

## PROPOSTA DE CONTROLE DE VELOCIDADE PARA PIGs INSTRUMENTADOS UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO

Gustavo Fernandes de Lima, [gustavoflima@msn.com](mailto:gustavoflima@msn.com)<sup>1</sup>  
Victor Carvalho Galvão de Freitas, [victorc.galvao@gmail.com](mailto:victorc.galvao@gmail.com)<sup>1</sup>  
Andrés Ortiz Salazar, [andres@dca.ufrn.br](mailto:andres@dca.ufrn.br)<sup>1</sup>  
André Laurindo Maitelli, [maitelli@dca.ufrn.br](mailto:maitelli@dca.ufrn.br)<sup>2</sup>  
Francisco de Assis Oliveira Fontes, [franciscofontes@uol.com.br](mailto:franciscofontes@uol.com.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CEP 590720-970, Natal, RN.

<sup>2</sup>Laboratório de Automação em Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CEP 590720-970, Natal, RN.

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CEP 590720-970, Natal, RN.

**Resumo:** A utilização de PIGs instrumentados na operação de inspeção de dutos na busca de defeitos tais como corrosão, trincas e amassamentos é de melhor qualidade quando essas ferramentas mantêm uma velocidade baixa, uma vez que seus sensores podem captar mais pontos de descontinuidade. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta de controle de velocidade para esses PIGs, por meio do controle do diferencial de pressão atuante neles. Uma válvula by-pass, acionada por solenóide e desenvolvida neste trabalho, possui a capacidade de controlar esse diferencial, consequentemente a velocidade desses PIGs. Uma bancada de testes, em escala reduzida, foi montada para simular situações de "tiro" em PIGs, bem como permitir uma melhor compreensão das pressões atuantes na válvula by-pass. A plataforma Arduino foi empregada para aquisição de pressões a montante e a jusante da válvula by-pass proposta. O Arduino, também, controlou os tempos de abertura e fechamento da válvula by-pass. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais, utilizando a bancada de testes, mostraram uma redução significativa no diferencial de pressão atuante no PIG com a válvula by-pass proposta. Como consequência, é esperada uma redução significativa na velocidade do PIG no duto.

**Palavras-chave:** Prototipagem, microcontrolador, inspeção de dutos, transdutor de pressão, válvula by-pass.

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte de petróleo e derivados por dutos, onde não é realizada manutenção periodicamente, está sujeito à problemas indesejados, tais como: (a) a incrustação ou formação de sedimentos, como a parafina, e a consequente redução da área útil desse duto; e (b) a corrosão ou desgaste da parede interna dessa tubulação, que pode culminar com seu rompimento e posterior vazamento do produto transportado.

Nas duas situações é possível utilizar uma ferramenta que tem por objetivo a desobstrução e/ou inspeção da integridade interna dessa tubulação, conhecida pelo nome de PIG. O termo PIG (do inglês, *Pipeline Inspection Gauge*), designa uma ferramenta de inspeção de dutos projetada para ser empurrada pela pressão do fluido dentro do duto (ver Fig. 1).

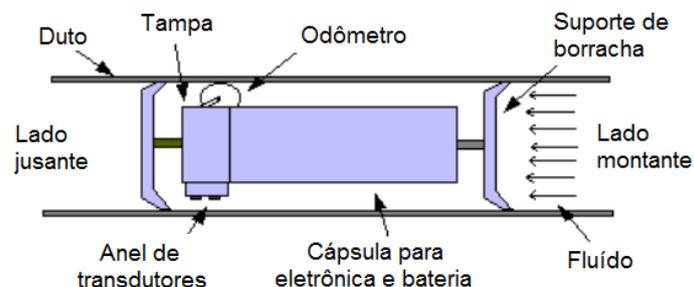


Figura 1: Exemplo de PIG Dentro do Duto.

O movimento do PIG dentro do duto é caracterizado pela incidência de uma pressão do lado montante. Esta pressão é de valor maior do que a pressão do lado jusante. Dessa forma, ocorre o surgimento de um diferencial de pressão capaz de empurrar o PIG pela tubulação. Esse diferencial de pressão é diretamente proporcional à velocidade alcançada pelo PIG,

então controlar o diferencial de pressão, significa controlar a velocidade desse *PIG*.

Os *PIGs* são classificados em "*Utility PIGs*" (*PIGs* de limpeza) ou "*Smart PIGs*" (*PIGs* instrumentados). Segundo Diaz (2008) os "*Utility PIGs*" realizam função de limpeza, separação de produtos, remoção de água e desamassamento dos dutos. Quando utilizados para remoção de detritos acumulados na parte inferior do duto permitem restaurar a seção reta original da tubulação. A Figura 2(a) apresenta um exemplo de *PIG* de limpeza disponível no mercado, o *PIG* disco.

De acordo com Diaz (2008) os "*Smart PIGs*" fornecem as informações das condições dos dutos, extensão e localização dos defeitos das tubulações. Um *PIG* instrumentado é constituído de uma cápsula apoiada por dois suportes de borracha. Ao redor dessa cápsula são instalados os sensores responsáveis por detectar discontinuidades no duto. E dentro da cápsula ficam os circuitos eletrônicos e as baterias do *PIG* instrumentado, conforme a Fig. 1 (ver página anterior).

Um exemplo de *PIG* instrumentado é o MFL (*Magnetic Flux Leakage*), como mostrado na Fig. 2(b), que funciona pela fuga de fluxo magnético. Uma fuga de fluxo magnético sempre ocorre quando o *PIG* passa por uma discontinuidade na parede interna da tubulação.

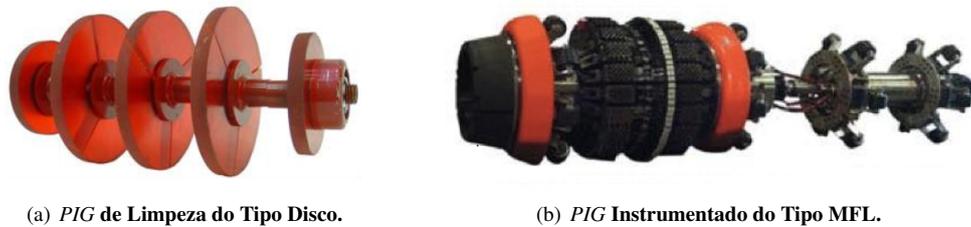


Figura 2: Tipos de *PIGs*.

Segundo Pereira *et al.* (2013) os *PIGs* instrumentados mais utilizados na indústria são o MFL e o Palito. Os dois possuem sensores que captam, na parede do duto, defeitos como: trincas, corrosão, soldas, defeitos de fabricação e amassamentos. Possuem ainda um preciso sistema de localização que registra a posição dos defeitos encontrados ao longo da operação. A operação de inspeção com esses *PIGs* é de melhor qualidade quando eles mantêm uma velocidade baixa, dessa forma, permitindo aos seus sensores captarem mais pontos de defeitos dentro do duto.

Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta para controlar o diferencial de pressão atuante nos *PIGs* instrumentados utilizando a plataforma Arduino. Ele é responsável pelo controle de abertura e fechamento de uma válvula *by-pass* desenvolvida com a finalidade de controlar esse diferencial de pressão. Por meio do controle do diferencial de pressão é possível controlar a aceleração do *PIG*, e conseqüentemente, sua velocidade dentro do duto, de maneira que a ela seja mantida numa faixa aceitável e segura.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Plataforma Arduino

Arduino, segundo Banzi *et al.* (2006), é uma plataforma de prototipagem eletrônica projetada para artistas, *designers*, *hobbyistas*, ou qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos. É uma pequena placa de circuito impresso cujas dimensões são 6,8 x 5,5 x 1,0 cm e seu projeto é baseado nas filosofias de *hardware* e *software* livres.

Neste trabalho, utilizou-se o modelo Arduino Uno pelas seguintes razões: possui conector USB tipo B para conexão com computador, conector jack 4 para alimentação externa, programação simples, preço baixo e fácil manuseio. A placa Arduino Uno conta com um microcontrolador ATmega328P (fabricado pela empresa Atmel), 14 entradas e saídas digitais, 6 entradas analógicas, 1 oscilador de cristal de 16 MHz e pinos de alimentação com 3,3 V, 5 V e Terra (0 V). Toda essa estrutura pode ser visualizada na Fig. 3, onde os principais blocos da placa foram identificados.

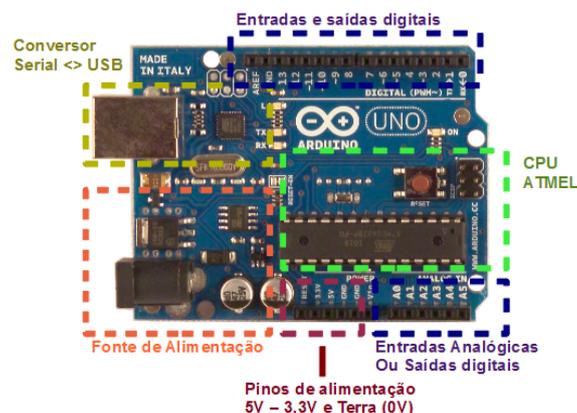


Figura 3: Blocos Identificados da Placa Arduino Uno.

O ATmega328P é um microcontrolador AVR 8 bits de baixa potência e arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computing*). Ele possui 28 pinos, 32 kB de memória Flash, 2 kB de memória RAM e 1 kB de EEPROM. E conta com um *bootloader*, que de acordo com Souza *et al.* (2011), dispensa o uso de programadores para o *chip*, facilitando ainda mais o seu uso uma vez que não exige compiladores ou *hardware* adicional.

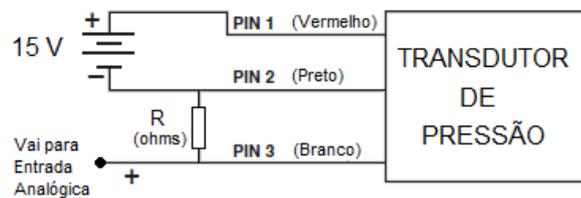
## 2.2 Transdutor de Pressão

O termo transdutor, conforme da 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). O transdutor deve responder somente a variações da forma de energia que se pretende medir, com a exclusão de outras.

No projeto, empregou-se dois transdutores, denominados PT01 e PT02, da marca Ashcroft e modelo A2X, como mostrados na Fig. 4(a) que medem pressões de 0 a 6.894,76 *kPa* (0 a 1.000 *psi*). Consultando-se o catálogo do fabricante, escolheu-se o esquema elétrico de ligação da Fig. 4(b) para utilização dos dois transdutores. Dessa forma, energizou-se os dois transdutores com tensão de 15  $V_{DC}$  e obteve-se dois sinais de saída com valores entre 0 e 5  $V_{DC}$ . Estes sinais são compatíveis com as entradas analógicas da placa Arduino, o que permitiu a conexão direta das saídas dos transdutores até as entradas analógicas. Em outras palavras, não foi necessário realizar condicionamento de sinal.



(a) Imagem do Transdutor.



(b) Esquema Elétrico de Ligação do Transdutor.

Figura 4: Transdutor de pressão.

Para o teste de calibração dos dois transdutores aplicou-se pressões de 0 a 3.100 *kPa* (0 a 450 *psi*), com o objetivo de determinar os valores de tensão nas suas saídas. Os principais valores da calibração realizada nos transdutores podem ser visualizados na Tab. 1.

Tabela 1: Valores obtidos no teste de calibração do transdutores de pressão.

Pressão ( <i>psi</i> )	20	40	60	80	...	350	400	450	Resistência
Pressão ( <i>kPa</i> )	137,80	275,60	413,40	551,20	...	2.411,50	2.756,00	3.100,50	( <i>ohms</i> )
PT-01( <i>volts</i> )	0,103	0,2047	0,301	0,402	...	1,745	2,010	2,255	470
PT-02( <i>volts</i> )	0	0,092	0,194	0,291	...	1,646	1,900	2,150	570

As tensões elétricas produzidas pelos transdutores PT-01 e PT-02 foram lidas pelo Arduino em suas entradas analógicas A0 e A1, respectivamente. Para transformar a tensão recebida em seu respectivo valor de pressão empregou-se o método de linearização utilizando os pontos da Tab. 1. Para isso, utilizou-se o comando *cftool* do *software* Matlab™ e como resultado obteve-se as Eqs. (1) e (2).

$$pt_{01}(v_1) = 199,9 \cdot v_1 - 0,5472 \text{ (em } \textit{psi}) \quad (1)$$

$$pt_{02}(v_2) = 199,4 \cdot v_2 - 21,09 \text{ (em } \textit{psi}) \quad (2)$$

Depois, implementou-se essas expressões no Arduino para obtenção dos valores de pressão dos dois transdutores, inicialmente na unidade *psi*, mas que foram convertido em *kPa* na sequência do código.

## 2.3 Válvula By-pass

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 o diferencial de pressão que incide no *PIG* instrumentado. A Figura 5 apresenta um esquema em corte da válvula *by-pass* proposta. É possível visualizar a passagem principal de fluxo e o pistão que controla a abertura e fechamento dessa passagem principal. O acionamento do pistão é realizado por uma válvula solenóide.

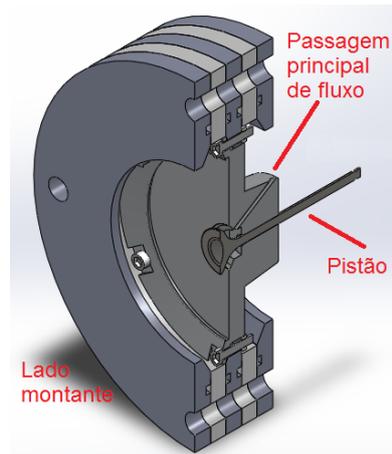


Figura 5: Válvula By-pass em Corte.

Construiu-se a válvula *by-pass* de maneira a aproveitar uma pequena parte de pressão do próprio duto (lado montante da válvula) para o acionamento do pistão. Quando a válvula solenóide é energizada, a pressão chega até a parte traseira do pistão, movendo-o para frente e abrindo a passagem principal de fluxo. E quando a energia da solenóide é cortada, a pressão não chega mais à parte traseira do pistão, fazendo-o retornar para sua posição inicial, pela ação de uma mola, e com isso fechando a passagem principal de fluxo.

O regime de escoamento através do orifício de descarga da válvula *by-pass* durante o controle de velocidade do *PIG* pode ser obtida a partir do Coeficiente de Vazão ( $C_v$ ) dessa válvula, conforme a Eq. (3):

$$C_v = \frac{47,2 \cdot Q}{\sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2) \cdot \rho}} \quad (3)$$

onde:  $C_v$  é o coeficiente de vazão para válvula,  $\rho$  é a densidade relativa do gás em relação ao ar,  $Q$  é a vazão,  $\Delta P$  é a diferença de pressão ou perda de carga,  $P_1$  é a pressão a montante da restrição, e  $P_2$  pressão a jusante da restrição.

Agora, isolando a vazão  $Q$  na Eq. (3) obtém-se a Eq. (4):

$$Q = \frac{C_v \cdot \sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2) \cdot \rho}}{47,2} = 0,0212 \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2) \cdot \rho} \quad (4)$$

Sabe-se que a vazão de um fluido em uma tubulação é dada pela Eq. (5):

$$Q = V \cdot A \quad (5)$$

onde:  $Q$  é a vazão do fluido,  $V$  é a velocidade do fluido, e  $A$  é a área da tubulação.

Dessa forma, pode-se substituir a Eq. (5) na Eq. (4) para se obter uma relação entre diferença de pressão  $\Delta P$  e velocidade do fluido  $V$ , conforme Eq. (6):

$$V \cdot A = 0,0212 \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2) \cdot \rho} \quad (6)$$

Por fim, considerando-se que a velocidade do *PIG* é a mesma velocidade do fluido (quando a válvula estiver fechada), então pode-se expressar a velocidade do *PIG* pela Eq. (7):

$$V_{PIG} = \frac{0,0212 \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2) \cdot \rho}}{A} \Rightarrow V_{PIG} = f(\Delta P, P) \quad (7)$$

Então, pode-se dizer que existe uma relação entre o diferencial de pressão aplicado ao *PIG* e a velocidade alcançada pelo mesmo, conforme demonstração apresentada acima.

## 2.4 Válvula Solenóide

A válvula solenóide, utilizada no projeto da válvula *by-pass*, foi empregada para controlar a pressão que aciona o movimento do pistão. É um componente eletromecânico do tipo 3 vias e 2 posições com acionamento por solenóide, retorno por mola e normal fechada ou NF, conforme Fig. 6(a). A condição NF garante o fechamento da válvula *by-pass* num momento de falta de energia ou pane eletrônica e a certeza do movimento do *PIG* numa situação de "tiro".

Alguns dados elétricos desta válvula são: tensão de  $12 V_{DC}$ , corrente elétrica de  $400 mA$ , potência de  $4,8 W$ , frequência de chaveamento de  $5 Hz$  e tempo de resposta de  $0,05 s$ . Por causa dessa corrente de  $400 mA$ , montou-se em *protoboard* um circuito externo ao Arduino, uma vez que, a máxima corrente fornecida por sua porta digital é de aproximadamente  $50 mA$ , insuficiente para acionar a solenóide diretamente pela placa Arduino.

Esse circuito externo teve como finalidade ligar e desligar a solenóide, que aciona o pistão da válvula proposta, comandado pela placa Arduino. Para isso, implementou-se um circuito com transistor na configuração de chave eletrônica,

conforme Fig. 6(b). Escolheu-se um Darlington TIP 122 NPN (Q1) pela razão dele suportar uma corrente contínua máxima de 5 A.

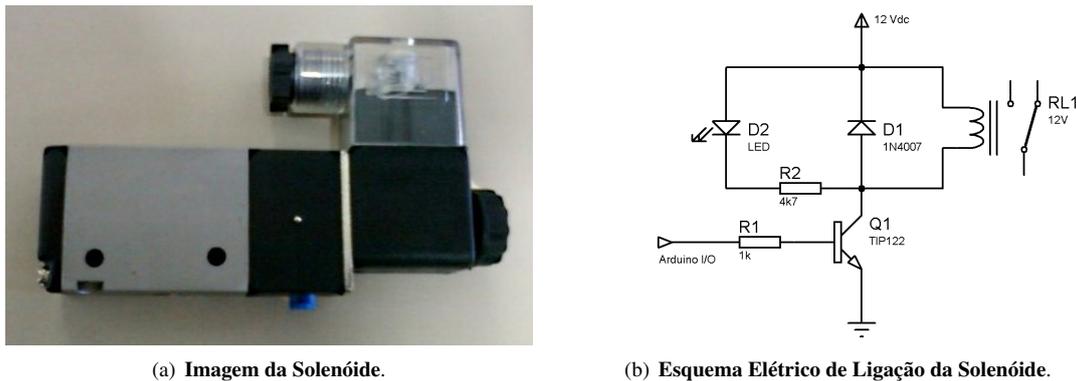


Figura 6: Válvula Solenóide.

Ainda na Fig. 6(b), representou-se a bobina da solenóide pelo símbolo de um relé (RL1). O acionamento de RL1 dá-se quando circula corrente pela base do transistor Q1, como resultado ocorre a passagem de corrente do coletor para o emissor, acionando RL1. Também, ocorre o acendimento do led (D2), para indicação visual do acionamento da solenóide. E por fim, protegeu-se o transistor Q1 contra altas tensões provocadas pela bobina da solenóide no instante de desenergização, com o uso do diodo de roda livre (D1).

## 2.5 Bancada de Testes

A bancada de testes é o sistema responsável por permitir a realização de simulação de "tiro" em PIGs. Construiu-se a bancada em aço galvanizado, com diâmetro de 100 mm (4"), aproximadamente 2 m de comprimento e localizada no anexo do LAMP (Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo). Na Figura 7 é possível visualizar a bancada de testes com seu principal componente em destaque, a válvula *by-pass* ao centro da tubulação. O lado montante da válvula *by-pass* proposta está à direita e o lado jusante, à esquerda. Em cada lado da válvula instalou-se um conjunto formado por manômetro e transdutor de pressão.

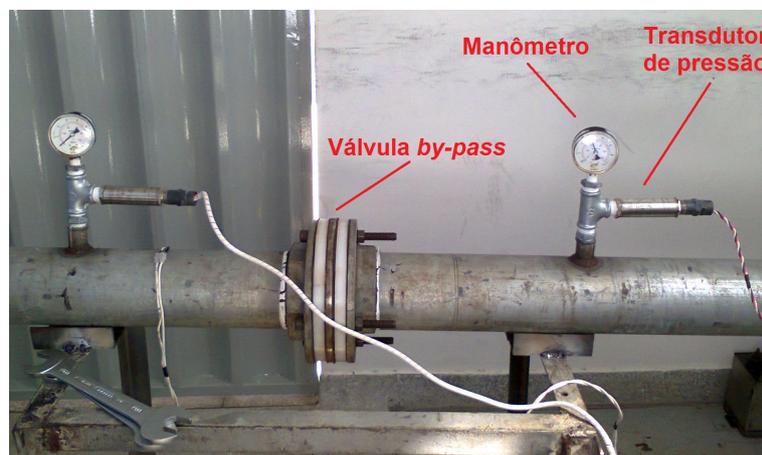


Figura 7: Bancada de Testes para Simulações de "Tiro" em PIGs.

## 2.6 Estratégia de Controle

A estratégia de controle implementada teve como objetivo obter uma espécie de modulação no sinal de acionamento da solenóide, dessa forma chaveando a válvula *by-pass*, que só abre ou fecha. A ideia é similar à modulação por largura de pulso, ou PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*), em que o valor médio do sinal modulado depende da duração dos pulsos.

Nos ensaios realizados, na bancada de testes, teve-se como propósito modular o funcionamento da válvula para manter o diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) em uma faixa predefinida. Nesses testes, definiu-se como faixa segura de operação para o PIG os valores entre 60 e 100 kPa.

Dessa forma o controle atuou de três formas diferentes. Quando o  $\Delta P$  ultrapassou 100 kPa a válvula foi comandada para abrir totalmente ou PWM de 100 %. Quando o  $\Delta P$  ficou entre 60 e 100 kPa a válvula foi modulada de forma a simular uma abertura parcialmente ou PWM de 50 %. E por fim, quando o  $\Delta P$  caiu abaixo de 60 kPa a válvula foi

fechada totalmente ou PWM de 0 %. A Tabela 2 apresenta a relação entre as faixas de valores de diferencial de pressão e valores médios de PWM.

Tabela 2: **Relação entre Diferencial de Pressão e PWM da Válvula.**

$\Delta P$ (kPa)	PWM Aplicado (%)
$\Delta P > 100$	100
$60 \leq \Delta P \leq 100$	50
$\Delta P < 60$	0

## 2.7 Metodologia Experimental

A metodologia empregada foi a de simular somente as situações de "tiro" em *PIGs*, utilizando a bancada de testes. Depois, coletar dados das pressões do lado montante e do lado jusante da válvula *by-pass*, para o cálculo do diferencial de pressão atuante na válvula. Em função do valor obtido, comandar a abertura ou fechamento da válvula *by-pass*, com o objetivo de manter esse diferencial dentro de uma faixa de valores predefinidos. Outras situações, como velocidade do *PIG* abaixo da referência, ficarão para trabalhos futuros.

Para a realização dos primeiros ensaios experimentais, com a bancada de testes, conectou-se todos os materiais descritos anteriormente em seu entorno. Primeiro, os sinais de tensão dos transdutores de pressão foram conectados nas entradas analógicas A0 e A1 do Arduino. E a saída da porta digital 09 do Arduino foi conectada ao resistor da base do transistor TIP 122, que aciona a válvula solenóide, que por sua vez aciona a válvula *by-pass*, dentro do duto (ver Fig. 7). A Figura 8 ilustra todas as conexões elétricas feitas para a simulação somente de situações de "tiro" em *PIGs* na bancada de testes.

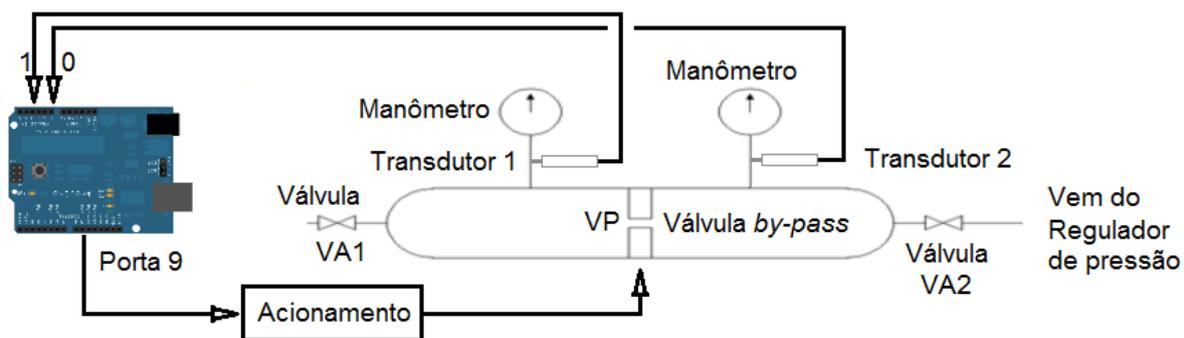


Figura 8: **Conexões Elétricas Realizadas no Entorno da Bancada de Testes.**

Em uma situação real, o momento que antecede o "tiro" é caracterizado pela parada do *PIG* dentro do duto por um motivo desconhecido. Quando isso acontece a pressão do lado jusante cai praticamente a zero, enquanto que a pressão do lado montante começa a crescer. Ela aumenta até o ponto de vencer a força de atrito que mantém o *PIG* parado no duto. Quando o atrito é vencido, tem-se um alto valor de diferencial de pressão, como resultado o *PIG* dispara sem controle dentro da tubulação e diz-se que ocorreu um "tiro".

Na prática o teste é feito em uma tubulação conhecida por *loop* de teste do *PIG*, onde a simulação do "tiro" é feita com a descarga abrupta de uma válvula de abertura rápida a jusante do mesmo. Desta forma se aumenta ou diminui a velocidade do *PIG* a partir da decompressão posicionada a jusante do mesmo.

Assim, na bancada de teste preliminar o *PIG* fica montado fixo num flange, simulando uma condição de forma semelhante ao do *loop* de teste. Desta forma, obtém-se uma queda de pressão através do *PIG* e proporcionando a atuação da válvula *by-pass* instalada nele, sendo acionada de acordo com a estratégia de controle implementada. Todo esse conjunto possibilita uma simulação da variação de velocidade de um *PIG* real. Os resultados obtidos, na bancada de testes, permitiram estimar o dimensional do orifício da válvula *by-pass* ou seja do seu coeficiente de vazão ( $C_v$ ). Resultados reais serão obtidos em testes a serem realizados em um *loop* para ensaio de *PIGs*.

Para simulação de "tiro" com a bancada de testes procedeu-se da seguinte maneira: pressurização da tubulação do lado montante e do lado jusante, com objetivo de produzir um diferencial de pressão diferente de zero, que simule o movimento do *PIG* dentro do duto; depois, abrir o registro esfera VA1 de forma manual (ver Fig. 8) para esvaziamento da tubulação do lado jusante da válvula *by-pass*. Esse rápido esvaziamento produziu um aumento rápido do diferencial de pressão, dessa forma simulando o "tiro" atuante no corpo do *PIG*. Por fim, o Arduino comandou a abertura da válvula *by-pass* buscando diminuir o diferencial de pressão no menor tempo possível, procurando assim alcançar uma faixa de valores aceitáveis, para uma movimentação segura do *PIG* dentro da tubulação.

Então, reforçando a idéia principal da metodologia apresentada aqui, tem-se que a válvula *by-pass* foi projetada para controlar o diferencial de pressão aplicado ao *PIG*, enquanto que o registro esfera identificado na Fig. 8 com VA1 de abertura manual e acionada por um operador serve para simular somente a situação de "tiro".

Para validar a bancada de testes e como primeiro ensaio experimental realizou-se uma aquisição de pressões com o objetivo de testar os manômetros. Assim, os registros esfera VA1 (jusante) e VA2 (montante) ficaram abertos 100%, enquanto que VP (válvula *by-pass*) permaneceu fechada. E ajustou-se o regulador de pressão em 310,05 *kPa* (45 *psi*).

A Figura 9 ilustra o resultado deste ensaio, nela observou-se a coerência das pressões, uma vez que, no lado montante (curva azul) a pressão aumentou até próximo de 310,05 *kPa* (45 *psi*). Enquanto que a pressão no lado jusante (curva vermelha) permaneceu em zero, praticamente durante todo o ensaio de 250 segundos. O registro VA1 aberto permitiu a medição da pressão atmosférica, que vale zero *kPa* (zero *psi*).

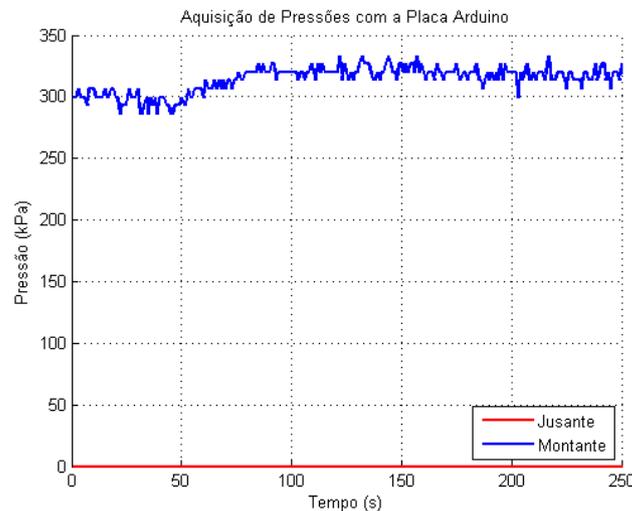


Figura 9: Ensaio com VA1 e VA2 Abertos 100% e VP Fechada.

Concluída a validação de pressões na bancada de testes passou-se aos testes com simulação de "tiro" em PIGs.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O segundo ensaio experimental objetivou a simulação da situação de "tiro". Para isso acontecer realizou-se a abertura de VA1 rapidamente, no tempo igual a 50 *s*, até o esvaziamento completo da câmara no lado jusante de VP. E quase simultaneamente, o Arduino comandou a abertura de VP, pela energização da válvula solenóide. Com VP aberta iniciou-se a recomposição de pressão no lado jusante até a pressão aproximada de 200 *kPa* (30 *psi*).

Após o tempo de 150 *s*, essa simulação de "tiro" repetiu-se e observou-se uma nova recuperação de pressão no lado jusante de VP, saindo de zero e subindo até 200 *kPa* (30 *psi*). A Figura 10 apresenta esses dois "tiros" num tempo total de 250 *s* de duração do ensaio.

Em termos de pressões no lado montante de VP observou-se que antes do primeiro "tiro" a pressão máxima alcançada foi de 286,35 *kPa* (41,56 *psi*) e a pressão mínima registrada após o "tiro" foi de 225,92 *kPa* (32,79 *psi*).

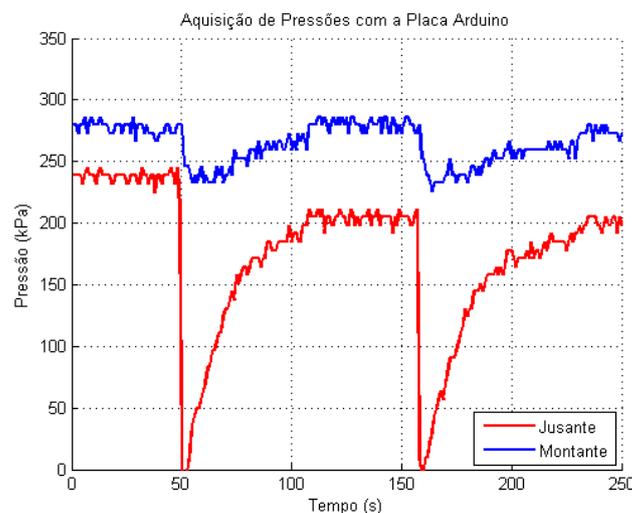


Figura 10: Ensaio com VA1 Aberto 100% Rapidamente, VA2 Aberto 100% e VP Controlada pelo Arduino.

Para um melhor entendimento desse segundo ensaio produziu-se mais um gráfico, o da curva de diferencial de pressão.

Este gráfico permitiu um melhor entendimento do que acontece com um *PIG* dentro da tubulação, uma vez que esse diferencial de pressão está diretamente relacionado com a velocidade alcançada pelo *PIG* instrumentado.

Como dito anteriormente, escolheu-se os valores entre 60 *kPa* (8,71 *psi*) e 100 *kPa* (14,51 *psi*) como sendo uma faixa aceitável de diferencial de pressão para o *PIG* movimentar-se pelo duto com segurança. Dessa forma quando o diferencial de pressão ultrapassou 100 *kPa* (14,51 *psi*) a VP foi aberta e quando o diferencial caiu abaixo de 60 *kPa* (8,71 *psi*) a VP foi fechada. E quando ficou no intervalo de 60 a 100 *kPa* (8,71 a 14,51 *psi*) a VP foi mantida de forma a simular uma abertura parcial de 50 %.

Na Figura 11 tem-se que o diferencial de pressão começou um pouco abaixo de 50 *kPa* (7,26 *psi*), representando o *PIG* em movimento. Por volta de 50 *s* abriu-se o registro VA1 e ocorreu um pico de pressão, representando o instante do "tiro". A rápida elevação do diferencial de pressão foi detectada pelo Arduino, que comandou a abertura de VP. Após a abertura de VP observou-se uma queda no diferencial de pressão. Até entrar na faixa de 60 e 100 *kPa* onde a VP ficou modulando para não deixar o diferencial cair para baixo de 60 *kPa*.

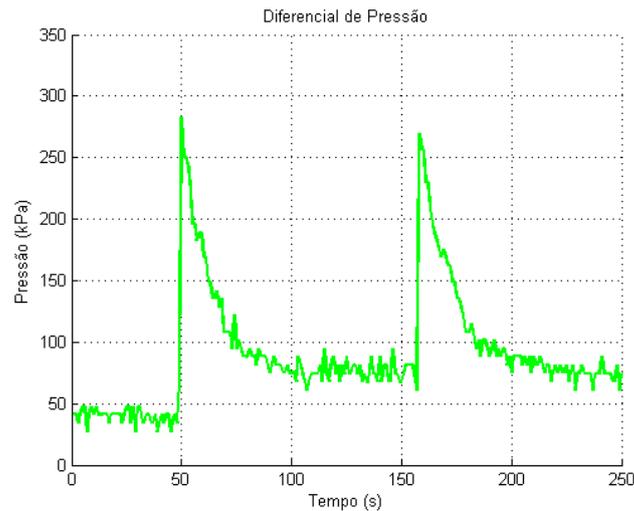


Figura 11: Diferencial de Pressão Obtido no Segundo Ensaio.

Depois de 150 segundos realizou-se mais uma abertura do registro VA1, representando outra situação de "tiro". Neste segundo "tiro", o Arduino comandou a abertura de VP quando detectou um diferencial de pressão maior do que 100 *kPa* (14,51 *psi*). Ao cair abaixo de 100 *kPa* (14,51 *psi*) a VP foi mantida em estado de modulação a 50 %. Nesse ensaio, o diferencial não caiu abaixo de 60 *kPa* (8,71 *psi*). Conseguiu-se após a realização dos dois "tiros" que o diferencial de pressão permanecesse numa faixa entre 60 e 100 *kPa* (8,71 e 14,51 *psi*).

Para visualização dessa faixa de valores, que foi predefinida no controle de abertura e fechamento da VP, redesenhou-se o gráfico da Fig. 11 com duas retas tracejadas sobre os valores de 60 e 100 *kPa*. Neste novo gráfico (ver Fig. 12) ficou fácil de visualizar a atuação do controle, que deixou o diferencial de pressão dentro da faixa predefinida.

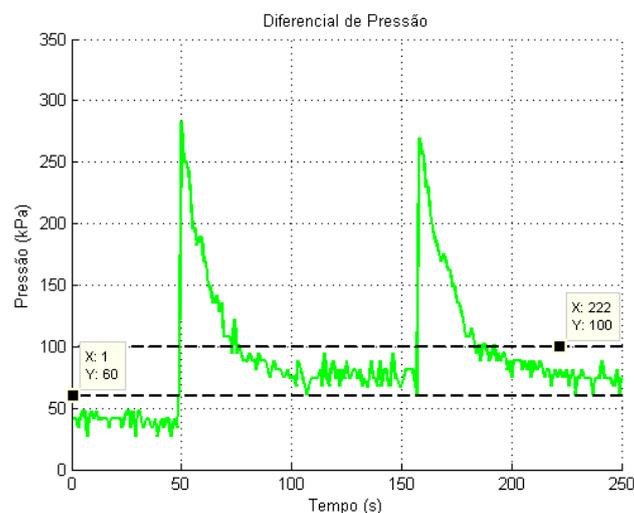


Figura 12: Faixa de Valores Predefinidos para Movimentação Segura do *PIG*.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma proposta para controlar a velocidade e principalmente minimizar os efeitos da situação chamada de "tiro", pelo controle do diferencial de pressão atuante em *PIGs* instrumentados, utilizando para isso uma válvula *by-pass*. Essa válvula foi desenvolvida para regular o fluxo de pressão pelo corpo do *PIG*, assim, controlando o diferencial de pressão pretende-se controlar a velocidade alcançada por essas ferramentas. Uma bancada de testes, em escala reduzida, foi construída para simulação somente de situações de "tiro" nesses *PIGs* e, também, permitir uma melhor compreensão do que acontece com as pressões a montante e a jusante da válvula *by-pass*. A plataforma Arduino foi empregada para realizar a aquisição de pressões nos lados montante e a jusante, como também, controlar os tempos de abertura e fechamento da válvula *by-pass*, de forma semelhante a uma sinal PWM. E com isso, obter um diferencial de pressão médio que mantenha a velocidade do *PIG* dentro de uma faixa aceitável de 2 a 5 m/s, sem prejuízo ou danos para os sensores da instrumentação de medição instalados nele.

Para continuação deste projeto planeja-se a implementação de um controle inteligente utilizando a lógica *Fuzzy* na placa Arduino. Espera-se com isso a obtenção de um diferencial de pressão em torno de uma referência predefinida e não mais numa faixa de valores predefinidos, como os mostrados neste artigo. A escolha pelo *Fuzzy* aconteceu pela dificuldade de se obter um modelo matemático que representasse bem o movimento do *PIG* dentro do duto, como também, pelas não-linearidades presentes no sistema. Assim, fica inviável o uso de outros tipos de controladores como PID, Preditivo, etc.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Banzi, M., Cuartielles, D., Igoe, T., Martino, G. and Mellis, D., 2006. "Arduino - homepage". Disponível em: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). Acesso em: 26 abr. 2013.
- da Silva, T.H.G., 2013. *Análise da Mecânica Respiratória de Traqueas Isoladas de Ratos*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Diaz, J.F.A., 2008. *Estudo e Projeto Conceitual de um Robô para Inspeção de Linhas de Serviço*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ.
- Pereira, C.G., de Oliveira, R.R.G., de Lima, G.F., Salazar, A.O., Maitelli, A.L. and Fontes, F.A.O., 2013. "Proposta de tecnologia para controle de velocidade de pigs instrumentados". *INTERCON 2013*.
- Souza, A.R., Paixão, A.C., Uzêda, D.D., Dias, M.A., Duarte, S. and de Amorim, H.S., 2011. "A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC". In *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Vol. 33, pp. 1702-1 – 1702-5.

#### 6. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

#### GLOSSÁRIO

EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (Memória Programável Somente para Leitura Apagável Eletricamente)
LAMP	Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo
MFL	Magnetic Flux Leakage (Fuga de Fluxo Magnético)
PID	Proporcional, Integrativo e Derivativo
PIG	Pipeline Inspection Gauge (Ferramenta de Inspeção de Dutos)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RAM	Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório)
RISC	Reduced Instruction Set Computing (Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções)

## PROPOSAL OF SPEED CONTROL FOR SMART PIGs USING THE ARDUINO PLATFORM

Gustavo Fernandes de Lima, [gustavoffima@msn.com](mailto:gustavoffima@msn.com)<sup>1</sup>

Victor Carvalho Galvão de Freitas, [victorc.galvao@gmail.com](mailto:victorc.galvao@gmail.com)<sup>1</sup>

Andrés Ortiz Salazar, [andres@dca.ufrn.br](mailto:andres@dca.ufrn.br)<sup>1</sup>

André Laurindo Maitelli, [maitelli@dca.ufrn.br](mailto:maitelli@dca.ufrn.br)<sup>2</sup>

Francisco de Assis Oliveira Fontes, [franciscofontes@uol.com.br](mailto:franciscofontes@uol.com.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo, Federal University of Rio Grande do Norte, zip code 590720-970, Natal, RN.

<sup>2</sup>Laboratório de Automação em Petróleo, Federal University of Rio Grande do Norte, zip code 590720-970, Natal, RN.

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Federal University of Rio Grande do Norte, zip code 590720-970, Natal, RN.

**Abstract:** *The use of smart PIGs in the pipeline inspection operation for defects search such as corrosion, cracks and dents is of better quality when these tools maintain a low speed, since their sensors can gather more points of discontinuity. This work aims to present a proposal for a speed control system for smart PIGs, by controlling the pressure differential acting on them. A by-pass valve, solenoid operated and developed in this work, has the ability to control this differential, hence the speed of these tools. A test bench, in reduced scale, was assembled to simulate only situations of PIG's peak speed as well as provide a better understanding of the pressures acting on the by-pass valve. The Arduino platform was used for acquisition of upstream and downstream pressures of the proposed valve. The Arduino also controlled the times of opening and closing the by-pass valve. The results obtained in the experimental tests, using the test bench, showed a significant reduction in pressure's differential active over the PIG with the proposed valve. Consequently, it is expected a significant reduction in the speed of PIG in the pipe.*

**Keywords:** *Prototyping, microcontroller, pipeline inspection, pressure transducer, by-pass valve.*