

USO DO SISTEMA LÓGICO FUZZY NO CONTROLE DA POTÊNCIA APLICADA AO MOTOR DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DE UM GASEIFICADOR/COMBUSTOR PARA PRODUÇÃO DE CALOR

Oscar Luiz Teixeira Rezende¹, Luciano Lessa Lorenzoni² e Hans Rolf Kulitz³

Resumo: O objetivo do trabalho foi desenvolver um Sistema Lógico Fuzzy (SLF) que simula o monitoramento da potência aplicada ao motor do sistema de ventilação de um gaseificador/combustor, construído para produzir ar aquecido utilizado na secagem de grãos e aquecimento de aviários. Foram utilizados dados experimentais na modelagem e nos testes com o SLF proposto. Os resultados revelaram que a modelagem do SLF foi adequada para determinar as potências, e os valores obtidos reproduziram satisfatoriamente os resultados experimentais com base em informações dispersas, sem a necessidade da tradicional modelagem matemática de um sistema de transferência de calor e massa.

Palavras-chave: Simulação; Gaseificação; Controlador Fuzzy.

USING FUZZY LOGIC SYSTEM TO CONTROL THE POWER APPLIED TO THE VENTILATION SYSTEM MOTOR OF A GASIFIER/COMBUSTOR TO PRODUCE HEAT

Abstract: This study aimed at developing a Fuzzy Logic System (FLS) to simulate the monitoring of power applied to the ventilation system motor of a gasifier/combustor built to produce hot air used to dry grains and heat aviaries. Experimental data were used to model and test the FLS proposed. The results show that the FLS modeling was appropriate to determine power levels. The values achieved reproduced the experimental results satisfactorily, based on disperse information, and without needing the traditional mathematical modeling of a heat and mass transfer system.

Keywords: Simulation; Gasification; Fuzzy Controller.

¹ Professor do Ifes Vitória, Doutor em Engenharia Agrícola pela UFV. *E-mail* para contato: oscar@ifes.edu.br.

² Professor do Ifes Vitória, Doutor em Engenharia Elétrica pela Ufes.

³ Professor do Ifes Vitória, Doutor em Engenharia Elétrica pela Ufes.

INTRODUÇÃO

No atual contexto, em que é imperativo buscar fontes de energia limpa e renovável, a geração de calor utilizando gaseificadores de biomassa acoplados a combustores torna-se uma alternativa viável. Zanata (2007), ao testar um gaseificador/combustor para aquecimento do ar de aviários, obteve ar quente e limpo com níveis aceitáveis de CO e CO₂ e uma redução de 26% no uso da lenha em relação à fornalha de fogo direto.

Um dos problemas detectados por Zanata (2007) foi o desperdício de energia quando não se controla a potência aplicada ao motor do sistema de ventilação e o ventilador gira em velocidade constante. Durante os testes com o gaseificador/combustor, ele observou que, no período diurno, quando a temperatura ambiente é mais alta, a temperatura no interior do galpão foi controlada por meio da abertura das cortinas e não houve redução no consumo de biomassa, causando desperdício de energia térmica e de combustível.

Uma alternativa para flexibilizar a operação do gaseificador/combustor e usar, de forma racional, a energia produzida é controlar a velocidade do ventilador do sistema de ventilação para produzir um ar de exaustão na temperatura desejada.

Entre as opções de controle, a estratégia de “controle fuzzy” é a de mais fácil compreensão, pois utiliza uma técnica que incorpora a forma humana de pensar. Segundo Zadeh (2008), nos últimos 40 anos, foram publicados mais de 68.000 trabalhos em que o termo “*lógica fuzzy*” aparece no título, e aproximadamente 4.800 patentes no Japão e 1.500 nos Estados Unidos estão relacionadas com a lógica fuzzy.

O Sistema Lógico Fuzzy (SLF) (Figura 1) apropria-se dos conceitos da lógica fuzzy para modelar processos numa abordagem diferente dos métodos convencionais desenvolvidos pela modelagem matemática. Nesses sistemas, as tarefas são comandadas pelos conhecimentos subjetivos de especialistas, relacionadas com alguma variável de interesse e traduzidas por conjuntos fuzzy que, associados a uma determina base de regras, obtêm a relação fuzzy, que controla/inferre uma variável-resposta.

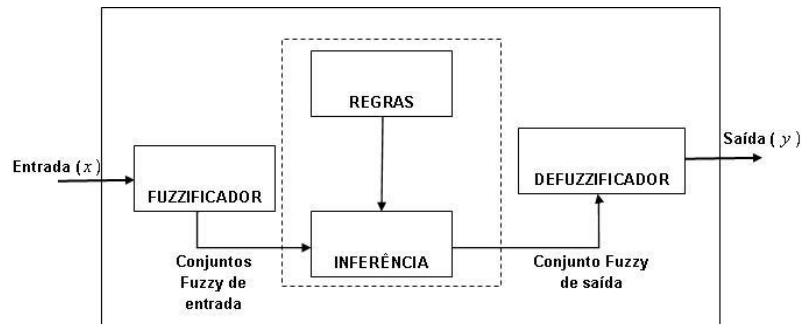


Figura 1 Estrutura de um Sistema Lógico Fuzzy.

O sistema está estruturado em quatro componentes básicos: *fuzzificador*, *regras*, *inferência* e *defuzzificador*. Pode ser interpretado como um mapeamento de entrada e saída representado pelo modelo matemático $y = f(x)$, em que o valor de y é obtido pela transformação de x , que é operado pela função f , ao percorrer as linhas cheias na Figura 1.

Na Figura 1, x representa as variáveis linguísticas de entrada, f é uma função constituída das operações executadas nos componentes básicos – *fuzzificador*, *regras*, *inferência* e *defuzzificador* – e y são as variáveis numéricas de saída que executam as ações demandadas pelo sistema. A seguir, uma explicação resumida de cada um dos componentes do SLF:

- Fuzzificador – Nesse componente, as variáveis linguísticas de entrada são associadas aos conjuntos fuzzy pertinentes com os respectivos domínios;
- Regras – São consideradas o “núcleo” do Sistema Lógico Fuzzy. Fornecidas por especialistas ou extraídas de dados numéricos, são expressas como uma coleção de sentenças lógicas do tipo *Se... Então...* Por exemplo, *se a temperatura é alta, então aumente a velocidade do ventilador*;

- Inferência – Nesse componente ocorrem as operações com os conjuntos fuzzy propriamente ditas. Há combinação dos antecedentes com os consequentes das regras para gerar o conjunto fuzzy de saída;
- Defuzzificador – Interpreta as informações geradas no conjunto fuzzy de saída, dando origem às ações demandadas pelo sistema, e permite representar um conjunto fuzzy por um valor numérico.

O SLF é utilizado de duas formas: uma para inferir resultados que descrevem o “estado das coisas” sem executar uma ação sobre elas e outra para controlar determinadas ações, como acionar um sistema de ventilação e aumentar a vazão de ar que atravessa um determinado volume de controle.

Vários pesquisadores desenvolveram SLF como ferramenta para enfrentar problemas na área da agricultura. Manzine & Teixeira (2006), Cramesco et al. (2010) e Caneppele & Seraphim (2010) construíram Sistemas Lógicos Fuzzy para racionalizar consumo e otimizar processos de geração de energia em unidades rurais.

A ambiência animal também é um tema que vários autores pesquisam no Brasil. Trata-se de uma área de estudo que utiliza a lógica fuzzy como ferramenta de auxílio à tomada de decisão. Nesse caso, os SLF são desenvolvidos para avaliar as condições de conforto nos ambientes de produção animal. Entre os autores que pesquisaram o tema, citamos: Pandorfi et al. (2007), Pereira et al. (2008), Sachissi et al. (2008) e Ponciano et al. (2010).

Neste trabalho, foi desenvolvido um SLF para simular a potência aplicada ao motor do sistema de ventilação de um gaseificador/combustor causando variações na temperatura de exaustão do ar quente gerado pelo sistema.

Os dados de temperatura e a potência aplicada ao motor do sistema de ventilação utilizados na modelagem e na simulação do SLF foram colhidos por Santo (2008), que controlou a potência do sistema utilizando um inversor, cuja frequência desejada foi estabelecida manualmente para controlar a velocidade do ventilador do gaseificar/combustor.

OBJETIVO GERAL

Este trabalho visou a desenvolver um SLF para simular o monitoramento da potência aplicada ao motor do sistema de ventilação de um gaseificador/combustor, construído para produzir ar aquecido utilizado na secagem de grãos e aquecimento de aviários.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram objetivos específicos deste estudo:

- definir as funções de pertinência correspondentes aos termos linguísticos das variáveis de entrada e saída do SLF;
- determinar as partições do universo do discurso das variáveis de entrada e de saída do SLF;
- estabelecer o conjunto de regras do SLF;
- descrever o comportamento dos dados experimentais e aqueles obtidos pelo SLF por meio do ajuste a um modelo matemático adequado;
- comparar os resultados das potências médias obtidas experimentalmente e pelo SLF.

MATERIAL E MÉTODOS

Os testes com o SLF proposto foram feitos utilizando os dados experimentais obtidos por Santos (2008), ao estudar um gaseificador/combustor projetado por Martin (2005) (Figura 2).

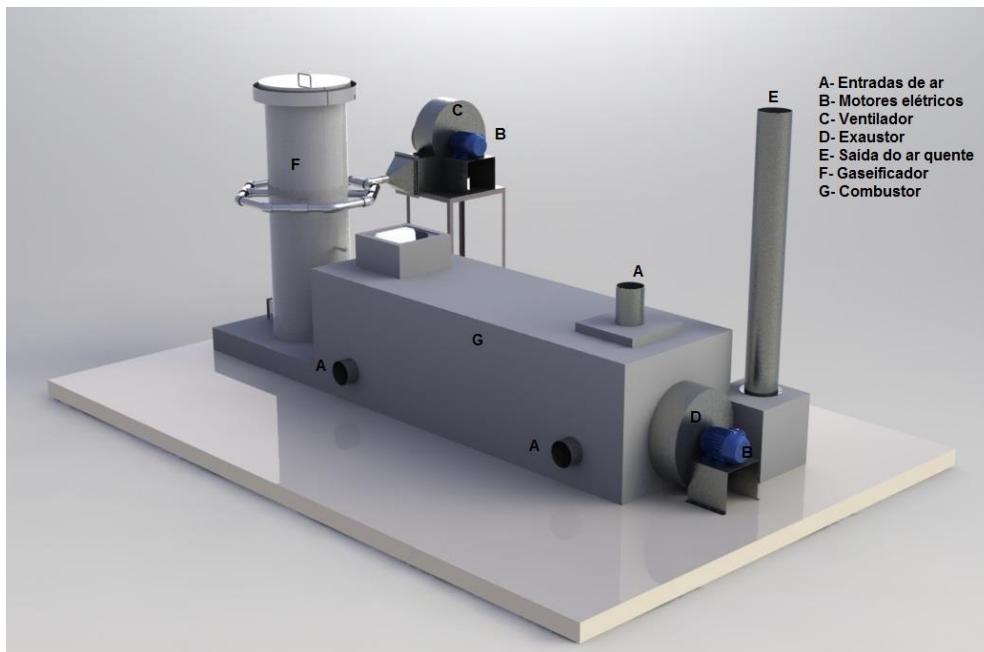


Figura 2. Croqui do gaseificador/combustor

O SLF foi modelado tomando-se por base dados experimentais e optando-se pelo tratamento em que a área total das aberturas de entrada do ar no combustor foi de 180cm^2 , com duas variáveis de entrada: a temperatura no combustor (*comb*) e a temperatura de exaustão (*exaust*), e uma variável-resposta, a potência aplicada ao motor elétrico do sistema de ventilação (*pot*), conforme a Figura 3.

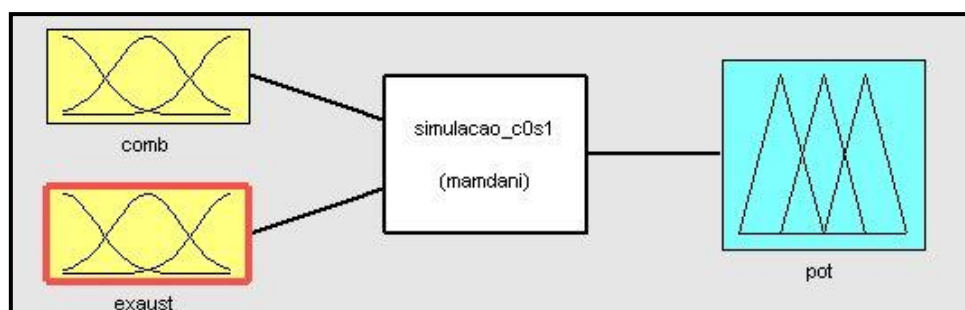


Figura 3. Modelo do Sistema Lógico Fuzzy

O conjunto fuzzy correspondente à variável:

a) *comb*, que foi definida com três valores linguísticos: temperatura no combustor baixa (TCB); temperatura no combustor média (TCM); temperatura no combustor alta (TCA). As funções de pertinência escolhidas para representar os valores linguísticos foram a trapezoide e a triangular, com a partição do universo do discurso determinada, estatisticamente, pelos valores: mínimo, primeiro quartil, segundo quartil, terceiro quartil e máximo dos dados experimentais da temperatura no combustor (Figura 4).

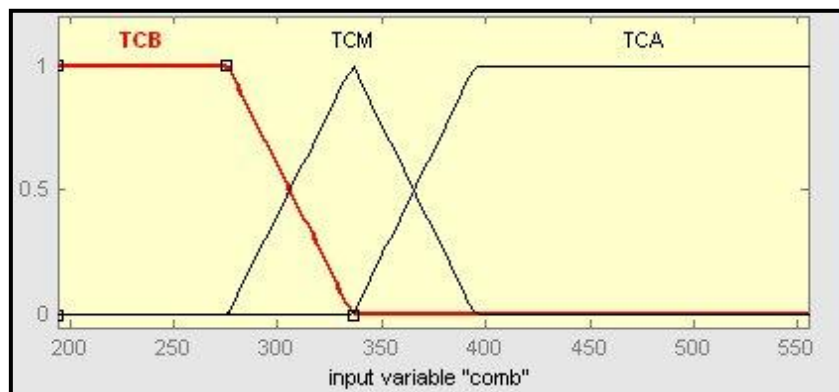


Figura 4. Conjunto fuzzy da variável *comb* (em °C)

b) *exhaust*, que foi definida com os valores linguísticos: temperatura de exaustão baixa (TEB); temperatura de exaustão média (TEM); temperatura de exaustão alta (TEA).

c) *Pot*, que foi classificada com os valores linguísticos: potência baixa (PB), potência média (PM) e potência alta (PA).

As funções de pertinência referentes aos valores linguísticos das variáveis *exhaust* e *pot*, assim como as respectivas partições do universo do discurso, foram determinadas de forma semelhante às da variável *comb*, com recursos dos dados experimentais correspondentes (Figuras 5 e 6).

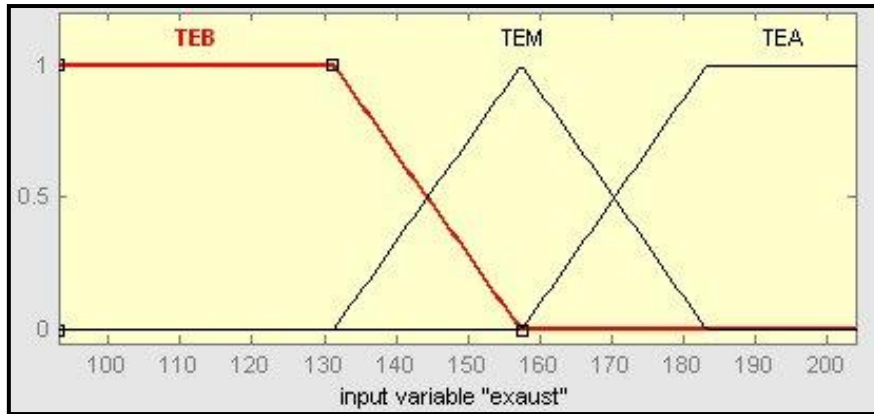


Figura 5. Conjunto fuzzy da variável *exhaust* (em °C)

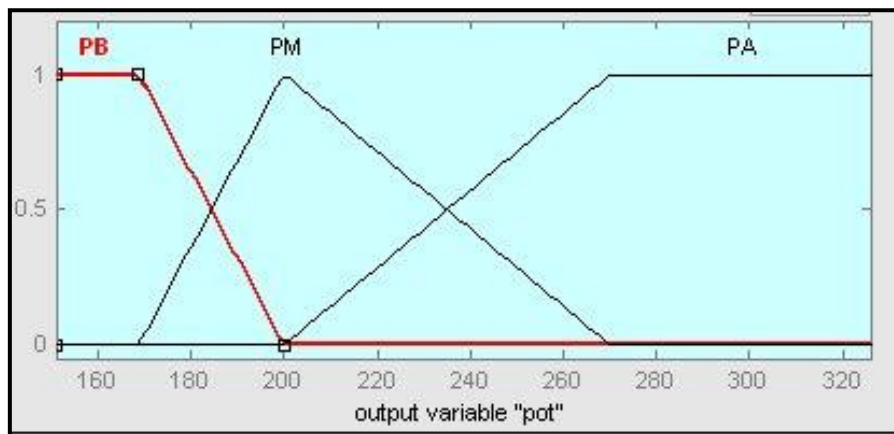


Figura 6. Conjunto fuzzy da variável *pot* (em W)

As regras do SLF (Quadro 1) foram criadas considerando como antecedentes os agrupamentos dos valores linguísticos das duas variáveis de entrada. Como consequentes, foram atribuídos os valores linguísticos da variável-resposta do sistema baseados no comportamento dos dados experimentais das variáveis de entrada, observando: “À medida que a potência do motor aumentou, a temperatura de exaustão e a temperatura no combustor também aumentaram”.

Regras	Se comb e exhaust, então pot		
R1	TCB	TEA	PB
R2	TCB	TEM	PB
R3	TCB	TEB	PM
R4	TCM	TEA	PM
R5	TCM	TEM	PM
R6	TCM	TEB	PM
R7	TCA	TEA	PM
R8	TCA	TEM	PA
R9	TCA	TEB	PA

Quadro 1. Conjunto de regras do SLF

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O SLF foi implementado no pacote *Fuzzy logic toolbox* do Matlab, versão 7.6. Para a *fuzzificação* das variáveis de entrada, utilizou-se o método Mamdani; para a *defuzzificação* da variável de saída, o método centro de massa.

Nos testes, os pares de valores das variáveis *comb* e *exhaust* foram processados pelo SLF, obtendo-se a potência aplicada ao motor. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados referentes às temperaturas no combustor e no exaustor e às potências obtidas experimentalmente e pelo SLF.

Pares de temperatura	Temperatura no combustor (°C)	Temperatura no exaustor (°C)	Potência experimental (W)	Potência SLF (W)
1	194,0	93,0	151,0	168,0
2	212,0	101,0	165,0	168,0
3	252,0	122,0	151,0	168,0

4	262,0	122,0	180,0	168,0
5	275,0	132,0	165,0	169,0
6	278,0	131,0	200,0	174,0
7	286,0	137,0	229,0	187,0
8	294,0	144,0	270,0	198,0
9	296,0	147,0	180,0	197,0
10	331,0	168,0	200,0	212,0
11	341,0	155,0	326,0	221,0
12	350,0	186,0	229,0	233,0
13	359,0	173,0	165,0	244,0
14	376,0	175,0	180,0	262,0
15	395,0	193,0	326,0	279,0
16	395,0	204,0	270,0	279,0
17	426,0	201,0	200,0	279,0
18	462,0	160,0	229,0	277,0
19	497,0	160,0	270,0	277,0
20	555,0	199,0	326,0	270,0

Para visualizar o comportamento das potências, os valores foram plotados na

Figura 7.

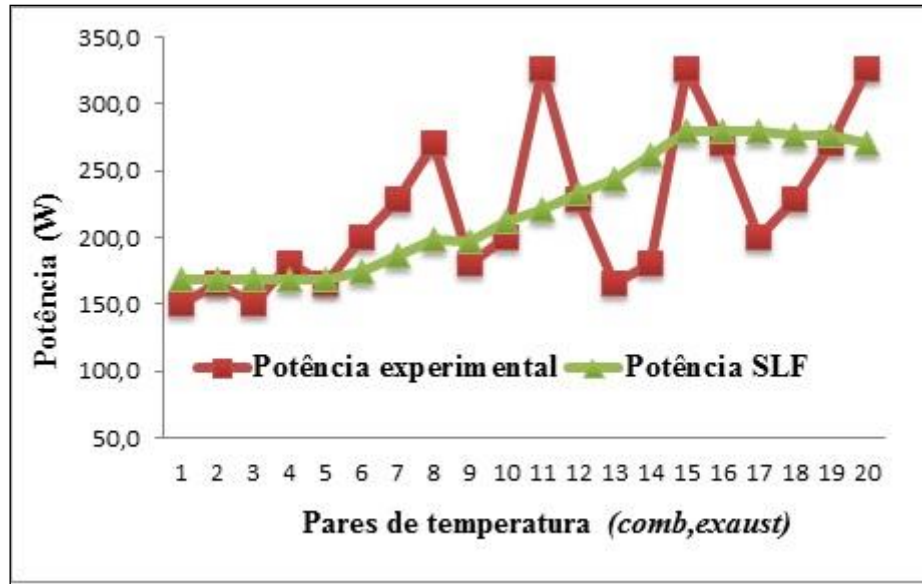


Figura 7. Relação entre os pares (*comb, exhaust*) e os valores das potências obtidas experimentalmente e pelo SLF.

Para descrever o comportamento das duas potências, os dados foram ajustados ao modelo matemático polinomial $y = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$, em que:

y = Potência (em W);

x = Par de temperatura (adimensional);

a_i = Parâmetros do modelo (adimensional).

Observou-se que os valores da potência experimentalmente calculada não se ajustaram bem ao modelo matemático, como mostrou o cálculo de $R^2 = 0,4269$ (Figura 8).

Os valores da potência determinada pelo SLF se ajustaram bem ao modelo polinomial $y = -0,0733x^3 + 2,3308x^2 - 12,876x + 183,93$, conforme observado pelo cálculo de $R^2 = 0,9897$ (Figura 9).

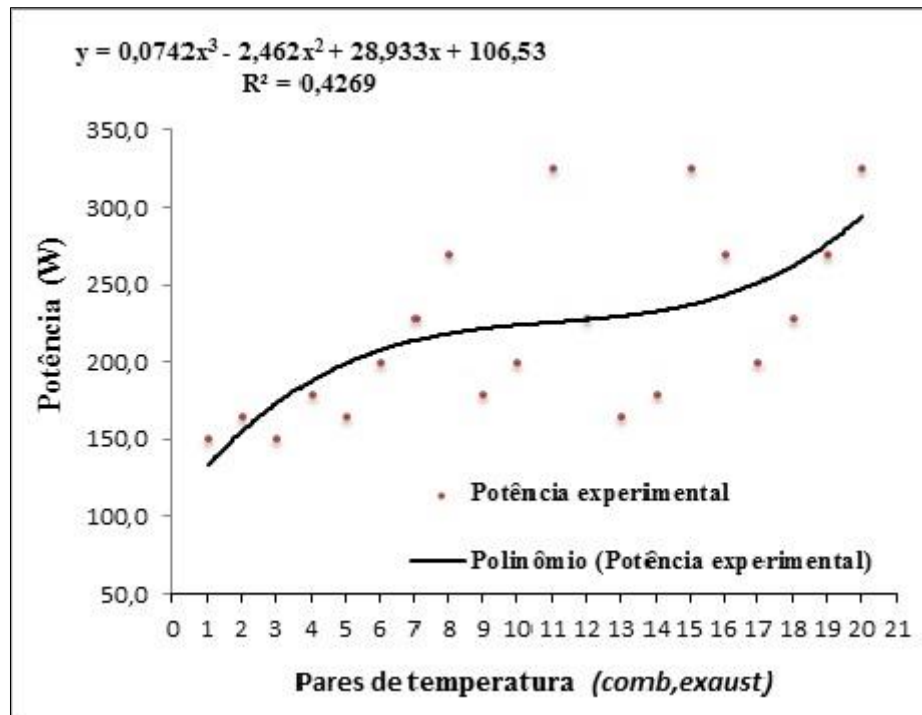


Figura 8. Ajuste dos valores experimentais da potência ao modelo matemático

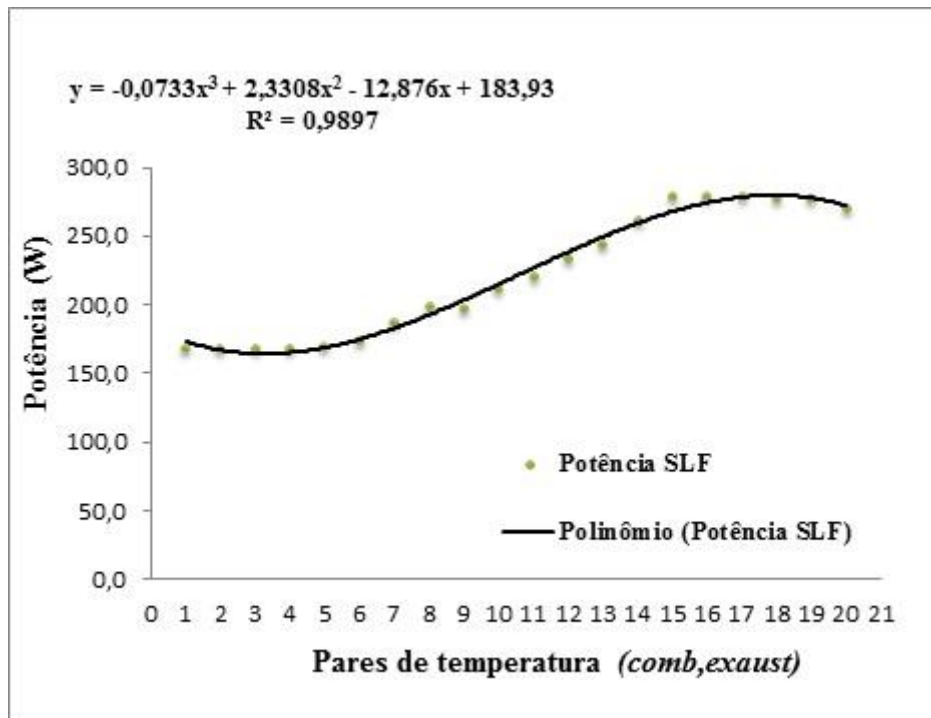


Figura 9. Ajuste dos valores da potência determinados pelo SLF ao modelo matemático.

O valor médio da potência observada experimentalmente foi 220,6 W e o valor médio da potência calculada pelo SLF foi 221,5 W. As potências médias foram comparadas pelo teste de *t* ao nível de significância 5%. Os cálculos estatísticos realizaram-se por meio do *software* SPSS V16.

A significância do teste foi $P = 0,957 > 0,05$, o que indicou aceitar a hipótese de igualdade entre as médias. O coeficiente de variação relativo aos dados experimentais foi 0,267, e o relativo ao SLF foi 0,206, o que mostrou maior variabilidade dos dados experimentais.

CONCLUSÕES

A partir do estudo, concluiu-se que:

- as funções de pertinências e os valores linguísticos estabelecidos para as variáveis de entrada e de saída se mostraram adequados ao modelo proposto;
- a partição do universo do discurso de cada variável de entrada e de saída, obtida estatisticamente pelo cálculo dos valores: mínimo, primeiro quartil, segundo quartil, terceiro quartil e máximo dos dados experimentais se mostrou adequada à modelagem proposta;
- a implicação entre o antecedente e o conseqüente do conjunto de regras criado de forma intuitiva, e não exigindo grandes conhecimentos do comportamento das variáveis, produziu boas respostas do controlador fuzzy;
- o modelo polinomial, que ajustou valores da potência obtidos pelo SLF, reproduziu de forma satisfatória os resultados experimentais com base em informações dispersas, sem a necessidade da tradicional modelagem matemática de um sistema de transferência de calor e massa;
- não houve diferença significativa entre as potências médias obtidas experimentalmente e aquelas obtidas utilizando o SLF.

REFERÊNCIAS

CANEPPELE, Fernando de Lima; SERAPHIM, Odivaldo José. Aplicação da Teoria Fuzzy no Controle de Sistemas de Geração de Energias Alternativas. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 24-41, 2010.

CRAMESCO, Camila Pires; GABRIEL FILHO, Luís Roberto Almeida; CATANEO, Angelo. Metodologia de Determinação de Funções de Pertinência de Controladores Fuzzy Para a Avaliação Energética de Empresas de Avicultura de Postura. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 21-39, 2010.

MANZINI, Luiz Gonzaga; TEIXEIRA, Nelson Miguel. Utilização da Lógica Fuzzy para o Enquadramento Tarifário de Energia Elétrica em Agroindústria. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 63-80, 2006.

MARTIN, S. **Gaseificador da biomassa para aquecimento de ar para a secagem de produtos agrícolas**. 2005, 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 2005.

PANDAROFI, Héilton; et al. Uso da lógica fuzzy na caracterização do ambiente produtivo para matrizes gestantes. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, V.27, n.1, p. 83-92, jan/abr. 2007.

PEREIRA, D. F. et al. Sistema de Controle Fuzzy para a estimativa do bem-estar de matrizes pesadas. **Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, SP, v.28, n.4, p.624-634, out./dez. 2008.

PONCIANO, P.F. et al. Análise do ambiente para frangos por meio da Lógica Fuzzy: uma revisão. **Archivos de Zootecnia**, Cordoba Ar, v. 60, n. , p.1-13, 2011.

SANTOS, William R. **Controle e avaliação de um conjunto gaseificador-combustor de fluxo concorrente, utilizando como combustível a biomassa de lenha de eucalipto**. 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, MG.

SCHIASSI, Leonardo et al. Metodologia Fuzzy aplicada à avaliação do aumento da temperatura corporal em frangos de corte. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 16, n. 2, p. 180-191, abr. 2008.

ZANATTA, F. L. **Gaseificador de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, MG.

ZADEH, Lotfi A. Is there a need for fuzzy logic? **Information Sciences**, Elsevier, n. 178, p. 2751-2779, 25 fev. 2008.