

# SINTONIA DE CONTROLADORES PID UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Gilvan Farias da Silva <sup>1</sup>

## RESUMO

Neste trabalho é utilizado otimização por enxame de partículas para sintonizar controladores PID para três plantas diferentes. Uma das plantas analisadas possui um zero com parte real maior que zero, representando maior desafio ao trabalho. Foram utilizados os critérios de erro ISE, IAE, ITAE e ITSE como função objetivo do algoritmo de otimização. Os resultados das funções objetivos foram apresentados por meio de gráficos de sobressinal em função do tempo de acomodação de forma a mostrar o caráter estocástico da otimização por enxame de partículas. Para cada planta houveram diferentes resultados para cada critério de erro utilizado, mostrando que não existe um critério ótimo de aplicação universal.

**Palavras-chave:** Controlador Pid, Otimização, Sistemas de Controle.

## INTRODUÇÃO

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é bastante utilizado na indústria devido a sua simplicidade e grande aplicabilidade. Controladores PID são utilizados em variadas aplicações, como controle de nível, vazão, temperatura, entre outras grandezas de interesse em Engenharia de Controle (LEMES; SILVEIRA; COELHO, 2010).

Alguns métodos clássicos de sintonia de controladores PID são os métodos de Ziegler-Nichols, projeto com auxílio do gráfico de lugar das raízes e com auxílio da resposta em frequência utilizando diagramas de Bode ou de Nichols (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2009; OGATA, 2010).

Estima-se que apenas 32 % dos controladores PID utilizados foram sintonizados adequadamente (YU, 2006). Devido a importância da correta sintonia dos parâmetros do controlador novos métodos de sintonia, que melhorem o desempenho do sistema de controle, tem sido proposto.

Métodos heurísticos de sintonia baseados em Algoritmo Genético (AG), Otimização por Enxame de Partículas (PSO – Particle Swarm Optimization) ou Janela de Restrição Aleatória (R2W – Random Restricted Window) podem fornecer resultados satisfatórios, próximos de valores ótimos (BARCELOS; LOPES, 2018; LOPES, 2017).

---

<sup>1</sup> Mestrando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia - UFBA, [gilvan.farias.silva@gmail.com](mailto:gilvan.farias.silva@gmail.com), (83) 3322.3222

Este trabalho tem o objetivo de sintonizar controladores PID utilizando o algoritmo bio-inspirado PSO, tendo como estudo de caso três diferentes plantas e serem controladas. Ao final da execução do algoritmo é feita uma análise estatística dos resultados obtidos.

## METODOLOGIA

Foram utilizadas três funções de transferência de plantas para estudo de caso, equações (1) a (3). A planta 1 possui função de transferência  $G_1(s)$  de primeira ordem. A planta 2 possui função de transferência  $G_2(s)$  de segunda ordem apresentando comportamento oscilatório. A planta 3 possui função de transferência  $G_3(s)$  de segunda ordem com comportamento oscilatório, sendo que possui um zero com valor real maior que zero. As Figuras 1, 2 e 3 mostram a resposta ao degrau das plantas  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  e  $G_3(s)$  respectivamente.

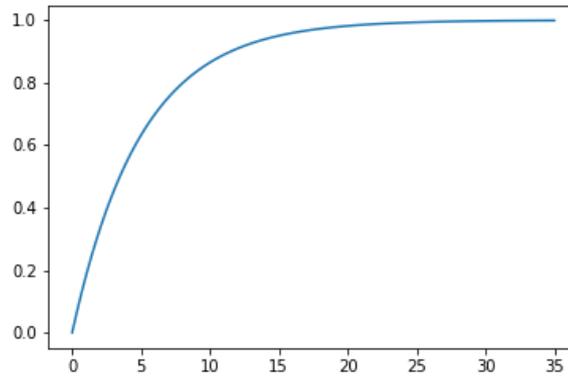
Para cada planta foram projetados controladores PID utilizando o método PSO. Os parâmetros sintonizados foram o ganho proporcional  $K_p$ , o tempo integral  $T_i$  e o tempo derivativo  $T_d$ .

Foram utilizados os critérios de erro Integrated squared Error (ISE), Integrated Absolut Error (IAE), Integrates Timed Absolut Error (ITAE) e Integrated Timed Squared Error (ITSE) como funções objetivo do algoritmo PSO. Para cada critério o algoritmo PSO foi inicializado 50 vezes, totalizando 200 incializações para cada planta.

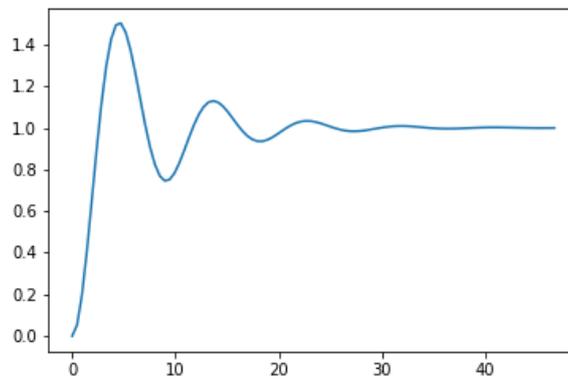
$$G_1(s) = \frac{1}{5s + 1} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{0,5}{s^2 + 0,3s + 0,5} \quad (2)$$

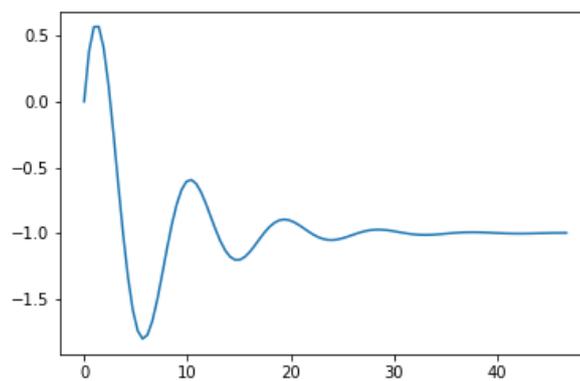
$$G_2(s) = \frac{s - 0,5}{s^2 + 0,3s + 0,5} \quad (3)$$



**Figura 1: Resposta ao degrau da planta  $G_1(s)$ .**  
Fonte: Autor (2019).



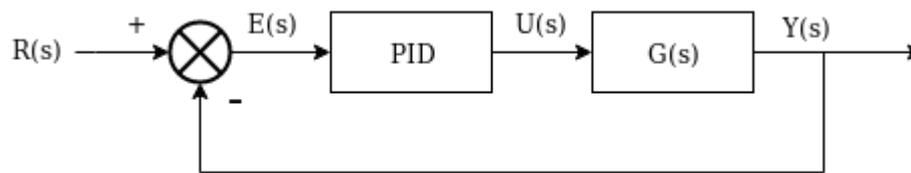
**Figura 2: Resposta ao degrau da planta  $G_2(s)$ .**  
Fonte: Autor (2019).



**Figura 3: Resposta ao degrau da planta  $G_3(s)$ .**  
Fonte: Autor (2019).

## DESENVOLVIMENTO

O controlador PID é composto pelos fatores proporcional, integrativo e derivativo, que atuam sobre o sinal de erro, definido como a diferença entre o valor de referência e a saída da planta (OGATA, 2010). A Figura 4 mostra o diagrama de blocos de um sistema de controle em que o controlador é colocado em série com a planta e possui realimentação negativa.



**Figura 4: Sistema de controle com PID e realimentação negativa.**

Fonte: Autor (2019), baseado em Ogata (2010).

O algoritmo PSO foi proposto por Eberhart e Kennedy (1995). Trata-se de uma heurística utilizada em problemas de otimização que baseia-se no comportamento de animais sociais. Uma população de soluções candidatas (partículas) é inicializada, sendo a posição de cada partícula composta por um conjunto de parâmetros que devem ser alterados a cada iteração e forma a minimizar uma determinada função objetivo. As posições da  $m$ -ésima partícula  $p_m$  é atualizada a cada iteração  $t$  somando a posição atual da partícula com a velocidade  $v_m$ , conforme a equação (4).

$$p_m(t + 1) = p_m(t) + v_m(t + 1) \quad (4)$$

A velocidade de  $m$ -ésima partícula é influenciada pela própria velocidade uma iteração anterior, pela posição da própria partícula que resultou no melhor valor da função objetivo ( $p_{best}$ ) e pela posição da partícula que resultou no melhor valor global de função objetivo em todo o enxame ( $g_{best}$ ) (OMAR; ALI; MOSTAFA, 2011). A velocidade  $v_m$  é calculada conforme a equação (5) em que  $w$  é o peso inercial,  $c_1$  e  $c_2$  são as constantes cognitiva e social respectivamente e  $r_1$  e  $r_2$  são números aleatórios sorteados a cada iteração.

$$v_m(t + 1) = w(t)v_m(t) + c_1r_1(p_{best}(t) - p_m(t)) + c_2r_2(g_{best}(t) - p_m(t)) \quad (5)$$

Para sintonizar o controlador PID com PSO, cada partícula foi definida com um possível controlador, em que a posição da partícula é representada pelos parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ . Foram testadas quatro funções objetivo: ISE, IAE, ITAE e ITSE.

A integral do erro quadrático (ISE - integral of the square of the error) eleva o erro ao quadrado de forma que a ocorrência de erro negativo seja considerada de maneira equivalente ao erro positivo, equação (6). A integral do erro absoluto (IAE - integral of the absolute magnitude of the error) aumenta tanto para erro positivo quanto negativo, equação (7). Duas funções penalizam o erro multiplicando-o pelo tempo, de forma que sistemas com erro após longo período da inicialização do sistema de controle são mais penalizados. Estas funções são a integral do tempo multiplicado pelo erro absoluto (ITAE - integral of time multiplied by the absolute value of the error) e a integral do tempo multiplicada pelo erro ao quadrado (ITSE - integral of time multiplied by the squared error), equações (8) e (9) respectivamente (HUSSAIN et al, 2014).

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (6)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (7)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} ty|e(t)| dt \quad (8)$$

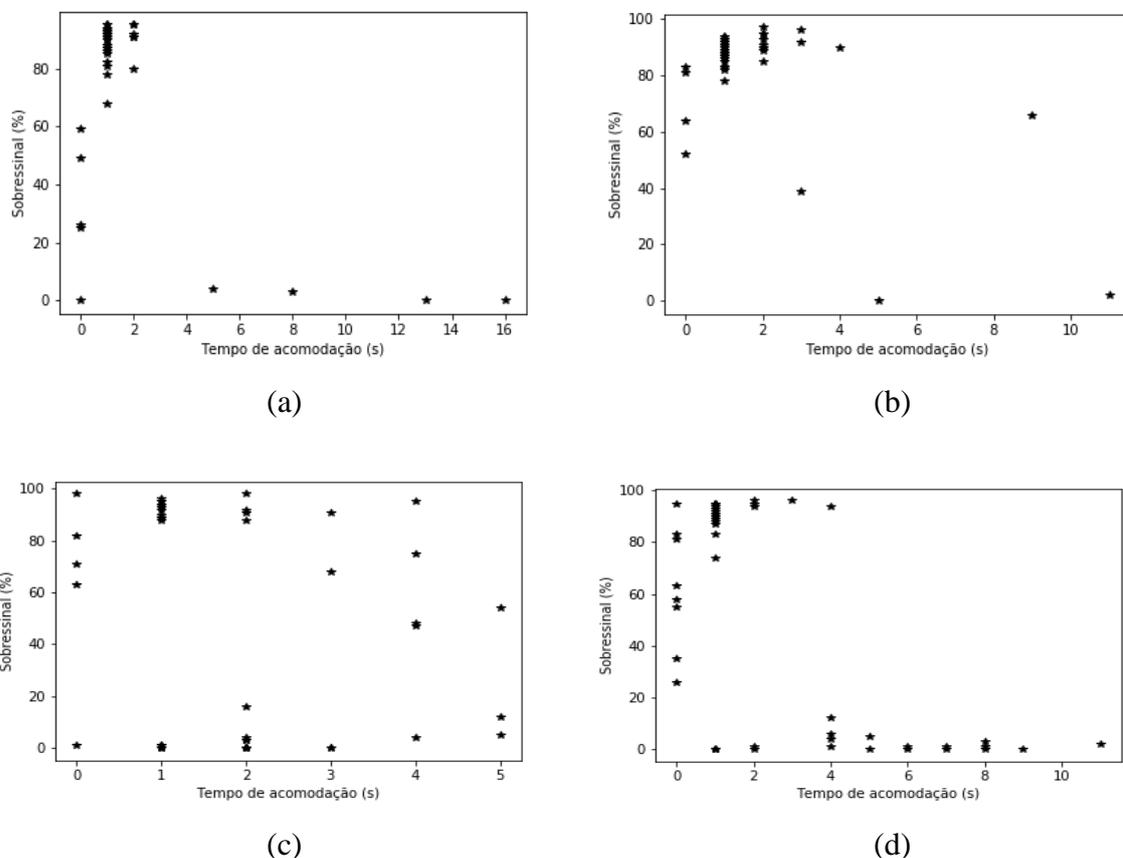
$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (9)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a execução do algoritmo PSO foram gerados gráficos de sobressinal em função do tempo de acomodação para cada combinação de planta e PID sintonizado utilizando as quatro funções objetivo. Desta forma é possível comparar os resultados obtidos utilizando as quatro funções objetivo utilizadas. Como cada configuração foi iniciada 50 vezes, cada gráfico contém 50 pontos correspondendo ao valor de sobressinal em (%) e tempo de acomodação em (s) de cada combinação.

### Resultados para a planta $G_1(s)$

Para a planta  $G_1(s)$  houve grande variação no valor de sobressinal para todas funções objetivo utilizadas. Utilizando a função objetivo ISE houve grande concentração de valores de tempo de acomodação menores que 3 s, apesar de ter sido este método que proporcionou o maior tempo de acomodação, que foi de 16 s. A função objetivo ITSE proporcionou a maior concentração de baixos valores de sobressinal entre as funções testadas, conforme Figura (5).

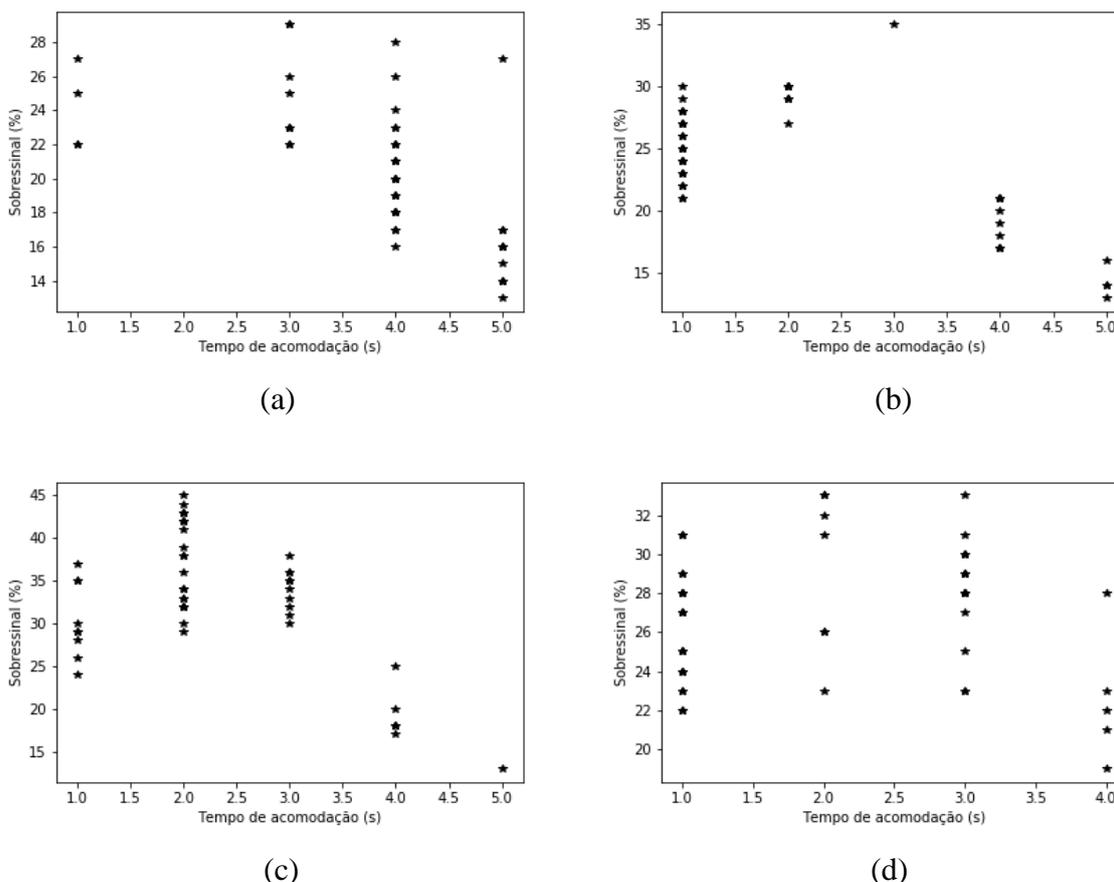


**Figura 5:** Gráficos de sobressinal em função do tempo de acomodação para a planta  $G_1(s)$  (a) para o critério ISE, (b) para o critério IAE, (c) para o critério ITAE, (d) para o critério (ITSE).  
Fonte: Autor (2019).

### Resultados para a planta $G_2(s)$

Para a planta  $G_2(s)$ , utilizando o critério ISE a maior parte dos valores de tempo de acomodação foram maiores ou iguais a 3 s. Por outro lado, com o critério ITSE todos os tempos de acomodação foram menores ou iguais a 4 s.

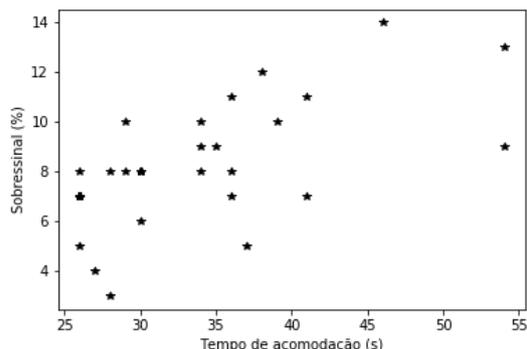
Em relação ao sobressinal, o critério ISE proporcionou o menores valores de sobressinal, não ultrapassando 30 %. O maior sobressinal foi proporcionado pelo critério ITAE, que chegou a 45 %, conforme Figura (6).



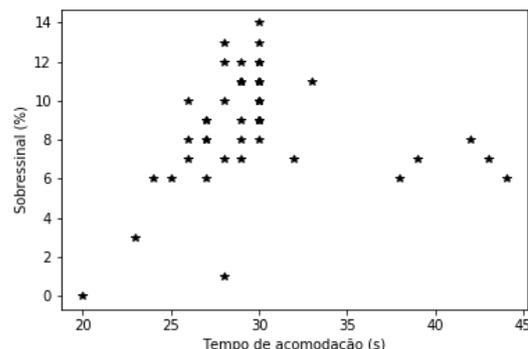
**Figura 6:** Gráficos de sobressinal em função do tempo de acomodação para a planta  $G_2(s)$  (a) para o critério ISE, (b) para o critério IAE, (c) para o critério ITAE, (d) para o critério (ITSE).  
Fonte: Autor (2019).

### Resultados para a planta $G_3(s)$

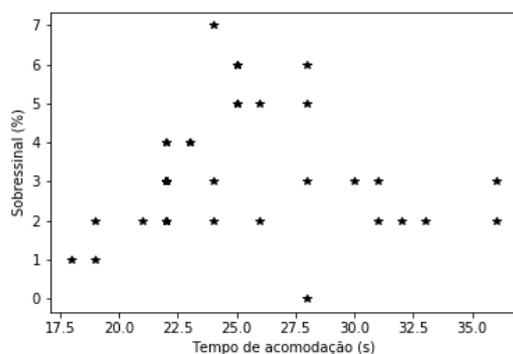
Para a planta  $G_2(s)$ , para todas as funções objetivo utilizadas o tempo de acomodação apresentaram valores de tempo de acomodação entre 17 s e 55 s. Esse resultado é devido ao zero com parte real positiva presente na planta  $G_3(s)$ . Para todas funções objetivo o sobressinal foi menor ou igual a 14 %, com destaque para o critério ITAE, que proporcionou sobressinal menor ou igual a 7 %, conforme a Figura 7.



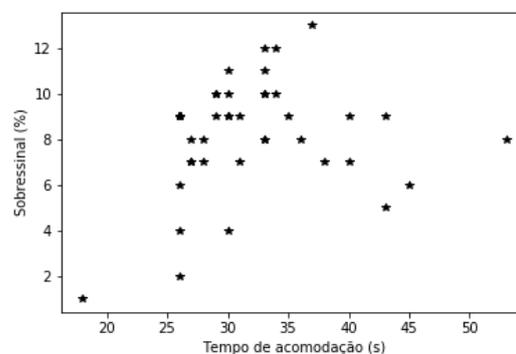
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 7: Gráficos de sobressinal em função do tempo de acomodação para a planta  $G_3(s)$  (a) para o critério ISE, (b) para o critério IAE, (c) para o critério ITAE, (d) para o critério (ITSE).**  
Fonte: Autor (2019).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sintonia de controladores PID por meio do algoritmo PSO não é um método exato. Conforme os resultados apresentados, este método possui caráter estocástico, uma vez que para várias inicializações chegou-se a diversos resultados diferentes. Entretanto possui grande potencial principalmente em casos em que a resolução analítica do problema é demasiadamente complexa.

Foram utilizadas três plantas com distintas funções de transferências. Uma vez que, as quatro funções objetivo proporcionaram resultados diferentes para cada planta analisada, conclui-se que nenhuma das funções objetivo estudadas pode proporcionar o melhor resultado para qualquer planta. Para cada planta é necessário executar o algoritmo PSO com diferentes funções objetivo. Em trabalhos futuros serão acrescentadas restrições de tempo de acomodação e sobressinal máximo ao algoritmo PSO.

## REFERÊNCIAS

BARCELOS, Arlei Fonseca; LOPES, Renan Silva. Otimização de controle PID utilizando algoritmos genéticos. In: **SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA**, 15., 2018, Resende, Rj. Anais.... Resende, Rj: Aedb, 2018. p. 1 - 13. Disponível em: <<https://www.aedb.br>>. Acesso em: 03 jul. 2019.

EBERHART, Russell; KENNEDY, James. Particle swarm optimization. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS**, 1995, [s. L.]. Proceedings.... [s. L.]: Ieee, 1995. v. 4, p. 1942 - 1948.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback control of dynamic systems**, 6. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.

HUSSAIN, K. M. et al. Comparison of PID Controller Tuning Methods with Genetic Algorithm for FOPTD System. **Int. Journal Of Engineering Research And Applications**, [s. l.], v. 4, n. 2, p.308-314, fev. 2014. ISSN: 2248-9622. Disponível em: <<https://www.ijera.com/>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

LEMES, A.; SILVEIRA, A.; COELHO, A. Pseudo controlador PID: Projeto e sintonia automática. In **XVIII Congresso Brasileiro de Automática–CBA**, 2010, Bonito, MS.

LOPES, Felipe Rebelo. Sintonia de controlador pid utilizando os métodos R2W e PSO Tuning of pid controller using R2W and PSO. **Engevista**, [s. L.], v. 19, n. 2, p.482-497, maio 2017. ISSN online: 2317-6717. Disponível em: <<http://periodicos.uff.br/engevista>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OMAR, M. H. T.; ALI, W. M.; MOSTAFA, M. Z.. Auto Tuning of PID Controller Using Swarm Intelligence. **International Review Of Automatic Control (i.re.a.co.)**, [s. L.], v. 4, n. 3, p.319-327, maio 2011.

YU, Cheng-ching. **Autotuning of PID controllers: a relay feedback approach**. 2. ed. [s. L.]: Springer Science, 2006.