em parâmetros contínuos gerados aleatoriamente dentro de uma faixa de valores permitidos, definidos pelo usuário ($K_{p,max}$, $K_{i,max}$ e $K_{d,max}$). Cada indivíduo é representado por um vetor-linha de três colunas, cada qual representando um parâmetro do PID.

C. Avaliação

Como função de avaliação, foi adotada a minimização da integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo (ITSE), que é o índice de desempenho de controlador PID que apresenta melhor seletividade. O índice de desempenho é dado por:

$$ITSE = \int_0^{\tau} te(t)^2 dt \quad (7)$$

Sendo calculado o índice de desempenho ITSE Eq. (7), internamente, a função de avaliação (*fitness*) será tratada como um problema de minimização sendo, portanto, dada pelo inverso de (5).

D. Seleção

O método de seleção dos pais deve simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies, em que os pais mais capazes geram mais filhos, ao mesmo tempo em que pais menos aptos também podem gerar descendentes. Consequentemente deve-se privilegiar os indivíduos com função de avaliação alta no caso específico desse trabalho seria os indivíduos quem geram valores mais próximo do mínimo da função. Neste método, de posse dos valores de aptidão já calculados, procede-se à soma dos mesmos para em seguida dividir cada valor individual de aptidão pela soma dos valores de aptidão.

Os indivíduos com maior aptidão terão maior probabilidade de serem selecionados, isto ocorre, pois, para a seleção, é gerado um número aleatório que percorrerá a roleta tendo maior probabilidade de parar em um indivíduo que contemple uma maior fatia da mesma [10].

E. Crossover

Implementou-se o *crossover* utilizando parâmetros contínuos apresentado por RADCLIFFE [9]. Este método consiste na seguinte operação:

$$p_{new} = \alpha \cdot p_{mn} + (1 - \alpha)p_{dn} \quad (8)$$

Em que:

α : número aleatório no intervalo [0, 1];

p_{mn} : n ésima variável no pai 1;

p_{dn} : n ésima variável no pai 2;

p_{new} : n ésima variável da população gerada.

F. Mutação

A mutação aplicada a parâmetros contínuos consiste em gerar uma sequência de números aleatórios do tamanho de cada cromossomo. Compara-se, então, o valor obtido à probabilidade de mutação definida e, sendo esta menor que aquele, ocorrerá a mutação, substituindo o parâmetro daquele indivíduo por um valor aleatório dentro do intervalo definido pelo usuário dos ganhos dos controladores.

V. RESULTADOS

Para sintonia do PID utilizando o AG foram inseridos os seguintes valores:

- Dados de entrada
 - ✓ Tamanho da população: 50%
 - ✓ Probabilidade de mutação: 10%
 - ✓ Probabilidade de *crossover*: 80%
- Ganhos Máximos
 - ✓ K_{p_max} : 100
 - ✓ K_{i_max} : 50
 - ✓ K_{d_max} : 50

Obteve-se, pela sintonia por AG, como parâmetros do controlador, K_p , K_i e K_d , os valores 98,96; 8,98 e 5,88 respectivamente apresentando índice de desempenho ITSE de 114,23 enquanto que, para a parametrização por Ziegler-Nichols, foi obtido 2,842; 10,152 e 0,19 seguindo a mesma ordem anterior com índice de desempenho ITSE 1500,03, assim, obteve-se uma redução de 93% do índice ao se utilizar a sintonia por Algoritmos Genéticos.

A resposta do sistema com a utilização desses parâmetros pode ser visualizada na Fig. 7.

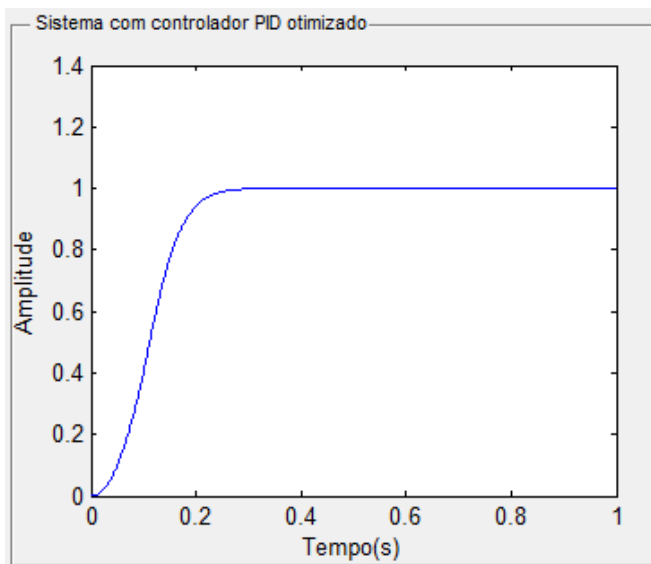


Fig. 7. Resposta do sistema estudado utilizando PID com parâmetros obtidos do AG.

Graficamente, pode-se notar grandes diferenças entre os sistemas comparados: primeiramente quanto ao tempo de estabilização, o sistema com parâmetros obtidos por Ziegler-Nichols leva mais de 10 segundos para se acomodar enquanto que o sistema com parâmetros obtidos por AG, estabiliza-se em aproximadamente 0,4 segundos,

apresentando um *overshoot* mínimo. Adicionalmente, não se observam oscilações no sinal de controle.

VI. CONCLUSÕES

Ao se fazer a análise dos resultados obtidos pelo *software* proposto, demonstrou-se grande eficiência em seu objetivo de sintonia de parâmetros de um controlador PID. As três análises explicitadas ao longo do texto, e presentes na interface gráfica, possibilitam um abrangente entendimento das facetas do problema em questão, retratando desde um sistema sem controle PID apenas com realimentação unitária, passando por sintonia heurística que, no caso em questão, utilizou parâmetros estabelecidos pelo método de Ziegler-Nichols, até a sintonia proposta por AGs.

Além das evidentes vantagens quando da parametrização do controlador PID por Algoritmos Genéticos, com a utilização do *software* ela se dá de forma simples em relação aos outros métodos, especificando apenas os parâmetros de entrada do AG (tamanho população, número de gerações, probabilidade de mutação e de *crossover* e os limites do problema).

REFERÊNCIAS

- [1] Ang, K. H., Chong, G., Li, Y., “PID Control System Analysis, Design, and Technology”. *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, Vol. 13, no. 4, pp. 559-576, 2005.
- [2] Skoczowski, S. *et al.*, “A Method for Improving the Robustness of PID Control”, *IEEE Trans. Ind. Electr.*, vol. 52, no. 6, pp. 1669-1676, 2005.
- [3] Oviedo, J. J., Boelen, T., Van Overschee, P., “Robust Advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications”, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 26, n° 1, pp. 15-19, 2006.
- [4] Ziegler, J. G.; Nichols, N. B., “Optimum settings for automatic controllers”, *Transactions of the ASME* 64, pp. 759-768, 1942.
- [5] Krishnakumar, K., Goldberg, D. E., “Control System Optimization Using Genetic Algorithms”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 15, No. 3, pp. 735-740, 1992.
- [6] Varsek, A., Urbacic, T., Filipic, B., “Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning”, *IEEE Trans. Sys. Man and Cyber*, Vol. 23/5, pp. 1330-1339, 1993.
- [7] Ogata, K., “Engenharia de Controle Moderno”, 4ª ed. *Prentice Hall*, 2003.
- [8] Goldberg, D., “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, *Addison-Wesley*, 1989.
- [9] Radcliffe, N. J., “Forma Analysis and Random respectful Recombination”, *In Proc. Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, 1991.
- [10] Linden, Ricardo, “Algoritmos Genéticos”, 2ªed, *Brasport*, 2008.