

## Otimização usando PSO no controle PI de vazão de um túnel de vento atmosférico utilizando a técnica de *Gain Scheduling* *Optimization using PSO in the PI control of atmospheric wind tunnel flow using the Gain Scheduling technique*

Bruno. C. Coswosk<sup>1</sup>, Eric. S. M. Lima<sup>1</sup>, Helder R. O. Rocha<sup>1\*</sup>, Rodrigo Fiorotti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, ES

<sup>2</sup> Instituto Federal do Espírito Santo – Campus São Mateus, ES

\*Autor para correspondência, E-mail: [helder.rocha@ufes.br](mailto:helder.rocha@ufes.br)

### Article history

Received: 23 April 2017

Accepted: 07 June 2017

Available online: 25 June 2017

**Resumo:** Em sistemas de gás de queima (*flare*), que são comumente utilizados como sistemas de segurança e alívio de pressão em ativos produtores de hidrocarbonetos, a sua quantificação é desafiadora, devido características tais como, instalações em grandes diâmetros, necessidade de baixa intrusividade ao processo, variações na composição química do gás, presença eventual de líquidos e a ausência de trechos retos adequados para que os perfis de escoamentos se desenvolvam possibilitando assim a medição de vazão com altas incertezas. Esses fatores contribuem para que a adequação dessa medição aos requisitos da legislação seja um problema tecnológico de elevada relevância. Tendo em vista tais dificuldades, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de aplicar a técnica *Gain Scheduled* (Controle Adaptativo) em conjunto com a sintonia de um *PI* a fim de resolver os problemas apresentados. Foi realizada a modelagem do túnel de vento, a implementação do controle *PI*, a otimização do controle foi feito utilizando Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*) e por fim foi usada a técnica *Gain Scheduled* para combater a variação da dinâmica do processo. Os resultados mostram que os efeitos devido às oscilações da rotação do soprador foram reduzidos com a otimização do controle da velocidade do escoamento, contribuindo que uma série de fenômenos de interesse de mecânica dos fluidos sejam detectados na presença de um escoamento controlado.

Palavras chave: Sintonia de controladores, Otimização por Enxame de Partículas, Controle Adaptativo.

**Abstract:** In flare gas systems, which are commonly used as safety and pressure relief systems in hydrocarbon-producing assets, their quantification are challenging, due to its characteristics such as large diameter installations, the need for low intrusiveness to the process, variations in the chemical composition of the gas, possible presence of liquids and the absence of suitable straight tube length to allow the flow profiles to develop, thus to the measurement of flow with high uncertainties. These factors contribute to the fact that the adequacy of this measurement to the requirements of the legislation is a technological problem of high relevance. Considering these difficulties, this work was developed with the objective of applying the *Gain Scheduled* (Adaptive Control) technique together with the tuning of a *PI* controller in order to solve the presented problems. The *PI* control tuning, such as control optimization, was done using *Particle Swarm Optimization* and finally, the *Gain Scheduled* technique was used to combat the variation of the process dynamics. The results show that the effects due to the oscillations of the blower rotation were reduced with the optimization of the flow control, contributing that a series of phenomena of fluid mechanics interest are detected in the presence of a controlled flow.

Keywords: Tuning controllers, *Particle Swarm Optimization*, *Gain Scheduled*.

## 1. Introdução

A indústria de petróleo e gás requer medições de vazão com incertezas estabelecidas por lei. No Brasil, a Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 1 de 2000 (Lima, 2014), foi o primeiro documento desta categoria a ser publicado. Este documento regula tecnicamente condições e procedimentos de sistemas de medição de vazão de hidrocarbonetos (petróleo e gás natural), além de autorizar previamente a utilização de medidores ultrassônicos de vazão para gás natural. Essa portaria foi recentemente atualizada para a

resolução conjunta no. 1/2013. Contudo, curvas e outros obstáculos são comumente encontrados nesse cenário, o que pode afetar a qualidade da medição de vazão em função de perturbações no escoamento, tais como efeito *swirl* e assimetrias no perfil de velocidades (Libardi, 2014).

Em sistemas de gás de queima (*flare*), que são comumente utilizados como sistemas de segurança e alívio de pressão em ativos produtores de hidrocarbonetos, a sua quantificação tem sido considerada por especialistas como uma condição de medição das mais desafiadoras, tendo em vista que esses escoamentos tipicamente apresentam características, tais como: instalações em grandes diâmetros, necessidade de baixos índices de manutenção, necessidade de baixa intrusividade ao processo, variações na composição química do gás, presença eventual de líquidos (condensado ou gotículas de óleo) e a ausência de trechos retos adequados (Lima, 2013). Esses fatores contribuem para que a adequação dessa medição aos requisitos da legislação seja um problema tecnológico de elevada relevância.

Com isso a comunidade científica e tecnológica (Lima, 2014) tem avaliado padrões de escoamento e efeitos de perturbações no escoamento causados por acidentes de linha, bem como busca laboriosamente métodos para diminuição dos consequentes erros e incertezas. Por outro lado, medidores de vazão com tecnologia ultrassônica de um canal acústico são frequentemente utilizados em instalações de queima de gás, apesar de serem sensíveis a perturbações promovidas pela presença de acidentes de linha. Por outro lado, dadas as condições operacionais típicas em *flare* (Lima, 2014), considera-se que um túnel de vento atmosférico aspirado (regime turbulento,  $Re = 10^5$ ) apresente condições de similaridade hidrodinâmica adequadas para representar esse escoamento (Segantine, 2014), (Lima, 2013).

Com o intuito de mapear o perfil de velocidades no túnel de vento foi utilizado um tubo de *Pitot*, que é um instrumento constituído por dois tubos coaxiais, formando uma peça em formato de L. Entretanto, leituras de velocidade local efetuadas com o tubo de *Pitot*, indicam que o processo não é totalmente controlado, pois não possuem repetitividade. Tal fato é atribuído às oscilações da rotação e do torque no soprador do tipo *limit-load* do túnel de vento, acarretando em leituras de velocidade não representativas do escoamento e, conseqüentemente, em um cálculo de vazão também não representativo do processo (Lima, 2013). Tendo em vista tais dificuldades, otimizar o controle da vazão em túneis de vento experimentais mostram-se necessário.

Os controladores Proporcional, Integrativo e Derivativo (*PID*) são utilizados pela maioria das malhas indústrias. Isto se deve a sua simplicidade conceitual, ao seu bom desempenho e a sua robustez (Dorf, 2013). Os controladores do tipo *PID* podem ser usados nas suas diferentes configurações (*P*, *PI*, *PD* e *PID*), dependendo da sua necessidade. Existem diversas técnicas para ajuste dos parâmetros do controlador, isto é, técnicas de sintonia. As primeiras técnicas de sintonia de controladores do tipo *PID* foram propostas por Ziegler e Nichols em 1942, mesmo sendo antigas, essas técnicas são amplamente aplicadas nos dias de hoje, às vezes em sua forma original, mas geralmente de forma modificada (Ogata, 2011). Porém, grande parte dos controladores está mal sintonizada, fazendo com que os desempenhos das malhas industriais sejam comprometidos (Souza, 2013). Segundo Gomes (2008), para a obtenção de resultados adequados, é necessária a realização da sintonia do *PID* de forma correta. Essa sintonia é realizada em duas etapas: 1 - Identificar a planta por meio de um modelo matemático, em geral, representado por uma função de transferência; 2 - Baseado no modelo obtido, realizar a sintonia dos parâmetros do *PID*.

A sintonia de um controlador *PID* é a etapa mais importante e, talvez, a mais desafiante para tornar capaz de cumprir certos critérios de desempenho em uma aplicação específica. Sendo assim, uma boa sintonia do controlador é indispensável para a realização de um controle utilizando o *PID* (Gaing, 2004). O grande problema é que os métodos clássicos de sintonia não obtêm um ajuste adequado aos controladores, isso se deve à grande diversidade de dinâmicas de processos. O ideal seria obter um método de sintonia que funcione bem independente da dinâmica do sistema a controlar. Uma alternativa amplamente adotada na literatura especializada para sanar tal problema é a utilização de algoritmos como ferramenta de otimização do controlador *PID* (Chang, 2010).

Segundo Pereira (2008), Algoritmos Evolutivos (AEs) compreendem todos os métodos de pesquisa que se inspira em processos naturais, tais como: comportamento social de grupos de animais, reprodução de animais, entre outros. Esses algoritmos baseiam-se na seleção natural como processo de pesquisa da solução ótima, apoiados na teoria de que na natureza os indivíduos mais aptos prevalecem (maior chance de sobrevivência) sobre os menos aptos. Dentre os algoritmos evolutivos vale destacar o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO) proposto por Eberhart e Kennedy (1995), que consiste na otimização de uma função objetivo através da troca de informação entre elementos (partículas), como é o caso de um grupo de organismos da mesma espécie (bando de aves e cardumes de peixes).

O objetivo geral deste trabalho é aplicar a técnica *Gain Scheduled* (Pradeep Kannan, 2014) em conjunto com a sintonia de um controlador PI, cujo objetivo é resolver o problema de escoamento de gás de queima (*flare*). Para isto, foi realizada a modelagem do túnel de vento, a implementação do controle PI, a otimização do controle foi feita utilizando *Particle Swarm Optimization* (PSO) e por fim foi usada a técnica *Gain Scheduled* para combater a variação da dinâmica do processo.

O restante do artigo foi organizado da seguinte maneira: na Seção 2 são apresentados os conceitos do controlador Proporcional-Integral-Derivativa, sintonia de controladores e *Gain Scheduled*. Enquanto que na Seção 3 é descrita o túnel de vento e seu sistema de controle. Na Seção 4 é apresentada a função de transferência para cada valor de vazão desejado para análise do perfil de velocidade tratado neste artigo. A Seção 5 mostra detalhes do PSO aplicado à sintonia do PI do túnel de vento. Resultados de testes de simulações são comentados na Seção 6. Por fim, a Seção 7 apresenta as principais conclusões baseadas nos resultados obtidos.

## 2. Controle automático

O conceito de sistema de controle automático é baseado na teoria da realimentação mostrada no diagrama em blocos da Fig. 1:

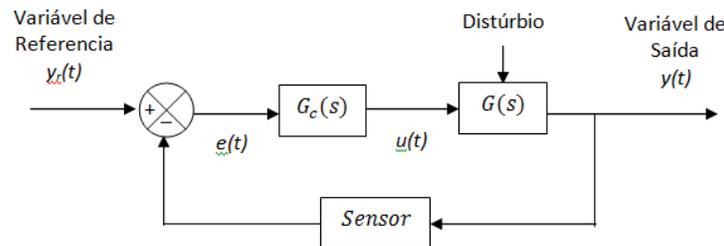


Figura 1. Estrutura de realimentação.

A variável  $y_r(t)$  corresponde à referência do sistema. A saída do sistema, também chamada de variável do processo, é representada por  $y(t)$ . A entrada do controlador  $G_c(s)$  é dada pela variável  $e(t)$ , que corresponde ao erro, que é a diferença entre valor desejado e o valor de saída. A grandeza  $u(t)$  corresponde à variável de entrada do processo  $G(s)$ , ou seja, a variável manipulada. Basicamente, o funcionamento do controlador consiste em analisar o sinal de erro e enviar um comando para corrigir o sinal de entrada do processo (Souza, 2013).

Nos dias atuais, o controlador  $G_c(s)$  que é composto das ações Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) são usados em larga escala como controladores das malhas industriais, apesar da complexidade das malhas terem aumentado bastante, tal fato ocorre devido à simplicidade e eficiência desse tipo de controlador (Dorf, 2013), (Ogata, 2011).

### 2.1 Ação de controle Proporcional-Integral-Derivativa

O controlador *PID* é muito utilizado na automação, pois utiliza as qualidades das ações Proporcional, Integral e Derivativo. É dito por Andrade (2013) que a ação proporcional estabiliza o sistema, enquanto que a ação integral torna a medição igual ao *Setpoint* (elimina o erro em regime permanente) e que a ação derivativa fornece ao sistema uma ação de antecipação, ou seja, acelera o ajuste realizado pelo controle.

A representação matemática deste tipo de controlador é dada por (1):

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}), \quad (1)$$

onde  $K_p$  - ganho proporcional;  $T_d$  - tempo derivativo;  $T_i$  - tempo integral;  $e(t)$  - valor do erro no instante  $t$ .

E sua função de transferência é dada por Eq. (2):

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (2)$$

onde  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ ,  $K_d = K_p T_d$ ,  $K_i$  - ganho integral;  $K_d$  - ganho derivativo.

Caso se queira usar apenas um (*PI*), basta ajustar o ganho derivativo igual a zero.

## 2.2 Métodos de sintonia

O principal passo para o projeto do controlador *PID* é a sintonia, ou seja, definição dos parâmetros  $K_p$  (ganho proporcional),  $K_i$  (ganho integrativo) e  $K_d$  (ganho derivativo) visando cumprir um desempenho estabelecido para os processos determinados. O grande problema na prática é que na maioria dos casos os controladores estão mal sintonizados. Grande parte dos controladores é sintonizada de forma manual utilizando métodos antigos (Ziegler e Nichols, CHR 20%, etc.), que apesar de funcionarem em alguns casos, perdem força devido à evolução dos tipos de processos aos quais os controladores são empregados (Dorf, 2013; Ogata, 2011).

## 2.3 Gain Scheduled

Em vários casos, a dinâmica do processo controlado pode variar de acordo com as condições de operação do processo. Um sistema do tipo *Gain Scheduled* é um sistema adaptativo no qual os parâmetros do controlador são ajustados de acordo com a variação da dinâmica do processo. Para isso, deve-se conhecer muito bem a dinâmica da planta a qual está sendo controlada. O *Gain Scheduled* é uma excelente maneira de reduzir os efeitos das variações do processo e também das não linearidades conhecidas do processo (Pradeep Kannan, 2014).

Ao determinar as variáveis de escalonamento, os parâmetros do controlador são calculados para as diversas condições de operação. Sendo assim, o controlador é sintonizado para cada condição de operação. Dessa forma, a estabilidade e o desempenho do sistema são melhorados significativamente. A Fig. 2 mostra o esquema com a estrutura do controlador *Gain Scheduled*.

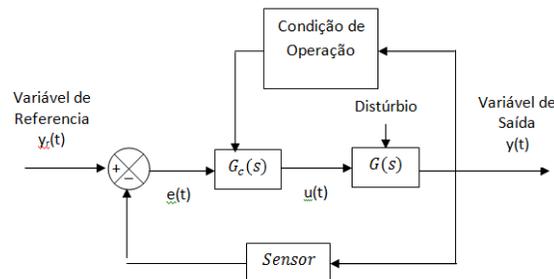


Figura 2. Esquema do controlador *Gain Scheduled*.

## 3. O túnel de vento e seu sistema de controle

O sistema estudado é um túnel de vento atmosférico constituído por tubos de polipropileno, com diâmetro interno médio de  $\varnothing = 128$  milímetros (mm) ( $\varnothing$  nominal 8”). Ele opera simulando o escoamento em tubulações de liberação de gás de tocha (*flare*). Sua configuração e construção permitem diversos tipos de montagem.

O escoamento interno é promovido por um soprador do tipo *limit-load*, o qual é instalado à jusante da tubulação. Todavia, para que sejam reduzidos os efeitos rotacionais no escoamento gerados pelo rotor do soprador, é instalado entre o soprador e os tubos um equipamento chamado *plenum*, o qual também é responsável por permitir a instalação de diferentes diâmetros de tubos. Além disso, o túnel de vento possui um condicionador de fluxo antes do *plenum* (Lima, 2014). O modelo pode ser visto na Fig. 3.

O túnel de vento é composto de tubos que podem ter diferentes comprimentos, mas diâmetros internos constantes. Isso permite uma avaliação dos perfis de velocidade em diversos trechos de medição. As medições no túnel de vento são realizadas por um tubo de *Pitot* e por um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito com um único par de transdutores (MUV), esses transdutores estão situados a montante e a jusante, e são identificados pelas letras A e B na Fig. 4, respectivamente (Lima, 2013). Ademais, é possível observar, que o centro do duto coincide com o eixo x, e que D é o diâmetro interno do duto. Os ângulos de montagem dos transdutores são definidos pelo ângulo de rotação no eixo x a partir da posição vertical do eixo y. O ângulo  $\theta$  define o plano de emissão, que contém a direção dos pulsos acústicos emitidos pelo par de transdutores (Lima, 2014).



Figura 3. Plenum.

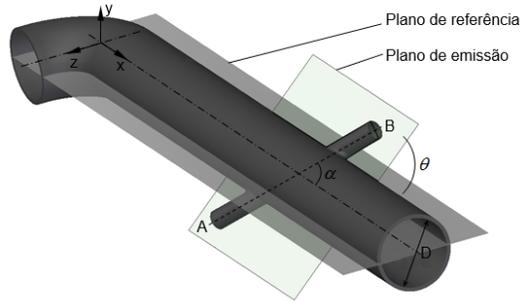


Figura 4. Plano de emissão.

A velocidade do escoamento é controlada por um inversor de frequência da WEG modelo CFW 09. Esse dispositivo é capaz de gerar uma tensão e frequências trifásicas ajustáveis, com a finalidade de controlar a rotação de um motor de indução trifásico com o princípio de controle vetorial *sensorless*, ou seja, variando a tensão e a frequência para que seja possível atingir vários patamares de velocidade de escoamento no túnel de vento. O sistema também possui um PLC, que é responsável pelo acionamento do inversor de frequência (Lima, 2014). O painel de controle do túnel de vento está representado na Fig. 5.



Figura 5. Painel de controle do túnel de vento.

## 4. Modelagem

### 4.1 Função de transferência do túnel de vento atmosférico

Por definição, o modelo matemático é a descrição do sistema físico representado por meio de equações, que descrevem matematicamente a relação das variáveis de entrada com as de saída. Modelos podem ser obtidos de maneira analítica, baseado em leis da física, ou por meio de dados experimentais ou de estruturas com modelos já definidos. Neste projeto, a obtenção do modelo do sistema de controle em estudo foi obtida de forma experimental.

O sistema em estudo possui o comportamento de um sistema de primeira ordem com tempo morto, ou seja, pode ser descrito por uma função de transferência de primeira ordem de forma satisfatória (Dorf, 2013). A representação do modelo matemático de um sistema de primeira ordem com atraso é dada pela Eq. (3).

$$G(s) = \frac{K * e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (3)$$

onde:  $K$  - Ganho estático;  $L$  - Atraso de transporte (tempo morto);  $T$  - Constante de tempo;  $s$  - variável complexa.

A proposta deste trabalho é utilizar a técnica do *Gain Scheduled* para obter um controlador com o melhor desempenho. Desse modo, obteve-se funções de transferências para cada faixa de velocidade do vento (*Setpoint*) aplicada no túnel de vento atmosférico.

#### 4.2 Passos para obtenção da função de transferência

A primeira etapa consistiu-se em coletar os dados do processo do túnel de vento atmosférico por meio de um software de aquisição de dados. Para a coleta desses dados foram adotados os valores de velocidade de escoamento (*Setpoints*) em metros/segundo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Patamares (faixa) de velocidade.

Patamar	Velocidade, m/s
1	0 - 10
2	0 - 15
3	0 - 20
4	0 - 25
5	0 - 30
6	0 - 35

Após a obtenção dos dados para cada patamar (faixa) de velocidade (corresponde as leituras de velocidade local efetuados pelo tubo de *Pitot* para cada valor desejado de velocidade de escoamento), utilizou-se a ferramenta IDENT do MATLAB para obtenção automática das funções de transferência. O primeiro patamar de velocidade a ser avaliado foi o de 0 - 10 m/s, que por meio do IDENT obteve-se a seguinte resposta:

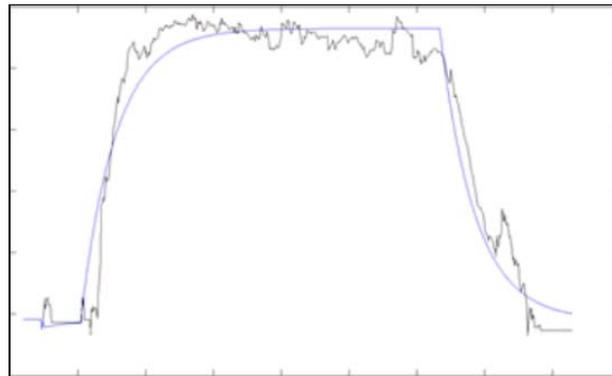


Figura 6. Curvas de respostas do modelo (0 - 10 m/s).

A função de transferência para a faixa 0 - 10 m/s é dada por (4):

$$G(s) = \frac{0,94969 * e^{-1,5s}}{1 + 2,5752s} \tag{4}$$

As demais funções transferências para os outros patamares de velocidade encontram na Tabela 2.

Tabela 2. Funções transferências para perfis de velocidade.

	Velocidade, m/s	Funções transferências
1	0 - 10	$G(s) = \frac{0,94969 * e^{-1,5s}}{1 + 2,5752s}$
2	0 - 15	$G(s) = \frac{1,0375 * e^{-1,5s}}{1 + 3,062s}$
3	0 - 20	$G(s) = \frac{1,2022 * e^{-1,5s}}{1 + 3,4314s}$
4	0 - 25	$G(s) = \frac{1,1204 * e^{-1,5s}}{1 + 4,1273s}$
5	0 - 30	$G(s) = \frac{1,2179 * e^{-1,5s}}{1 + 4,5889s}$
6	0 - 35	$G(s) = \frac{1,2476 * e^{-1,5s}}{1 + 4,885s}$

## 5. PSO aplicado à sintonia do PI do túnel de vento

Neste trabalho além de ter sido utilizado os métodos de sintonia Ziegler e Nichols, CHR 20%, usou-se também a sintonia por PSO. O método de otimização por enxame de partículas (PSO) foi criado por James Kennedy e Russel Eberhart em 1995. É uma técnica de computação estocástica baseada em dinâmica de populações (Kennedy, 1995), em outras palavras, no comportamento coletivo de animais (como cardumes de peixes ou bandos de pássaros). Neste método, as partículas (soluções do problema), trocam informações entre si e também interagem com o ambiente, para alcançar um objetivo específico.

No PSO, o enxame de partículas é distribuído aleatoriamente num espaço de soluções, sendo que uma das posições das partículas pode ser considerada uma possível solução (Kennedy, 1995). As partículas possuem também uma velocidade associada, que indica sua tendência de movimento na próxima interação. Cada partícula do enxame movimenta no espaço de soluções por meio de duas forças. A primeira é uma atração de magnitude aleatória para a melhor posição encontrada por ele mesmo (*pbest*). A segunda é uma atração, também de magnitude aleatória, para melhor posição encontrada por alguns ou por todos os membros do enxame (*gbest*). Com essas informações, a posição e velocidade de cada partícula são atualizadas a cada interação do algoritmo, tais atualizações ocorrem até o enxame convergir. O método do PSO está descrito nas etapas abaixo.

### Algoritmo do PSO

*Passo 1: Iniciar as variáveis do enxame de partículas.*

- $x$  representa a posição de uma partícula;
- $U$  é um vetor  $d$ -dimensional de números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1;
- $x_{min}$  é o menor valor da variável  $x$  que compõe uma possível solução;
- $x_{max}$  é o maior valor da variável  $x$  que compõe uma possível solução;
- $Dim$  é a dimensão máxima das partículas;
- $x_i = x_{min} + (x_{max} - x_{min})U$ ,  $\forall i = 1, \dots, Dim$ ;
- $v_i = (x_{max} - x_{min})U - x_i$ ,  $\forall i = 1, \dots, Dim$ , é a velocidade;
- $Pbest_i = 0$  representa a melhor localização da partícula;
- $Gbest = 0$  representa a melhor localização do enxame;
- $Pbestfun_i = 0$ ;
- $Gbestfun_i = 0$ ;
- $N$  é o tamanho do enxame;
- $w = 1/(2 * \log(2))$  é a ponderação da inércia;
- $c_1 = 0.5 + \log(2)$  representa o parâmetro cognitivo;
- $c_2 = c_1$  representa o parâmetro social.

*Passo 2: Calcular o valor da função-objetivo  $f(x)$  para todas as partículas.*

- O vetor  $Pbest_i$  recebe a posição atual de cada partícula;
- O vetor  $Pbestfun_i$  recebe o valor da função-objetivo da partícula;
- $Gbest$  recebe a posição da melhor partícula do enxame;
- $Gbestfun$  recebe a função-objetivo da melhor partícula do enxame.

*Passo 3: Atualizar as posições e velocidades das partículas de acordo com as equações a seguir:*

$$v_i = w * v_i + c_1 * rand().(Pbest - x_i) + c_2 * rand().(Gbest - x_i), \forall i = 1, \dots, Dim$$

$$x_i = x_i + v_i; \forall i = 1, \dots, Dim$$

*Passo 4: Calcular o valor da função-objetivo  $f(x)$  para todas as partículas.*

*Passo 5: Para cada partícula, comparar o valor da função-objetivo atual com o valor de  $Pbest_i$ . Caso o atual seja melhor,  $Pbest_i$  recebe a posição atual e  $Pbestfun_i$  recebe o valor da função-objetivo atual.*

*Passo 6: Encontrar o melhor valor objetivo entre as partículas atuais e comparar com o  $Gbest$ . Caso haja melhora,  $Gbest$  recebe a posição e  $Gbestfun$  recebe a função-objetivo da melhor partícula.*

*Passo 7: Repetir o processo a partir do Passo 3 até que uma condição de parada seja encontrada.*

Neste trabalho, considerou a população inicial do PSO com 50 partículas (possíveis soluções do problema) inicialmente obtidas pelo método clássico Ziegler- Nichols (Z-N). A dimensão do problema foi ajustada para dois, pois representa a quantidade de variáveis das soluções (P e I). Em seguida, foi realizada a avaliação das partículas através da função objetivo.

Como função objetivo, usou-se o índice de desempenho ITAE (*Integral of Time Multiplied by the Absolute Value of Error*), dado na equação (5), por apresentar algumas características importantes: reduz grandes erros iniciais resposta do sistema, e leva em consideração os erros futuros de resposta (Dorf, 2013), (Ogata, 2011).

$$ITAE = \int_0^{T_i} t|e(t)| dt, \quad (5)$$

onde  $T_i$  - tempo máximo de integração;  $t$  - instante de tempo;  $e(t)$  - Valor do erro no instante  $t$ .

A atualização das posições e velocidades das partículas é realizado no passo 3 do algoritmo. O processo será repetido até atingir a condição de parada.

## 6. Resultados

Foram modelados controladores *PI* com o objetivo de manter a velocidade de escoamento igual ao valor de referência. Os algoritmos e a planta de controle foram implementados utilizando o software MATLAB. Tomando como base os métodos de sintonia exibidos anteriormente foram calculados os parâmetros de cada controlador para cada faixa de velocidade. A Tabela 3 apresenta os resultados, respectivamente, velocidade de escoamento 0 - 10 m/s, 0 - 15 m/s, 0 - 20 m/s, 0 - 25 m/s, 0 - 30 m/s e 0 - 35 m/s. No PSO foi considerado um tempo simulação de 100 segundos com uma resolução de 0,1 segundos.

Tabela 3. Funções transferências para perfis de velocidade.

Velocidade (m/s)		Método	Kp	Ki
1	0 - 10	Ziegler e Nichols	1,627	0,325
		CHR 20%	1,085	0,421
		PSO	1,020	0,360
2	0 - 15	Ziegler e Nichols	1,771	0,354
		CHR 20%	1,181	0,386
		PSO	1,050	0,320
3	0 - 20	Ziegler e Nichols	2,210	0,442
		CHR 20%	1,474	0,357
		PSO	1,020	0,290
4	0 - 25	Ziegler e Nichols	2,261	0,452
		CHR 20%	1,507	0,328
		PSO	1,330	0,310
5	0 - 30	Ziegler e Nichols	2,261	0,452
		CHR 20%	1,507	0,328
		PSO	1,360	0,290
6	0 - 35	Ziegler e Nichols	2,349	0,470
		CHR 20%	1,566	0,321
		PSO	1,490	0,300

**Nota:** para validar o desempenho do método proposto foi utilizado apenas o patamar de velocidade de 0 a 20 m/s.

A Fig. 7 mostra a curva de resposta para uma entrada em degrau unitário aplicada ao sistema. Observa-se pela Fig. 7 e pela Tabela 4 que a melhor solução obtida pelo PSO ao aplicar um degrau unitário para 20 m/s, consegue tempo de subida (ts) de 2,6 s, tempo de pico de 6,55 s, tempo de acomodação de 8,61 s e máximo sobressinal de 5,45%. Para a sintonia por Ziegler e Nichols têm-se os seguintes resultados: tempo de subida (ts) de 1,09 s, tempo de pico de 4,12 s, tempo de acomodação de 21,1 s e máximo sobressinal de 48,5%. Para a sintonia por CHR têm-se os seguintes resultados: tempo de

subida ( $t_s$ ) de 1,65 s, tempo de pico de 4,91 s, tempo de acomodação de 10,9 s e máximo sobressinal de 19,2%.

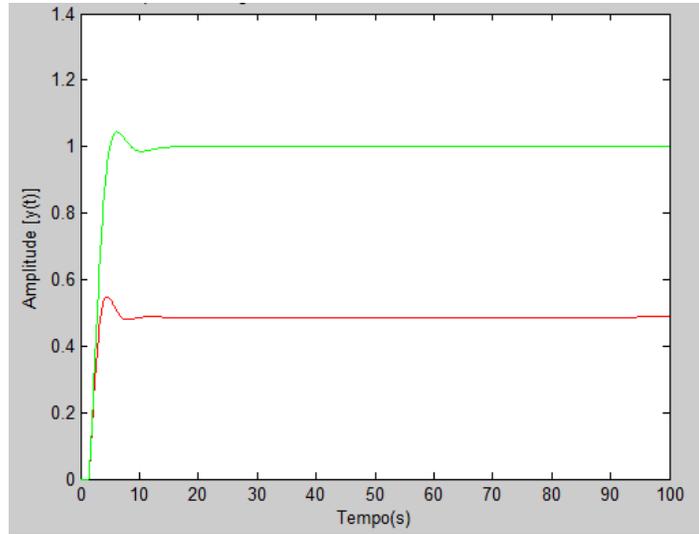


Figura 7. Resposta ao degrau unitário com (Verde) e sem controlador (Vermelho).

A Tabela 4 exibe os tempos obtidos para os controladores, em resposta a um degrau unitário, nas diferentes sintonias apresentadas no trabalho, com o intuito de promover uma comparação entre elas.

Tabela 4. Tempos obtidos pelos controladores.

	Tempo de Subida ( $t_s$ )	Tempo de Pico ( $t_p$ )	Tempo de acomodação para 2% ( $t_a$ )	Máximo Sobressinal ( $M_p$ )
PSO	2,6 (seg.)	6,55 (seg.)	8,61 (seg.)	5,45%
ZN	1,09 (seg.)	4,12 (seg.)	21,1 (seg.)	48,5%
CHR	1,65 (seg.)	4,91 (seg.)	10,9 (seg.)	19,2%

É possível notar que o PSO apresenta tempo de acomodação ( $t_a$ ) e máximo sobressinal ( $M_p$ ) menores que os controladores com sintonia por métodos da literatura. Por outro lado os métodos ZN e CHR possuem o tempo de subida ( $t_s$ ) e o tempo de pico ( $t_p$ ) mais baixo. É possível perceber também que o PSO possuem valores mais otimizados, pois os tempos estão em um maior equilíbrio.

Tendo obtido os ganhos do controlador  $PI$  por meio de simulação, tais valores foram aplicados à planta real para a análise de comportamento da vazão, inferidas a partir das leituras da velocidade do escoamento. As Figs. 8, 9 e 10 representam as respostas de um degrau em modo manual (malha aberta), com o controlador usando o método Z-N e o controlador com os ganhos obtidos pelo PSO, onde o eixo  $x$  representa o número de amostras (período de amostragem – 100 ms) e  $y$  a velocidade de escoamento. A linha na cor azul representa o valor de velocidade desejada (SP – Setpoint) e a linha na cor verde representa o valor de velocidade medido pelo tubo de Pitot (PV – Process Value).

Observa-se na Fig. 8 que a planta em malha aberta apresentou um erro de regime permanente na ordem de 30% para a resposta ao degrau unitário.

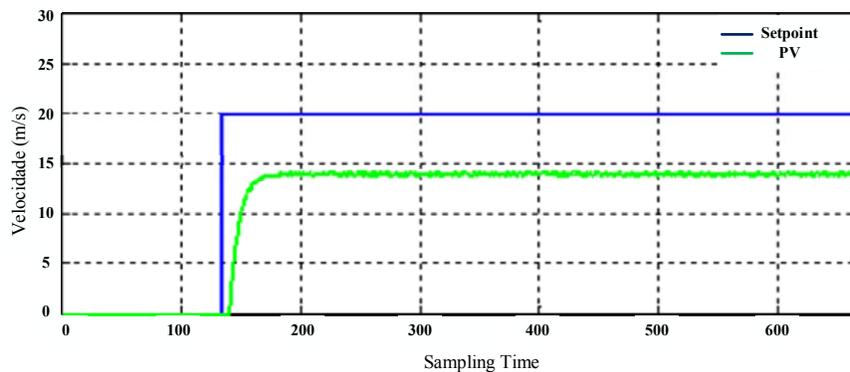


Figura 8. Função de transferência em malha aberta, (velocidade de escoamento 0-20 m/s).

Na Fig. 9 apresenta-se o resultado para o sistema em malha fechada e usando o controlador PI projetado pelo método de Ziegler e Nichols, para tal controlador observa-se que o erro de regime permanente foi eliminado, mas o sistema passa a ter sobressinal em torno de 40%. Por fim, os resultados com o controlador projetado usando PSO o sobressinal máxima cai para 5% e sem erro estacionário (Fig. 10).

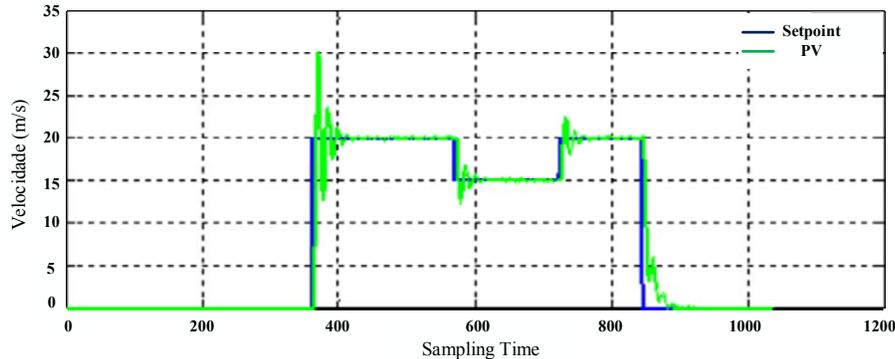


Figura 9. Resposta ao degrau unitário usando Z-N (velocidade de escoamento 0-20 m/s).

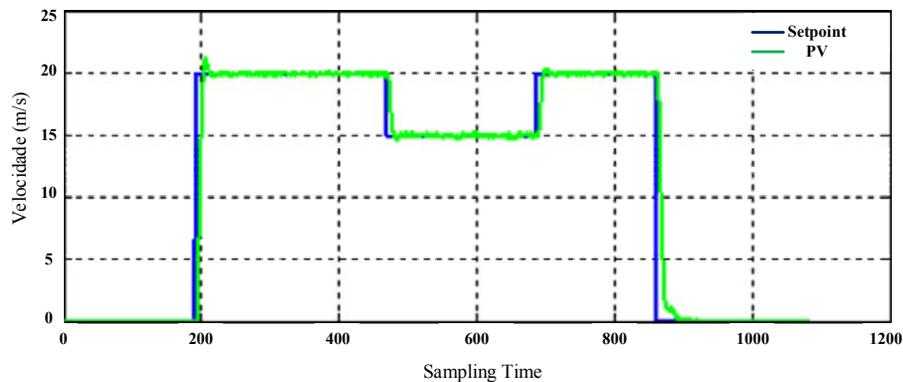


Figura 10. Resposta ao degrau unitário com os ganhos obtidos pelo o PSO (velocidade de escoamento 0-20 m/s).

Para analisar os resultados na planta real, as Figs. 11 e 12 ilustram as leituras de vazão efetuadas por um medidor de vazão ultrassônico de um canal (MUV), instalado a montante do Tubo de *Pitot*. Nessa análise comparativa veem-se respectivamente as leituras do MUV com o controlador de fraco desempenho, como também as leituras do MUV utilizando os recursos de sintonia obtidos através do PSO que apresenta resultados mais comportado do que o controlador de fraco desempenho. Os resultados obtidos corroboram a necessidade de projetar controladores de vazão robustos para cenários onde se pretende representar escoamentos de processos industriais. Esse fator contribui na diminuição das incertezas de medição, pois com o uso de técnicas de sintonia cada vez mais eficientes e robustas, o processo torna-se cada vez mais controlado, garantindo assim índices satisfatórios de repetibilidade e reprodutibilidade em ambientes onde se pretende avaliar fenômenos físicos de interesse para a mecânica dos fluidos.

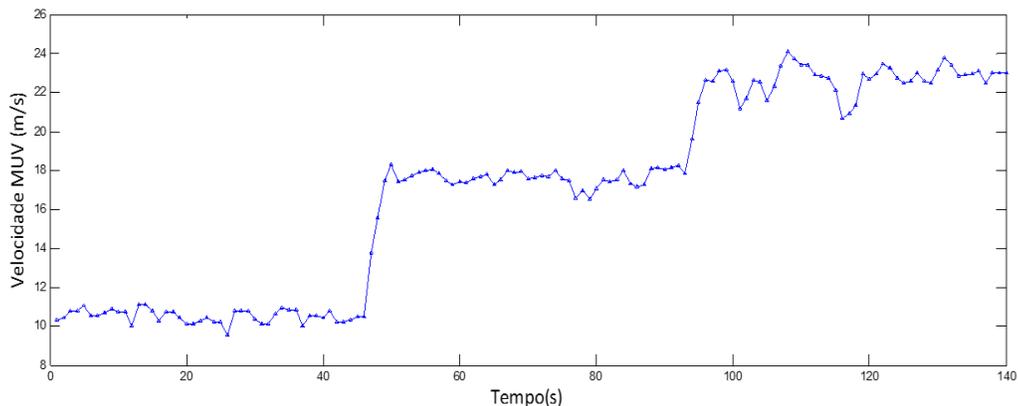


Figura 11. Leituras de vazão efetuadas com o controlador com fraco desempenho.

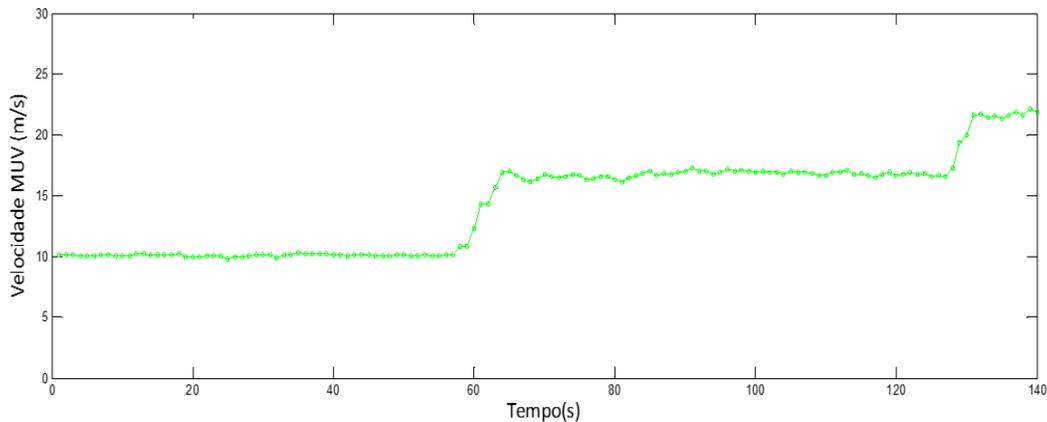


Figura 12. Leituras de vazão efetuadas utilizando os recursos de sintonia obtidos através do PSO.

## 7. Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem teoria e prática de sintonia de um controlador *PI* para vazão de um túnel de vento atmosférico para o problema de escoamento de gás de queima (*flare*). Para sintonia do *PI*, usou-se os métodos Z-N e CHR, assim como Otimização por Enxame de Partículas (PSO) para obtenção dos ganhos do controlador e por fim foi usada a técnica *Gain Scheduled* para combater a variação da dinâmica do processo. Pôde-se verificar que, quando efetuada a sintonia *PI* utilizando todos os métodos estudados, o PSO mostrou-se mais eficiente na sintonia de controladores, pois apesar de apresentarem valores mais altos de tempo de subida e tempo de pico em relação aos métodos tradicionais, ele manteve os valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação bem menores.

## Referências bibliográficas

- Andrade, L. H.; Costa, B. L. G.; Angélico, B. A. *PSO aplicado à sintonia do controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didática industrial*. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2013.
- Chang, W. D.; & Shih, S. P. *PID controller design of nonlinear systems using an improved particle swarm optimization approach*. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, v. 15, n. 11, p. 3632-3639, 2010.
- Dorf, R. C.; Bishop, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 12th ed., LTC, Rio de Janeiro, 2013.
- Gaing, Z. L. *A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system*. IEEE transactions on energy conversion, v. 19, n. 2, p. 384-391, 2004.
- Gomes, S. A. P. *Comparação entre Métodos de Identificação de Plantas com Respostas ao Degrau Monotonicamente crescentes e Sintonia de Controladores PID*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001117.pdf>, 2008.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. *Particle Swarm Optimization*. Proc. IEEE Intl.Conf. on Neural Networks, v. 4, p. 1942-1948, 1995.
- Libardi, C. C.; Romero, O. J. *Desenvolvimento de um simulador numérico para o estudo do escoamento de petróleo em meios porosos*. Latin American Journal of Energy Research, v. 1, n. 1, p. 10-20, 2014.
- Lima, E. S. M. *Análise Experimental da Sensibilidade da Tecnologia Ultrassônica para Medição de Gás de Queima Sob o Efeito de Curva*. Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.
- Lima, E. S. M. et al. *Otimização de um controle PI de vazão de um túnel de vento atmosférico usando algoritmos genéticos para análise experimental do efeito de curvas na medição de vazão de gás de flare*. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014.

Ogata, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5th ed., Pearson Education – Br, 2011.

Pereira, J. J. *Sintonia do controlador PID, com Algoritmo de Otimização por Grupo de Partículas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, 2008.

Pradeep Kannan, D.; Sathiamoorthy, S. *Implementation of Gain Scheduled PID Controller for a Nonlinear Coupled Spherical Tank Process*. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, v. 14, n. 6, p. 93-98, 2014.

Segantine, E. J.; Pereira, F. A. R.; Moura Junior, J. *Estudo do escoamento em um separador tubociclônico de instalação no fundo de um poço de petróleo através da fluidodinâmica computacional*. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 1, n. 1, p. 54-64, 2014.

Souza, J. O. O. *Metaheurísticas Aplicadas na Sintonia de Controladores PID: Estudo de Casos*. Dissertação de mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Disponível em: <http://biblioteca.asav.org.br/vinculos/000008/000008E0.pdf>, 2013