

PROPOSTA DE TECNOLOGIA PARA O CONTROLE DE VELOCIDADE DE PIGs INTELIGENTES UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

GUSTAVO F. DE LIMA¹, VICTOR C. G. DE FREITAS¹, ANTÔNIO E. DE M. SILVA¹, ANDRÉS O. SALAZAR¹,
ANDRÉ L. MAITELLI¹, FRANCISCO DE A. O. FONTES²

1. *Departamento de Engenharia da Computação e Automação,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CEP 590720-970, Natal, RN, Brasil.
E-mails: gustavoflima@msn.com, victorc.galvao@gmail.com,
edumorais92@gmail.com, andres@dca.ufrn.br, maitelli@dca.ufrn.br*

2. *Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CEP 590720-970, Natal, RN, Brasil.
E-mail: francisconfontes@uol.com.br*

Abstract—For better pipeline inspection, a Smart PIG must maintain low speed while it performs that operation. In this paper we propose a technology for PIG speed control based on Fuzzy Logic, using a by-pass valve as the actuator. Our focus is to deal with the PIG speed excursion, caused by high pressure differentials that typically occur during the inspection. So we mounted a test bench, in reduced scale, to simulate PIG speed excursions and used a linear model to estimate the PIGs velocity by means of pressure differential. Our experiments demonstrated that the valve opening leads to a significant reduction in pressure differential. The results show that the system is able to control the PIGs velocity.

Keywords—Smart PIG, pipeline inspection, speed control, by-pass valve, Fuzzy control.

Resumo—Para uma melhor inspeção, um PIG instrumentado (*Smart PIG*) deve manter uma velocidade baixa durante essa operação. Neste trabalho, propomos uma tecnologia para controle de velocidade de PIGs instrumentados baseado em lógica Fuzzy, usando como atuador uma válvula *by-pass*. Nosso foco é lidar com os picos de velocidade ou “tiros”, causados por altos diferenciais de pressão que ocorrem tipicamente durante a inspeção. Assim, montamos uma bancada de testes, em escala reduzida, para simular o fenômeno do “tiro” e usamos um modelo linear para estimar a velocidade do PIG por meio do diferencial de pressão. Nossos experimentos demonstraram que a abertura da válvula causa uma redução significativa na diferença de pressão. Os resultados mostram que o sistema é promissor no sentido de controlar a velocidade do PIG.

Palavras-chave—PIG instrumentado, inspeção de dutos, controle de velocidade, válvula *by-pass*, controle Fuzzy.

1 Introdução

A malha dutoviária brasileira, segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP), citado por Alves (2007), tem uma extensão de 15.069 km, sendo 7.404 km de oleodutos e os outros 7.665 km de gasodutos. Um duto que não passa por manutenção periódica fica sujeito a dois problemas: redução da área útil por acumulo de sedimentos e perda de material da parede interna do duto por corrosão. Nos dois casos é possível utilizar uma ferramenta, que tem por objetivo a desobstrução e/ou inspeção da integridade interna desse duto, conhecida pelo nome de PIG (*Pipeline Inspection Gauge*).

Os PIGs instrumentados (ver Figura1), segundo Pereira (2012), normalmente se deslocam no interior dos dutos de forma autônoma, impulsionados pela pressão produzida pelo fluido e percorrem toda a extensão do duto, até centenas de quilômetros, e são capazes de armazenar os registros da operação em curso para análise e avaliação posteriores.

Para que um PIG instrumentado possa identificar e quantificar diversas anomalias é preciso que ele mantenha uma baixa velocidade de deslocamento. Isso para que os sensores possam coletar dados com segurança e confiabilidade. Segundo Nguyen et al (2001), essa velocidade é

geralmente na faixa de 1 a 5 m/s em dutos de líquido e de 2 a 7 m/s em dutos de gás.

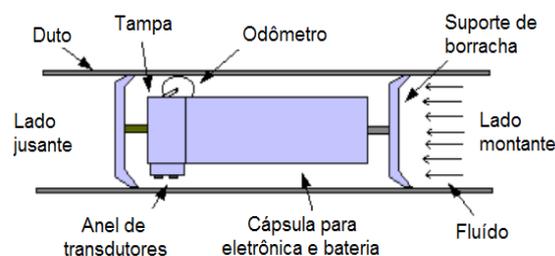


Figura1. Exemplo de PIG dentro do duto.

Alguns trabalhos têm tratado do controle de velocidade de PIGs instrumentados. Um deles, o trabalho de Sutherland e Paz (2000) obteve o controle de velocidade por meio de um *by-pass* de fluxo de gás, o que melhorou a qualidade dos dados coletados.

Em outro, segundo Lima et al (2014) a velocidade do PIG pode ser obtida do Coeficiente de Vazão da válvula *by-pass*, considerando que essa velocidade é a mesma da velocidade do fluido, quando a válvula estiver fechada.

O comportamento da velocidade de um PIG é bastante não-linear e não possui um modelo matemático bem definido. Como solução escolheu-se a Lógica Fuzzy para o desenvolvimento de um

controlador inteligente, que operasse sem a necessidade de um modelo matemático do processo; que utilizasse a experiência do especialista humano e, por fim, que não precisasse de cálculos e equações complicadas.

A partir do valor do diferencial de pressão, o controlador calcula o sinal de controle, que é o tempo de abertura da válvula *by-pass*. Essa válvula, desenvolvida em trabalhos anteriores, foi controlada segundo Freitas et al (2014) utilizando blocos IF... THEN embarcados na placa Arduino, onde foram obtidos resultados satisfatórios, possui dois estados: aberta ou fechada.

O chaveamento (liga/desliga) da válvula é semelhante a um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), cujo objetivo é obter um valor médio para abertura da válvula.

As próximas seções deste artigo estarão organizadas da seguinte maneira: na seção 2 serão abordados os conceitos do movimento do *PIG* e da lógica *Fuzzy*. Na seção 3 serão apresentados os principais componentes para montagem da bancada de testes. A seção 4 abordará os testes realizados, utilizando a bancada, a configuração do controlador *Fuzzy* e os resultados experimentais obtidos. Por fim, na seção 5 estarão as conclusões.

2 Fundamentação Teórica

Esta seção abordará a fundamentação teórica para o entendimento do trabalho, apresentando um modelo simplificado do movimento do *PIG* e a teoria da lógica *Fuzzy*, aplicada no desenvolvimento de um controlador inteligente.

2.1 O Movimento do *PIG*

Segundo Pereira et al (2013) a dinâmica do movimento do *PIG* é baseada na Segunda Lei de Newton. O balanço de forças é mostrado na Figura 2.

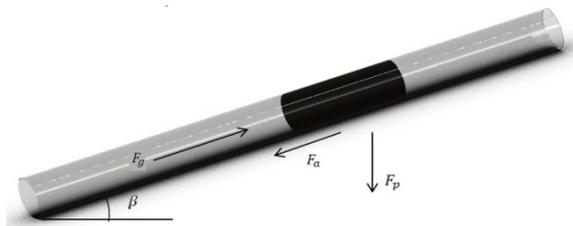


Figura 2. Balanço de forças que agem no *PIG*.

onde: F_g é a força exercida pelo diferencial de pressão ΔP , que move o *PIG*; F_a é a força de atrito entre o *PIG* e a parede do duto; F_p é a força peso que age quando o duto tem inclinação; e β é o ângulo de inclinação do duto.

Estas forças estão relacionadas pela Segunda Lei de Newton, conforme as Eq. (1) a (4):

$$M \cdot a = F_g + F_a + F_p \quad (1)$$

$$F_g = \Delta P \cdot A \quad (2)$$

$$F_a = B \cdot v + F_s \quad (3)$$

$$F_p = M \cdot g \cdot \sin \beta \quad (4)$$

onde: M é a massa do *PIG*; a é a sua aceleração; ΔP é o diferencial de pressão no *PIG*; A é a área do *PIG* na qual é exercida a pressão do gás; B é o coeficiente de atrito viscoso; v é a velocidade do *PIG*; F_s é o atrito seco; g é a aceleração da gravidade.

Para obter o modelo linear do sistema foi desconsiderado, inicialmente, o atrito seco e a força peso, que serão modelados posteriormente para análise de seus efeitos no sistema.

Dessa forma, temos que:

$$M \cdot a = \Delta P \cdot A + B \cdot v \quad (5)$$

Para a Eq. (5) ficar em função da velocidade do *PIG*, a aceleração foi substituída por dv/dt , conforme a Eq. (6).

$$M \cdot \frac{dv}{dt} - B \cdot v = \Delta P \cdot A \quad (6)$$

Realizando a transformada de Laplace, considerando as condições iniciais iguais a zero, a função de transferência do sistema é obtida como mostrada na Eq.(7).

$$\frac{V(s)}{\Delta P \cdot A} = \frac{V(s)}{F_g(s)} = \frac{1}{M \cdot s - B} \quad (7)$$

Onde a entrada é a força que move o *PIG*, causada pelo diferencial de pressão e a saída é a velocidade do mesmo.

2.2 Lógica *Fuzzy*

Em 1965, o professor Lotfi Zadeh da Universidade de Berkeley (USA) publicou o trabalho intitulado "*Fuzzy sets*" (Zadeh, 1965) no jornal acadêmico "*Information and Control*". Ele propôs uma nova teoria de conjuntos, onde a passagem da pertinência para a não pertinência fosse feita de uma forma lenta e gradual e não abrupta como na teoria usual de conjuntos, conforme Feitosa citado por Bilobrevic e Marçal (2004). Dessa forma, surgiram os Conjuntos *Fuzzy* (nebuloso ou difuso).

Uma vantagem da Lógica *Fuzzy*, quando implementada nos controladores, é que estes podem ser projetados para se comportarem conforme o raciocínio dedutivo, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem (Simões e Shaw, 1999).

Um sistema baseado em Lógica *Fuzzy* pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes: fuzzificador (codificador); regras (base de conhecimento); inferência (lógica de tomada de decisões); e defuzzificador (decodificador). Esta estrutura pode ser visualizada na Figura 3.

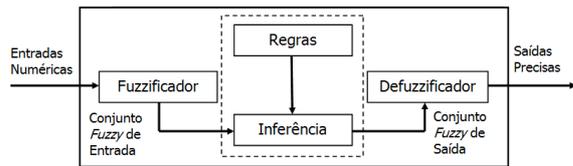


Figura 3. Blocos do controlador Fuzzy.

Em resumo, a Lógica *Fuzzy* objetiva fazer com que as decisões tomadas pela máquina se aproximem cada vez mais das decisões humanas, principalmente ao trabalhar com uma grande variedade de informações, vagas e incertas (Vale, 2007).

3 Implementação do Sistema

Nesta seção serão abordados os principais componentes e sub-sistemas para implementação/montagem de uma bancada de testes, com o objetivo de realizar simulações de situações sofridas por *PIGs* conhecidas no meio técnico pelo jargão “tiro”.

3.1 Plataforma Arduino

O Arduino Uno, usado neste trabalho, conta com um microcontrolador ATmega328P, 6 entradas analógicas, 14 entradas e saídas digitais, um conversor serial para USB, fonte de alimentação externa e pinos de energia com 3,3 V, 5 V e Terra (GND).

A função do Arduino, neste projeto, foi a de controlar o tempo em que a válvula *by-pass* permanecia aberta ou fechada, utilizando um sinal *PWM*. A válvula *by-pass* possui somente dois estados: aberto (*duty cycle* de 100%) e fechado (*duty cycle* de 0%). Dessa forma, o uso de uma porta *PWM* possibilitou a obtenção de valores entre 0 e 100% para a abertura da válvula.

3.2 Dispositivo de Aquisição de Dados

Um dispositivo de aquisição de dados ou DAQ (*Data Acquisition*), segundo Gesteira (2014), atua como a interface entre o computador e os sinais do mundo exterior. Ele digitaliza os sinais analógicos de entrada, de forma que o PC possa lê-los ou interpretá-los.

Para a aquisição de dados deste projeto foi escolhido o dispositivo NI USB-6008 da empresa *National Instruments*. O NI USB-6008 é um dispositivo DAQ de baixo custo, fácil conexão com PC utilizando uma porta USB e de dimensões reduzidas (NI, 2013).

3.3 Transdutor de Pressão

O termo transdutor, conforme Silva (2013), é definido como um dispositivo que realiza a conversão de uma forma de energia (pressão, por

exemplo) em outra (tensão elétrica, por exemplo). Idealmente, o transdutor deve responder somente a variações da forma de energia que se pretende medir, com a exclusão de outras.

Neste projeto foram utilizados dois transdutores de pressão eletrônicos, identificados como PT-01 e PT-02: um a montante da válvula *by-pass* e outro a jusante dela. Eles são instrumentos lineares da marca Ashcroft - modelo A2X - e podem medir pressões de 0 a 6.894,76 kPa (0 a 1.000 psi), gerando um sinal de saída entre 0 V e 5 V.

Os sinais de tensão produzidos pelos transdutores foram convertidos em valores de pressão por meio das Eq.(8) e (9).

$$pt_{01}(v_1) = (199,9 \cdot v_1 - 0,5472)\text{psi} \quad (8)$$

$$pt_{02}(v_2) = (199,4 \cdot v_2 + 21,09)\text{psi} \quad (9)$$

Essas expressões foram implementadas no programa Matlab™ para obtenção dos valores de pressão dos dois transdutores, que foram convertidos em kPa posteriormente.

3.4 Válvula *By-pass*

A válvula *by-pass* utilizada neste projeto tem por função controlar a passagem de gás pelo corpo do *PIG*. Significa que ela pode controlar a pressão na jusante do *PIG*. Como consequência deste controle foi possível controlar a velocidade do mesmo.

A Figura 4 apresenta um corte da válvula *by-pass* proposta. É possível visualizar uma passagem principal de fluxo e o pistão que controla a abertura e fechamento dessa passagem principal.

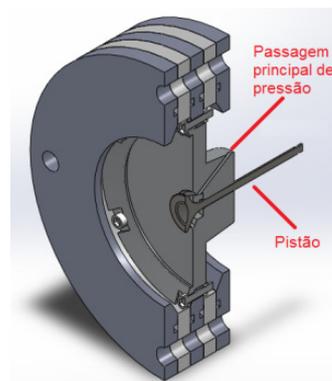


Figura 4. Vista em corte da válvula *by-pass*.

O movimento do pistão é realizado pela aplicação de pressão do próprio duto (pressão da montante), por meio de uma válvula eletropneumática de 3/2 vias. Essa eletroválvula é acionada por um transistor Darlington TIP 122, numa configuração de chave eletrônica.

3.5 Bancada de Testes

A bancada de testes montada para simulação de situações de “tiro” em *PIGs* foi construída em aço galvanizado, com diâmetro 4” e aproximadamente 2

m de comprimento. Na Figura 5 é possível visualizar a tubulação montada para o funcionamento da bancada de testes. No centro da bancada existe um flange onde foi montada a válvula *by-pass*, identificada por VP. Em cada lado desse flange foi instalado um manômetro junto com um transdutor de pressão. E por último, uma válvula esfera de acionamento manual em cada extremidade da tubulação, identificada por V1 na montante e V2 na jusante, respectivamente.



Figura 5. Bancada de testes para simulações de “tiro”.

A pressão máxima possível na montante é 550 kPa (80 psi), sendo limitada por um regulador de pressão e o registro V1 permaneceu aberto durante todo o ensaio. E a válvula V2 permite a simulação das situações de “tiro” em um *PIG* dentro do duto.

3.6 Metodologia Experimental

A metodologia experimental neste trabalho foi a de realizar a simulação do evento “tiro”, utilizando a bancada de testes. Quando um *PIG* sofre a ação de um “tiro”, ele fica submetido a uma alta pressão montante e uma baixa pressão jusante, o que faz o diferencial subir e empurrar esse *PIG* em alta velocidade dentro do duto.

Este comportamento de pressões foi obtido na bancada de testes, o que permitiu o desenvolvimento do presente trabalho. Em momento algum foi lançado qualquer tipo de *PIG* dentro da tubulação da bancada de testes. As pressões foram manipuladas de forma a simular o movimento do *PIG*.

Para obtenção dos resultados foi necessário realizar a montagem dos componentes apresentados anteriormente no entorno da bancada de testes. Primeiro, os sinais de tensão dos transdutores de pressão foram conectados nas entradas analógicas AI0 e AI1 do dispositivo DAQ USB-6008 e este foi conectado ao computador via cabo USB.

Depois, o Arduino foi conectado ao computador via cabo USB, também. Por fim, a saída da porta digital 09 da placa Arduino, com um sinal *PWM*, foi conectada ao resistor da base do transistor Darlington TIP 122, que aciona a válvula *by-pass*.

A Figura 6 mostra as interligações realizadas no entorno da bancada de testes.

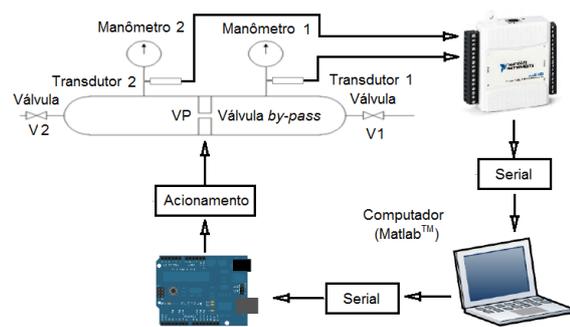


Figura 6. Conexões realizadas na bancada de testes.

4 Testes e Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados na bancada de testes. Foi testada a situação de “tiro” a que os *PIGs* podem ser submetidos. Essa situação foi testada sem o controle *Fuzzy* e depois com o controle *Fuzzy* funcionando. Isso permitiu uma comparação antes e depois do efeito do diferencial de pressão aplicado ao corpo do *PIG*.

4.1 Testes sem o Controlador Fuzzy

A situação de “tiro” é o momento em que o *PIG* fica sujeito a um alto valor de diferencial de pressão e, neste caso, por não ter uma válvula *by-pass*, que regule esse diferencial de pressão, desenvolve uma velocidade alta dentro do duto. Isto impossibilita uma leitura de qualidade pelos sensores, além de ser inseguro para realização da operação de inspeção.

A Figura 7 mostra um “tiro” após o tempo de 10 s com a VP fechada 100%. Dessa forma, a redução do diferencial de pressão (cor verde) foi muito lenta, demorando quase 50 s para a pressão cair de 402,05 kPa (58,31 psi) para 317,80 kPa (46,09 psi).

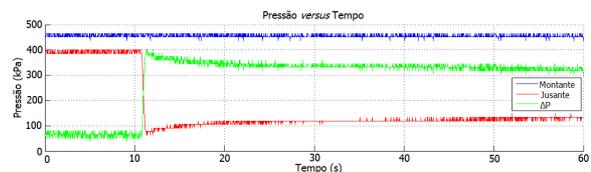


Figura 7. Ensaio simulando um “tiro” com VP fechada 100%.

Para uma estimativa de velocidade alcançada pelo *PIG* depois deste “tiro” foi aplicada a Eq. (7), com os seguintes valores: $M=80$ kg; $B=900$ Ns/m; $A=0,0081$ m², que corresponde a um duto de 4” de diâmetro.

A Figura 8 apresenta o resultado dessa estimativa de velocidade. Nela a velocidade alcançou um pico de 3,48 m/s e demorou quase 50 s para seu valor alcançar a marca de 2,89 m/s, aproximadamente, o que significa uma redução de 17%. E o espaço percorrido por esse *PIG* foi de 155,5 m.

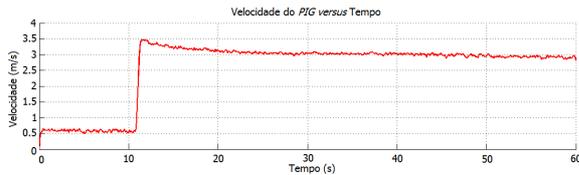


Figura 8. Velocidade estimada do PIG sem o Controlador Fuzzy.

O teste apresentado serviu de parâmetro de comparação com o que será mostrado mais adiante. É muito semelhante a uma situação real, uma vez que, ainda não existe um controle de velocidade implementado nos PIGs instrumentados hoje em dia.

4.2 Configuração do Controlador Fuzzy

Para regular a pressão utilizando a válvula *by-pass*, uma faixa de oscilação foi definida como aceitável para o diferencial de pressão, após o “tiro”, obtida de forma heurística entre 20 e 30% do valor de pressão da montante. A pressão montante foi regulada inicialmente em 414 kPa (60 psi), o que produziu uma faixa para oscilação do diferencial de pressão entre 82 e 124 kPa (12 e 18 psi).

A primeira variável de entrada foi definida com valores de 0 a 550 kPa (0 a 80 psi). Sendo “deltaP” dada pela Eq. (10).

$$\Delta P = P_{montante} - P_{jusante} \quad (10)$$

A Figura 9 ilustra o conjunto Fuzzy para a entrada “deltaP”. Os valores linguísticos definidos foram: baixo, referência, médio e alto.

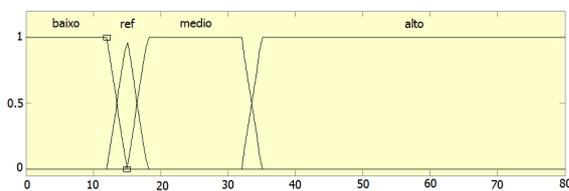


Figura 9. Variável de entrada “deltaP”.

A segunda variável de entrada foi definida com valores de -550 a 550 kPa/s (-80 a 80 psi/s). Sendo a “taxadeltaP” dada pela Eq. (11).

$$\dot{\Delta P} = \frac{d}{dt} \Delta P = \frac{\Delta P_{atual} - \Delta P_{anterior}}{t_{atual} - t_{anterior}} \quad (11)$$

A Figura 10 mostra o conjunto Fuzzy para a entrada de “taxadeltaP”. Os valores linguísticos definidos foram: caindo, estável e subindo.

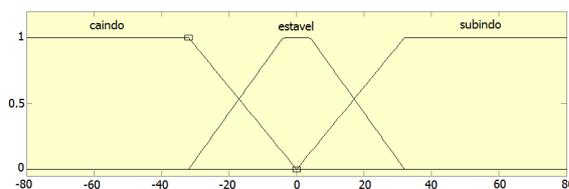


Figura 10. Variável de entrada “taxadeltaP”.

A variável de saída do sistema foi definida como “PWM” e assumiu valores de 0 a 255, isso por causa

do Arduino. Nele um sinal PWM assume valores de 8 bits ($2^8 = 256$).

Os valores linguísticos previstos para a variável de saída “PWM” foram: fechado, pouco, médio e aberto. A Figura 11 apresenta a configuração das pertinências da variável “PWM”.

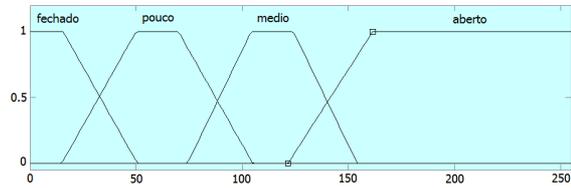


Figura 11. Variável de saída “PWM”.

A lógica Fuzzy necessita de regras que definam seu comportamento. Estas regras descrevem as condições esperadas durante o processo, e quais atitudes serão tomadas para cada condição. A Tabela 1 mostra as regras utilizadas no controlador Fuzzy.

Tabela 1. Base de regras utilizada

		TaxaDeltaP		
		Caindo	Estável	Subindo
DeltaP	Baixo	Fechado	Fechado	Fechado
	Ref	Fechado	Pouco	Pouco
	Médio	Médio	Médio	Aberto
	Alto	Aberto	Aberto	Aberto

Por fim, foi usada a máquina de inferência de Mamdani que utiliza como implicação at-norma mínimo [mín] e como agregação a sua co-norma máximo [máx]. A defuzzificação foi calculada utilizando o centroide.

4.3 Testes com Controlador Fuzzy

Para mostrar o funcionamento do controlador Fuzzy atuando no acionamento da válvula *by-pass* foi necessário repetir o ensaio de simulação de “tiro” e registrar o comportamento das pressões para posterior análise.

A Figura 12 apresenta a ocorrência de um “tiro” depois do tempo de 10 s e o diferencial de pressão atingiu um pico de aproximadamente 317,97 kPa (47 psi), menor do que os 402,05 kPa (58 psi) alcançado no ensaio anterior sem o controlador Fuzzy, sendo considerado bastante significativo.

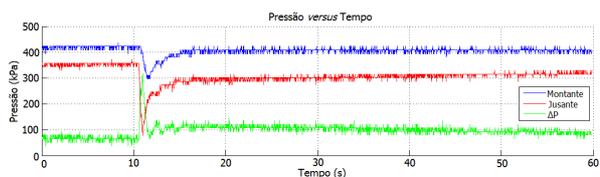


Figura 12. Ensaio simulando “tiro” com VP variando de 0 a 100%.

Neste ensaio foi possível visualizar que o diferencial de pressão permaneceu dentro da faixa predefinida de 82 e 124 kPa (12 e 18 psi) de pressão.

Isso foi considerado como satisfatório para o movimento seguro do *PIG*.

Na sequência foi produzido o gráfico de velocidade estimada do *PIG*. A Figura 13 ilustra a ação do controlador para reduzir no menor tempo possível os efeitos do “tiro” sobre o corpo do *PIG*.

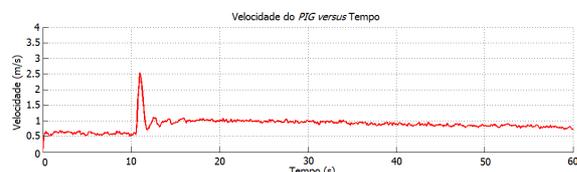


Figura 13. Velocidade estimada com Controle Fuzzy.

A velocidade alcançou o valor máximo de 2,5 m/s e depois caiu para 0,8 m/s, o que representa uma redução de 68%. Melhor do que os 17 % de redução obtida no ensaio de “tiro” sem o controlador Fuzzy. E o espaço percorrido por esse *PIG* foi de 52,2 m.

4.4 Comparação de Resultados

Para auxiliar na análise, os dados de velocidade de pico, redução de velocidade e espaço percorrido pelo *PIG* antes sem controlador *Fuzzy* e depois com controlador *Fuzzy* foram organizados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparativo dos Resultados Obtidos.

	Sem controlador	Com controlador
Velocidade de pico	3,5 m/s	2,5 m/s
Redução de velocidade	17 %	68 %
Espaço percorrido	155,5 m	52,2 m

5 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi propor uma tecnologia capaz de controlar o diferencial de pressão atuante em *PIGs* instrumentados e, com isso, controlar sua velocidade. A estratégia proposta, neste trabalho, implementou um controlador por Lógica *Fuzzy*, que tem por vantagens utilizar a experiência do especialista humano e não precisar de cálculos e equações complicadas.

Os resultados experimentais obtidos com a utilização da bancada de testes mostraram um bom desempenho para o controle proposto. O mesmo conseguiu manter o diferencial de pressão atuante no *PIG* dentro de uma faixa predefinida, mesmo sendo submetido ao evento “tiro”.

A velocidade do *PIG* foi estimada e observou-se que a mesma foi controlada com sucesso, permanecendo dentro de uma faixa aceitável e segura para a realização da operação de inspeção de dutos.

Referências Bibliográficas

- Alves, V. R. F. M. (2007). Programação de Transferência de Derivados de Petróleo em Rede Dutoviária usando Algoritmo Genético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Dissertação de mestrado.
- Bilobrovec, M.; Marçal, R. F. M. and Kovaleski, J. L. (2004). Implementação de um Sistema de Controle Inteligente Utilizando a Lógica Fuzzy. in XI SIMPEP, Bauru, SP.
- Freitas, Victor Carvalho Galvão de et al. (2014). Plataforma Arduino no Controle de Velocidades de *PIGs*, I Simpósio de Automação e Sistemas, Natal, RN.
- Gesteira, L. G. G. K. (2014). Sistema de Aquisição de Dados Baseado em Labview para um Dinamômetro de Chasi. Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Dissertação de mestrado.
- Lima, G. F.; Freitas, V. C. G.; Salazar, A. O.; Maitelli, A. L. and Fontes, F. A. O. (2014). Proposta de Controle de Velocidade Para *PIGs* Instrumentados Utilizando a Plataforma Arduino. in VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG.
- Nguyen, T. T.; Yoo, H. R.; Rho, Y. W. and Kim, S. B. (2001). Speed Control of *PIG* Using Bypass Flow in Natural Gas Pipeline. in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Pusan, Korea, pp. 863 –868.
- NI (2013). User Guide and Specifications - NI USB-6008/6009. National Instruments, Manual do usuário.
- Pereira, C. G.; Lima, G. F.; Oliveira, R. R. G.; Salazar, A. O.; Maitelli, A. L. and Fontes, F. A. O. (2013). Proposta de Tecnologia para Controle de Velocidade de *PIGs* Instrumentados. in INTERCON 2013, Trujillo, Perú.
- Silva, T. H. G. (2013). Análise da Mecânica Respiratória de Traqueas Isoladas de Ratos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Dissertação de mestrado.
- Simões, M. G. and Shaw, I. S. (1999). Controle e Modelagem Fuzzy, 1ª ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP.
- Sutherland, J. and Paz, H. (2000). Advances in In-line Inspection Technology for Pipeline Integrity, em ‘V Annual International Pipeline Congress’, Morelia, México.
- Vale, M. R. B. G. (2007). Análise Comparativa do Desempenho de um Controlador Fuzzy Acoplado a um PID Neural Sintonizado por um Algoritmo Genético com Controladores Inteligentes Convencionais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Dissertação de mestrado.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, Vol. 8, pp. 338 – 354.