

## INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS: CONTROLADORES PID

Ana Regina Lara Bretz  
Rubem Geraldo Vasconcelos Machado  
Fabrícia Cristina de Sousa Silva  
Jéssica Luíza Cabral Guimarães  
Lucas Bueno Oliveira  
Raylander de Freitas Coura

### RESUMO

Este artigo apresenta um ambiente computacional, utilizando métodos relacionados a inteligência computacional, direcionado à otimização de parâmetros necessários para configuração de controle de sistema dinâmico (controle PID), com base em ciência da computação e matemática, tornando-se uma ferramenta valiosa para solução de problemas complexos tanto para otimização de processos quanto para controle dos mesmos. Em particular, foram destacadas as operações necessárias para se viabilizar o uso de um algoritmo de Evolução Diferencial (DE, *Differential Evolution*) para se obter uma 'configuração ótima das constantes proporcional, integral e derivativa necessárias para se viabilizar um controle PID de um sistema de vazão típico em uma malha de controle fechada. Para avaliação da proposta, foi utilizado como referência o método de comparação e sintonização Ziegler-Nichols que é bastante utilizado e conhecido na literatura. Como resultado o algoritmo DE proporcionou uma resposta desejada ao sistema, utilizando somente os controladores PI, podendo assim ser modificada à medida que se queira alterar o sistema de controle de vazão. Em contrapartida o método de sintonização Ziegler-Nichols seja simples de ser aplicado, o mesmo não apresentou uma resposta desejada, mesmo disponibilizando a resposta em um tempo mais rápido que o método DE, utilizando somente os controladores PI.

**Palavras-chave:** Controle de Vazão. PID. Differential Evolution. Ziegler-Nichols. Algoritmo.

### INTRODUÇÃO

Controlar sistemas e processos físicos é inerente à evolução humana. O controle manual, uma das primeiras formas utilizadas pelo homem para obtenção de resultados vem se tornando cada vez mais extintos no mundo atual, devido ao crescente aumento das tecnologias e sofisticação das atividades humanas.

Com os avanços tecnológicos, os processos industriais estão cada vez mais complexos. Esta complexidade, está associada à natureza destes processos e à

necessidade de atendimento de requisitos de aumento de produtividade, sustentabilidade, qualidade e/ou segurança. Sob esta ótica, automatizar e otimizar são vitais para viabilização de processos e/ou atividades.

A utilização de automação nas indústrias tem sido cada vez maior, proporcionando um aumento na qualidade e quantidade da produção e, ao mesmo tempo, oferecendo preços atrativos.

Diante disso, o uso da inteligência computacional, entendido como o conjunto de métodos computacionais com foco em ciência da computação e matemática, torna-se ferramenta valiosa para solução de problemas complexos tanto para otimização de processos quanto para controle dos mesmos.

Este artigo foi desenvolvido para se estudar o impacto da utilização de procedimentos que envolvem inteligência computacional, mais especificamente o algoritmo de otimização *Differential Evolution* (DE), para se obter uma configuração ótima das constantes proporcional, integral e derivativa necessárias para se viabilizar um controle PID de um sistema de vazão típico. Como método de comparação e/ou referência, utilizou-se o Método de Sintonização de Ziegler-Nichols.

Neste trabalho, para avaliação dos procedimentos e/ou propostas, operou-se apenas com simulações realizadas utilizando o software Matlab.

## **1 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **1.1 Controladores PID**

O controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) é o controlador utilizado para processos que minimiza os erros e aumenta os ganhos de um sistema de malhas. Segundo Ogata (2010), mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente emprega de controle PID ou PID modificado.

De acordo com Bega (2006), citado por Pires (2014), três termos são fundamentais, os quais estão ligados a qualquer processo. Esses termos são: a Variável Controlada, que é a parte envolvida no controle, como uma variável de temperatura, nível ou vazão; o Set Point (SP), que é o valor estabelecido e o

desejado para a variável; e a Variável Manipulada, que como o nome já diz pode ser modificada quando preciso.

Como podem haver distúrbios na variável controlada, o controle tem a finalidade de modificar a variável manipulada, para assim manter a variável controlada no valor do Set Point.

Basicamente, o controle proporcional é uma ação de controle proporcional ao erro. Esse controle procura garantir uma melhor resposta no tempo da malha. Segundo Oliveira (1994), citado por Pires (2014), neste tipo de controlador a relação entre o sinal de saída e o de erro, é dada pela equação, no domínio do tempo:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

Em que  $u(t)$  é a saída do controlador,  $K_p$  é o ganho proporcional e  $e(t)$ , é o erro que ocorre na variável.

Já no domínio da frequência, temos a seguinte equação:

$$U(s) = K_p \cdot E(s)$$

A ação integral é proporcional à integral do sinal do erro. De acordo com Oliveira (1994), considerando a saída do controlador como função do erro e da integral do erro, sua equação pode ser representada da seguinte forma, no domínio do tempo:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Onde  $T_i$  é uma constante de ação de controle integral. Já no domínio da frequência, a equação é representada da seguinte forma:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right)$$

Em que colocamos o termo  $s$  ao representar a equação no domínio da frequência.

De acordo com Oliveira (1994), citado por Pires (2014, p.10), “a ação derivativa, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações o que conduz a uma velocidade de resposta superior quando comparado com P e PI”. Sua fórmula completa é representada na seguinte equação, no domínio do tempo:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt}$$

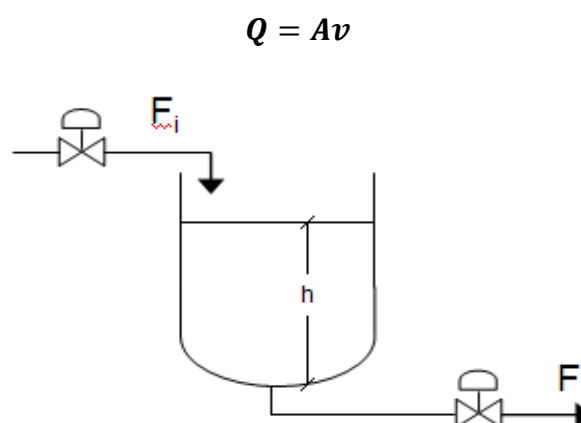
Em que  $T_d$  é o tempo derivativo. No domínio da frequência, o controle Proporcional Integral Derivativo é representado com a seguinte equação:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$

## 1.2 Controle de Vazão

O controle de vazão é uma demanda existente em vários sistemas e/ou processos industriais. A vazão é a taxa de transferência de um fluido, tomada em unidades de volume no tempo ou de outra maneira, é a velocidade com que se transporta um volume em massa, quando, então, tem-se a chamada vazão mássica. A unidade de vazão será sempre volume por unidade de tempo (ou massa por unidade de tempo):  $m^3/h$ , litros/minuto, galões/minuto, barris/dia, etc.

Uma equação básica que relaciona vazão (em  $m^3/s$ ), a área da tubulação (em  $m^2$ ) e a velocidade (em  $m/s$ ):



**Imagem 1: Funcionamento de um sistema de controle de vazão**

Fonte: Ebah

### 1.3 Controle de Malha Fechada

Neste trabalho opera-se com sistemas de controle em malha fechada, ou seja, temos uma realimentação (*feedback*) que permite que a ação de controle seja tomada utilizando uma referência e o estado atual da saída. Esta estrutura de controle tem como princípio de funcionamento a procura da redução da diferença entre a saída (resposta, variável de processo – PV) de um sistema e um valor de referência (desejado, *setpoint* – SP).

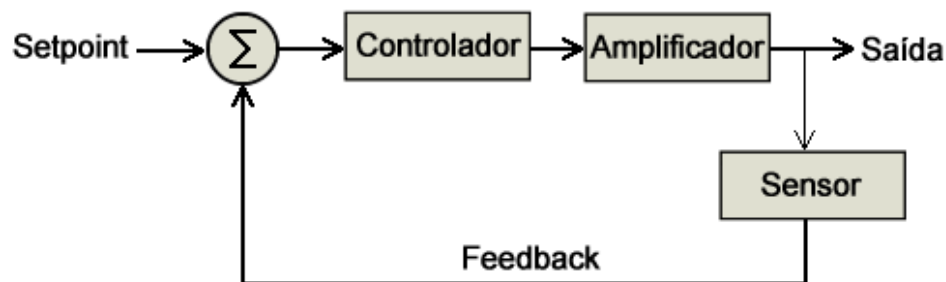


Imagem 2: Sistema de malha fechada

Fonte: Blogspot: instrumentação e controle

### 1.4 Differential Evolution

O algoritmo evolutivo Differential Evolution, que em português significa Evolução Diferencial, abreviado por DE, foi desenvolvido por Storn e Price (1997), em 1997 e foi proposto com o objetivo de solucionar problemas de otimização. Segundo Cheng e Hwang (2001), o DE, possui como principais características:

- “É um algoritmo de busca estocástica, originado dos mecanismos de seleção natural;
- O algoritmo é simples e de fácil entendimento, com poucos parâmetros de controle para conduzir a otimização;
- É eficaz para solucionar problemas de otimização com função objetivo descontínua, pois não necessita de informações sobre derivadas da mesma;
- É mais robusto quanto a ótimo locais, pois busca a solução ótima global manipulando uma população de soluções, ou seja, utiliza diferentes regiões no espaço de busca;

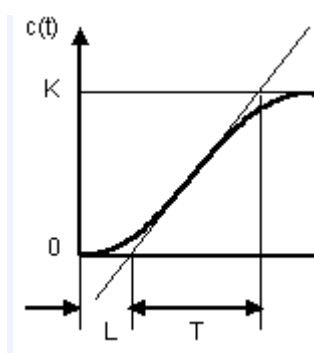
É eficaz mesmo trabalhando com uma população pequena;  
Permite as variáveis serem otimizadas como números reais, sem processamento extra”.

Segundo Faccin (2004), a maioria dos sistemas de controle não utilizam malhas de controle na forma adequada, diminuindo a variabilidade do processo. O método DE traz uma abordagem cada vez mais inovadora que vem sendo aplicada a estudos para a otimização de sistemas de controle com valores ótimos ou muito próximos ao esperado.

### 1.5 Ziegler – Nichols

Para fazer a análise pelo Método de Sintonização de Ziegler-Nichols de Malha Aberta, introduzimos um degrau no sistema e observamos a resposta da curva.

Assim a resposta gerada estabelecerá um tempo de atraso “L” e uma constante de tempo “T”, representados na imagem abaixo.



**Imagem 3: Representação da resposta de sistema a um degrau**

Fonte: Ebah

Dessa forma com os valores de L e T podemos definir os controladores e seus valores utilizando a tabela de sintonização.

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \times \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0

<b>PID</b>	$1,2 \times \frac{T}{L}$	2 L	0,5 L
------------	--------------------------	-----	-------

**Tabela 1: Tabela de Sintonização de Ziegler-Nichols de Malha Aberta**

## 2 METODOLOGIA

Através de uma de pesquisa bibliográfica, foi realizado estudo de uma forma que melhor permitiria uma comparação efetiva entre o Método de Sintonização de Ziegler-Nichols e a proposta, que se utiliza do algoritmo Differential Evolution.

A equações fornecidas ao método de otimização baseado em DE foram definidas assumindo estes pressupostos: sistema com resposta compatível com um sistema de primeira ordem e um controlador com ações proporcional e integral.

O tipo de resposta, compatível com sistema de primeira ordem, foi definida para ter-se o ambiente mais favorável à utilização do Método de Ziegler-Nichols (que procura ajustar ações de controle assumindo que a resposta é a de um sistema de primeira ordem). Assim, desta forma, os desempenhos são realizados nas condições mais favoráveis possíveis ao método de referência.

Como deve-se procurar um controle o mais simples possível, definiu-se como requisito, em um primeiro momento, a necessidade de um controle PI, ou seja, um controle apenas com ações de controle proporcional e integral. Caso este controle não se mostre viável, pode-se construir um controlador com configuração mais complexa.

Depois de definidas as equações, foi utilizado um código no Matlab, com a codificação do algoritmo Differential Evolution para encontrar os valores para a constante proporcional ( $K_p$ ) e integral ( $K_i$ ) e assim obter o controle de vazão desejado.

Todas as operações foram simuladas assumindo tempos de subida (*rise time*) de 3 segundos, compatível com sistema real. Assim, a partir desta definição e do pressuposto de que a resposta seja compatível com a de um sistema de primeira ordem, foram realizados os cálculos e/ou procedimentos para se encontrar os valores das constantes  $K_p$  e  $K_i$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As equações necessárias para codificar o algoritmo DE foram:

Resposta desejada:

$$G(s) = 1 \frac{0,1}{s + 0,1} \rightarrow G(t) = 1 - e^{-0,1t}$$

Função de transferência:

$$Y(s) = \frac{sKp Kc A + Ki Kc A}{s^2 + s(A + Kp Kc A) + Ki Kc A} R(s) + \frac{s^2 + sA}{s^2 + s(A + Kp Kc A) + Ki Kc A} D(s)$$

Polos da função de transferência:

$$P1 = \frac{-[A + Kp Kc A] + \sqrt{(A + Kp Kc A)^2 - 4 Ki Kc A}}{2}$$

$$P2 = \frac{-[A + Kp Kc A] - \sqrt{(A + Kp Kc A)^2 - 4 Ki Kc A}}{2}$$

Resíduos da função de transferência:

$$\text{Resíduo Constante} = \frac{Ki Kc A}{P1 P2}$$

$$\text{Resíduo Exponencial 1} = \frac{P1 Kp Kc A + Ki Kc A}{P1 (P1 - P2)}$$

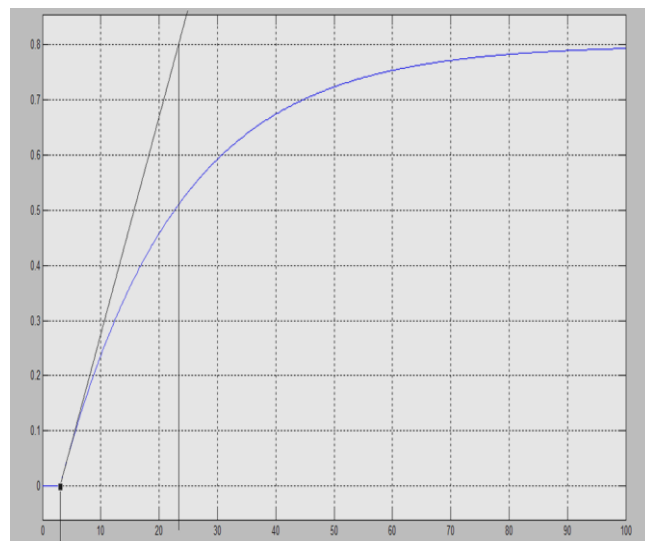
$$\text{Resíduo Exponencial 2} = \frac{P2 Kp Kc A + Ki Kc A}{P2 (P2 - P1)}$$

$$\text{Resíduo Exponencial 3} = \frac{P1^2 + P1 A}{(P1 - P2)}$$



$$\text{Resíduo Exponencial } 4 = \frac{P2^2 + P2 A}{(P2 - P1)}$$

Após encontrar os valores de Kp e Ki com o algoritmo Differential Evolution, analisamos o gráfico da função do sistema para obter os valores de Kp e Ki pelo Método de Sintonização de Ziegler-Nichols.



**Imagem 4: Gráfico representando os valores de L e T**

Fonte: Elaborado pelos autores.

Por ser um experimento o tempo de atraso de resposta do sistema da função “L” foi escolhido pelos autores com 3 segundos. A constante de tempo “T” que foi encontrada ao traçar uma reta tangente a curva partindo do ponto final do tempo de atraso foi encontrada no valor de 20 segundos.

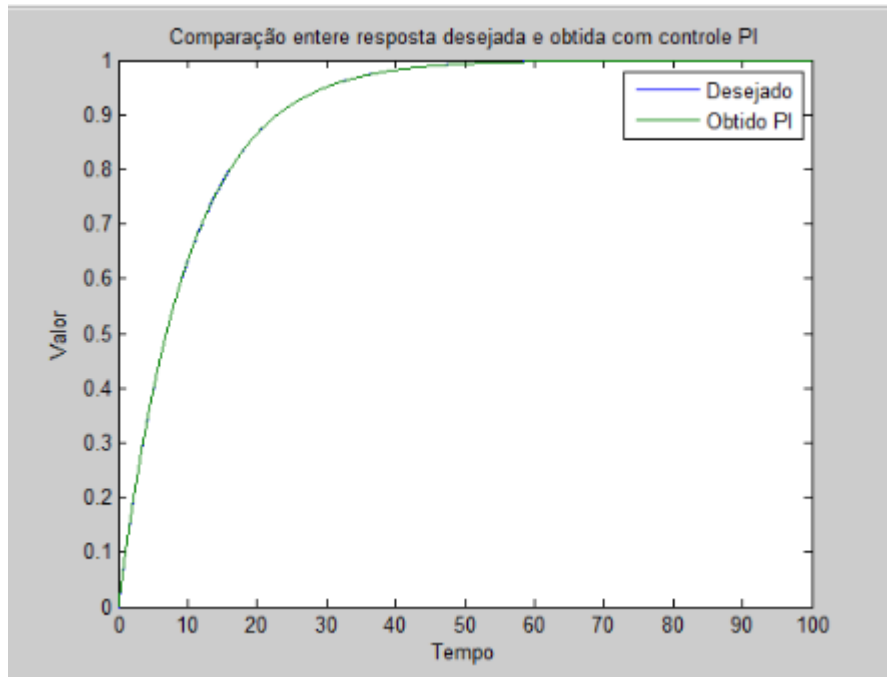
Assim ao analisar a tabela de Sintonização de Ziegler-Nichols de Malha Aberta encontramos os valores dos controladores Kp e Ki do sistema de vazão.

Com o algoritmo Differential Evolution foram encontradas as respostas de Kp em 2,50271 e Ki em 0,124991. Já com o Método de Sintonização de Ziegler-Nichols Kp no valor de 6 e Ki 0,1.

Nas imagens 5 e 6, é possível observar a diferença entre as respostas, sendo que o Método de Sintonização de Ziegler-Nichols estabiliza o sistema em 20

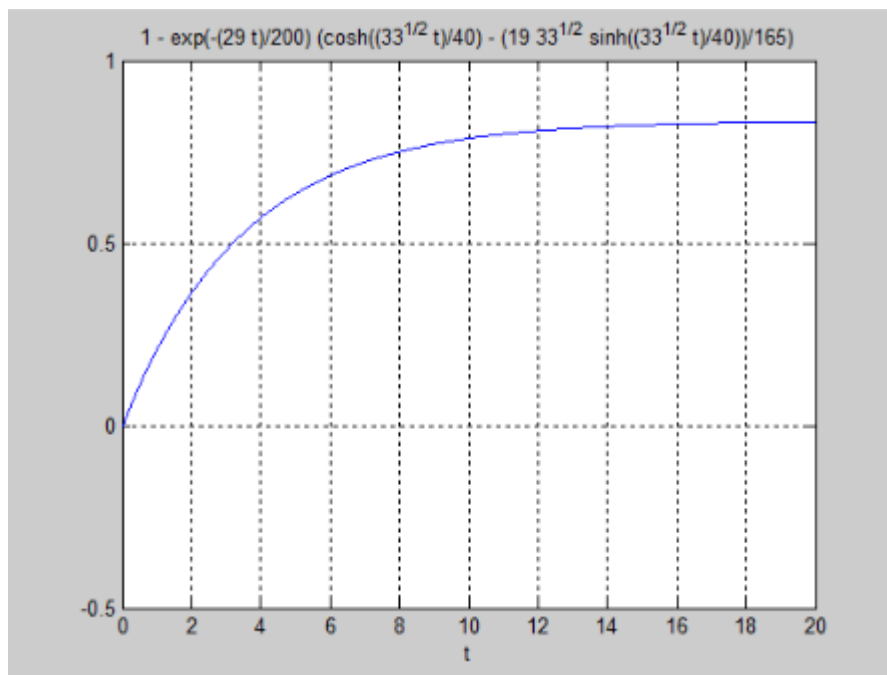
BRETZ, A. R. L.; MACHADO, R. G. V.; SILVA, F. C. S.; GUIMARAES, J. L. C.; OLIVEIRA, L. B.; COURA, R. F. Inteligência computacional para otimização e controle de sistemas dinâmicos: controladores PID

segundos e o método calculado no algoritmo Differential Evolution em aproximadamente 50 segundos.



**Imagem 5: Gráfico representando a comparação entre a resposta desejada e a obtida com o controle PI**

Fonte: Elaborado pelos autores



BRETZ, A. R. L.; MACHADO, R. G. V.; SILVA, F. C. S.; GUIMARAES, J. L. C.; OLIVEIRA, L. B.; COURA, R. F. Inteligência computacional para otimização e controle de sistemas dinâmicos: controladores PID

## **Imagem 6: Gráfico representando a resposta do sistema com a Sintonização de Ziegler-Nichols**

Fonte: Elaborado pelos autores

O Método de Sintonização de Ziegler-Nichols não atendeu ao experimento proposto, pois não há como alterar sua resposta para estabilizar o sistema, visando à resposta desejada do experimento. Assim o algoritmo Differential Evolution foi o melhor método para calcular os valores dos controladores PI de forma a encontrar resultados otimizados a resposta desejada para o experimento do sistema de vazão.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho foi realizada a comparação entre dois métodos para configuração de um controlador PID: um baseado no Método de Ziegler-Nichols (método já consolidado na literatura e que é muito utilizado como referência em disciplinas focadas em controles de processos) e outro, proposto neste trabalho, que envolve utilização de método de otimização baseado em Differential Evolution. Nas análises foi admitida uma resposta desejável para um sistema compatível com demandas reais.

Embora seja um método simples de ser aplicado, o método de Ziegler-Nichols não nos fornece um valor ótimo para as constantes associadas às ações de controle e, além disso, não nos fornece nenhuma referência confiável para ajustes finos nos valores fornecidos. Assim, nas simulações realizadas, apresentou resultados muito diferentes dos assumidos como necessários para o sistema. Isto significa que, na prática, trabalhos extras devem ser realizados para ajustes finos na resposta do sistema, ou seja, o método não retornou resultado factível com as demandas práticas.

Em contrapartida, o método proposto utilizando DE, embora a rigor não possa nos garantir valor ótimo, permitiu que fosse obtida a resposta desejada para o sistema simulado. Esta maior precisão, teve como custo a necessidade de definição das equações de resposta do sistema, ou seja, por se utilizar das equações de resposta do sistema, o método permitiu que um valor prático factível fosse obtido.

BRETZ, A. R. L.; MACHADO, R. G. V.; SILVA, F. C. S.; GUIMARAES, J. L. C.; OLIVEIRA, L. B.; COURA, R. F. Inteligência computacional para otimização e controle de sistemas dinâmicos: controladores PID

Portanto, a proposta realizada apresenta-se como interessante e capaz de possibilitar ajustes de controladores que permitem atender requisitos mais estritos de sustentabilidade, economia, eficiência e segurança.

## **COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FOR OPTIMIZATION AND CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS: PID Controllers**

### **ABSTRACT**

This article presents a computational environment, using methods related to computational intelligence, directed to the optimization of parameters necessary for configuration of dynamic system control (PID control), based on computer science and mathematics, becoming a valuable tool for solution of Complex problems so much for process optimization as for their control. In particular, the operations necessary to enable the use of a Differential Evolution (DE) algorithm to obtain an optimal configuration of the proportional, integral and derivative constants necessary to enable a PID control of a Flow rate in a closed control mesh. For the evaluation of the proposal, the Ziegler-Nichols method of comparison and tuning was used as a reference, which is widely used and known in the literature. As a result, the DE algorithm provided a desired response to the system, using only the PI controllers, so that it can be modified as the flow control system changes. On the other hand, the Ziegler-Nichols tuning method is simple to apply and does not present a desired response, even providing the response in a faster time than the DE method, using only PI controllers.

**Keywords:** Flow Control. PID. Differential Evolution. Ziegler-Nichols. Algorithm.

BRETZ, A. R. L.; MACHADO, R. G. V.; SILVA, F. C. S.; GUIMARAES, J. L. C.; OLIVEIRA, L. B.; COURA, R. F. Inteligência computacional para otimização e controle de sistemas dinâmicos: controladores PID

## REFERÊNCIAS

BEGA, E. A.; FINKEL, V. S.; KOCH, R. **Instrumentação Industrial**. Rio de Janeiro, 2006.

CHENG, Shih-Lian; HWANG, Chyi. **Optimal approximation of linear systems by a differential evolution algorithm**. IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics-part a: systems and humans, v. 31, n. 6, p. 698-707, 2001.

DANTAS, Joseane Azevedo. **Análise Aerodinâmica de Vant Híbrido do Tipo Asa Fixa Inclinável com Quatro Rotores**. Rio Grande do Norte, 2013.

FACCIN, Flávio. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**. 2004.

GUTIERREZ, Regina Maria Vinhais; PAN, Simon Shi Koo. **Complexo eletrônico: automação do controle industrial**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 28, p. 189-231, 2008.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010, pp 521.

OGATA, Katsuhiko; YANG, Yanjuan. **Modern control engineering**. 1970.

OLIVEIRA, J. P. B. M. **Review of Auto-tuning Techniques for Industrial PI Controllers**. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. University of Salford, 1994.

PIRES, Vinícius Pereira. **Sintonia de um Controlador PID em um Sistema de Controle de Vazão**. Revista da Graduação, v. 7, n. 2. 2014.

STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. **Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces**. Journal of global optimization, v. 11, n. 4, p. 341-359, 1997.

Imagem 1, disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAsxoAI/control-processos?part=2>>. Acesso em 27 de julho de 2017.

Imagem 2, disponível em:  
<<http://instrumentacaoecontrole.blogspot.com/2013/04/aula-27-estrategia-de-controle.html>>. Acesso em 27 de julho de 2017,

Imagem 3, disponível em:  
<<http://www.ebah.com.br/content/abaaaf33gae/laboratorio-controle-caderno-praticas>>. Acesso em 27 de julho de 2017.