
ESTRATÉGIA PARA COMPENSAÇÃO DE ERROS DE AÇÃO DE CONTROLE EM UMA VÁLVULA INDUSTRIAL UTILIZANDO INFERÊNCIA FUZZY

Gláucia Bressan (UTFPR) E-mail: galbressan@gmail.com
Guilherme Mosaner da Silva (UTFPR) E-mail: gui_mosaner@hotmail.com
Wagner Endo (UTFPR) E-mail: wendo@utfpr.edu.br

Resumo: O objetivo principal deste trabalho é o estudo e aplicação de uma estratégia unificada de classificação automática em uma malha de controle de vazão, com uma válvula pneumática industrial como elemento final de controle. Neste contexto, este trabalho propõe o estudo do método de classificação *fuzzy* e sua aplicação nessa válvula. São utilizadas como variáveis de entrada a vazão, a porcentagem de abertura da válvula e o tempo de abertura da válvula. A saída do sistema desenvolvido é compensado diretamente na ação de controle na temperatura do líquido de um sistema de aquecimento. Por fim, os resultados descrevem a atuação do sistema desenvolvido em um processo de uma planta industrial real didática, onde se emulam todas as características de um processo industrial real, pois todos os testes foram realizados em uma válvula do tipo globo, com atuador pneumático e posicionador com sensor de efeito Hall.

Palavras-chave: válvulas de controle, classificação automática, lógica *fuzzy*, planta industrial, processo de aquecimento.

STRATEGY FOR COMPENSATION OF CONTROL ACTION ERRORS IN AN INDUSTRIAL VALVE USING FUZZY INFERENCE

Abstract: This work aims to present a study and application of a unified strategy of automatic classification in a flow control loop. This system has an industrial pneumatic valve as the final control element. In this context, this work proposes to apply the fuzzy classification method to improve the features of the valve. Flow and percentage of valve opening are used as input variables. The output is directly compensated on the liquid temperature of the heating system. Finally, the results describe the performance of the system in a real process on a didactic industrial plant. Therefore, all the characteristics of a real industrial process are emulated. The tests are applied in a globe valve with pneumatic actuator and positioner based on Hall effect sensor.

Keywords: control valves, automatic classification, fuzzy logic, industrial plant, heating process

1. Introdução

O controle automático de processos se mostra importante para diferentes campos da engenharia ou ciência, já que está presente em sistemas robóticos, sistemas de manufatura modernos e em sistemas industriais que envolvem controle de variáveis como temperatura, vazão, pressão, entre outros (OGATA, 2000). A principal função desse controle é regular o comportamento das variáveis de interesse em um sistema ou uma planta, onde estes normalmente possuem uma ou mais entradas (Wolovich, 1994). Controlar uma grandeza ou variável, é o ato de alterar seu valor de acordo com uma intenção ou até que se encontre no ponto de operação desejado (CASTRUCCI, BITTAR e SALES, 2011). Atualmente, novas estratégias de controle buscam estudá-las com modelos adaptativos, onde são necessários se conhecer os erros da ação de controle advindos das medições e instrumentos do processo (ÅSTRÖM e WITTENMARK, 2008).

No presente trabalho, é analisado um sistema emulado, a partir de instrumentos industriais reais, de processo de aquecimento de líquidos. Este processo possui como elemento final de controle uma válvula do tipo globo com atuador pneumático e um posicionador com sensor de efeito hall. Este sistema de automação industrial faz parte dos equipamentos do Laboratório de Automação e Instrumentação, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio. A planta emula processos de uma planta industrial real em escala reduzida; seu sistema de controle possui um controlador *Profibus-PA* e um controlador lógico programável (CLP).

O processo de aquecimento ocorre em um tanque, sendo a válvula responsável pelo ajuste da vazão de entrada de líquido no mesmo. O sistema é aquecido por um conjunto de resistências de imersão, controlado com um conversor estático que regula sua respectiva potência elétrica a partir de um sinal proporcional de ação de controle. Esse aquecimento responde de acordo com as flutuações da vazão de entrada. A vazão é medida por um transmissor de pressão diferencial com placas de orifício.

Este sistema funciona com a válvula atuando de forma antecipativa, para que o sistema de aquecimento regule a sua potência elétrica, de acordo com uma temperatura desejada. Ainda faz parte desta planta industrial um sistema em que ocorre a mistura entre este fluido aquecido proveniente do tanque de aquecimento e um fluido frio do reservatório geral.

Dada a relevância do controle de vazão em um sistema automatizado, é importante destacar que em um sistema industrial, a válvula é composta por diferentes elementos: o corpo, o atuador pneumático e o posicionador da abertura e fechamento da válvula, realimentando o atuador pneumático (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2006).

Em sistemas mais elementares e didáticos, todo o aparato em torno da válvula é considerado ideal, desprezando-se erros de medição, histerese e até de medição do sensor do posicionador, por exemplo. Por outro lado, em um sistema industrial real isso não pode ser desprezado, uma vez que erros podem gerar grandes perdas e falhas de controle em um sistema de funcionamento, praticamente, permanente.

Desta forma, este trabalho busca a aplicação no ambiente industrial. Nesse caso, é necessária uma estratégia simples e robusta que implica na compensação de erros, sem se modelá-los explicitamente, utilizando as características dos modelos de inferência *fuzzy*. Ao generalizar a compensação desses erros, este trabalho pode ser aplicado a diferentes tipos e modelos de válvulas de controle.

Observa-se que qualquer problema ou erros de medida na malha de vazão afetam as demais variáveis de todos os outros processos da planta industrial. Por exemplo, no processo de resfriamento que depende de um valor mais constante possível de água aquecida para seu correto funcionamento. Conforme Silva, Endo e Lisbôa (2011), identificou-se que a propagação destes problemas ou erros geram distúrbios e diminuem o desempenho do sistema de controle.

Existe no processo de aquecimento em estudo um controlador PID que regula o aquecimento deste tanque. O PID por ser um dos mais utilizados na indústria possui bom desempenho (WOLOVICH, 1994). No entanto, ele desconsidera os possíveis erros de medição e controle advindos da malha de vazão. Tornando-se necessário alguma nova abordagem para se compensar esses erros.

Sendo assim, a partir do estudo do método de classificação *fuzzy* (KLIR e YUAN, 1995) e sua aplicação no controle da válvula de vazão da planta industrial mencionada anteriormente, são utilizadas como variáveis de entrada: a vazão medida pelo

transmissor, a porcentagem de abertura da válvula e o tempo de abertura da válvula. O sistema de classificação deve fazer uso de sistemas híbridos *neurofuzzy* (JANG, 1993; JANG, SUN e MIZUTANI, 2012) - os quais utilizam redes neurais e lógica *fuzzy* - para o ajuste dos parâmetros das funções de pertinência. O principal objetivo é atuar em um processo de aquecimento, buscando uma compensação robusta de erros no controle de uma válvula em um processo industrial.

O MatLab (*Matrix Laboratory*) é utilizado para coletar os dados diretamente da planta industrial. Esta proposta é uma alternativa às técnicas tradicionais de controle, como o PID (proporcional, integral e derivativo), pois alguns problemas práticos da válvula, como o atraso e a histerese gerada pelo posicionador, podem ser compensadas ou melhoradas pelo controle *fuzzy*, posicionando a válvula de forma mais eficiente, por meio de variáveis linguísticas, e compensando assim os seus erros de posicionamento.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada a metodologia com os estudos das ferramentas computacionais e instrumentação física dos processos industriais, na Seção 3 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da estratégia de compensação de erros na ação de controle da válvula da malha de vazão do sistema de aquecimento. Na Seção 4, as considerações e sugestões para futuros trabalhos provenientes deste artigo.

2. Procedimentos Metodológicos

Nesta seção, são descritos os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, compreendendo os sistemas de classificação *fuzzy* e os sistemas *neurofuzzy*. Também é descrita a planta industrial didática e suas características, para aplicação dos conceitos e controle da válvula de vazão.

2.1 Sistemas fuzzy

O Sistema de Inferência *Fuzzy* é uma estrutura computacional popular baseada nos conceitos de teoria de conjuntos *fuzzy*, regras *fuzzy* e raciocínio *fuzzy* (SIMÕES e SHAWN, 2007). O mecanismo de inferência *fuzzy* consiste em quatro estágios: *fuzzificação*, base de regras, inferência e *defuzzificação*, como ilustra a Figura 1.

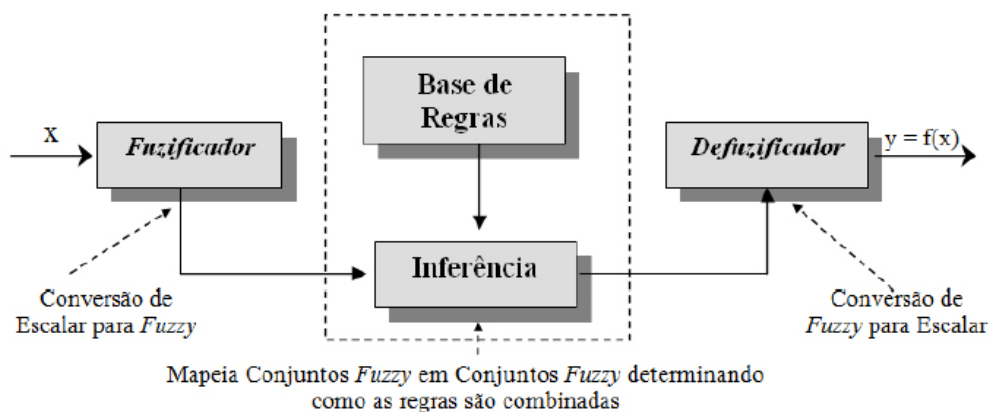


Figura 1 – Diagrama de um modelo de inferência par aplicação de uma inferência *fuzzy* a partir de uma base de regras pré-determinadas através de regras linguísticas (SIMÕES e SHAWN, 2007)

De forma geral, as variáveis de entrada de um sistema *fuzzy* adotam valores numéricos

contínuos. Assim, é necessária a conversão dos valores discretos em valores *fuzzy* pré-definidos para cada variável, uma vez que regras *fuzzy* são capazes somente de relacionar conjuntos *fuzzy* (KLIR e YUAN, 1995). A interface de *fuzzyficação* captura os valores das variáveis de entrada (valores discretos), transformando números em conjuntos *fuzzy*, de modo que possam se tornar variáveis linguísticas (CHU, LIU E WANG, 2013).

Na segunda etapa, ocorre o desenvolvimento da base de regras do tipo, “Se <antecedente> Então <consequente>”, que demonstram as relações de entrada e saída. Também são definidas as chamadas funções pertinência, as quais indicam o grau de equivalência de um elemento a um determinado conjunto *fuzzy*. Logo em seguida, na etapa de inferência, os dados subjetivos (variáveis linguísticas) previamente definidas na base de regras são avaliados matematicamente, empregando as regras de inferência da lógica *fuzzy*. A última etapa, *defuzzificação*, é um processo de transformação do valor agregado de saída em um único valor discreto que representa um compromisso entre os diferentes valores *fuzzy* contidos na saída do controlador (JANG, SUN e MIZUTANI, 2012).

2.2 Sistemas neurofuzzy

O sistema de classificação proposto deve fazer uso de sistemas híbridos *neurofuzzy* (JANG, SUN e MIZUTANI, 2012) para o ajuste dos parâmetros das funções de pertinência. Nesses sistemas, são incorporadas as técnicas de aprendizado automático de redes neurais artificiais com a capacidade de representação próxima ao raciocínio humano oferecido por sistemas *fuzzy*. Ou seja, há uma fase de treinamento supervisionado, no qual são apresentados os dados em pares entrada/saída e como resultado há um modelo linguístico da representação do conhecimento extraído dos dados na forma de um sistema de inferência *fuzzy* (PEDRYCZ e GOMIDE, 1998).

Devido à esta natureza híbrida, sistemas neurofuzzy herdam as características de redes neurais e sistemas de inferência *fuzzy*, ou seja, além do aprendizado automático a partir de dados que fornece conhecimento implícito, as regras podem ser inseridas no sistema de inferência a partir do conhecimento explícito fornecido por um especialista. As regras geradas a partir dos dados também podem ser otimizadas utilizando o conhecimento do especialista (PEDRYCZ e GOMIDE, 1998).

Uma das principais motivações para o uso de sistemas *neurofuzzy* é fornecer um mecanismo formal para transformar experiência (dados) e conhecimento de especialistas humanos em uma representação do conhecimento de maneira explícita na forma de um sistema de inferência *fuzzy* (JANG, SUN e MIZUTANI, 2012).

2.3 Estudo do sistema da válvula de controle

A descrição detalhada de um elemento final de controle, como a válvula, é necessária para que se conheça os elementos de cada parte a ser controlada, conforme modelo apresentado na Figura 2. No entanto, do ponto de vista prático, a sua modelagem completa, pode ser inviável em um ambiente imediato e intenso como a indústria. Encontrar um sistema que atenda essas características de desempenho e robustez pode ser aplicado a partir desse sistema *fuzzy*, desenvolvido neste trabalho.

O principal problema abordado neste trabalho é o erro de histerese proveniente do modelo do atuador e posicionador que para seu controle possui um controlador PI interno para controle da posição de abertura/fechamento da válvula de controle. Pois, o corpo da válvula do tipo globo tem modelo linear.

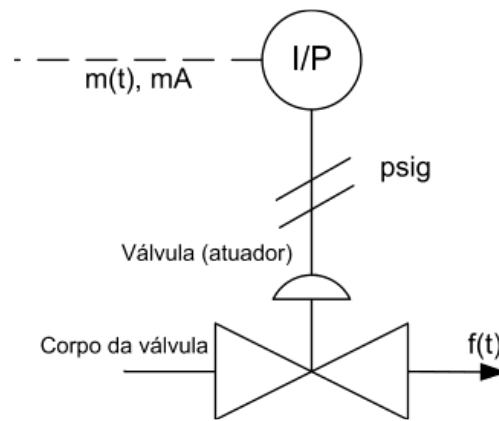


Figura 2 – Simbologia funcional da válvula de controle com atuador pneumático. O corpo da válvula de controle é indicado com simbologia geral, no entanto em diferentes aplicações industriais é necessário levar-se em consideração o modelo de resposta do corpo válvula.

Essa característica de histerese pode variar de acordo com as características de dimensionamento da válvula, como: capacidade de válvula (C_v), característica de abertura da válvula, diâmetro da tubulação, resposta do posicionador PI (proporcional e integral), circuito pneumático de acionamento, dentre outras.

Uma válvula de controle pode ter diferentes curvas de resposta, como é apresentado na Figura 3. Em sua maioria, as válvulas de controle funcionam entre o regime linear e o de igual percentagem, o qual pode ser variado o tempo de resposta de acordo com o valor de α , já as de abertura rápida são utilizadas para segurança e proteção (SMITH e CORRIPIO, 1997). A equação (1) descreve os diferentes comportamentos de válvulas industriais

$$C_v(vp) = C_{v,máx} \cdot \alpha^{vp-1} \quad (1)$$

em que o fator de capacidade ou coeficiente de fluxo, C_v , são valores obtidos, geralmente, em galões por minuto de água que flui através de uma válvula com elevação de 1 psi (*pound per square inch*) à montante, vp é a posição da válvula em percentagem de abertura e α o fator de abertura. Para uma válvula de igual abertura, propriamente dita, $\alpha = 50\%$.

No entanto, entre uma resposta ideal aos modelos válvulas, como apresentado na Figura 3, outros erros ocorrem no seu funcionamento, como é o caso da histerese e regiões de não linearidade do controle da válvula, conforme mostrado na Figura 4.

Assim, a importância desse estudo sobre o modelo de funcionamento das válvulas é necessário, pois características reais intrínsecas do sistema ocorrem em grande parte de sistemas reais de controle. Na indústria, essas características se não levadas em consideração podem diminuir em muito o desempenho esperado do sistema (SMITH e CORRIPIO, 1997).

2.4 Descrição técnica da planta industrial de ensaios reais

Neste trabalho, todas as análises foram desenvolvidas em torno da planta didática do fabricante brasileiro, SMAR, que reproduz processos industriais para fins didáticos e é munida de equipamentos e ferramentas iguais aos usados em processos industriais, permitindo simular experimentos muito s de situações reais.

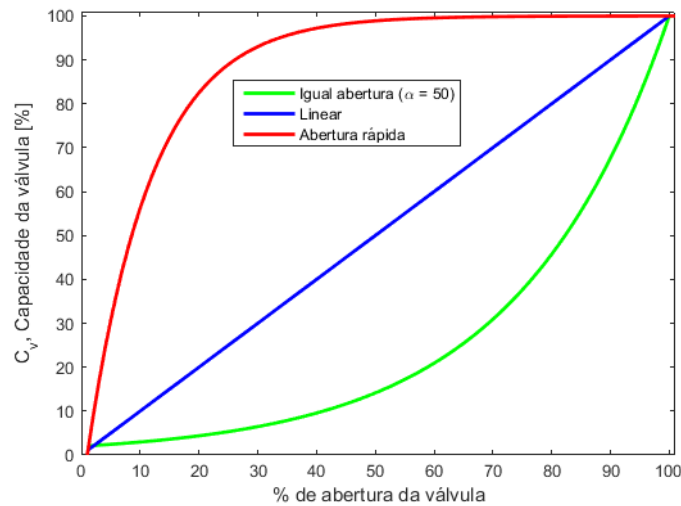


Figura 3 – Curvas de resposta de uma válvula de controle de acordo com a relação de abertura e a capacidade da válvula (medida em quantidade e volume por tempo) sujeito a uma que de determinada pressão. Diversos fabricantes de válvulas fornecem Cv, em gpm (galões por minuto) com queda de 1psi (SMITH e CORRUIPIO, 1997).

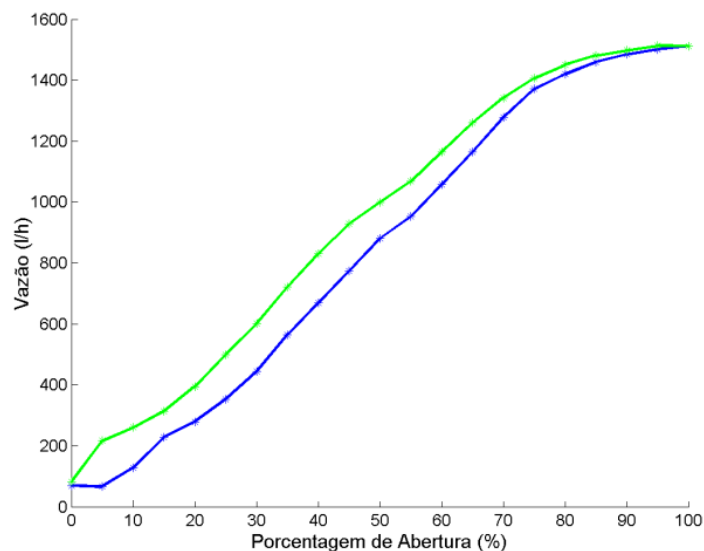


Figura 4 – Comportamento dinâmico de abertura e fechamento da válvula com atuador pneumático. Observa-se uma predominância linear, no entanto, destacam-se regiões que não há característica linear (SILVA, ENDO e LISBOA, 2011).

Vários processos industriais podem ser emulados neste sistema de ensaios. Essa planta didática foi adquirida no ano de 2009, pela UTFPR, *Campus* Cornélio Procópio, quando ocorreu o REUNI (Programa de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais) e está localizada no Laboratório de Automação e Instrumentação, desta universidade, a imagem da Figura 5 apresenta o imagem da planta utilizada no estudo e desenvolvimento deste trabalho.



Figura 5 – Imagem real da planta didática industrial – possui todos os instrumentos de controle destinados à aplicação industrial – somente os processos são emulados – aquecimento e mistura – em escala reduzida

O primeiro processo que ocorre na planta é o de aquecimento, em que ocorre a medição da quantidade de água fria que está entrando no sistema, essa vazão é medida pelo FIT (transmissor e indicador de vazão), que manda um sinal para o controlador indicando se será necessário aumentar a temperatura ou não, com base no *setpoint* de referência.

Nesse sistema, observa-se a ação de um controlador por antecipação e por realimentação e com isso, é permitida a atuação do controle em variações da vazão de água fria (abertura e fechamento da válvula) e variação de temperatura do tanque de aquecimento. A ação do controlador se dá por uma relação entre a demanda de entrada da água fria e a temperatura que é medida no tanque de aquecimento (SILVA, ENDO e LISBOA, 2011).

No processo de mistura, a água quente fornecida pelo tanque de aquecimento é misturada com água fria do reservatório. O controle mantém a temperatura no tanque de mistura, fazendo a correção frente às variações da temperatura da água. A saída do controle de temperatura do tanque de mistura servirá de *setpoint* para a malha de vazão de água fria, e quando for verificada uma temperatura diferente da esperada, irá ocorrer a ação da válvula de água fria, aumentando ou diminuindo sua vazão (SILVA, ENDO e LISBOA, 2011).

A aquisição de dados dos equipamentos é feita por meio do sistema supervisor *ProcessView* integrado ao *SYSTEM302*, além disso ele possui uma interface gráfica que mostra as informações presentes na malha de controle, como ilustra a Figura 6. A utilização do software *MatLab* como cliente OPC (*Open Platform Communications*), originalmente denominado *OLE (Object linking and embedding) for Process Control*, permite a coleta de dados do processo através de uma interface de aquisição de dados.

Tendo em vista que a malha de aquecimento da planta industrial é um sistema de primeira ordem, é possível determinar uma função de transferência que rege seu comportamento. Esse tipo de função nos permite simular de maneira muito fiel o comportamento de um sistema, de forma relativamente simples, que pode ser conferido em (NISE, 2002).

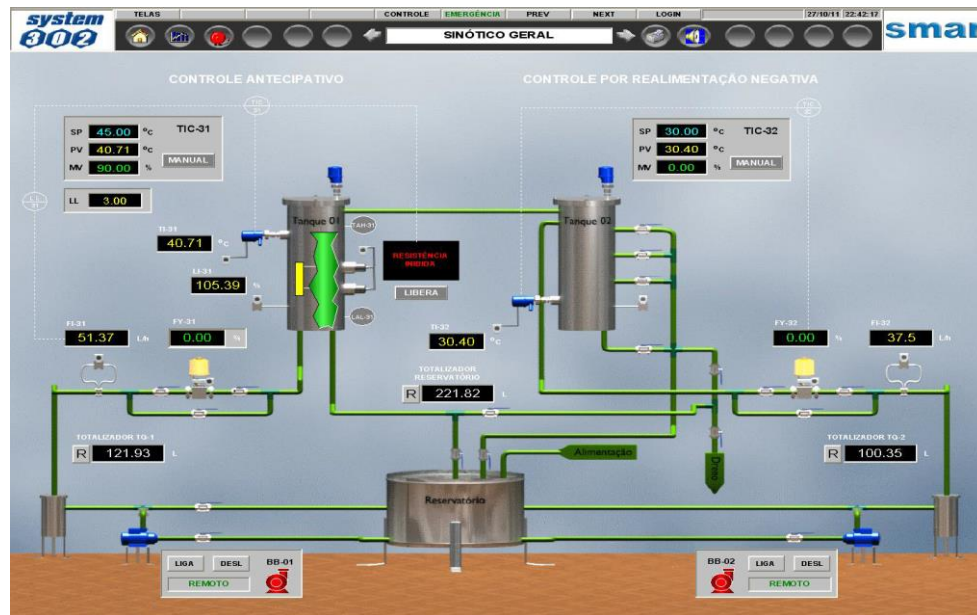


Figura 6 – Tela de visualização *online* do sistema supervisório

A partir de uma coleta de dados reais do sistema de aquecimento obteve a característica de resposta, apresentada na Figura 7. A função de transferência foi obtida a partir destes dados de uma resposta temporal. Para a identificação do modelo (AGUIRRE, 2007) utilizou uma heurística para se caracterizar a função de transferência, $G(s)$, da resposta do sistema que foi utilizada como referência e normalizada, conforme descrita na equação (2).

$$G(s) = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{s + 3 \cdot 10^{-3}} \quad (2)$$

4. Resultados

Nesta seção, um exemplo de aplicação dos conceitos estudados é desenvolvido com o objetivo de classificar a temperatura do tanque de aquecimento. A partir de variáveis de entrada como vazão e abertura da válvula, é possível classificar a temperatura do tanque de aquecimento (saída do sistema). As variáveis de entrada foram coletadas diretamente na planta e a variável de saída é obtida por meio da equação (2). Foram coletadas 750 linhas de dados numéricos, os quais foram divididos em conjunto de treinamento – utilizando 80% dos dados – e conjunto de teste – 20% dos dados. Tanto as variáveis de entrada (abertura da válvula, vazão e tempo de abertura) quanto a de saída (temperatura) são discretizadas em cinco classes linguísticas: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. De acordo com as combinações das entradas, seriam geradas vinte e cinco regras do tipo “se-então”, porém, algumas combinações das variáveis de entrada não são cabíveis na prática e essas regras são podadas. Por esse motivo, são geradas 45 regras linguísticas, como nos exemplos a seguir:

“Se Abertura é alta E Vazão é muito alta E Tempo é muito baixo ENTÃO Temperatura é baixa.”

“Se Abertura é baixa E Vazão é baixa E Tempo é médio ENTÃO Temperatura é alta.”

Os parâmetros de entrada das funções pertinência são obtidos por meio de treinamento supervisionado de dados, aplicando o sistema neurofuzzy (JANG, SUN e MIZUTANI, 2012).

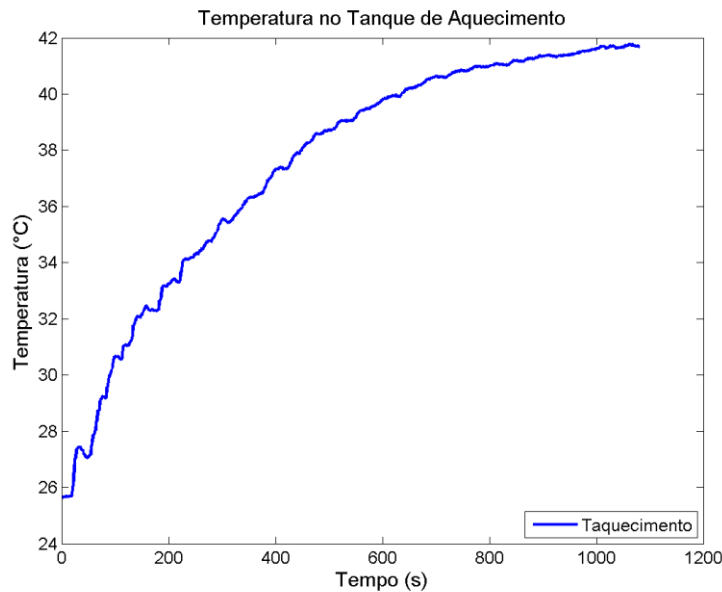


Figura 7 – Resposta de aquecimento do tanque em malha aberta de acordo com uma vazão de *setpoint* determinada. A resposta de aquecimento é relacionada pela inferência *fuzzy* com as outras variáveis do processo

O tipo de função escolhido para este exemplo foi a triangular, pois é o formato de onda mais indicado para se usar com variáveis que possuem picos, como vazão e temperatura. Os parâmetros das funções de pertinência obtidos são inseridos no sistema de classificação *fuzzy*, que trabalham com o sistema de inferência do tipo Mamdani, cujas saídas são conjuntos *fuzzy*.

A Tabela 1 exhibe os parâmetros das funções de pertinência de entrada, obtidos pelo treinamento do sistema neurofuzzy, e de saída, construída com base na temperatura do tanque de aquecimento da planta. Sendo, FCV, a válvula de controle de uma malha de vazão, FIT, o indicador e transmissor de vazão, TIT, o transmissor e indicador de temperatura e Tempo, o tempo de abertura da válvula.

Foi observado que a válvula possui comportamentos específicos em determinados períodos de tempo, ou seja, quando sua abertura é alterada, estes comportamentos afetam a saída de forma negativa, aumentando ainda mais o erro de leitura final, tendo em vista este problema, foi adotada a estratégia de introduzir a variável tempo para minimizar o fator erro na saída do sistema. As Figuras 8, 9 e 10 apresentam o comportamento das funções de pertinência de entradas, geradas por estes parâmetros, e a Figura 11 apresenta o comportamento da função de saída. A estratégia de compensação do erro ocorre vinculando as ações da *fuzzy*ificação/*defuzzy*ificação das entradas com a ação na variável de processo controlada.

Após o treinamento dos parâmetros e da construção do classificador *fuzzy*, o conjunto de teste foi aplicado para calcular o índice de acerto do sistema de classificação *fuzzy*. O modelo de classificação obteve uma taxa de acerto de 98%, mostrando-se um sistema robusto e aplicável a dados reais. O processo de aquecimento da planta industrial está sujeito à diversos fatores externos, como entrada de ar nas tubulações e troca de calor dos equipamentos, que acabam causando uma grande variação em seus valores de temperatura.

Tabela 1 – Determinação dos parâmetros das funções de pertinência com característica triangular – são apresentados os valores tríplexes para cada função vinculada às variáveis linguísticas

	MB	B	M	A	MA
FCV	-0.25	-0.002	0.237	0.498	0.726
	0.002	0.263	0.496	0.732	1.003
	0.279	0.500	0.787	1	1.25
FIT	-0.195	0.004	0.297	0.519	0.772
	0.046	0.289	0.527	0.76	0.999
	0.293	0.552	0.767	1.001	1.239
Tempo	-0.25	0	0.25	0.5	0.75
	-0.0026	0.25	0.5	0.75	1
	0.247	0.5	0.75	1	1.25
TIT	-0.25	0	0.2	0.5	0.65
	0	0.25	0.5	0.75	1
	0.25	0.65	0.8	1	1.75

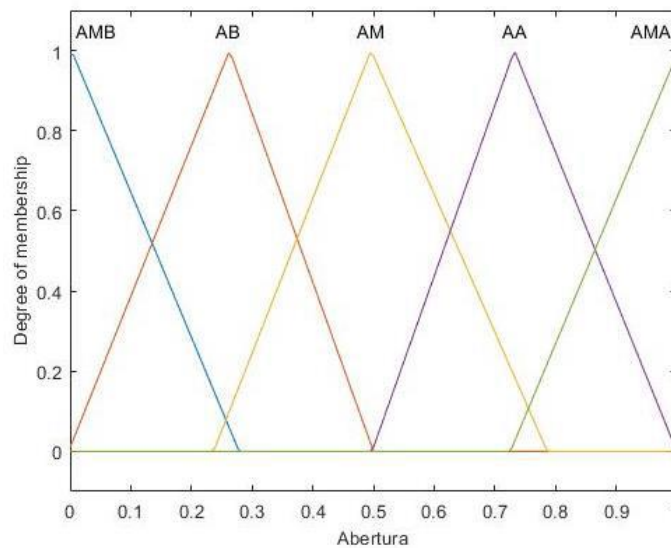


Figura 8 - Funções de pertinência de entrada – discretização dos valores de abertura da válvula de controle da vazão de entrada– FCV.

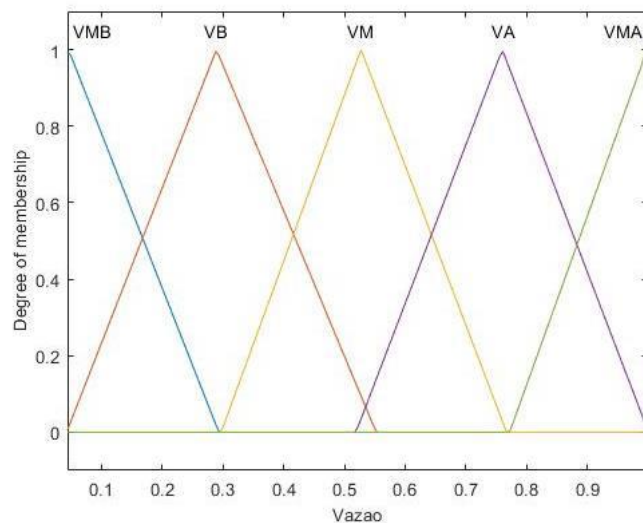


Figura 9 - Funções de pertinência de entrada – discretização dos valores do FIT – transmissor e indicador de vazão

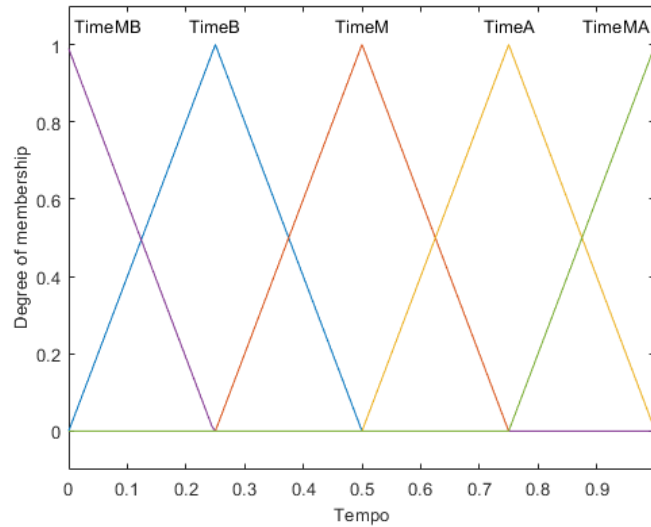


Figura 10 – Funções de pertinência de entrada - Tempo de abertura da válvula de vazão

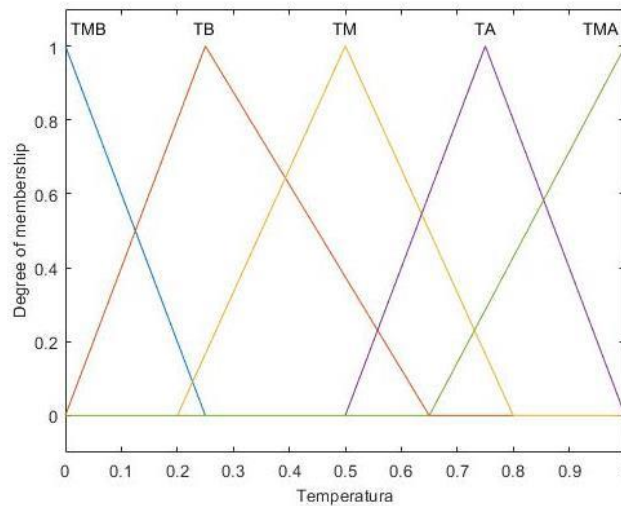


Figura 11 - Função de pertinência de saída do sistema fuzzy – a estratégia de compensação do erro ocorre vinculando as ações da fuzzyficação das entradas com a ação na variável de processo controlada.

Em busca de amenizar estes problemas, os dados de temperatura, que são a saída do sistema, foram gerados a partir da função de transferência do tanque de aquecimento, dada pela equação (2), logo os dados de saída obtidos são valores consideráveis, tendo em vista, que a proposta busca melhorar sistemas reais de controle de válvulas industriais.

4. Conclusão

A lógica fuzzy é uma importante ferramenta para solucionar problemas que possuem variáveis que podem ser discretizadas em classes (intervalos linguísticos) com sobreposições entre suas fronteiras, possibilitando que apresentem graus de pertinência entre as classes. A utilização de sistemas fuzzy vem crescendo cada vez mais no cenário tecnológico, com as mais diversas representações de problemas, incluindo produtos típicos comerciais como geladeiras, ar condicionado e câmera fotográfica e produtos industriais como veículo autoguiado, robô móvel e controle de trafego urbano.

Neste trabalho, foi apresentado um estudo sobre classificação de temperatura de uma planta industrial didática. O estudo foi aplicado mais especificamente na malha de aquecimento da planta. Pode-se concluir que os sistemas fuzzy e neurofuzzy foram bem aplicáveis para a compensação de erros de controle para o sistema de aquecimento da planta industrial real, com processo emulado. No entanto, é importante destacar que isso ocorre visto que as variáveis de entrada e de saída permitem sobreposições entre classes linguísticas. O comportamento do sistema foi feito por meio de entradas, abertura da válvula e as medidas coletadas de vazão, por um FIT, permitindo inferir-se sobre a ação direta de controle da temperatura do tanque de aquecimento, classificada como muito baixa, baixa, média, alta ou muito alta.

Como perspectivas de continuidade do trabalho, será desenvolvida no sistema de ensaios um controle fuzzy, um PID (proporcional, integral e derivativo) e outras técnicas que compensem com robustez e simplicidade os erros advindos dos sinais de controle de todo o aparato de uma válvula industrial real. Assim, novas abordagens serão comparadas, com o intuito de determinar qual a estratégia mais viável ao ambiente industrial para diferentes topologias de controle e para cada situação da planta nos processos reais.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas*. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- ÅSTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B. *Adaptive Control*. 2.ed. Mineola: Dover, 2008.
- BALBINOT, A. & BRUSAMARELLO, V. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CASTRUCCI, P.; BITTAR, A. & SALES, R. M. *Controle automático*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- CHU, Q.; LIU, T.; & WANG, Y. *Research on Excitation Controller Based on the Adaptive Fuzzy PID Technique*. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT HUMAN-MACHINE SYSTEMS CYBERNETICS, 5, 2013. Hangzhou, **Anais...** Hangzhou,: IEEE, v.1, p. 297 - 300, 2013.
- JANG, J. S. R. *Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 23, n. 3, p. 665-685, 1993.
- JANG, J. S.; SUN, C. T. & MIZUTANI, E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing - a computational approach to learning and machine intelligence*. PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.
- KLIR, G. J & YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: theory and applications*. Prentice Hall, Binghamton, New York, 1995.
- MATHWORKS, C. *Fuzzy Logic Toolbox TM User's Guide R 2015 a*. Natick: Mathworks, 2015.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2002.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- PEDRYCZ, E. & GOMIDE, F. *An introduction to fuzzy sets: analysis and design*. MIT Press, 1998.
- SMITH, C. A. & CORRIPIO, A. B. *Principles and Practices of Automatic Process Control*. Wiley, 1997.
- SILVA, L. R. B.; ENDO, W. & LISBÔA, A. R. B. S. *Expectativas da utilização de uma planta didática industrial como objeto de aprendizagem em um curso de graduação em engenharia*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 39., 2011, Blumenau. **Anais...** Blumenau. ABENGE, 2011.
- SIMÕES, M. G. & SHAW, I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. Edgard Blucher, 2ª. ed. São Paulo, 2007.
- WOLOVICH, W. A. *Automatic control systems: basic analysis and design*. Fort Worth: Saunders College Publishing, 1994.