CONTROLE DE PLANTA DIDÁTICA UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Buno Laprince Feitosa Duarte[1], Diogo Rodrigues Pelles[1], Ivan Vilela[1],

Departamento de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, DF,
email: eng.duarte.bruno@gmail.com ; diogopelles@gmail.com e ivanvilela@gmail.com

Resumo

O controle de uma planta didática SMAR System 302, que utiliza o protocolo Foundation FieldBus, é uma forma recorrente de testar métodos a serem aplicados em plantas industriais de forma a não impactar na produção das indústrias.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema supervisório desenvolvido na ferramenta do software Matlab - OPC Tool, utilizado como método de controle da temperatura em um tanque a lógica Fuzzy. Para validar a metodologia e o algoritmo, houveram experimentos em situações onde a temperatura definida pelo usuário era superior a temperatura da água no reservatório é inferior a temperatura da água no tanque de aquecimento, até a convergência da temperatura.

Palavras chave: Automação Industrial; Redes Industriais; Sistemas Supervisórios, Lógica Fuzzy; Foundation Fieldbus, OPC.

Abstract

A didatic Smar System 302 plant control system, that uses Foundation FieldBus protocol, is a recurrent way of testing methods in industrial plants without impact in actual industry production.

This paper presents the development of a supervisory system created via Matlab and OPC tools, using a fuzzy logic controller aplied in a water heating tank. To validate the algoritm, experiments were made in different situations where the set point chosen by the user was above and below the water in the tank, so that the the actual temperature would converge to said set point.

Keywords: Industrial Automation; Industrial Networks; Supervisory Systems, Fuzzy Logic; Foundation Fieldbus, OPC.

1. Introdução

O presente artigo demonstra o desenvolvimento de um sistema supervisório utilizando o método de controle com lógica Nebulosa (ou Lógica Difusa - "Fuzzy Logic"), para a planta didática SMAR SYSTEM302. A planta consiste em um reservatório de água, dois tanques, sendo o Tanque 01 para aquecimento do líquido e o Tanque 02 para de mistura, onde a água aquecida é misturada com a água oriunda do reservatório que é alimentada por um registro da CAESB, e, teoricamente, a temperatura ambiente.

O controle da temperatura do tanque de mistura (Tanque 02) utilizando o método de controle Fuzzy foi desenvolvido através da ferramenta computacional MatLab, e devidamente implementado. Na maioria das lógicas clássicas as declarações de suas variáveis se dão por meio de verdadeiro (V) ou falso (F) e quando se utiliza a lógica nebulosa a sua utilização é um pouco mais ampla, sendo que a lógica é baseada na teoria dos conjuntos nebulosos, que podem ser interpretadas como uma variável linguística, ou seja, uma variável cujos valores são palavras ou sentenças ao invés de serem somente números, se utiliza de valores de pertinência intermediários entre os valores de verdade e falso da lógica clássica.

Segundo a revisão bibliográfica, a utilização da lógica Fuzzy tem sido recorrente quando se busca reduzir o consumo de energia em plantas industriais.

A proposta deste trabalho é apresentar um controle avançado de temperatura do Tanque de Mistura permitindo desta forma que as variáveis do sistema possam ser visualizadas e modificadas pelo software através das regras de inferência nebulosa aplicadas na base de conhecimento, regras de produção Se <antecedente> então <conseqüência> garantindo que a temperatura desejada no "Setpoint" seja uma resposta determinística para cada variável de saída do sistema de processo com a utilização software Matlab - OPC Tool.

É representado associando-se cada elemento ao seu grau de pertinência a fórmula do conjunto nebuloso discreto abaixo.

$$A = \mu_A^1 / x_1 + \mu_A^2 / x_2 + \cdots + \mu_A^n / x_n = \sum_{i=1,n} \mu_A^i / x_i$$

A avaliação da variação do consumo energético no processo de aquecimento da água a na atuação das válvulas não pode ser verificado no presente trabalho, mas fica de sugestão para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Este trabalho utiliza lógica Nebulosa (lógica difusa - "Fuzzy Logic") para sistema de controle supervisório, desta maneira é apresentado abaixo alguns trabalhos que serviram de revisão bibliográfica para o presente trabalho.

É sugerido um modelo de supervisão utilizando lógica Fuzzy para um sistema de geração de energia híbrido, este modelo é composto por um grupo gerador diesel, um gerador eólico e um banco de baterias. O objetivo é fazer o gerador diesel trabalhar o menos possível para economizar combustível; o banco de baterias atua quando o gerador eólico não consegue suprir a demanda de energia por um curto intervalo de tempo, onde não é viável utilizar o gerador diesel, conseguindo uma eficiência maior no uso do gerador eólico. (FERNANDES, 2005).

Yamakawa (2007) propõe um sistema de controle Fuzzy para banco de capacitores automático, aplicado nos alimentadores de distribuição de energia elétrica com o intuito de minimizar o número de chaveamento do banco de capacitores sem alterar os níveis de tensão do alimentador, bem como melhorar o desempenho do equipamento, resultando em uma maior correção dos reativos.

O trabalho de Fernandes Júnior et al. (2005) consiste na sintonia de parâmetros de controladores PID, para controlar o nível de um sistema de tanques acoplados. Na obtenção dos parâmetros foi utilizado métodos como Sensibilidade Limite e Método da Curva de Reação; o diferencial deste trabalho foi à utilização de sistema Fuzzy para alterar os parâmetros dos controladores PID conforme a mudança no ponto de operação do sistema de tanques, resultando em menores overshoot e menor tempo de estabilização.

O trabalho de Arriaga-De-Valle e Dieck-Assad (2006) discute e compara o controle clássico PID aplicado a um sistema de caldeira para geração de
vapor, com um sistema Fuzzy supervisório gerando set-points para o controle clássico. O sistema supervisório proporcionou uma economia de combustível de 2,5 a 6,5 %, dependendo da carga de vapor.

Segundo Shaw e Simões (2004), variáveis isoladas do processo são controladas por PID, enquanto o controle supervisório é feito por operadores humanos. Existem sistemas supervisórios comerciais, como por exemplo, Elipse que implementa uma lógica clássica própria. A lógica Fuzzy pode fornecer uma solução eficiente para esse problema, pelos quais controladores supevisórios multivariáveis Fuzzy são projetados com base na experiência (conhecimento heurístico) dos operadores em vez de se utilizar modelos matemáticos complexos, assim torna-se muito eficiente o controle supervisório Fuzzy nos pontos de operação dos controladores PID.

O trabalho Wang e colaboradores (WANG, et al. 2012) utiliza um controlador Fuzzy-PID para elevadores. Com o objetivo de reduzir o grande consumo de energia, este trabalho apresenta um novo sistema de controle que pode transformar a energia que vem do motor a trabalhar no estado gerador à rede elétrica. Esse sistema de controle se faz necessário porque o controle PI convencional não pode funcionar de forma eficiente no controle da variável tempo e objetos não lineares.

3.1 Fundamentos de Sistema Fuzzy

3.1.2 Conceitos Iniciais

Foi desenvolvida por um polonês chamado, Jan Lukasiewcz a primeira noção da lógica nomeada como conceitos "vagos" introduzindo conjuntos com graus de pertinência sendo 0, ½ e 1, que com o passar dos anos essa técnica foi se evoluindo passando para números infinitos de valores entre 0 e 1. Em meados de 1965 a lógica "Fuzzy" recebeu este nome, seu autor Lotfi Asker Zadeh (ZAH-da), ele criou a lógica "fuzzy" combinando os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, definindo graus de pertinência.

Na teoria clássica, os conjuntos são denominados "crisp" um dado elemento do universo em discurso (domínio) pertence ou não pertence ao referido conjunto, agora quando falamos da teoria dos conjuntos "fuzzy" existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto. A lógica Fuzzy começa com o conceito de um conjunto Fuzzy, (ZADEH, 1992) para entender este princípio é importante conhecer a definição de um conjunto clássico. Um conjunto clássico inclui totalmente um elemento em um determinado grupo ou o exclui totalmente deste grupo. Por exemplo, o conjunto dos números pares são todos os números divisíveis por dois, e exclui-se desse conjunto todos os números que não são divisíveis por dois.

Lógica "Fuzzy" é uma técnica de Inteligência artificial, disciplina que procura maneiras de máquinas simularem o raciocínio humano na solução de problemas diversos. Esta abordagem procura mimetizar a forma humana atuar. (CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2002).

Um sistema baseado na "lógica fuzzy" pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes, Fuzzificador, Regras, ou base de conhecimento, Inferência, ou lógica de tomada de decisões e Defuzzificador.

Neste trabalho o primeiro passo foi realizar o mapeamento das entradas em conjuntos fuzzy, variáveis linguísticas, à princípio foi utilizado um programa já elaborado por um dos alunos e em cima deste foi possível verificar os mapeamentos, valores linguísticos de entrada de saída. As chamados de Inferência é possível realizar o uso das regras caracterizando os objetivos do controlador e sua estratégia a ser usada. Quando realizamos a defuzzificação este processo mapeia os valores linguísticos em valores numéricos de saída realizando uma interface de defuzzificação obtendo os valores para ser usado em uma condição real.

Um sistema de controle Fuzzy representa o conhecimento de um especialista do processo, por meio de dois conceitos, um de variável linguística (termos primários, universo de discurso) e pelo conjunto de regras nebulosas (base de conhecimentos), nas quais as condições são dadas a partir de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de entrada e saída do processo. (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

Desta forma enquanto na lógica clássica a verdade corresponde a um, e a não verdade corresponde ao zero, em lógica Fuzzy pode-se ter valores entre zero e um para o grau de pertinência em um determinado conjunto Fuzzy.

Em sistemas Fuzzy a curva que define como cada ponto no espaço de entrada é mapeado para um valor de pertinência (ou grau de pertinência) entre zero e um, é chamada de função de pertinência. O espaço de entrada é muitas vezes referido como universo de discurso (PASSINO; YOURKOVICH, 1997).

Uma variável linguística tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos linguísticos, Ou seja, palavras ou frases. Assim, ao invés de assumir instâncias numéricas. Uma variável linguística assume instâncias linguísticas. Neste caso a variável linguística temperatura poderá assumir como valor um dos membros do conjunto {Muito baixa; Baixa; Alta}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se cada um destes a um conjunto Fuzzy limitado por meio de uma função de pertinência sobre um universo de discurso comum.(GOMIDE; GUDWIN, 1994).

4. Metodologia

O controle de uma planta didática SMAR System 302 (Figura 3.1), que utiliza coprocessador lógico do sistema DFI302, através de sinótico desenvolvido na plataforma Matlab e com comunicação através de OPC.

O sistema de controle do supervisório foi desenvolvido em lógica FUZZY, utilizando regras estabelecidas de temperaturas para a água do tanque de mistura (Tanque 02), abertura e fechamento da válvula proporcional (FY-32), controle de vazão.

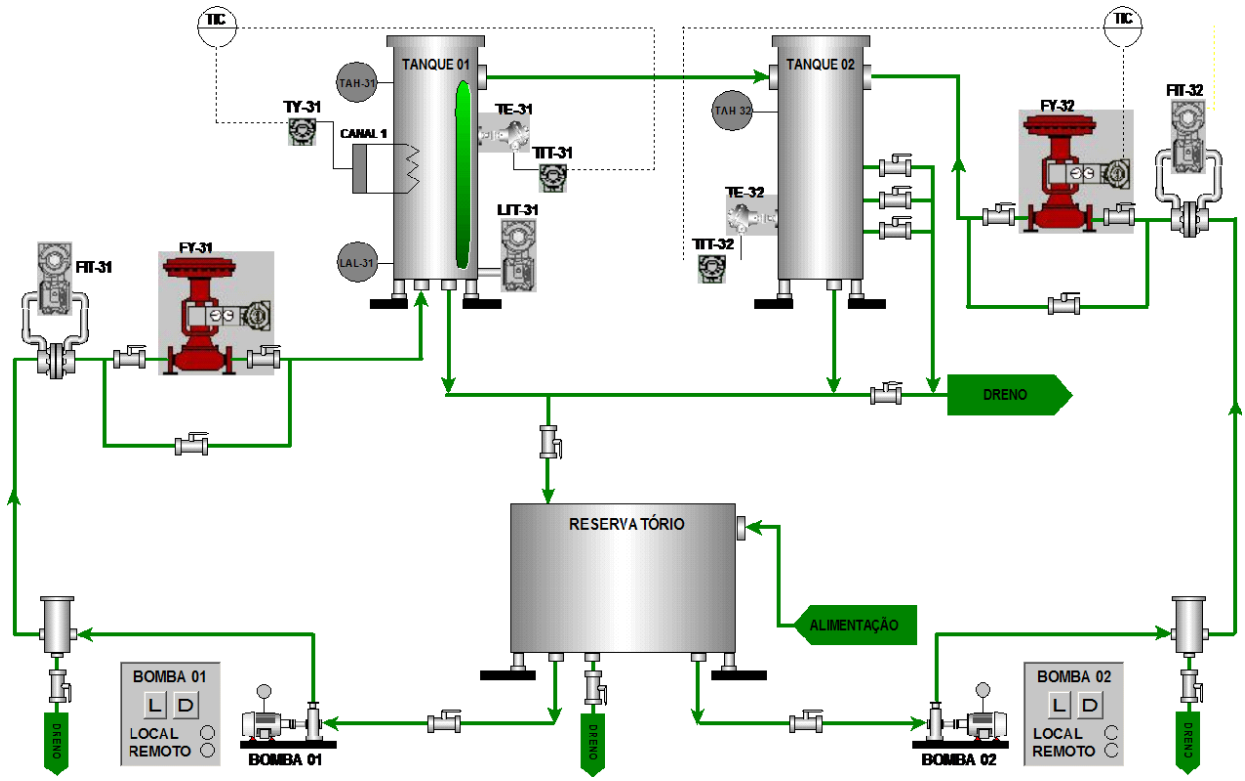


Figura 3.0 Desenho esquemático da planta didática SMAR.

O Sinótico desenvolvido no presente trabalho é representado na sua versão final (ver Figura 3.1) e na sua plataforma (Figura 3.2).

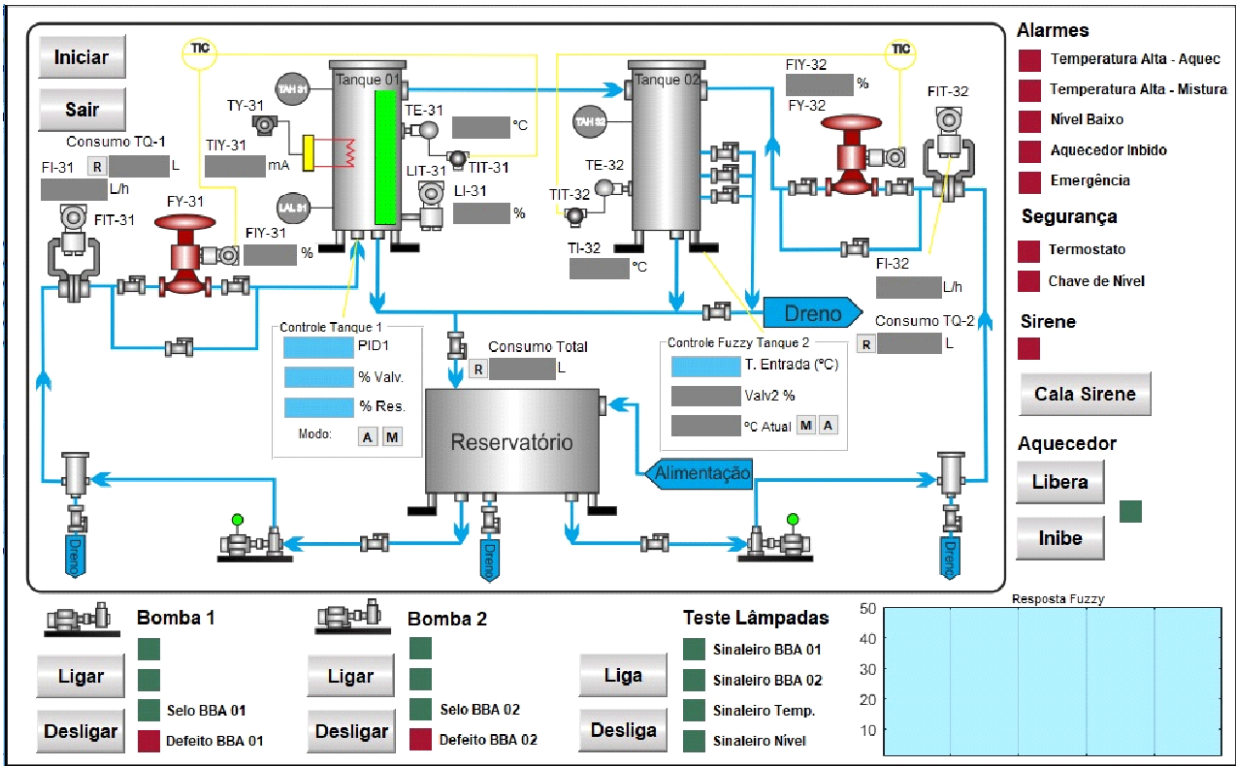


Figura 3.1 Sinótico desenvolvido para a supervisão da planta didática SMAR.

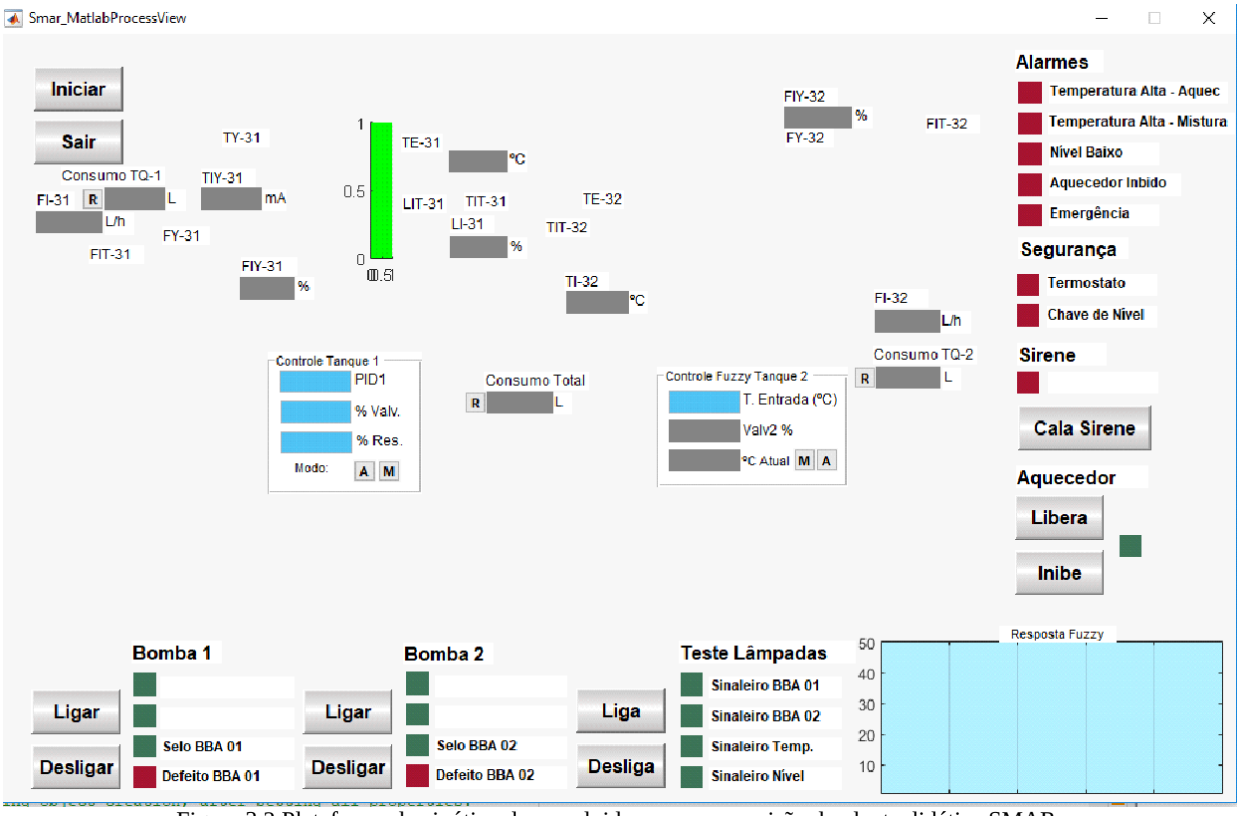


Figura 3.2 Plataforma do sinótico desenvolvido para a supervisão da planta didática SMAR.

No canto inferior direito da tela é apresentado o visor da “Resposta Fuzzy”, onde a comportamento da lógica é apresentado de forma gráfica, demonstrando se o sistema está operando de forma adequada, buscando a convergência da temperatura da água no Tanque de Mistura (Tanque 02) com a temperatura estabelecida pelo usuário “Setpoint” da planta didática. Vale ressaltar que por ter várias interferências o comportamento do Tanque de Mistura poderá sofrer alterações quanto a temperatura desejada.

Haverá uma regra para cada um dos sistemas dados:

- Regra 1
  - **Se** Temperatura Morna (M1) e Temperatura Quente (Q1);
  - **Então** Válvula fecha “X” %;

- Regra 2
  - **Se** Temperatura Morna (M1) e Temperatura Quente (Q2);
  - **Então** Válvula Abre “X” %;

- Regra 3
  - **Se** Temperatura Morna (M1) e Temperatura Quente (Q3);
  - **Então** Válvula Abre “X” %;

.
.
.

- Regra x
  - **Se** Temperatura X (xx) e Temperatura XX (xxx);
  - **Então** Válvula Abre ou Fecha “X” %;

As regras definidas no presente trabalho se utilizou da janela Rule Editor: SimplesFuzzy2 para gerar as regras e para a definição da lógica Fuzzy que são apresentados na Figura 3.3.

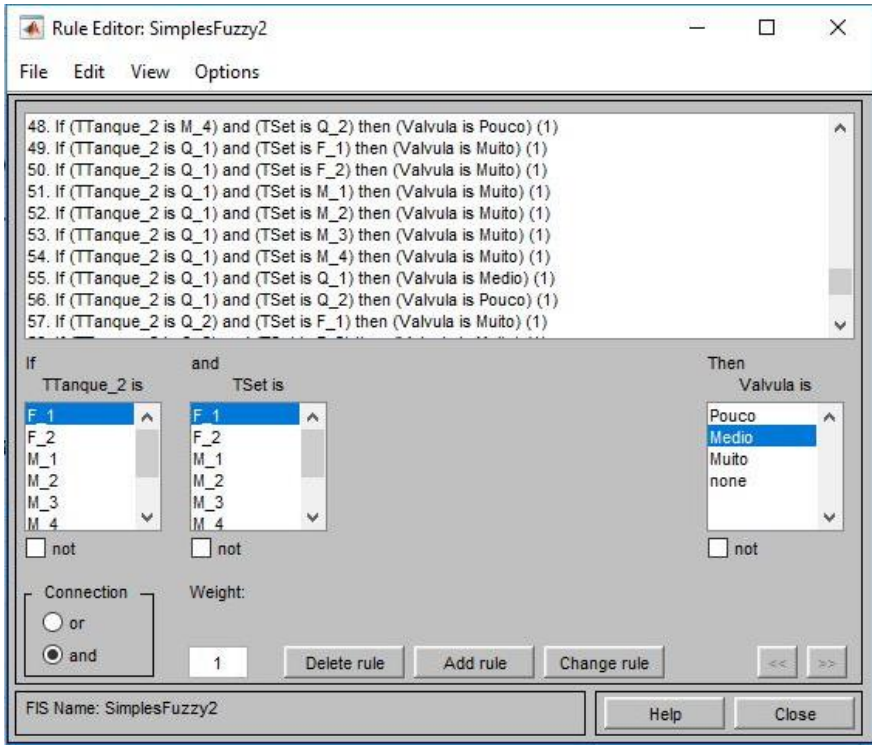


Tabela 3.3: Rule Editor SimplesFuzzy2 controle de temperatura no Tanque de Mistura

A tabela 3.4 apresenta a discretização de uma das regras estabelecidas no presente trabalho, logicamente não estão inseridas todos, de forma a exemplificar a metodologia utilizada.

1. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Médio) (1);
2. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);
3. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Médio) (1);
4. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);
5. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Médio) (1);
6. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Médio) (1);
7. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Médio) (1);
8. If (TTanque_2 is F_1) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);
9. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Médio) (1);
10. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);

---

11. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
12. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
13. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
14. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
15. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
16. If (TTanque_2 is F_2) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
17. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
18. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
19. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Médio) (1);
20. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
21. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
22. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
23. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
24. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
25. If (TTanque_2 is M_1) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
26. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
27. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
28. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);
29. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
30. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
31. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
32. If (TTanque_2 is M_2) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
33. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
34. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
35. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
36. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);

37. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Médio) (1);
38. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Pouco) (1)
39. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Pouco) (1)
40. If (TTanque_2 is M_3) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1)
41. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Muito) (1)
42. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
43. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
44. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
45. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Muito) (1);
46. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Muito) (1);
47. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
48. If (TTanque_2 is M_4) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Pouco) (1);
49. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
50. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
51. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
52. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
53. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Muito) (1);
54. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Muito) (1);
55. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Médio) (1);
56. If (TTanque_2 is Q_1) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);
57. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is F_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
58. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is F_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
59. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is M_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
60. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is M_2) Then (Valvula_is_Muito) (1);
61. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is M_3) Then (Valvula_is_Muito) (1);
62. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is M_4) Then (Valvula_is_Muito) (1);
63. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is Q_1) Then (Valvula_is_Muito) (1);
64. If (TTanque_2 is Q_2) and (TSet is Q_2) Then (Valvula_is_Médio) (1);

Tabela 3.4: Regras estabelecidas para a lógica Fuzzy de controle de temperatura no Tanque de Mistura

Após a modelagem no Membership Function Editor: SimplesFuzzy2 foi possível verificar as inferência de cada regra, ver Figura 3.5 e 3.6.

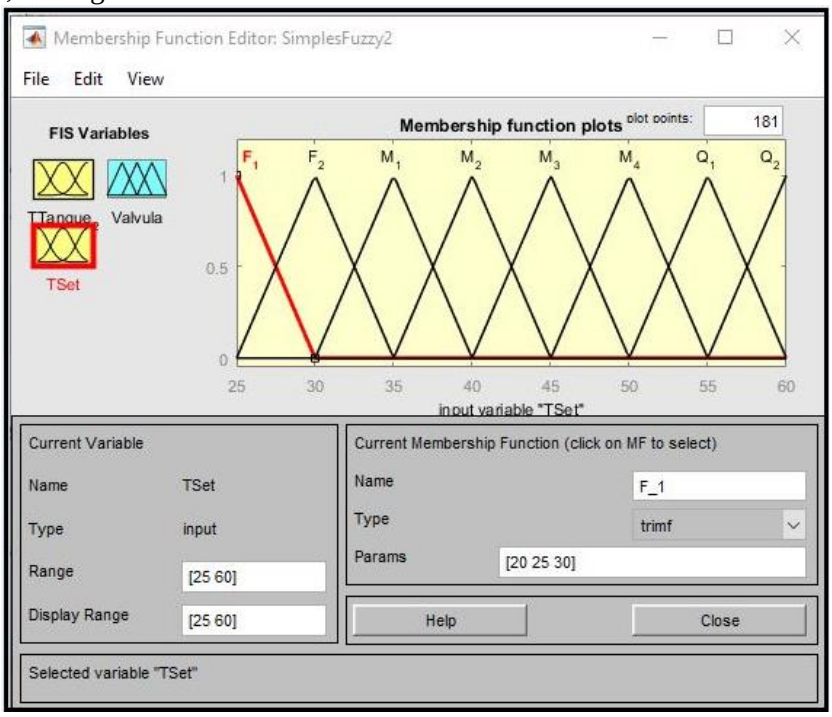


Figura 3.5: Regras de inferência - TSet.

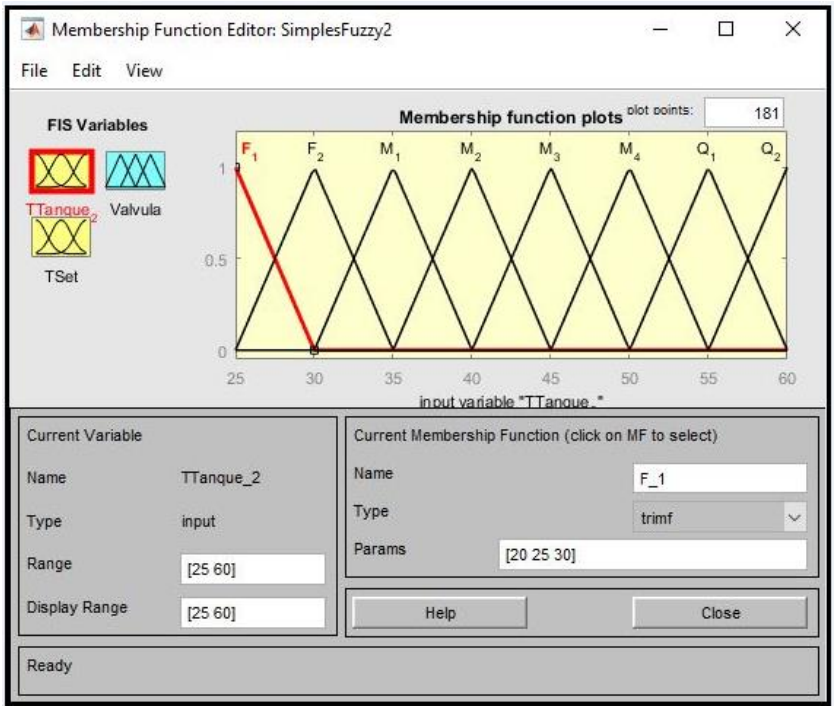


Figura 3.6: Regras de inferência - TTanque.

Na Figura 3.7 e 3.8 é possível verificar as respostas mediante as alterações inseridas do “Input” da Janela Rule Viewer: SimplesFuzzy2, bem com o gráfico.

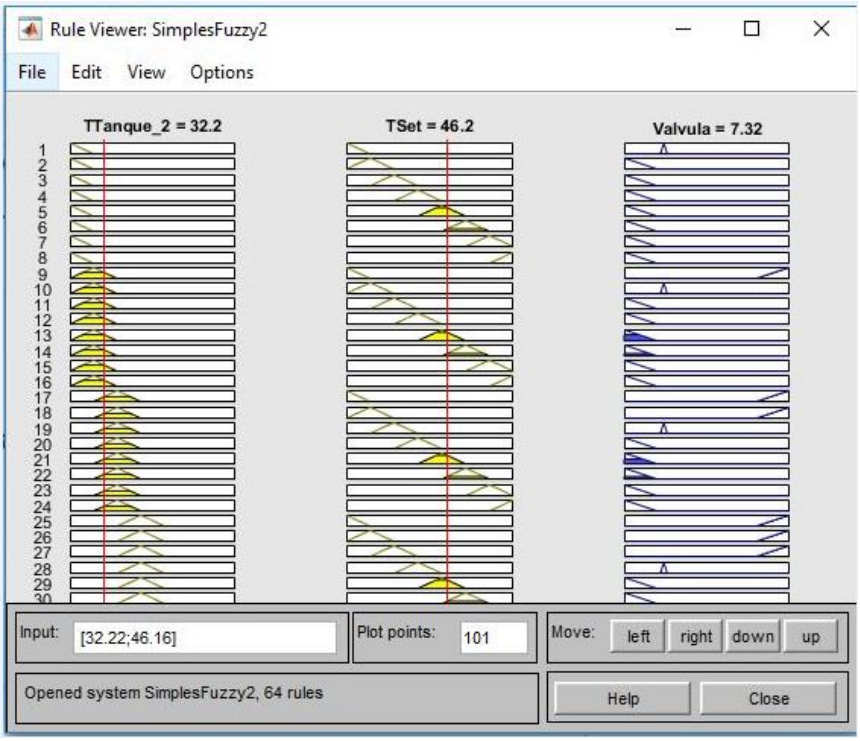


Figura 3.7 Tela gráfica do Matlab com as regras estabelecidas para a lógica Fuzzy.

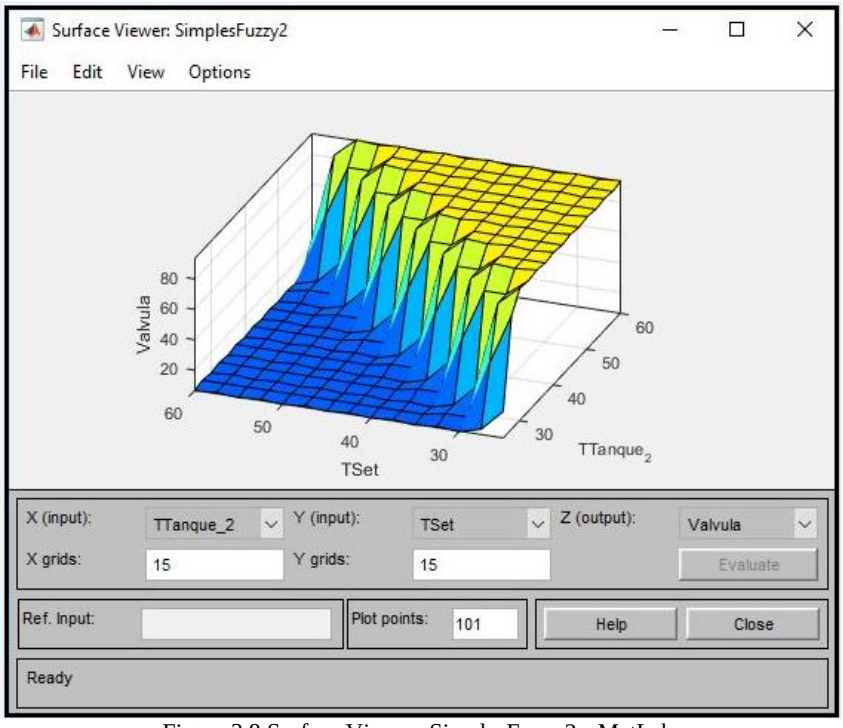


Figura 3.8 Surface Viewer: SimplesFuzzy2 - MatLab.

5. Resultados

O algoritmo desenvolvido em MatLab utilizou um servidor OPC (“OLE Process Control”), onde OLE (Object Linking and Embedding”) para comunicação com a planta didática SMAR. A flexibilidade de configuração dos dispositivos desta planta permite a criação de outras malhas de controle, permitindo assim um melhor aproveitamento e integração da planta didática que nestes trabalho foi utilizado protocolo de comunicação Foundation FieldBus. Os resultados para os experimentos na planta didática, simulando as condições de controle de temperatura de um fluido em uma planta industrial são apresentados à seguir:

5.1 Temperatura do Tanque de Mistura Superior a do Reservatório.

O software de supervisão - ProcessView atuou no controle do processo da planta permitindo a aquisição de dados, alarmes, análises demonstrando que o reservatório da água mais fria circule no tanque de mistura através da bomba que é acionada todas as vezes que as regras são validadas fazendo com que haja mistura da água quente já existente no tanque de mistura, vinda do tanque de aquecimento, de uma forma controlada, através da válvula FY-302, localizada na entrada do tanque.

A temperatura foi subindo de forma gradual, até convergir a temperatura estabelecida pelo usuário. Os resultados são apresentados na Figura 3.8. e 3.9.

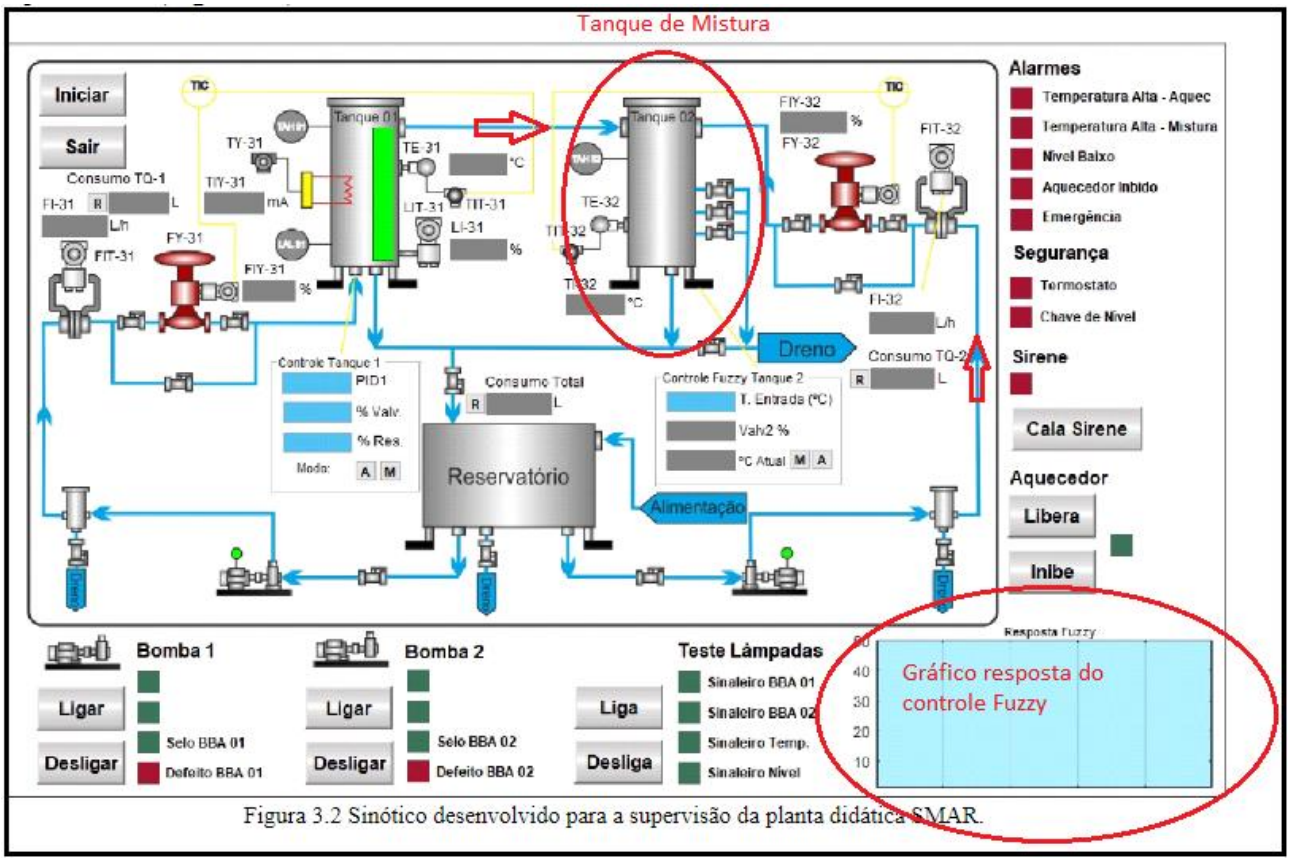


Figura 3.9 – Resultados obtidos para Desenho esquemático da planta didática SMAR.

Observado os resultados:

A resposta do controle *fuzzy* após a escolha dos valores para “Setpoint” foram de 35ºC e 40ºC como é demonstrada nas figura 4.0 e figura 4.1. Sendo que na Figura 4.0 o Tanque de Mistura já apresentava uma temperatura bem acima da definida no “Setpoint” fazendo com que a resposta da abertura da válvula fosse variando até convergir com que a temperatura desejada.

Entretanto na figura 4.1 o Tanque de Mistura apresentava uma temperatura baixa entre 25ºC e 30ºC e a resposta da válvula foi exatamente o contrário da figura 4.1, visto que a válvula deveria modular até chegar na temperatura do “Setpoint” e em alguns instantes de intervalos 580 à 900 houve variação na mesma para manter a temperatura aos 40ºC.

O controle poderá ser aperfeiçado em trabalhos futuros.

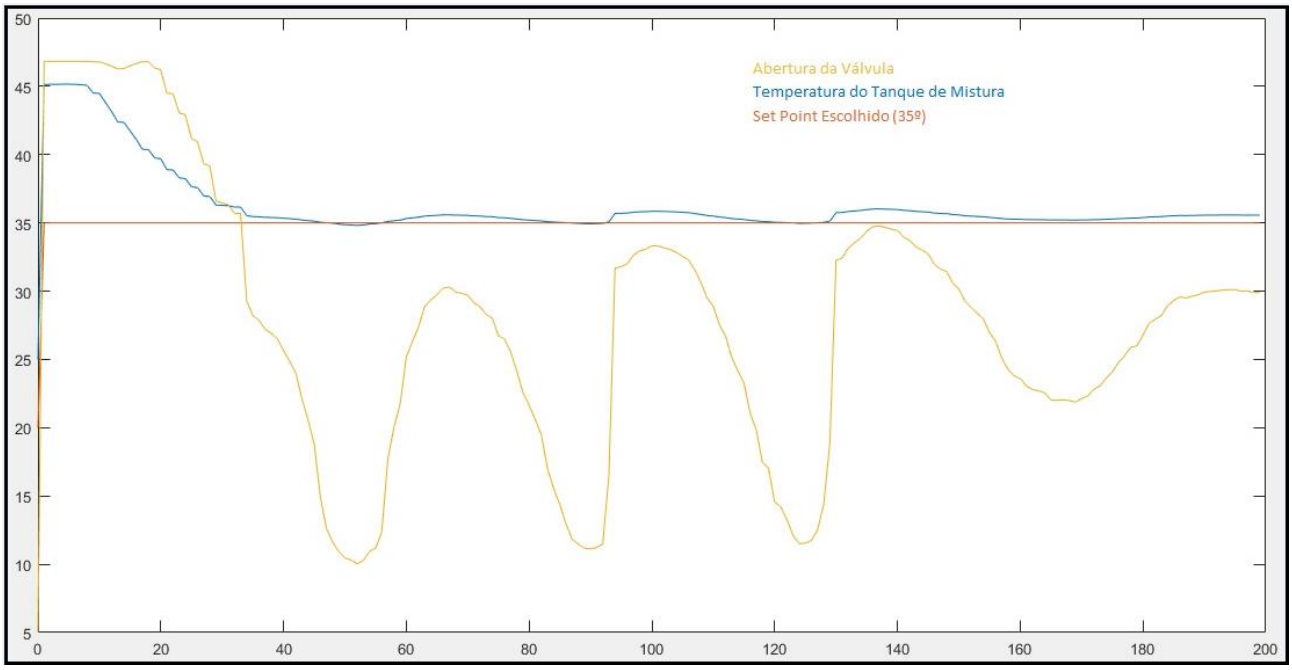


Figura 4.0 – Resposta do Controle Fuzzy em relação ao Setpoint definido de 35ºC.

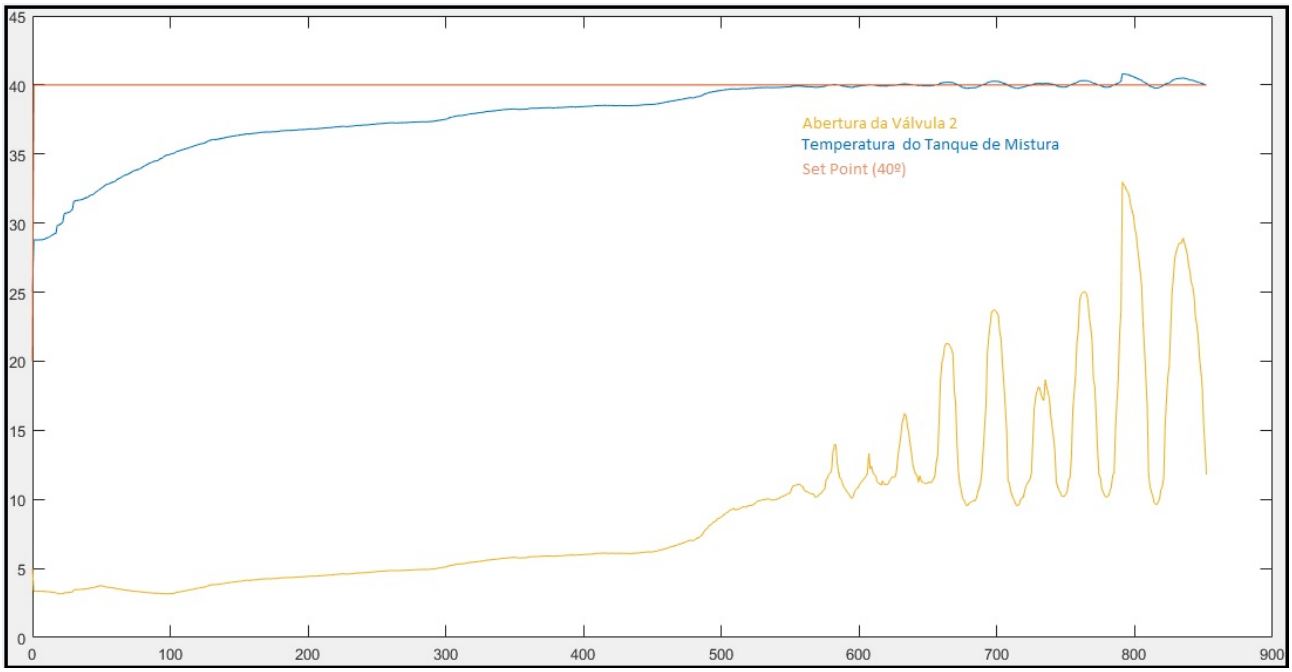


Figura 4.1 – Resposta do Controle Fuzzy em relação ao Setpoint definido de 40ºC.

6. Conclusões

O presente artigo alcançou o objetivo traçado de supervisionar uma planta didática SMAR SYSTEM302 utilizando como método de controle um algoritmo desenvolvido em Software MatLab utilizando a lógica Fuzzy.

A temperatura do tanque de mistura (tanque 02) foi controlado após a definição da temperatura pelo usuário "Setpoint", através do uso do sinótico e a temperatura convergiu para o valor desejado.

Entretanto, a lógica *fuzzy* funcionou bem depois de várias tentativas de erro que estavam ocorrendo devido às variáveis de entrada de temperatura do tanque 1, pois as respostas do controle fuzzy ficavam cada vez mais difícil de se aplicar as regras para o controle do Tanque 2, quando retiramos estas variáveis de entrada e estipularmos as mesmas entre os valores de temperatura de 40 - 50 ºC e válvula 1 entre 10 e 15% só assim, tivemos uma resposta satisfatória no Controle *Fuzzy* Tanque 2. Sabendo que esses valores de entrada podem mudar, consequentemente poderá ocorrer uma demora significativas nas respostas até

alcançar os resultados desejados.

Como citado anteriormente, recomendamos o estudo futuro do consumo energético da planta utilizando diferentes lógicas de controle, para validar, ou não, os resultados obtidos pela bibliografia na redução do consumo energético em plantas industriais.

7. Referências Bibliográficas:

ARRIAGA-DE-VALLE, Enrique; DIECK-ASSAD, Graciano. Modeling and Simulation of a Fuzzy Supervisory Controller for an Industrial Boiler. 2006. Disponivel em:

< ttp://sim.sagepub.com/content/82/12/841.short>. Acesso em: 03 nov. 2014

ASTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. Adaptative control. 2nd. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing, 1995.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. Sistemas de controle modernos. 2001

FABRO, João Alberto. Uma abordagem neuro-nebulosa de controle preditivo aplicada a processos multi-estágios. 2003. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003.

FERNANDES, Rafael Tramontini. Supervisão de um sistema híbrido eólico/diesel usando lógica Fuzzy. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2005.

FERNANDES JÚNIOR, Francisco Guerra. et al. Implementação de controladores PID utilizando lógica Fuzzy e instrumentação industrial. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Luis, 7, set. 2005. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/artigos/2005/sbai2005_03.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2013.

GOMIDE, Fernando Antonio Campos; GUDWIN, Ricardo Ribeiro. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. SBA Controle & Automação. Campinas, v.4, n.3, p. 97-115, set/out. 1994.

GOMIDE, Fernando Antonio Campos; PEDRYCZ, Witold. An Introdution to Fuzzy Sets: Analysis and Design. 2. ed. Massachusetts: Bradford, 2006.

MAHER, M. Modélisation et elaboration d'algorithms d'estimation et de commande: application à um bioprocédé. 1995. Tese - Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, Toulouse, 1995.

MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Version 2.2.9. United States of America: MathWorks, 2009. SOFTWARE.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies,1975.

MENDONÇA, Marcio. Uma contribuição ao desenvolvimento de sistemas inteligentes utilizando redes cognitivas dinâmicas. 2011. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PASSINO, M. K.; YOURKOVICH, S. Fuzzy control. Menlo Park: Addison-Wesley, 1997.

SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy. Controle e modelagem Fuzzy. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2004.

WANG Rui; LUO Fei; HUANG Xiaohong; LI Peng, New elevator energy feedback control system design based on fuzzy PID controller, Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE , Sept. 2012.

YAMAKAWA, Eduardo Kazumi. Sistema de controle nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

YESIL, Engin. et al. Self-Tuning PI Controller via Fuzzy Cognitive Maps. 2011. Disponivel em: <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-41142-7_57>. Acesso em: 03 nov. 2014.

ZADEH, L. A. An introduction to Fuzzy logic applications in intelligent systems. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1992.

ELAC2008, Inteligência Artificial Escola de Verão 2008, Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - LAC em: <http://www.lac.inpe.br/~demisio/download/ia_elac07/ia-lac6.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2017.

Ronald, Seget, Sistema de Comunicação OPC para uma coluna de Destilação Piloto em:

<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos08/326_Sistema%20de%20Comunicacao%20OPC%20para%20uma%20Coluna%20de%20Destilacao%20Piloto.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2017.