

IDENTIFICAÇÃO DE UM SECADOR CICLÔNICO POR MEIO DE SISTEMAS FUZZY E PSO

BRUNO ELYEZER FONSECA*, BRUNO HENRIQUE GROENNER BARBOSA†, JEFFERSON LUIZ GOMEZ CORRÊA‡

* *Universidade Federal de Lavras - MG*

† *Universidade Federal de Lavras - MG*

‡ *Universidade Federal de Lavras - MG*

Emails: brunoelyezerfonseca@yahoo.com.br, bunohb@deg.ufla.br, jefferson@dca.ufla.br

Abstract— The cyclone dryer is a facility that aims to separate and dry the solid particles through the air flow and calor transference. This work has as objective, to provide a *fuzzy* model with pertinence functions adjusted by the *PSO* algorithm, to identify the *gain* and *time constants* for a second-order model, where the inputs are the electric power supplied to resistors and the output is the process temperature. The transfer function parameters vary according to: the applied power (kW), the frequency (Hz) of the fan that controls the cyclone air flow, and the distance (dm) between the point of temperature measurement and the heat source. Thus, these three variables were used as inputs for the *fuzzy* system. Two experiments were realized to validate the model using a Pseudo Random Binary Signal (PRBS) for power rating, ranging between 2 and 6 kW. The adjustment coefficient on the two validation experiments were more than 82% and 85%, respectively. The optimized fuzzy system was able to model the system and to extract its features.

Keywords— Sistemas Fuzzy, Ciclone Secador, PSO, Modelagem de Sistemas.

Resumo— O secador de partículas do tipo ciclone é um equipamento utilizado para separação e secagem de partículas sólidas por meio da circulação de ar e injeção de calor. Este trabalho teve por objetivo a construção de um modelo *fuzzy*, com funções de pertinência estimadas por meio do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), para modelar a variação dos parâmetros de ganho e constantes de tempo de uma função de transferência de segunda ordem, cuja entrada é a potência elétrica fornecida ao banco de resistores e a saída a temperatura do processo. Os parâmetros desta função de transferência variam de acordo com: a potência aplicada aos resistores (kW), a frequência (Hz) do inversor que controla a vazão de ar do ciclone e com a distância (dm) do ponto de medição de temperatura da fonte de calor. Dessa forma, estas três variáveis foram utilizadas como entradas do sistema *fuzzy*. Dois experimentos foram realizados para validação do modelo identificado com uma entrada do tipo Binária Pseudo-Aleatória (PRBS) para a potência, variando-a entre 2 e 6 kW. O coeficiente de ajuste para os dois casos foi superior a 82% e 85%, respectivamente. Assim, o sistema *fuzzy* otimizado foi capaz de modelar o sistema e extrair suas características.

Palavras-chave— Sistemas Fuzzy, Ciclone Secador, PSO, Modelagem de Sistemas.

1 Introdução

A Inteligência Computacional é uma área de pesquisa muito utilizada para otimização de processos. Trata-se de um conjunto de ferramentas de vasta aplicabilidade e eficaz na solução de diversos tipos de problemas. Dentre diversos tipos de algoritmos e métodos destacam-se as redes neurais, os sistemas *fuzzy*, os sistemas *neurofuzzy* e a computação evolucionária.

Os sistemas fuzzy são utilizados para modelagem de processos e têm como característica importante o fato de trabalharem com variáveis linguísticas o que apresenta uma ótima vantagem para modelagem de processos. Por meio de um sistema de inferência fuzzy é possível identificar as principais características de um processo através das variáveis de entrada escolhidas.

A Computação Evolucionária (CE) apresenta subdivisões em Algoritmos Evolucionários, Sistemas Imunológicos, Sistemas por Enxames, entre outros. Os algoritmos baseados em CE são obtidos pela observação de um processo na natureza, seguida pela obtenção de um modelo biológico e

posteriormente a obtenção de um modelo computacional.

Um tipo de algoritmo bio-inspirado é o de Enxame de Partículas (PSO - Particle Swarm Optimization). Ele se baseia em conceitos de inteligência coletiva. Este modelo pode ser encontrado na natureza por grupos que, através da velocidade e posição de cada indivíduo, orientam todo o grupo na solução de problemas comuns ao mesmo. Exemplos do uso de algoritmos computacionais e exemplos são detalhados em (Aguirre, 2007), (Barbosa et al., 2011) e (Tayal and Lather, 2015).

A geração de energia elétrica através de fontes de biomassa formam processos que podem ser otimizados através de algoritmos de inteligência computacional. Essa otimização é uma necessidade. Em 2014 a geração de energia elétrica foi composta por uma matriz diversificada com a maioria de 65,2 % por hidroelétricas seguido por 13,0% de gás natural, 7,3% biomassa, 6,9 % de derivados do petróleo, 3,2 % de carvão e derivados, 2,5% nuclear e 2,0% de eólicas (EPE, 2014). Neste tipo de matriz o preço do custo de produção e fornecimento pode sofrer variações devido ao uso

de usinas termoeletricas e consumo de derivados de petróleo. Outro fator importante a respeito do consumo de energia no Brasil refere-se as fontes de energia de biomassa de 2005 até 2014, no qual houve crescimento na quantidade de consumo energético de mais de 26%. Dentre as fontes de energia de biomassa, o bagaço de cana se destaca por apresentar crescimento aproximado de 51,1 % destacando-se como fonte de energia limpa. Neste contexto a otimização do processo de utilização do bagaço de cana como fonte de energia torna-se uma boa alternativa para o enriquecimento da matriz energética brasileira.

O secador do tipo ciclone é um equipamento que possibilita a secagem de resíduos tais como o bagaço de cana. Trabalhos como (Corrêa, 2003) e (Oliveira, 2010) realizaram a secagem do bagaço da cana em um secador ciclônico e verificaram uma melhora em sua qualidade para queima.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo empregar técnicas de inteligência computacional (sistemas fuzzy e nuvem de partículas) para modelar a temperatura em diversos pontos de medição de um ciclone experimental, a partir da potência elétrica aplicada em um banco de resistores utilizado como fonte de calor do secador. Esse equipamento e suas principais características estão descritos em Corrêa et al (2014) e Oliveira (2010).

2 Referencial Teórico

2.1 Ciclone Secador

Ciclones são equipamentos usados para a limpeza de gases misturados a partículas sólidas e também são um dos coletores de sólidos industriais mais comuns. Sua condição de operação normal é na limpeza de gases no entanto trabalhos vêm sendo desenvolvidos para a adequação do ciclone como secador de partículas, como Corrêa (2003), Corrêa et al (2014) e Oliveira (2010).

O funcionamento do Ciclone pode ser descrito conforme apresentado na Figura 1 em que por meio de um ventilador (1), acionado por um inversor de frequência, é possível controlar a velocidade do ar no interior do equipamento. Em seguida, o ar passa por um medidor de vazão (2) até chegar a um banco de resistores (3) onde é aquecido, o número de resistores acionados é variável e determina a potência dissipada em forma de calor. Após este estágio o ar percorre as tubulações até chegar ao ponto de inserção dos resíduos agrícolas, composto por uma esteira (4) e um tubo de Venturi (5). Neste ponto, o ar tem a função de direcionar os resíduos até a parte de secagem no ciclone (6). Ao final do processo, os resíduos secos saem pela parte inferior do ciclone pronto para a coleta (7).

A temperatura do ciclone, em malha aberta,

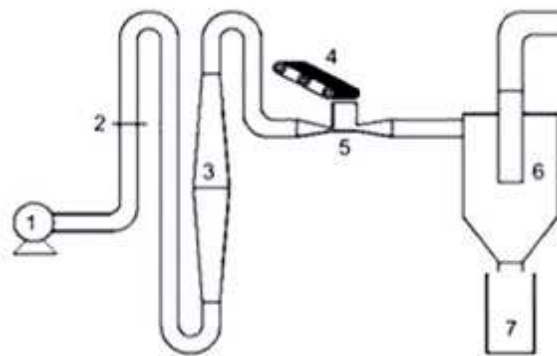


Figura 1: Ciclone Secador: 1) Ventilador controlado por inversor de frequência. 2) Medição de vazão. 3) Sistema de aquecimento. 4) Esteira para a entrada de partículas. 5) Tubo de Venturi. 6) Câmara ciclônica. 7) Saída de partículas.

depende da combinação entre potência elétrica fornecida ao banco de resistores e dissipada na forma de calor, da vazão do ar e da distância do ponto de medição para a fonte de calor. A modelagem do comportamento da temperatura em função destas variáveis é essencial para a otimização do processo de secagem de partículas.

2.2 PSO

O algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization), proposto por (Kennedy, 1995), é baseado no comportamento de grupos de animais ou insetos que ao se locomoverem, observam as melhores posições de cada indivíduo do grupo afim de encontrar o melhor caminho. Isto se torna possível observando os fatores de posição, velocidade e desempenho de cada indivíduo.

Este algoritmo vem sendo utilizado largamente para a otimização de sistemas. (Mirza Muhammad Sabir, 2016) aplicaram o algoritmo PSO para a obtenção dos parâmetros de um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para controle de posição de um painel solar a fim de aperfeiçoar a captação da luz. (Singh et al., 2016) utilizaram o algoritmo para otimizar um problema de *Optimal Power Flow* que é um algoritmo orientado para soluções de problemas como consumo de combustível, taxa de compra e venda de ações e outros problemas de otimização.

2.3 Sistemas Fuzzy

Os sistemas fuzzy têm sido empregados em diversos tipos de áreas para a modelagem de processos. Segundo (Shaw, 2015), os sistemas *fuzzy* estendem a teoria de conjuntos bivalentes, ou seja, são sistemas com multivalência. Isto significa que um valor pode pertencer a um conjunto não apenas de forma *verdadeira* ou *falsa*, mas pode pertencer aos dois conjuntos com graus de pertinência.

cia diferentes. Os sistemas *fuzzy* apresentam conjuntos que se aproximam da visão do mundo real observado.

O processo descrito por sistemas *fuzzy* ocorre em duas etapas chamadas *fuzzificação* e *defuzzificação*. Na primeira ocorre um mapeamento dos números reais que descrevem o sistema a ser modelado para um sistema *fuzzy*. Nesta etapa são atribuídas as regras e as variáveis linguísticas tais como valores *alto*, *baixo*, *fraco*, *forte*, e etc. Para cada classe ou grupo é criado um pré-processamento de dados. A segunda etapa, a *defuzzificação*, consiste na determinação, através dos valores de entrada e regras que regem o sistema, em sua saída numérica. Esta etapa consiste na transcrição da variável linguística de saída em um valor discreto (Shaw, 2015).

3 Materiais e Métodos

A partir de um estudo prévio sobre o secador ciclônico, constatou-se que este processo pode ser representado pela seguinte função de transferência $H(s)$:

$$H(s) = \frac{Kp}{(Tp1.s + 1)(Tp2.s + 1)} \quad (1)$$

em que Kp é o Ganho [$^{\circ}C/kW$], $Tp1$ e $Tp2$ são as constantes de tempo 1 e 2.

O objetivo do algoritmo *PSO* combinado com a estrutura *fuzzy* é de fato otimizar os parâmetros da função de transferência descrita pela equação 1. A figura 2 demonstra o sistema proposto. O algoritmo *PSO* têm o objetivo de encontrar as melhores funções de pertinência do sistema *fuzzy*.

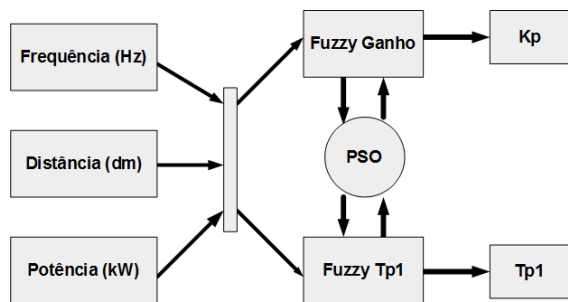


Figura 2: Sistemas Fuzzy propostos para modelagem das funções de transferência do ciclone secador.

Os parâmetros da função de transferência variam com a amplitude da potência fornecida, com a vazão de ar no interior do ciclone e com o ponto de medição de temperatura. Assim, optou-se por representar esta variação dos parâmetros por dois sistemas *fuzzy*, um cuja saída é o ganho dessa função de transferência e outro cuja saída é a constante de tempo dominante do sistema, conforme apresentado na Figura 2. A segunda constante de

Algoritmo 1 PSO

- 1: **Entradas:** Insira valores aleatórios para cada indivíduo j da população P de tamanho N ;
- 2: $P[j] = [V_1 \ M_1 \ V_2 \ M_2 \ \dots \ V_{12} \ M_{12}]$;
- 3: Insira os valores das constantes $C1$, $C2$ e W .
- 4: Atribua uma velocidade V inicial para todas partículas.
- 5: Atribua um valor inicial para a melhor posição P_{best} de cada partícula e a melhor posição do grupo G_{best}
- 6: **Para:** $k = 1, \dots$, número de gerações
- 7: **Para:** $j = 1, \dots, N$
- 8: **Para:** $i = 1, \dots$, número de parâmetros da partícula $P[j]$
- 9: $R1 = rand()$;
- 10: $R2 = rand()$;
- 11: $V[j, i] = W V[j, i] + C1 R1(P_{best} - P[j][i]) + C2 R2(G_{best} - P[j][i])$;
- 12: **Fim Para**
- 13: $X[j] = P[j] + V[j]$;
- 14: Avalie a partícula $X[j]$ por meio da Função Objetivo (2)
- 15: **SE** $X[j]$ for melhor que $P[j]$
- 16: $P[j] = P[j] + V[j]$;
- 17: **Fim SE**
- 18: **Fim Para**
- 19: Atualize P_{best}
- 20: **Fim Para**
- 21: **Saída:** $P_{best} = [V_1, V_2 \dots V_{12}, M_1, M_2 \dots M_{12}]$ que representa os melhores valores de variância e média associados às funções de pertinência das entradas do sistema *fuzzy*.

tempo foi fixada em 100 segundos com base em testes previamente realizados. O Algoritmo *PSO* descreve o método proposto *PSO*. A função objetivo, utilizada na avaliação de cada partícula do *PSO*, é descrita por pelo erro $erro[i]$ de cada partícula:

$$erro[i] = \sum_{i=1}^N (P[i] - P_{exp}[i])^2 \quad (2)$$

em que $P[i]$ representam as melhores partículas, P_{exp} representam as melhores partículas obtidas experimentalmente.

As funções de pertinência para as saídas não foram otimizadas pelo algoritmo empregado. Para os dois sistemas *fuzzy* foram realizadas 100 iterações do Algoritmo *PSO*, e o erro médio quadrático final foi menor que 10%.

4 Resultados

4.1 Otimização e Saída fuzzy

Foram realizados nove experimentos variando a potência em 4, 8 e 12 kW , a vazão do ar foi variada de acordo com a frequência do inversor em 40, 50 e 60 Hz e sete pontos de medição em

56, 236, 310, 390, 436, 446 e 456 *cm* distribuídos ao longo do equipamento.

Os valores de distância foram convertidos em decímetros para que a faixa de trabalho do algoritmo *PSO* fosse a mesma para as três variáveis. Foram extraídas as funções de transferência de segunda ordem para cada condição. As regras do controlador fuzzy foram extraídas com base nestes resultados. Os sistemas fuzzy obtidos foram do tipo *Mandani*, operadores de agregação máximo e mínimo e *defuzzificação* do tipo *Centróide*.

As funções de pertinência dos sistemas *fuzzy* obtidas por meio do 3 encontram-se descritas por sua variância e média (uma vez que são funções gaussianas) na tabela 1. A figura 3 apresenta um exemplo para a saída otimizada da distância para o parâmetro *Ganho*.

Tabela 1: Tabela de Resultados obtidos através do PSO e dados experimentais.

Variável	Tipo	Classe	Média	Variância
Ganho	D	Curta	2	14,5
Ganho	D	Longa	36,5	13,5
Ganho	F	Baixa	45,3	10,7
Ganho	F	Alta	55	9,8
Ganho	P	Fraca	2,7	3,3
Ganho	P	Forte	11,7	6,5
Tp1	D	Curta	8	16,3
Tp1	D	Longa	15	15,4
Tp1	F	Baixa	43,7	12,3
Tp1	F	Alta	54,1	3,7
Tp1	P	Fraca	2,3	3,1
Tp1	P	Forte	7,8	4,1

É possível observar pelas figuras 4, 5 e 6, que os resultados mostram-se coerentes com o comportamento físico pré determinado nas regras. O *Ganho* tende a aumentar ao diminuir a frequência e quando se aumenta a distância da fonte de calor. Isto era esperado pois, em relação à frequência, quando esta é menor, têm-se menos ar frio entrando no equipamento e em relação a distância, quanto mais longe dos resistores maior é a dissipação do calor e consequentemente menor o *Ganho*. A respeito da constante de tempo principal observa-se que esta varia de forma não linear em relação às três entradas descritas. Desta forma, o sistema *fuzzy* conseguiu extrair pontos de não linearidades conforme observado nas figuras 7,8, e 9.

4.2 Validação

A fim de validar o sistema fuzzy otimizado foram realizados dois testes a 40 e 60 Hz para o mesmo ponto de medição, a 5,6 dm da fonte de calor. Foram obtidos dados experimentais excitando o sistema com um sinal *Pseudo Random Binary Signal* (PRBS) para a entrada potência, com período de amostragem de 100 s. Esta entrada foi es-

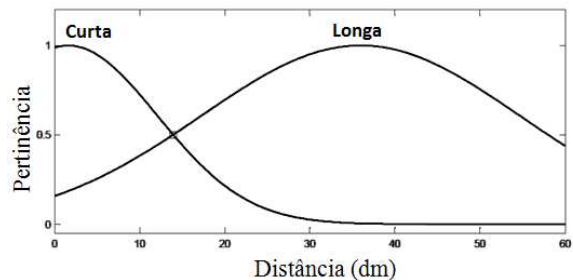


Figura 3: Funções de pertinência curta e longa para a entrada distância (dm) para o sistema *fuzzy* Ganho.

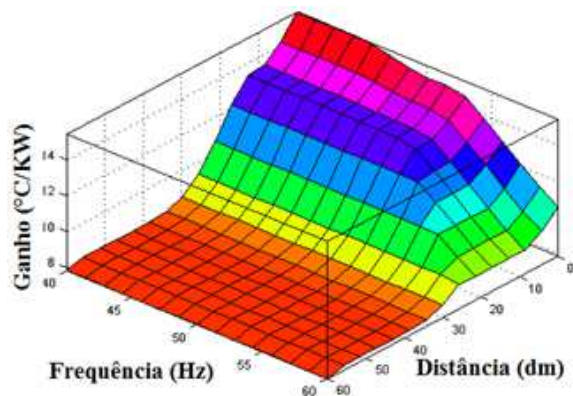


Figura 4: Figura 12. Saída Ganho em função da frequência e distância aplicadas.

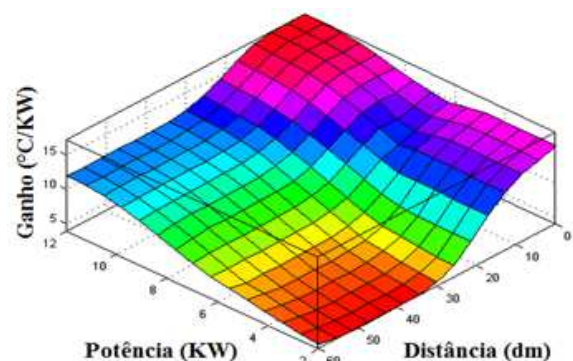


Figura 5: Saída Ganho em função da distância e potência aplicada.

colhida para poder testar a solução do sistema em regime transiente. A figura 10 apresenta os sinais de temperatura medidos nos dois experimentos e a entrada aplicada. A simulação livre das funções de transferências obtidas pelo sistema *fuzzy* proposto para essa mesma entrada encontra-se nas figuras 11 e 12. Para estes dois experimentos a correlação entre os dados experimentais e os simulados foi maior que 82% para o experimento de 40Hz e 60Hz respectivamente. Os modelos fuzzy demonstraram um ajuste relativamente alto (maior que 80 %) sendo que a temperatura do ciclone depende de parâmetros de transferência de calor

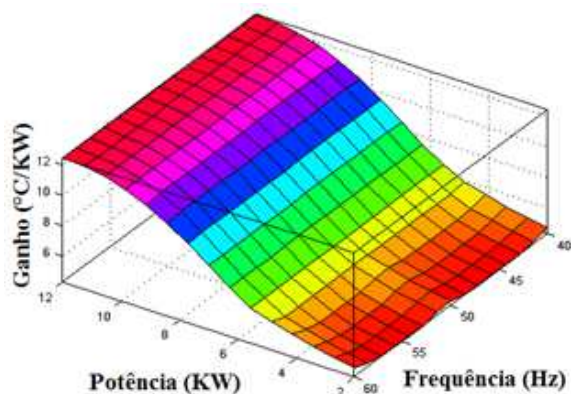


Figura 6: Saída Ganho em função da frequência e potência aplicadas.

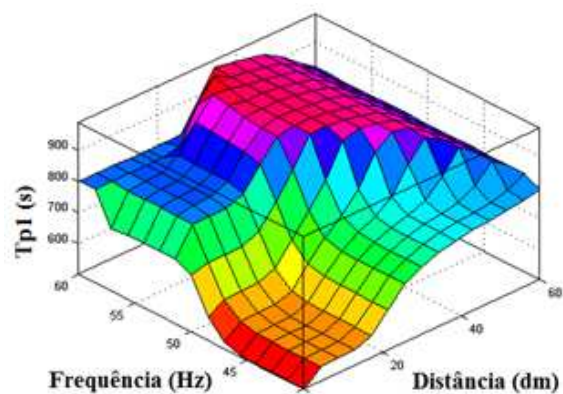


Figura 7: Saída Tp1 em função da frequência e distância aplicadas.

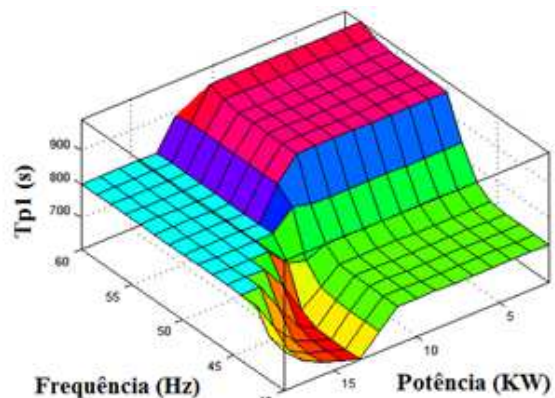


Figura 8: Saída Tp1 em função da frequência e potência aplicadas.

e outros fatores aqui não estudados que agregam não-linearidades ao sistema como a umidade do ar e variações na tensão e corrente elétrica.

O algoritmo *PSO* foi capaz de otimizar os parâmetros das funções de transferência de variáveis diferentes. Isto seria complicado sem a ajuda do algoritmo pois ainda que, as funções de pertinên-

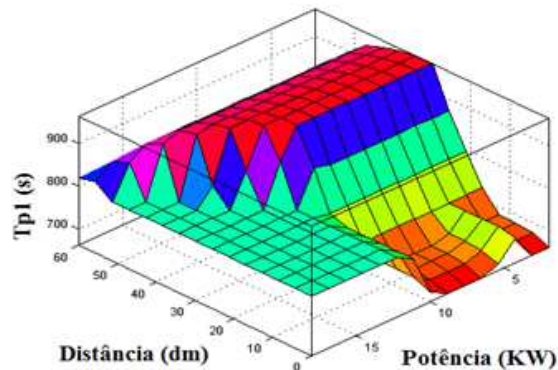


Figura 9: Saída Tp1 em função da distância e potência aplicadas.

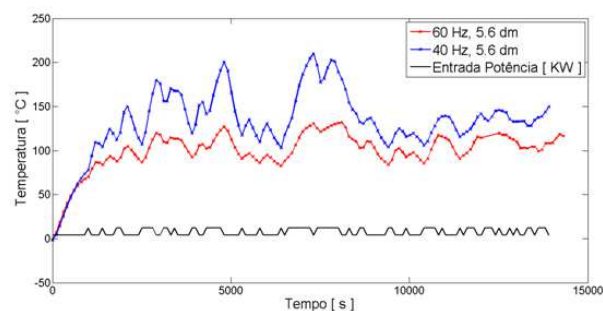


Figura 10: Saída de temperatura em função do sinal de potência, frequência e distância aplicadas.

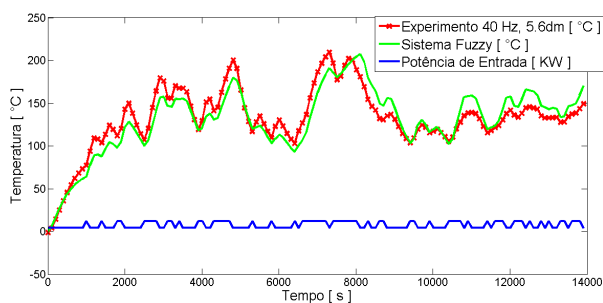


Figura 11: Saída Tp1 em função da distância e potência aplicadas.

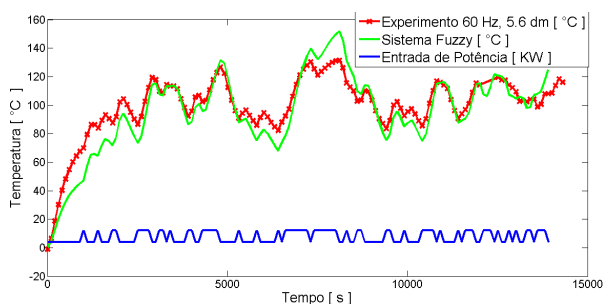


Figura 12: Saída Tp1 em função da distância e potência aplicadas.

cia gaussianas dependam apenas da média e variância, existem muitas possibilidades para a formação destas combinações e ao interferir em qualquer função de pertinência, todas as repostas atreladas a ela seriam afetadas.

O algoritmo *PSO* junto ao sistema *fuzzy* inseriu as não linearidades a equação 1 e proporcionou um modelo capaz de descrever a temperatura no ciclone para as faixas de frequência do inversor, potência aplicada aos resistores e distância da fonte de calor.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um método de ajuste das funções de pertinência de um sistema *fuzzy* baseado no algoritmo *PSO*. Dois sistemas *fuzzy* foram implementados, um para modelagem do ganho e outro para modelagem da constante de tempo dominante, de funções de transferência de segunda ordem do secador ciclônico. Os sistemas *fuzzy* implementados neste trabalho foram capazes de modelar as não-linearidades do secador ciclônico. O algoritmo *PSO* mostrou ser capaz de otimizar a estrutura de sistemas *fuzzy*, encontrando resultados satisfatórios em um tempo hábil.

É importante observar que a partir da construção desse sistema *fuzzy* é possível inferir os ganhos e constante de tempo dominante do sistema para diversas variações de suas entradas (potência, frequência e distância), mesmo que nem todas as combinações possíveis dessas entradas tenham sido implementadas em testes experimentais para a obtenção das funções de transferências alvos identificadas inicialmente.

A partir desta modelagem do ciclone secador será possível desenvolver seu controle em malha fechada além de proporcionar informações mais precisas para condições de secagem de resíduos com potencial de queima como o bagaço da cana e borra de café. Como projetos futuros, espera-se desenvolver um controlador *fuzzy* de temperatura do ciclone.

6 Agradecimentos

Apoio: FAPEMIG, CNPQ, CAPES.

Referências

Aguirre, L. A. (2007). *Introdução a Identificação de Sistemas.*, Editora UFMG.

Barbosa, B. H. G., Aguirre, L. A., Martinez, C. B. and Braga, A. P. (2011). Black and gray-box identification of a hydraulic pumping system, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **19**(2): 398–406.

Corrêa, J. L. G. (2003). *Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos.*, Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).

EPE (2014). Balanço energético nacional, *Technical report*, Ministério de Minas e Energia do Brasil. Governo Federal.

Kennedy, J. (1995). *Encyclopedia of Machine Learning*, Springer US, Boston, MA, chapter Particle Swarm Optimization, pp. 760–766.

Mirza Muhammad Sabir, T. A. (2016). Optimal pid controller design through swarm intelligence algorithms for sun tracking system, *Applied Mathematics and Computation* **274**(2016): 10.

Oliveira, L. F. (2010). *Secagem de bagaço de cana comum e um secador ciclônico.*, Master's thesis, UFLA, Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos).

Shaw, M. G. S. . I. (2015). *Controle e Modelagem Fuzzy*, FAPESP.

Singh, R., V. Mukherjee, V. and Ghoshal, S. (2016). Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for the solution of optimal power flow problem, *Applied Soft Computing* pp. 161–177.

Tayal, V. and Lather, J. (2015). Reduced order h_∞ controller and pso optimized fuzzy pss design in mitigating small signal oscillations in a wide range, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **68**: 123 – 131.