

## PROPOSTA PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DE PIG'S UTILIZANDO A PLACA ARDUINO

Gustavo Fernandes de Lima<sup>1</sup>, Victor Carvalho Galvão de Freitas<sup>2</sup>,  
Ralyson Rayala Gonçalves de Oliveira<sup>3</sup>, Andrés Ortiz Salazar<sup>4</sup>,  
André Laurindo Maitelli<sup>5</sup>, Francisco de Assis Oliveira Fontes<sup>6</sup>

Copyright 2014, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014**, realizado no período de 15 a 18 de setembro de 2014, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014*.

---

### Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de um sistema de controle de velocidade para PIGs instrumentados utilizando uma heurística de controle baseada na modulação PWM. São descritos os componentes de uma bancada de testes montada para a simulação de situações de “tiro” sofridas por PIGs em dutos de transporte de gás, a estratégia de controle utilizada e os resultados de experimentos realizados na bancada. Os resultados obtidos indicam que é possível realizar o controle de velocidade de um PIG por meio do controle de abertura e fechamento de uma válvula *by-pass* que foi desenvolvida especificamente para este fim.

### Abstract

This paper presents a proposal of a speed control system for smart PIGs using a control heuristic based on PWM modulation. The components of a test bench constructed to simulate speed excursions situations of PIGs in transportation ducts, the control strategy used and the results of experiments carried out on the bench are presented. The results indicate that it is possible to control the speed of a PIG by controlling the opening and closing of a by-pass valve developed specifically for this purpose.

### 1. Introdução

Os dutos de transporte de petróleo e seus derivados frequentemente sofrem com o acúmulo, em suas paredes internas, de parafina e outros compostos presentes naturalmente no produto transportado. Esse acúmulo de material é capaz de reduzir significativamente a capacidade de vazão de um duto. Além disso, a interação desses compostos com o duto pode causar desgaste e corrosão de suas paredes, causando até mesmo o seu rompimento nas áreas mais afetadas. Nesses casos, uma ferramenta conhecida como PIG (do inglês, *Pipeline Inspection Gauge*) pode ser utilizada com o objetivo de desobstruir a tubulação (PIGs de limpeza) ou realizar uma inspeção da integridade interna da mesma (PIGs instrumentados). O PIG é um dispositivo de formato cilíndrico projetado, em geral, de forma que sua impulsão seja causada pela diferença de pressão a que está submetido ao longo do duto. As figuras a seguir apresentam exemplos dos dois tipos de PIG mencionados.

---

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Elétrica e de Computação – UFRN

<sup>2</sup> Mestrando em Ciência e Engenharia de Petróleo – UFRN

<sup>3</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica – UFRN

<sup>4,5</sup> Doutor, Professor do Departamento de Engenharia de Computação e Automação – UFRN

<sup>6</sup> Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica – UFRN



Figura 1. PIG instrumentado. (Fonte: <http://www.gaznat.ch/>)



Figura 2. PIG de limpeza. (Fonte: <http://www.smartpigs.net/pigging-products.html>)

Um PIG instrumentado, ou *Smart PIG*, é dotado de sensores capazes de detectar defeitos nas paredes do duto tais como trincas, corrosão e amassamentos. No entanto, para o funcionamento adequado desses sensores, é necessário que a velocidade do mesmo durante seu deslocamento no duto seja mantida em determinados valores (em geral entre 1 m/s e 5m/s). Portanto, o controle de velocidade de PIGs instrumentados é objetivo de pesquisa em muitas instituições, pois possui grande importância na indústria de petróleo e gás.

Na ocorrência de uma obstrução presente no duto causada por sujeira, o PIG tem seu deslocamento impedido e sua pressão a montante aumenta até que seja suficiente para vencer o obstáculo. Nesse momento no qual o PIG volta a se deslocar, ocorre um aumento súbito em sua velocidade, até valores bem acima do adequado para seu correto funcionamento. A esse pico de velocidade, chamamos “tiro” e o foco principal do sistema apresentado é controlar o PIG para que, na ocorrência do “tiro”, a velocidade seja rapidamente minimizada e restabelecida para os valores adequados.

A diferença de pressão entre montante e jusante do PIG é regulada por meio de uma válvula *by-pass* desenvolvida neste trabalho. Como a velocidade do PIG é proporcional à diferença de pressão, é possível realizar o controle da velocidade pelo controle da diferença de pressão. A utilização desse tipo de válvula no controle de velocidade de PIGs tem sido objetivo de diversos trabalhos de pesquisa e ela vem sendo aplicada industrialmente com relativo sucesso.

Foi desenvolvida uma heurística de controle baseada no comportamento da modulação PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) e para a sua implementação é utilizado o Arduino, responsável também pela aquisição das informações provenientes da bancada de testes e por comandar o acionamento da válvula desenvolvida.

## 2. Ferramentas Utilizadas

Foi construída uma bancada de testes para a simulação de situações de “tiro” em PIGs que conta com um duto fabricado com aço galvanizado, com diâmetro de 4” e aproximadamente 2 metros de comprimento. Nesse duto, foram instaladas a válvula *by-pass*,  $V_{BP}$ , e uma válvula “de tiro”,  $V_T$ . Na Fig. 3 é possível visualizar a posição de  $V_{BP}$ , instalada num flange no centro do duto, e  $V_T$  instalada na extremidade. Em cada lado (jusante e montante) de  $V_{BP}$  foi instalado um manômetro junto com um transdutor de pressão.



Figura 3. Bancada de testes.

A válvula by-pass desenvolvida neste trabalho é um componente mecânico capaz de controlar a pressão do lado jusante do PIG, sendo assim capaz de controlar a diferença de pressão que incide no mesmo. Ela foi projetada de forma que a pressão presente no próprio duto, a montante do PIG, seja utilizada para permitir sua abertura. A Figura 4 apresenta um desenho de  $V_{BP}$ . É possível visualizar o orifício que permite o fluxo e o pistão que possibilita a abertura e fechamento desse orifício. O acionamento do pistão é realizado por uma válvula solenóide.

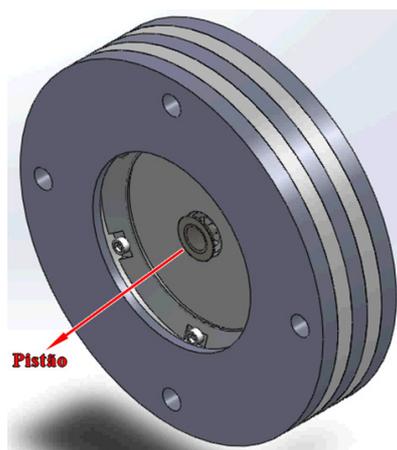


Figura 4. Válvula by-pass instalada no flange.

A válvula solenóide é utilizada para controlar a pressão responsável por movimentar o pistão da válvula by-pass. Quando o solenóide é energizado, a pressão incide sobre o pistão e desloca-o, deixando aberto o orifício e permitindo a vazão. Já quando a energia do solenóide é cortada, não incide pressão sobre o pistão e ele retorna à sua posição original graças à ação da mola de retorno, fechando assim o orifício.

Essa válvula solenóide é um componente eletromecânico do tipo 3 vias e 2 posições, retorno por mola e normal fechada ou NC (*Normal Closed*). A condição NC assegura o fechamento da válvula numa situação de falha elétrica, o que favorece o movimento do PIG numa situação de “tiro”. A Tabela 1 apresenta algumas características da válvula solenóide mencionada.

Tabela 1. Características da Válvula Solenóide	
Característica	Valor
Tensão	12 V <sub>DC</sub>
Corrente	400 mA
Freq. de chaveamento	5 Hz
Tempo de resposta	0,05 s

Os transdutores de pressão adotados são da marca Ashcroft, modelo A2X. Eles fornecem uma saída de tensão entre 0 e 5 V aproximadamente e o *range* de pressão é de 0 a 1000 psi.

Os valores de pressão provenientes dos transdutores são exibidos de forma gráfica em um computador por meio de ferramentas disponíveis no Matlab. O responsável pela interface entre computador e bancada de testes, bem como pela implementação da estratégia de controle e pelo acionamento do atuador (válvula by-pass) é o Arduino. A Figura 5 ilustra o esquema de comunicação adotado.

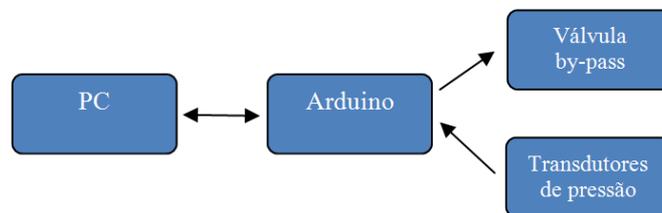


Figura 5. Diagrama de Blocos Ilustrando o Esquema de Comunicação.

O Arduino é um dispositivo eletrônico que conta com um conjunto de entradas e saídas analógicas e digitais e um microcontrolador. O modelo escolhido foi o Arduino UNO (Figura 6), devido principalmente ao seu baixo custo e sua facilidade de programação. A comunicação entre o PC e o Arduino é realizada via porta serial por meio de um cabo USB.



Figura 6. Arduino UNO.

Por causa da corrente máxima fornecida pela porta digital do Arduino ser de 50 mA, insuficiente para os 400 mA requeridos para acionamento do solenoide, foi necessário o uso de um circuito adicional. Esse circuito possui um transistor Darlington TIP 122 que suporta uma corrente CC máxima de 5 A, um diodo de “roda livre” para proteção do transistor contra altas tensões reversas e um *led* (*L*) para indicação visual do acionamento da solenoide. O esquema elétrico é apresentado na Figura 7. O símbolo de um relé foi adotado para representar a bobina da válvula solenoide (RL). O acionamento de RL ocorre na presença de corrente na base do transistor, resultando na passagem de corrente entre coletor e emissor e no acendimento do *led*.

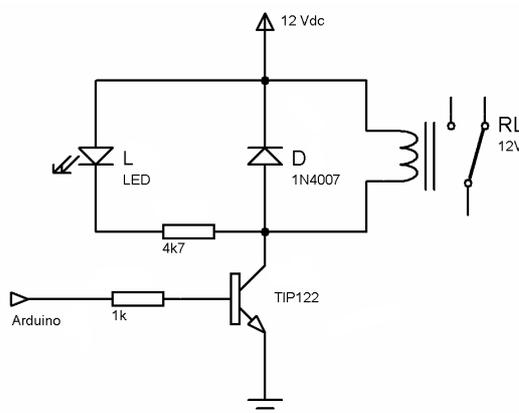


Figura 7. Circuito Elétrico para Acionamento do Solenoide.

### 3. Estratégia de Controle

O objetivo do sistema de controle é evitar ou minimizar a ocorrência do “tiro”, que ocorre no caso do surgimento de uma grande diferença de pressão. Portanto, esse alto  $\Delta P$  deve ser minimizado o mais rápido possível. O erro do sistema é definido como a diferença entre o  $\Delta P$  medido e o  $\Delta P$  desejado.

A estratégia adotada consiste em realizar um controle “ON/OFF” da válvula by-pass, de modo a se obter uma espécie de modulação da saída. A ideia é similar à modulação PWM, na qual o valor médio do sinal depende de quanto tempo o sinal permanece no estado ligado.

Em função dos valores de diferença de pressão medidos em relação à diferença de pressão estabelecida como referência ( $\Delta P_{REF}$ ), o controlador aciona a abertura/fechamento da válvula, de modo que quanto maior o erro, maior deve ser o tempo que a válvula by-pass permanece aberta num período. Foram definidas algumas faixas de diferença de pressão e os correspondentes valores percentuais, em relação ao tempo total de um período, em que a válvula permanece aberta, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Relação entre Diferença de Pressão e Abertura da Válvula By-pass.

$\Delta P$ (psi)	Abertura de $V_{BP}$ (%)
$\Delta P > 1,5 \Delta P_{REF}$	100
$1,2 \Delta P_{REF} < \Delta P < 1,5 \Delta P_{REF}$	50
$1,1 \Delta P_{REF} < \Delta P < 1,2 \Delta P_{REF}$	20
$\Delta P_{REF} < \Delta P < 1,1 \Delta P_{REF}$	10
$\Delta P < \Delta P_{REF}$	0

### 4. Procedimento Experimental

O objetivo do procedimento experimental adotado é simular a ocorrência do “tiro” em PIGs utilizando a bancada de testes. A maneira como foi feita essa simulação é a seguinte: (1) pressurização dos lados montante e jusante, de forma que exista uma pequena diferença de pressão entre os mesmos, simulando inicialmente o movimento normal do PIG; (2) uma rápida abertura da válvula de tiro  $V_T$  (feita manualmente por um operador), para descompressão do lado jusante. Essa abertura abrupta gera uma grande diferença de pressão, simulando a situação que causa o “tiro” em uma tubulação.

A pressurização do duto da bancada de testes é proporcionada por um compressor que é acoplado a um regulador de pressão. Dessa forma, a pressão a montante tende a permanecer constante quando a válvula by-pass é fechada. Na Figura 8, é apresentada uma representação do duto da bancada de testes.

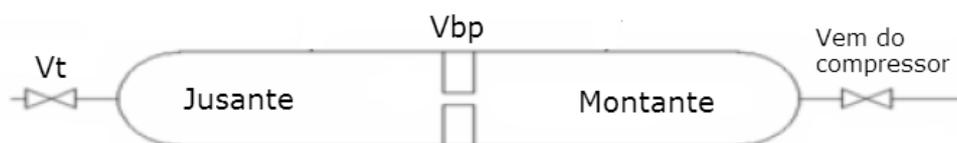


Figura 8. Representação do duto da bancada de testes.

Nos ensaios realizados, a pressão a montante foi inicialmente regulada para ficar próxima de 50 psi e a referência do controlador, a diferença de pressão, foi estabelecida em 10 psi.

Os dados adquiridos, as pressões provenientes dos transdutores, foram utilizados para o cálculo da diferença de pressão entre montante e jusante da válvula by-pass ( $V_{BP}$ ). Esta informação é utilizada pelo controlador para determinar a abertura ou fechamento desta válvula.

### 5. Resultados

Os primeiros resultados obtidos são apresentados nos gráficos das Figuras 9 e 10. Na Figura 9 é possível visualizar as pressões a montante (azul) e jusante (vermelho) com valores bem próximos, implicando em um diferencial de pressão próximo de zero. Isso representa uma baixa velocidade do PIG dentro da tubulação. Após o tempo de 15

segundos, a válvula de tiro ( $V_T$ ) foi aberta para simular a situação de “tiro”. A estratégia de controle implementada permitiu que a ação do “tiro” tivesse seu tempo de duração minimizada, fazendo o diferencial de pressão cair rapidamente para valores próximos ao da referência predefinida. Ainda na Figura 9, foi observado que entre 20 e 25 segundos o valor do diferencial de pressão permaneceu próximo do limite de  $1,5 \Delta P_{REF}$ . Tal situação motivou a realização de um segundo ensaio experimental na tentativa de melhorar o resultado obtido até então.

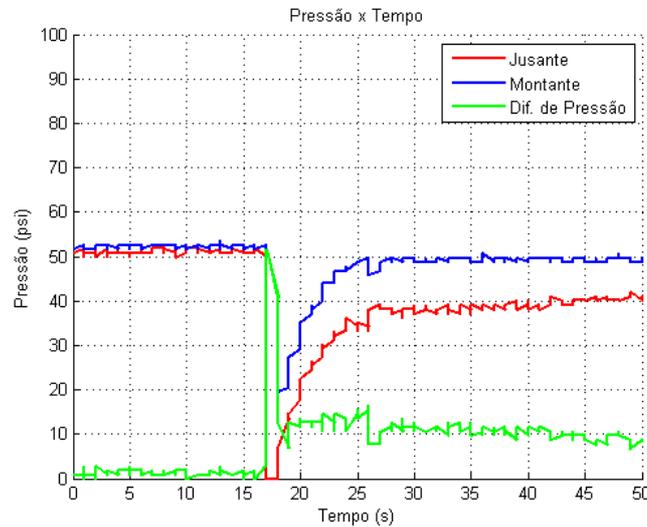


Figura 9. Resultado do Primeiro Ensaio Experimental Realizado.

Na busca por um diferencial de pressão mais próximo da referência foram realizados alguns ajustes nos valores de abertura da válvula by-pass. Tais ajustes permitiram obter a Figura 10, onde é mostrado um diferencial de pressão bem mais próximo da referência. Os valores utilizados neste segundo ensaio foram apresentados na Tabela 2 da pág. 5.

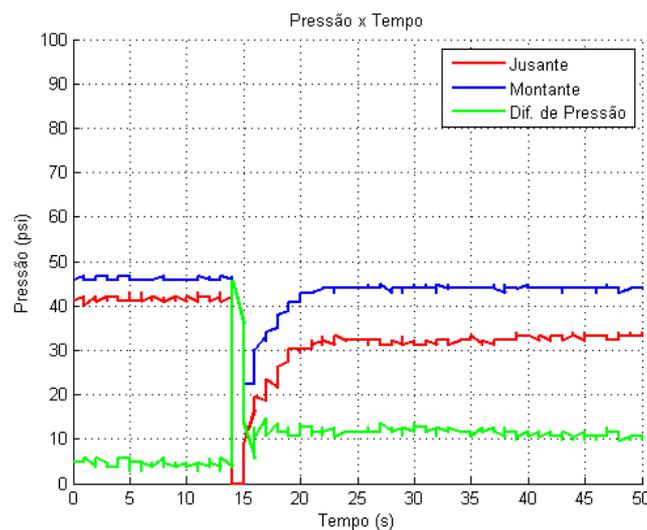


Figura 10. Resultado do Segundo Ensaio Experimental Realizado.

Assim reforçando, pelos gráficos apresentados nas Figuras 9 e 10, é possível observar um aumento abrupto do diferencial de pressão, provocada pela abertura manual da válvula de tiro ( $V_T$ ). Nesse instante, o controlador buscou minimizar os efeitos do fenômeno “tiro” que aplico ao PIG provoca uma alta velocidade do mesmo, o que é inseguro nas operação de inspeção de dutos. Nota-se que o controlador foi capaz de reduzir a diferença de pressão em pouco tempo e então ajustá-la para a diferença estabelecida como referência.

## 6. Conclusão

A bancada de testes montada é capaz de simular as situações de “tiro” propostas, por meio da utilização de uma válvula de tiro ( $V_T$ ) operada manualmente, como também pelo uso da válvula by-pass instalada num flange e que controla a diferença de pressão aplicada ao PIG. A abertura abrupta da válvula ( $V_T$ ) causa uma grande diferença de pressão entre montante e jusante do PIG, situação equivalente a que ocorre na prática.

A utilização do Arduino para realizar a aquisição de dados provenientes dos sensores, a implementação do algoritmo de controle, a comunicação com o computador suficiente para realizar os testes pretendidos. Embora algumas limitações do Arduino, como a impossibilidade de ler valores analógicos negativos, sejam características indesejadas para alguns sistemas, ele mostrou-se uma alternativa razoável principalmente devido à facilidade de programação e ao baixo custo.

A válvula by-pass desenvolvida utiliza-se de energia já presente no próprio sistema para atuar sobre o mesmo, o que é uma característica bastante positiva. Vale ressaltar que essa energia é proveniente da pressão do próprio duto. Desse modo, para o atuador foi possível utilizar uma solenóide com potência relativamente baixa, 4,8 W.

Considerando os resultados obtidos, é possível concluir que o sistema proposto é capaz de realizar o controle de velocidade de um PIG de modo a minimizar o “tiro” por meio do controle da diferença de pressão atuante sobre o mesmo. Posteriormente, pretende-se utilizar a técnica de controle inteligente conhecida como lógica *fuzzy* e realizar o controle nas situações mais gerais e não somente de modo a evitar o “tiro”.

## 7. Referências

Beuker, Thomas. “Addressing Challenging Environments – Advanced In-Line Inspection Solutions for Gas Pipelines”.

Guibin, Tan et al. “Research on Bypass-valve and its Resistance Characteristic of Speed Regulating PIG in Gas Pipeline”. 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation.

Yardi, Chaitanya. “Design of Regulated Velocity Flow Assurance Device for The Petroleum Industry”. 2004.