



08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

CONTROLE FUZZY EMBARCADO EM ARDUINO: UM ESTUDO DE CASO PARA UMA PLANTA DE NÍVEL

André Cruz Ribeiro¹ – andreacruzrb@gmail.com

Arthur Martins Almeida¹ - a_martinsa@yahoo.com.br

Marlon José do Carmo² – marloncarmo@ieee.org

¹ Engenharia de Controle e Automação, CEFET-MG – Leopoldina, MG, Brazil

² Departamento de Eletroeletrônica, CEFET-MG - Leopoldina, MG, Brazil

Resumo. *O trabalho apresenta o projeto de um controlador Fuzzy Mandani embarcado em uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Mega para uma malha de nível. É contemplado com a construção de um protótipo com dois reservatórios de água interligados, buscando o controle de nível no reservatório superior. Em um primeiro momento foi projetado um controlador PID Digital de Isermann abrangendo a modelagem matemática da planta e a sintonia do controlador. Posteriormente foi coletado os resultados com esse controlador para fins comparativos. Adiante, o trabalho contempla a construção completa de um controlador Fuzzy Mandani integrando a elaboração de todos os seus blocos funcionais. Ambos os controladores foram expostos a duas faixas distintas de operações da planta e foi realizado um comparativo, onde o controlador Fuzzy apresentou resultados satisfatórios e superiores ao PID. O trabalho acolhe todos os passos da construção da planta e do projeto dos controladores apresentando os problemas encontrados assim como suas respectivas soluções.*

Palavras-chave: *Lógica Fuzzy, Arduino, Planta de Nível, Controle de Processos.*

1. INTRODUÇÃO

As linhas de produção industrial estão emergindo tecnologicamente em taxas cada vez maiores. A globalização cria uma competitividade entre essas linhas exigindo delas soluções eficientes. Desta maneira, as indústrias buscam produtividade em suas linhas de montagem anulando os desperdícios e elevando a qualidade dos produtos finais. O resultado dessa busca é um destaque frente aos seus concorrentes em um mercado tão disputado. Nesse cenário, a automação se apresenta como um elemento fundamental. Sua implementação em processos fabris permite obter maior robustez, confiabilidade, qualidade e redução de custos em produções de larga escala (Guerra, 2009).

Sendo assim, estudos de métodos de controle de processos estão sendo progressivamente estudados. Os controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID) vem sendo largamente utilizado no meio industrial. Åström (1995) na década de 90 apontava como o controlador mais utilizado. Mais da metade das indústrias utilizam de alguma forma algoritmo com estratégias PID inseridas, como apontado por (Ogata, 2003) no início do século 21.

Os métodos de controle de processos convencionais são capazes de tomar decisões de acordo com sua função de transferência, ou seja, uma entrada provoca uma saída manipulada pela função de transferência do sistema de controle. De modo diferente os sistemas inteligentes manipulam suas entradas através da sua base de conhecimento, ou seja, são inteligentes o suficiente para tomar decisões para diferentes entradas sendo essas novas ou inesperadas (Simões & Shaw, 2007).

Surgem, então, os sistemas de controle inteligentes que se baseiam na inteligência humana e se fundamentam em sistemas biológicos para automatizar um processo ou um comportamento. Em 1956, McCarthy utilizou o termo Inteligência Artificial (do inglês *Artificial Intelligence* A.I.) pela primeira vez. IA é uma área de conhecimento que estuda a forma humana de solucionar problemas e a tentativa das máquinas de emular este procedimento.

É comum ouvir o termo Inteligência Artificial e comentários que a tecnologia avança em uma velocidade muito grande tornando as máquinas cada vez mais inteligentes. Porém, ainda há uma grande lacuna entre a habilidade criativa dos seres humanos e a capacidade dos computadores de resolver problemas. Isso acontece pelo motivo do cérebro humano raciocinar de forma imprecisa, incerta e nebulosa. Essa maneira do cérebro humano raciocinar é conhecida em inglês como “fuzzy”.

A Lógica Fuzzy é uma técnica de IA que busca incorporar a forma de como um humano raciocina na solução de problemas. Os controladores baseados nessa lógica são projetados incorporando o raciocínio dedutivo de um operador experiente.

Neste trabalho, apresenta-se a aplicação de um controlador *Fuzzy Mandani* em uma planta de nível não linear. Para isso foi necessário a construção de um protótipo de uma planta de nível, onde o controlador será embarcado em uma plataforma de prototipagem Arduino Mega. O trabalho será experimental e contempla resultados com diferentes ajustes nas inferências fuzzy.

Na seção 2 deste trabalho, salienta-se aspectos da lógica *fuzzy* exibindo o funcionamento dos controladores que utilizam essa lógica. A seção 3 tem seu enfoque na metodologia para aplicação do controlador na malha de nível. Este capítulo apresenta mais informações acerca da identificação e da implementação dos controladores. A seção 4 relata as simulações e os experimentos realizados. Na seção 5 conclui-se o trabalho desenvolvido.

2. UMA INTRODUÇÃO À LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy é conhecida por trabalhar incorporando a forma nebulosa e imprecisa de como os humanos pensam. Os subconjuntos dessa lógica trabalham com o objetivo de solucionar problemas complexos que contém dados incertos ou incompletos de uma maneira matemática (Campos & Saito, 2004).

Mediante a esses erros encontrados e a necessidade de expressar de forma sistemática valores imprecisos, nebulosos e mal definidos, a lógica fuzzy é então introduzida pelo matemático Zadeh em 1965. A teoria emergiu a partir da observação de que ao aumentar a complexidade do sistema, a habilidade de concluir fatos de forma precisa diminui (Zadeh, 1965). A lógica fuzzy incorpora a forma humana de pensar sobre determinada situação, abandonando toda a bivalência da lógica clássica de Aristóteles. Os subconjuntos fuzzy tem a

capacidade de unir as qualidades dos sistemas especialistas convencionais com técnicas presentes nos sistemas biológicos (Campos & Saito, 2004).

A lógica nebulosa introduz o conceito de graus de pertinência que o mundo bivalente não comporta. Sendo assim, essa lógica incorpora expressões que habitualmente os humanos usam com frequência como MUITO FRIO, POUCO FRIO, MUITO QUENTE e POUCO QUENTE. Os graus de pertinência se referem aos “graus de verdade” de uma afirmação (Moura, 2013).

2.1 Controlador Fuzzy

Um grande desafio no projeto de controladores é no momento da modelagem da planta física. É comum se utilizar modelo matemáticos, porém estes modelos nunca conseguem representar a realidade de uma forma perfeita. Isso acontece por diversos fatores, começando por como os dados reais são obtidos. Os instrumentos utilizados para a obtenção de informações apresentam imperfeições, não estando livres de erros e incertezas. Ademais, a forma como essas informações são incorporadas em uma identificação, seja por equações matemáticas ou outra forma de representação, serão sempre incompletas devido às simplificações e aproximações realizadas (Campos & Saito, 2004). Por outro lado, a modelagem fundamentada na lógica fuzzy realiza a identificação do modelo através de operadores humanos que já conhecem e operam essa planta. O projeto então é todo embasado na experiência de um operador que manipula a planta sem conhecimentos de modelagens matemáticas (Simões & Shaw, 2007). Esse método se originou através da observação de que os operadores humanos são capazes de controlar sistemas complexos usando seu raciocínio baseado em um conhecimento adquirido por experiências.

A Figura 1(a) ilustra como é feita a identificação de sistemas para o projeto de um controlador via metodologias convencionais. Nota-se que nesse caso a identificação é feita em cima da planta que se deseja controlar. Já a metodologia fuzzy, o operador humano que é identificado, conforme mostra a Figura 1(b).

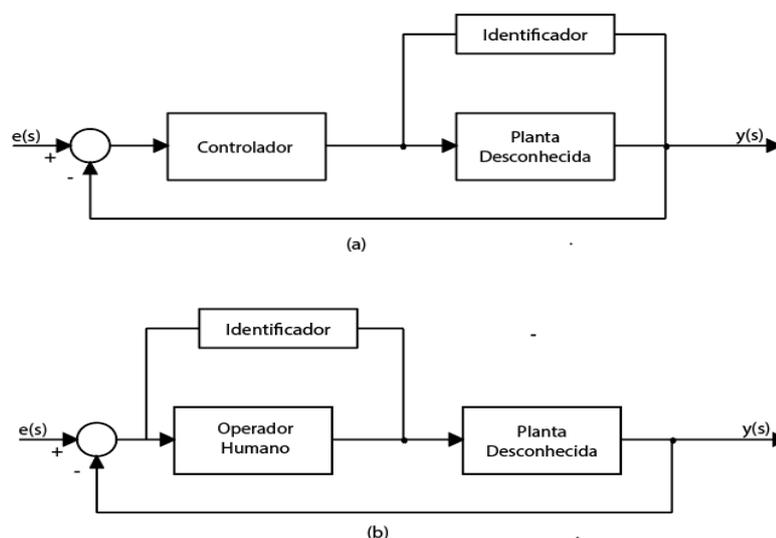


Figura 1 – Maneiras de Identificar Sistemas.

Os controladores fuzzy utilizam a lógica nebulosa que busca reproduzir o operador humano na construção de equações linguísticas que descrevem comportamentos do processo. Logo, esses controladores tomam ações de controle baseadas no modelo de operação do sistema. Embora muito se fala de usar expressões linguísticas para tratar informações de uma

forma difusa e nebulosa, a teoria é regida por regras precisas e conjuntos de premissas rigorosas (Campos & Saito, 2004).

O controlador fuzzy é composto por blocos funcionais: interface de fuzzificação, base de conhecimento, sistema de inferência e interface de defuzzificação. A Figura 2 mostra uma configuração genérica de um controlador fuzzy com todos esses blocos citados. O funcionamento do controlador é de simples compreensão. Inicialmente o processo envia dados dos sensores, essas variáveis de entrada são números reais. O primeiro passo do controlador é então introduzir esses números no “universo fuzzy”. Com as informações no domínio fuzzy o controlador é capaz de tratá-las através de suas inferências, ou seja, nesse momento é realizado as ações de controle. Porém, as informações ainda estão no domínio fuzzy e precisam ser decodificadas para serem enviadas aos atuadores. O defuzzificador é responsável por essa etapa de transformação inversa (Simões & Shaw, 2007).

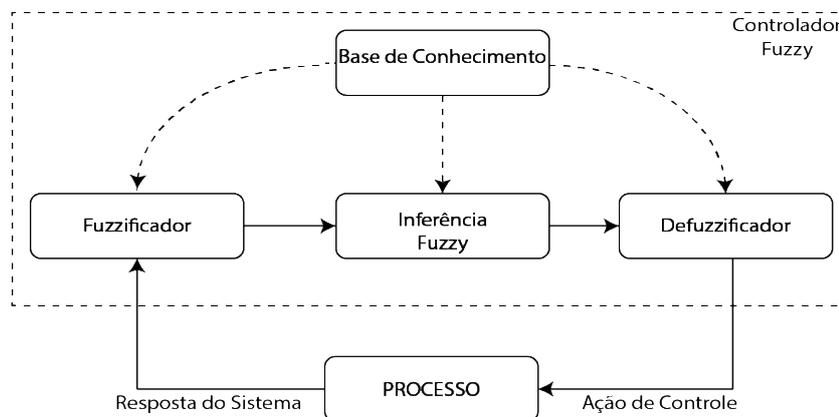


Figura 2 – Arquitetura básica de um controlador *fuzzy*.

2.2 Base de Conhecimento Fuzzy

A base de conhecimento é o bloco funcional constituído por todas as informações referentes aos universos de referência, valores linguísticos e funções de pertinência das variáveis do sistema. Há também inserido nessa base as regras fuzzy do controlador (Campos & Saito, 2004). Em outras palavras, esta base é onde está localizado toda a “inteligência” do controlador. A construção da base de conhecimento pode ser considerada a parte mais importante do projeto dos controladores fuzzy, pois se a aquisição das informações necessárias não for coletada corretamente comprometerá todo controlador e o seu futuro desempenho. Essa é uma etapa demorada e exige um certo cuidado para ser estabelecida. A obtenção de conhecimento, nessa fase, pode ser realizada manualmente, observando um operador trabalhando na planta e a forma como ele a opera. Há também uma forma automática de se obter, com a construção de um algoritmo de identificação de regras fuzzy. A obtenção manual ou a observação do operador são métodos de aquisição de dados parecidos. Ambos podem ser executados em uma conversa com um operador experiente onde se extrai regras como: SE <condição> ENTÃO <ação>.

A parte inicial de uma regra fuzzy, onde está inserida a condição, pode ser chamado como premissa. Já a segunda parte da regra, alocada a ação, é conhecido como consequência. Sendo assim, a consequência só será ativada se a premissa for verdadeira (Lilly, 2010). Para a construção de um controlador fuzzy é necessário a construção de uma coleção de regras. Essas regras ficam acondicionadas na base de conhecimento do controlador.

2.3 Interface de Fuzzyficação

O bloco de defuzzificação tem a funcionalidade de “converter” todos esses dados e conclusões fuzzy em números reais para que os atuadores atuem no processo. O defuzzificador harmoniza todas as regras, estabelecendo a influência de cada uma na resposta final (Simões & Shaw, 2007). Considerando uma base de dados composta por n regras, cada regra apresentará um conjunto fuzzy e conseqüentemente uma função de pertinência e cada conjunto portará de uma contribuição final particular. O bloco funcional de defuzzificação se encarrega então de organizar uma concordância entre essas regras (Lilly, 2010).

3. METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

Foi construído um protótipo contendo dois reservatórios de água para um controle de nível de um dos reservatórios. Desta forma, a malha de controle contemplada neste trabalho é uma malha de nível ilustrada na Figura 3. Como informado, o controlador está implementado no Arduino, o atuador é um motor elétrico que funciona como uma bomba de água. Desta forma, o motor atuará lançando o fluido do superior inferior para o superior. A malha é também constituída de um sensor ultrassônico de distância que capta o nível de água no reservatório.

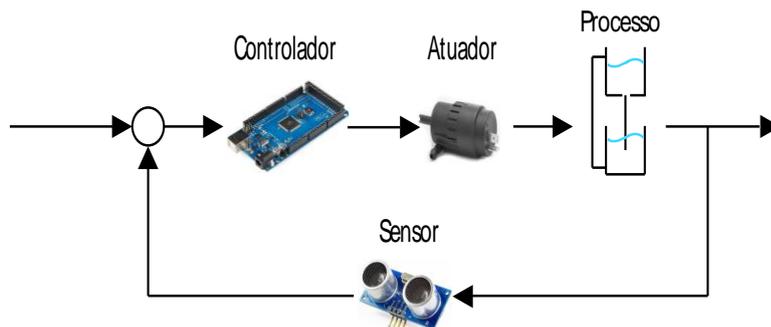


Figura 3 –Malha de controle de nível.

O protótipo construído é constituído por:

- Dois reservatórios de acrílico 15x15cm com espessura de 5mm;
- Placas em MDF;
- Mangueiras transparente de nível.

A Figura 4 mostra uma foto do protótipo construído. O Arduino enviará um sinal de controle para a bomba que por sua vez atuará transferindo água do reservatório inferior para o superior afim de controlar o nível no reservatório superior. O reservatório superior possui um furo para a água escorrer pelo efeito da gravidade.



Figura 4 – Protótipo construído para este trabalho.

O circuito elétrico é constituído por:

- Arduino Mega 2560;
- Sensor de distância ultrassônico HC-SR04;
- Eletrobomba de Reservatório de água para Parabrisa 12V;
- Resistor 1/8W de 211Ω ;
- Transistor TIP122 NPN;
- Diodo Retificador 1N4007;
- Fonte de alimentação chaveada de 12V.

O esquema elétrico é representado na Figura 5. Foi montado o circuito utilizando o software livre Fritzing para uma melhor visualização de cada componente, o led vermelho representa a eletrobomba de 12V.

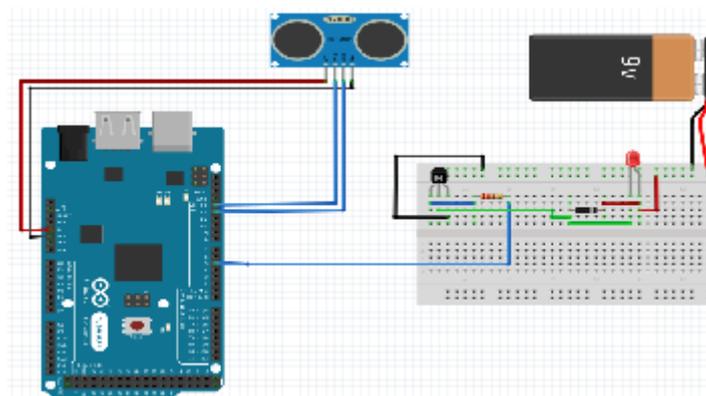


Figura 5 –Esquemático Elétrico

3.1 Controlador PID (Algoritmo de Isermman)

O controlador PID une três ações distintas: Proporcional, Integral e Derivativa. Essa união possibilita que o erro seja reduzido pela ação proporcional, zerado pela ação integral e

uma maior rapidez para atingir o SetPoint pela ação derivativa (Nise, 2004). Ele é um controlador amplamente utilizado em malhas de controle industriais por diversos motivos incluindo robustez e simplicidade na implementação (Åström, 1995).

No projeto do controlador PID é necessário inicialmente identificar o modelo físico. Essa identificação consiste em se obter uma função matemática, conhecida como função de transferência, que descreve o comportamento aproximado da planta física. Neste trabalho, a função de transferência foi encontrada em um método de curva de reação FODT (*First Order Delay Time*), isto é, primeira ordem mais tempo morto. Para encontrar essa curva é realizado a aplicação de um degrau unitário na entrada do sistema em malha aberta sem compensação até que a resposta se estabilize (Carmo, 2006). Sendo assim, é encontrado a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (1)$$

onde: k é o ganho estático do processo, L é o tempo de atraso e τ é a constante de tempo do sistema. Os valores dos parâmetros citados acima podem ser obtidos graficamente pela curva de reação (CORRIPIO & SMITH, 2001). Após a identificação do sistema para uma função de transferência aproxima, se faz necessário realizar a sintonia dos controladores, isto é, calcular os ganhos k_p , k_i e k_d do controlador. Há também diversas formas de sintonia dos ganhos com uma forte aprovação nas indústrias de processo. O método de Ziegler e Nichols é um dos meios de sintonia tradicional considerado como referência (CARMO, 2006).

O controlador implementado irá usar os parâmetros K_p , T_i e T_d . Neste trabalho foi empregado o controlador digital PID (ISERMANN, 1980). As equações 2 e 3 apresentam o algoritmo do controlador que foi implementado no código de controle do Arduino.

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (2)$$

ss variáveis q_0 , q_1 e q_2 são definidas por (3):

$$\begin{aligned} q_0 &= K \left(1 + \frac{T_d}{T_a} \right) \\ q_1 &= -K \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_a} - \frac{T_i}{T_a} \right) \\ q_2 &= K \frac{T_d}{T_a} \end{aligned} \quad (3)$$

A variável T_a se refere ao tempo de amostragem de um ciclo.

3.2 Controlador Fuzzy

O controlador *fuzzy* possui blocos funcionais responsáveis pelo tratamento das variáveis de entrada/saída e toda a tomada de decisão incluindo a base de dados que alimenta todo o mecanismo (SIMÕES & SHAW, 2007).

A planta física construída possui características não lineares muito fortes que impactam fortemente no controle. Uma das peculiaridades não lineares que irá impactar no projeto do controlador é o comportamento distinto da planta para diferentes faixas de níveis de água. Sendo assim, é inevitável projetarmos o controlador considerando mudanças em seus parâmetros conforme os *setpoints* escolhidos. Para iniciar o projeto do controlador *fuzzy* o

primeiro passo é entender nitidamente o funcionamento do sistema. Então, é levantado as variáveis linguísticas que se entende como necessárias para um controle preciso (MOURA, 2013). Simões sugere em seu livro duas entradas, erro e a variação do erro, fazendo com que o controlador *fuzzy* possua atributos similares as ações Proporcional e Derivativa (SIMÕES & SHAW, 2007). Para este trabalho, será considerado duas variáveis *fuzzy* de entrada: erro (ERRO) e variação do erro (VARERRO). É necessário estabelecer o número de valores linguísticos para cada variável, isto é, cada variável possui conjuntos *fuzzy* que determinam e quantificam a variável linguística dentro de um universo de discurso (LILLY, 2010).

A variável ERRO é calculada pela diferença entre o *setpoint* e o nível atual da água. Assim sendo, para valores negativos de erro se conclui que o nível de água está maior do que o *setpoint* e para valores positivos o nível está abaixo. Portanto o universo de discurso para esta variável é definido pelos valores máximos possíveis fisicamente. Considerando *setpoints* distintos, os limites do universo serão diferentes.

Na variável VARERRO, percebeu-se que a variação do erro se fazia válida para afirmar o sentido da variação da água (subindo ou descendo) e a taxa com que dessa variação (“velocidade” de subida ou descida). Logo foi estipulado três conjuntos *fuzzy* também sendo SUBINDO (G1), PEQUENO (P) e DESCENDO (G2). O conjunto PEQUENO é referente a pequenas variações, não importando se está subindo ou descendo o nível de água. Por experimentos se conclui que as máximas variações são de 2cm e essa variável possui os mesmos comportamentos para diferentes faixas de nível de água.

É importante ressaltar que as variáveis de entrada são consideradas variáveis independentes e as de saída dependentes. Isso acontece pelo fato das variáveis de saída possuírem valores estabelecidos pelo sistema *fuzzy*, ou seja, pertencem a uma faixa restrita de valores enquanto as variáveis de entrada podem assumir diversos valores não definidos pelo controlador (LILLY, 2010). É fácil perceber esse acontecimento: não se controla os valores de entrada advindos de sensores e sim as ações de controle que são enviadas aos atuadores. Entretanto, ao se conhecer o processo é possível determinar os máximos valores permitidos pelas características físicas do sistema.

Realizado o levantamento das variáveis de entrada e saída e os valores linguísticos com suas funções de pertinência em conjuntos *fuzzy*, se faz listagem das regras *fuzzy* de acordo com o conhecimento profundo do sistema estudado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Observa-se um melhor comportamento dinâmico do controlador *Fuzzy* diante do PID, conforme a Figura 6. Ela mostra para a planta de nível com *setpoint* de 4 cm. O controlador *Fuzzy* conseguiu controlar o nível da água no valor ajustado, enquanto o controlador PID ficou variando o nível em torno de 4,5 cm, o método de Ziegler e Nichols gerou uma instabilidade dinâmica (oscilação em torno do valor de regime permanente).

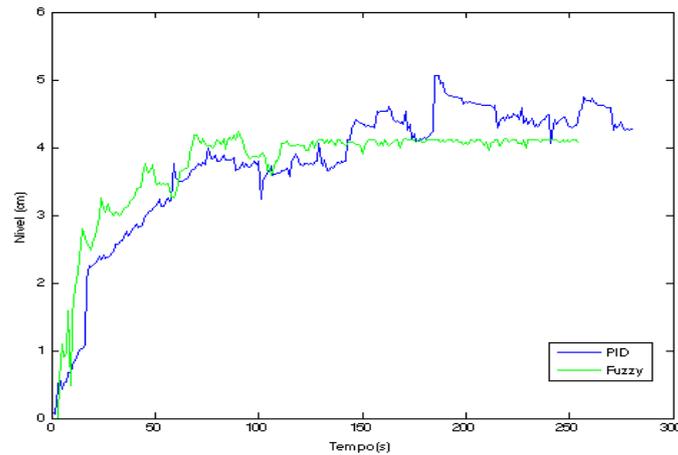


Figura 6 – Comparação PID e Fuzzy - *setpoint* de 4cm.

A mesma comparação para o *setpoint* de 9 cm se encontra na Figura 7. Percebe-se que para esse *setpoint* o PID obteve resultados pouco inferior ao *Fuzzy*, sendo que este último apresentou tempo de subida menor. Isso é resultado das não linearidades presente no sistema e a diferenciação do funcionamento do controlador PID para diferentes faixas de *setpoint*.

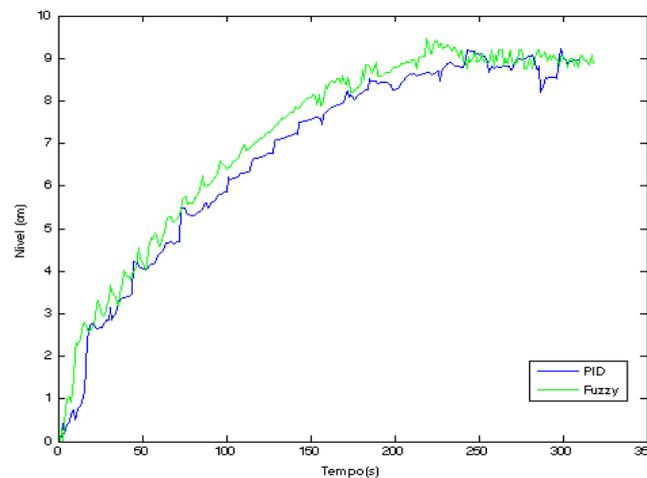


Figura 7 – Comparação PID e Fuzzy - *setpoint* de 9cm

5. CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados obtidos pela planta física construída com a compensação dos controladores PID e *Fuzzy*. Para ambos os controladores, explicitou todos os resultados na execução do projeto de acordo com as informações e métodos descritos na Metodologia. Os *setpoints* de 4 e 9 cm foram escolhidos como parâmetros para certificar o funcionamento e comportamento dos controladores em faixas de operações distintas.

Para o controlador PID é evidenciado as curvas de reações e cálculos da função de transferência e ganhos do controlador. Utilizando esta sintonia, observou-se um desempenho

diferente do controlador para *setpoints* diferentes, resultado dos fatores não lineares presentes na planta. O projeto do controlador *fuzzy* foi dividido em partes visando além de observar o comportamento em diferentes faixas de *setpoint*, a relevância do número de conjuntos *fuzzy*.

Diante dos resultados obtidos, percebe-se ruídos fortes no sensoriamento do nível de água que os filtros implementados (via *software* e mecânico) não foram capazes de compensar. Mesmo diante desses problemas, que são comuns para os dois controladores, o controlador *fuzzy* se mostrou robusto o bastante para “anular” esses efeitos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CEFET-MG, Fundação CEFETMINAS e FAPEMIG pelo apoio e fomento na realização deste trabalho.

REFERENCIAS

- Åström, K.; Hagglund, T. PID Controllers: theory, design and tuning. 2nd Edition. ed. Triangle Park: Instrument Society of America, 1995.
- Campos, M. M.; Saito, K. Sistemas inteligentes em controle e automação de processos. I. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.
- Carmo, M. J. Ambiente Educacional Multifuncional Integrado para Sintonia e Avaliação do Desempenho de Malhas Industriais de Controle. [S.l.]: UFJF. 2006. Dissertação de Mestrado.
- Corripio, A. B.; Smith. Tuning of Industrial Control System. NC. EUA: The instrumentation, systems and Automation Society. 2001.
- Guerra, W. D. A. Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis. Universidade Federal do Pernambuco, Curso de Especialização em Engenharia de Instrumentação, 2009. Monografia.
- Lilly, J. H. Fuzzy Control and Identification. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- Moura, L. H. Estudo de Controle Fuzzy em uma planta didática de nível Foundation Fieldbus. Centro Federa de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Leopoldina. 2013.
- Nise, N. S. Control Systems Engineering. 6. ed. Hoboken: [s.n.], 2004.
- Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 4a Edição. ed. Sao Paulo: Pearson Pretice Hall, 2003.
- Simões, M. G.; SHAW, I. S. Controle e Modelagem Fuzzy. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- Zadeh, L. A. Fuzzy Sets. Information and Control, v. 8, p. 338-353, 1965.

FUZZY CONTROL EMBEDDED IN ARDUINO: A CASE STUDY FOR A LEVEL PLANT

Abstract. *The paper presents the design of a Mandani Fuzzy controller shipped on an Arduino Mega electronic prototyping platform for a level loop. It is contemplated with the construction of a prototype with two interconnected water reservoirs seeking level control in the upper reservoir. At the outset, an Isermann Digital PID controller was designed covering the mathematical modeling of the plant and the controller tuning. Subsequently, the results were collected with this controller for comparative purposes. Later, the work contemplates the complete construction of a Fuzzy Mandani controller integrating the elaboration of all its functional blocks. Both controllers were exposed to two different ranges of plant operations and a comparative one was performed, where the Fuzzy controller presented satisfactory results and superior to the PID. The work takes in all the steps of the construction of the plant and the design of the controllers presenting the problems encountered as well as their respective solutions.*

Keywords: *Fuzzy Logic, Arduino, Level Plant, Process Control.*