

# DINÂMICA E CONTROLE DE ATUADORES PNEUMÁTICOS INDUSTRIAIS

## DYNAMICS AND CONTROL OF INDUSTRIAL PNEUMATIC ACTUATORS

Data de entrega dos originais à redação em: 27/04/2017  
e recebido para diagramação em: 26/03/2019

Rhenan D. Morais<sup>1</sup> Dr. Dennis L. Toufen<sup>2</sup>  
Ms. Leandro Paschoalotto<sup>3</sup> Antonio Angelo de Souza Tartaglia<sup>4</sup>

No cenário industrial atual, processos manufaturados demandam cada vez mais precisão e velocidade nas soluções empregadas, tendo como parâmetros de exigência ganhos com custo e eficiência. Assim, aplicações utilizando atuadores pneumáticos se tornaram bastante comuns devido à sua velocidade e baixo custo, apresentando resultados satisfatórios desde que aplicada uma técnica de controle adequada. Este trabalho tem como objetivo implementar um controlador digital para um atuador pneumático proporcional a fim de utilizar uma técnica de controle que proporcione velocidade e precisão, comparando os resultados obtidos com a performance do mesmo atuador sob ação de um controlador analógico.

Palavras-chave: Controlador Pneumático. Sistema de Controle. Resposta em Frequência. Controlador Digital.

*In the current industrial scenario, manufacturing processes increasingly demand accuracy and speed in the used solutions, having as requirement parameters with cost and efficiency gains. So applications using pneumatic actuators have become quite common due to its speed and low cost with satisfactory results since it applied appropriate control technique. This work aims to implement a digital controller to a proportional pneumatic actuator in order to use a control technique that provides speed and accuracy by comparing the results obtained from the performance of the same actuator under the action of an analog controller.*

*Keywords: Pneumatic Controller. System Control. Frequency Response. Digital Controller.*

## 1 INTRODUÇÃO

Atuadores pneumáticos são largamente utilizados na industrial devido a sua robustez, baixo custo, segurança, limpeza e por apresentarem um alto fator de potência entregue em relação ao próprio peso.

No entanto os sistemas de manufatura modernos necessitam cada vez mais de posicionadores com controle de preciso de posição e alta velocidade, o que inviabiliza o uso de atuadores convencionais em muitas aplicações. Neste cenário os sistemas de pneumática proporcional são uma alternativa aos já classicamente empregados servoposicionadores.

Técnicas mais sofisticadas de controle estão se tornando mais populares graças ao advento dos controladores digitais. Nestes controladores as funções matemáticas que descrevem o controlador podem ser implantadas via software e, dessa forma, não tem impacto direto no custo do controlador.

As principais vantagens dos controlados digitais são (DORF, 2011):

- Melhor sensibilidade de medição;
- Sensibilidade reduzida ao sinal de ruído;
- Capacidade de reconfigurar facilmente o algoritmo de controle via software;
- Compatibilidade direta com outros dispositivos digitais e de comunicação.

Definir qual a arquitetura do controlador é um dos desafios do projeto de qualquer sistema de controle (OGATA, 2011). Uma estratégia para isso é conhecer a resposta em frequência do sistema.

A resposta em frequência de um determinado sistema é a relação entre as amplitudes das oscilações de entrada e de saída, bem como a diferença de fase destas oscilações para quando uma entrada senoidal é aplicada ao sistema. Esse método é particularmente adequado quando o projeto do controlador é realizado a partir de dados experimentais e, portanto, a função de transferência real do sistema é desconhecida (DORF, 2011).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do projeto, o objeto principal de estudos foi um posicionador pneumático industrial de 60 cm de curso (modelo DGPL-25-450-PPV-A-B-KF-GK-SV), visto na Figura 1, dotado de sensor de posição (modelo MPYE-5-1/4-010-B) e acionado por uma válvula proporcional (modelo MLO-POT-450-TLF).

Figura 1 – Atuador pneumático de dupla ação utilizado nos testes



1 - Tecnologia em Automação Industrial. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, Guarulhos, Brasil.

2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, Guarulhos, Brasil. < dennis@ifsp.edu.br >.

3 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, Campus do Jordão, Brasil.

4 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, Guarulhos, Brasil.

Durante a execução do projeto, foi utilizado como base de comparação com o controlador digital a ser implementado um controlador PID analógico fornecido pelo fabricante do posicionador.

Para a aquisição de dados foi utilizado um osciloscópio digital modelo Tektronix MDO3024 com taxa de aquisição de 2,5GS/s e profundidade de memória de 10M pontos.

A análise dos dados se deu utilizando o software Python (x,y) e as bibliotecas Numpy, Scipy e Matplotlib todos de acesso livre e que permitem operações matemáticas sofisticadas e aplicação de filtros digitais.

Uma vez que os instrumentos de pesquisas foram definidos, os processos do projeto se deram basicamente da seguinte maneira:

- Determinar experimentalmente a resposta em frequência do sistema composto por uma válvula proporcional e um posicionador pneumático industrial.
- A partir da resposta em frequência propor e implementar um controlador digital para o sistema em estudo.
- Comparar o comportamento do controlador digital implementado com o controlador analógico fornecido pelo fabricante do posicionador.

### 3 DESENVOLVIMENTO

A montagem do sistema utilizado durante os ensaios, visto esquematicamente na Figura 2, consiste em duas partes principais:

- Circuito pneumático, responsável pelo movimento do atuador (Figura 3);
- Circuito eletropneumático, responsável pelo controle do circuito pneumático através da válvula proporcional e aquisição de dados (Figura 4).

Todos os dados necessários para descrever o comportamento do sistema durante os ensaios são registrados pelo osciloscópio para análise posterior.

Figura 2 - Diagrama esquemático do sistema utilizado para levantar a resposta em frequência da planta

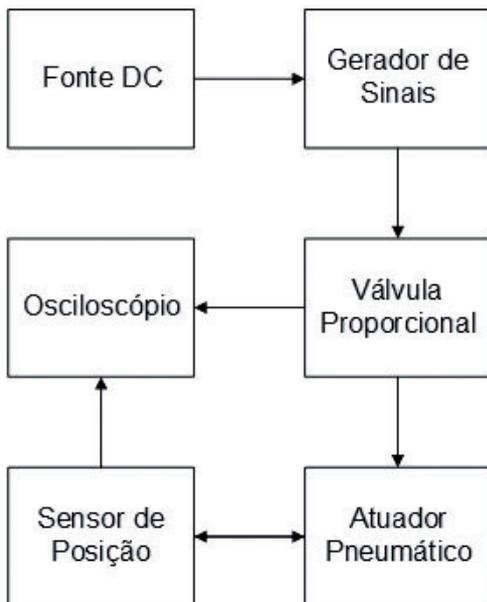
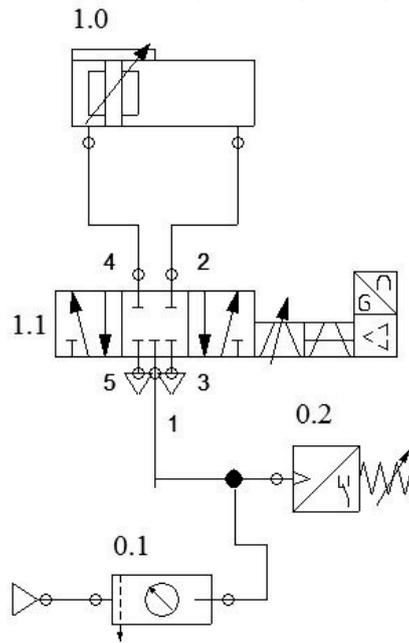


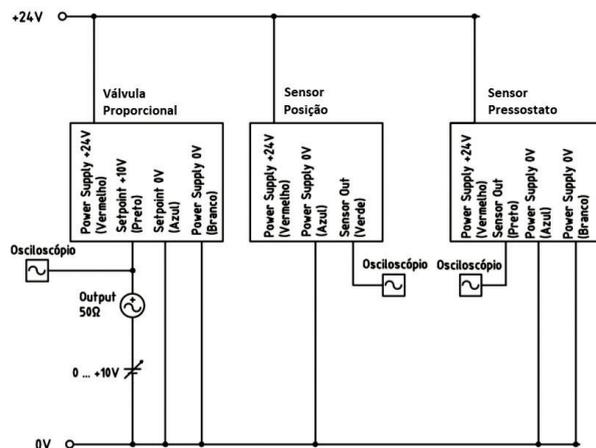
Figura 3 - Circuito Pneumático utilizado para levantar a resposta em frequência da planta



### 3.1 Resposta em Frequência

O termo “resposta em frequência” significa a resposta em regime estacionário de um sistema com entrada senoidal. Nos métodos de resposta em frequência, o método mais convencional disponível para análise e projeto de sistemas de controle, variamos a frequência do sinal de entrada em um certo intervalo e estudamos a resposta em frequência resultante (OGATA, 2011).

Figura 4 - Circuito Eletropneumático utilizado para levantar a resposta em frequência da planta



### 3.1.1 Levantando Resposta em Frequência

A fim de obter a resposta em frequência e o comportamento da planta utilizada, foi utilizado um gerador de sinais para variar um sinal de entrada e observar a resposta do posicionador, permitindo observar diretamente a variação de amplitude e de fase da posição do atuador em relação a excitação de entrada em diferentes frequências.

Os esquemas das figuras 2, 3 e 4 apresentam a configuração utilizada para obter as curvas de resposta em frequência da planta. Para gerar as curvas de resposta em frequência do sistema analisado, o primeiro passo é identificar, através de software, as frequências dos sinais registrados no ensaio.

No entanto, os sinais medidos podem apresentar inconsistências decorridas de ruídos no momento do registro de dados, para evitar ocasionais erros na análise, foi escrito um software em linguagem Python para aplicar um filtro digital ao sinal medido. Os sinais originais e filtrados podem ser comparados na figura 5. Após a aplicação do filtro nos sinais, é possível observar diretamente a variação de amplitude e de fase da posição do atuador em relação a excitação de entrada, representada na figura 6.

Figura 5 – Exemplo de sinais de entrada e de posição em ensaio, mostrando o efeito do filtro utilizado

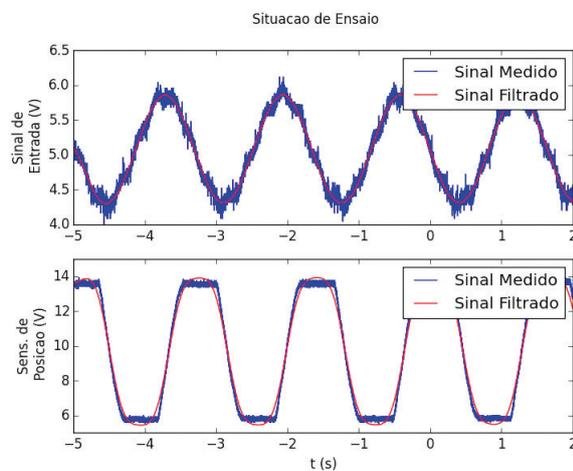
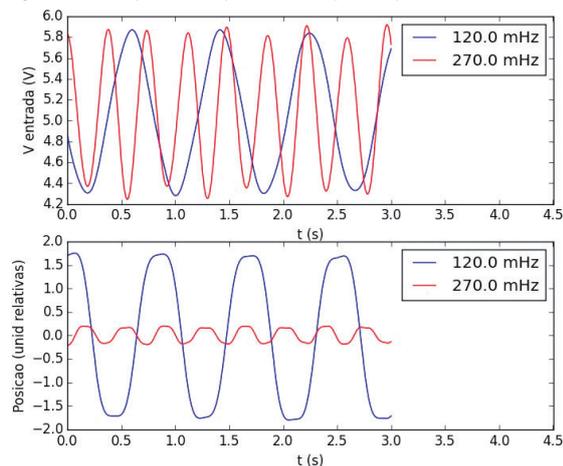


Figura 6 – Exemplos de resposta em frequência para 0.12 e 0.27 Hz



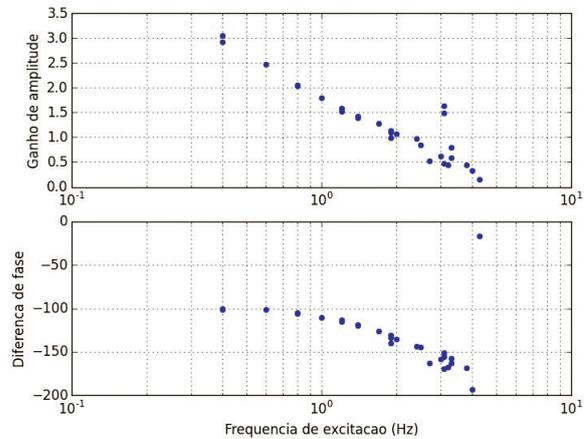
A Figura 6 mostra a comparação entre duas curvas cujos sinais de entrada tem amplitudes similares, mas com frequências distintas, nesta figura nota-se claramente como amplitude da oscilação da posição cai rapidamente com a frequência.

### 3.1.2 Diagrama de Bode do Sistema

Tendo sido registrados em ensaios uma gama considerável de comportamentos em diferentes

frequências, é possível definir o ganho de amplitude do atuador em cada situação examinada. Assim, percebe-se uma relação inversamente proporcional entre a frequência do sinal de excitação e o ganho de amplitude do atuador pneumático.

Figura 7 – Diagrama de Bode da planta em estudo



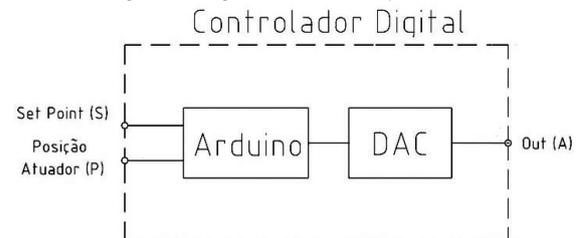
A relação descrita é observada na figura 7, denominada diagrama de Bode, no qual percebe-se que quanto maior a frequência do sinal de excitação, menor o ganho do posicionador, isto é, menos o atuador pneumático oscila, e do contrário, quanto menor a frequência, maior o ganho.

### 3.2 Projeto do Controlador Digital

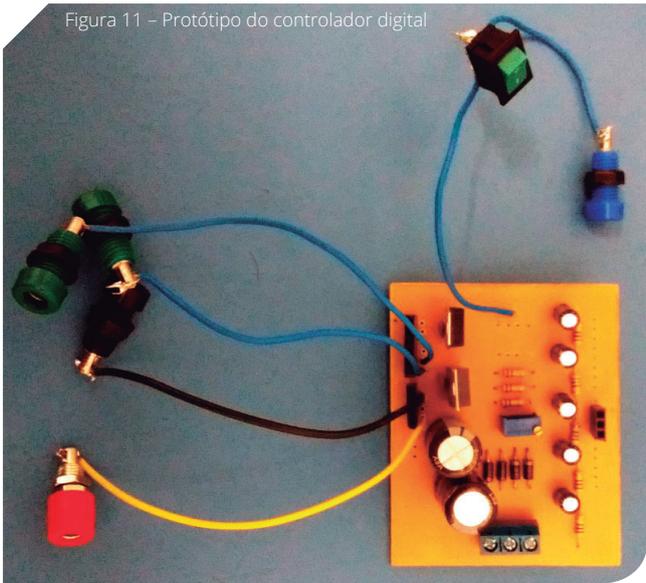
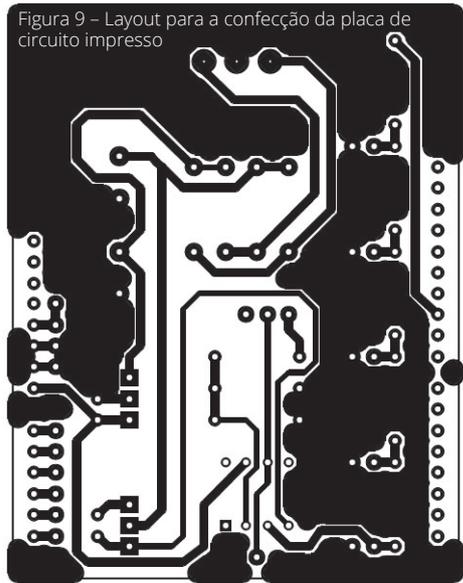
Com o diagrama de Bode que descreve o sistema utilizado durante os ensaios, é possível dar início ao projeto do controlador digital para atender a faixa de frequências estudadas. Os dados adquiridos até então, servem como base para a escolha da arquitetura do controlador digital a ser desenvolvido.

Para o projeto do controlador digital, foi escolhida a plataforma Arduino UNO, com um microcontrolador Atmel ATmega328. O projeto final foi dividido basicamente em duas partes, sendo uma o microcontrolador programável, outra um conversor Digital-Analógico (DAC), e pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de blocos simplificado do controlador



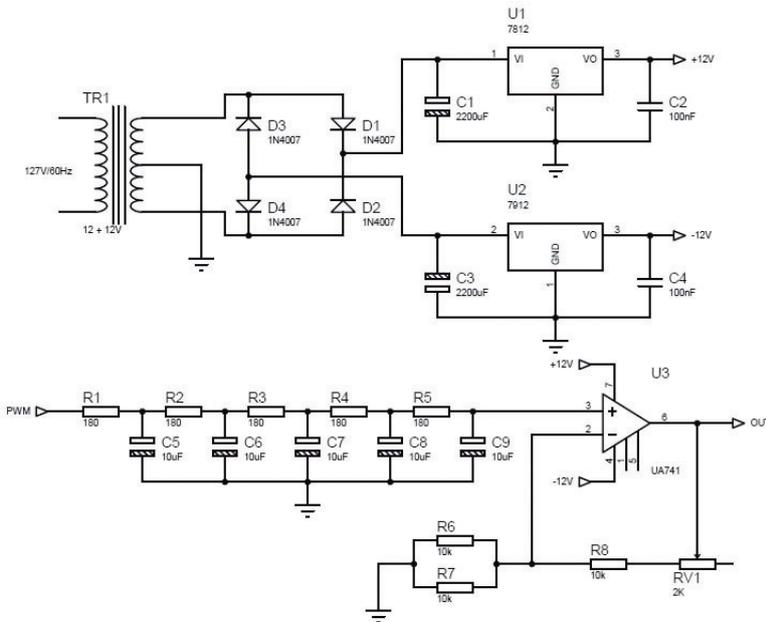
O controlador desenvolvido utiliza de uma saída PWM (Modulação de Largura de Pulso) do Arduino para efetuar o controle do atuador, onde alterando a largura do pulso de uma onda quadrada via software, é possível ter domínio sobre o valor de tensão enviado a válvula proporcional.



Para operar em conjunto com o sinal PWM foi construído um Conversor Digital-Analógico (DAC) utilizando um filtro tipo RC Passa-Baixa de quinta ordem com frequência de corte de 100Hz, e um amplificador operacional para realizar a interface entre o microcontrolador, que oferece uma saída de 0 a 5V, e a válvula proporcional que opera com 0 a 10V.

Para o desenvolvimento do layout e do circuito do controlador foram utilizados os softwares Proteus ISIS e ARES da Labcenter electronics. O layout da placa, e o esquema do circuito desenvolvido podem ser observados na figura 9 e 10.

Figura 10 – Circuitos do controlador desenvolvido



A confecção do controlador foi realizada em placa de fenolite, com o layout desenvolvido no ARES. O projeto já montado é a apresentado a seguir na figura 11.

### 3.3 Comparando os Controladores

A fim de comparar o controlador fornecido pelo fabricante com o controlador digital proposto, foi executado um teste de resposta a uma função degrau em ambos os controladores.

Para a execução do teste, foi escolhido o módulo proporcional do controlador analógico, e implementada uma rotina de controle proporcional no controlador digital. A fim de realizar a função degrau, foi utilizado um sinal externo de setpoint sendo chaveado manualmente com o mesmo equipamento para ambos os controladores.

#### 3.3.1 Programação do Controlador Digital

Para a implementação de um sistema de ação proporcional no controlador digital, os valores que definem o comportamento do sinal de saída A, são as entradas S (Set Point) e P (Posição do Atuador), ambas sendo interpretadas como um sinal analógico lidas pelo Arduino.

A expressão que foi utilizada no controlador, é descrita na Equação 1, onde A é o valor de saída do controlador,  $P_i$  é uma constante de posição do atuador pneumático, que é fixada em um valor que varia de acordo com a rotina de controle desejada, K é a constante de ganho proporcional e E o erro atuante.

$$A = P_i + K_x E \quad (1)$$

Conhecendo o valor de posição do atuador (P), e os valores de Set Point (S), ambos lidos pelo microcontrolador durante a rotina de controle, é possível calcular o erro (E) do controle de ação proporcional, definido pela Equação 2.

$$E = P \cdot S \quad (2)$$

Assim, conhecendo todos os valores dependentes ao controle proporcional, foi possível definir a expressão matemática realizada pelo microcontrolador.

$$A = \frac{P_i + (K \times E)}{4} \quad (3)$$

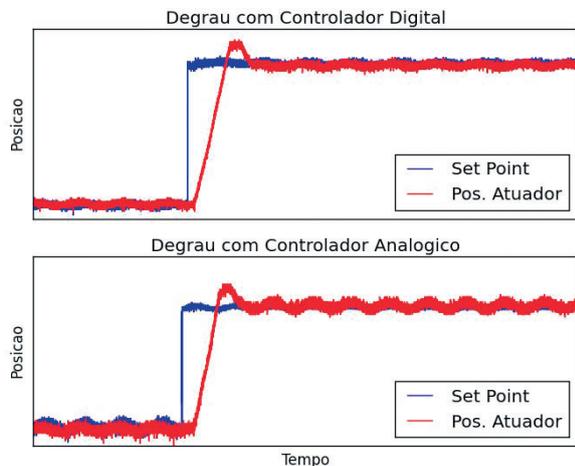
Nota-se que o valor final da Equação 3 é dividido por 4, uma vez que o sinal gerado pelo controlador é um sinal por modulação de largura de pulso que possui uma resolução de 8 bits, logo a divisão é necessária para manter a proporcionalidade entre o sinal de saída da expressão, e a faixa de trabalho do PWM.

### 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante a execução dos testes as formas de ondas necessárias para a análise dos resultados foram armazenadas com o auxílio de um osciloscópio. Foram realizados testes de resposta ao degrau com diferentes valores de pressão no sistema pneumático, assim, para cada pressão de trabalho utilizada, foi coletado a resposta da planta com o controlador digital e analógico.

A Figura 12 ilustra o comportamento de ambos os controladores operando com pressão de trabalho de 4 bar, onde é possível observar o sinal de *setpoint* e a posição do atuador pneumático. As escalas foram ajustadas a fim de fornecer um exemplo claro da resposta de cada controlador ao sinal de excitação.

Figura 12 – Exemplo de resposta ao degrau em ambos os controladores



Para comparar o desempenho obtido entre os controladores durante a função degrau, foram levados em consideração os valores de subida, que é o tempo que o sistema leva para ir do seu estado inicial ao valor final, e o overshoot da resposta, que corresponde ao quanto a variável de processo ultrapassa o valor desejado, expresso como uma porcentagem do valor final da ação de controle.

Ao fim do teste em cada controlador, foram registradas duas respostas para cada pressão de trabalho executada. Os valores médios do tempo de subida e porcentagem de overshoot de cada situação pode ser observada nas tabelas 1 e 2.

Figura 13 – Parâmetros utilizados para comparar as respostas da função degrau

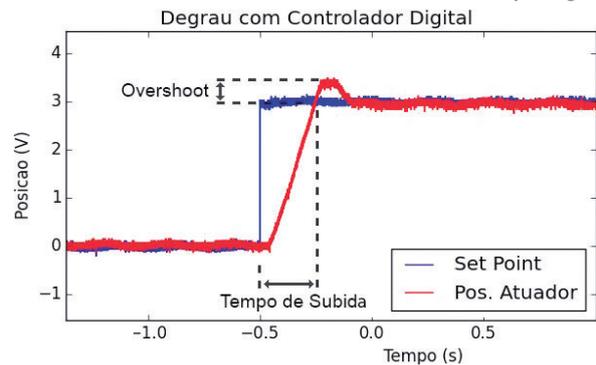
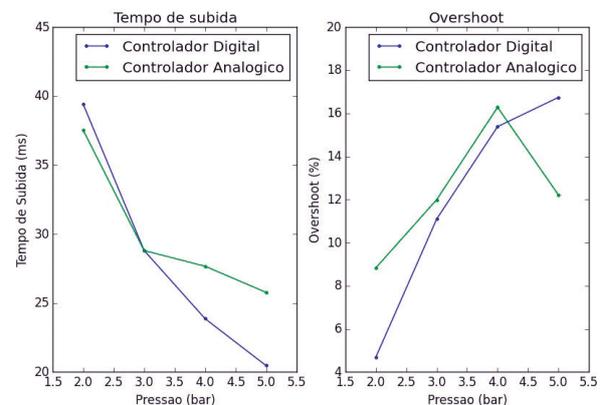


Figura 14 – Representação gráfica da comparação entre o desempenho dos controladores



Após levantar o comportamento de ambos os controladores operando na mesma situação, o resultado expresso de maneira visual pode ser observado na Figura 14, a qual apresenta a comparação entre o controlador digital e analógico.

Ao fim dos testes, foi possível observar que o controlador digital proposto apresentou resultado totalmente satisfatório em comparação com o controlador analógico fornecido pelo fabricante, mostrando-se até mesmo superior em algumas situações.

Tabela 1 – Valores obtidos com o controlador digital para função degrau

Degrau com Controlador Digital		
Pressão de trabalho (bar)	Tempo de Subida (ms)	Overshoot (%)
2	39,41	4,67
3	28,8	11,09
4	23,86	15,38
5	20,46	16,74

Tabela 2 – Valores obtidos com o controlador analógico para função degrau

Degrau com Controlador Analógico		
Pressão de trabalho (bar)	Tempo de Subida (ms)	Overshoot (%)
2	37,52	8,82
3	28,8	11,99
4	27,66	16,28
5	25,77	12,71

### 4 CONCLUSÃO

Com a execução do projeto, foi constatado que o controlador digital desenvolvido apresentou um resultado totalmente satisfatório em relação ao desempenho esperado inicialmente.

Com as primeiras etapas do projeto, de aquisição de dados referente a resposta em frequência da planta estudada, foi possível conhecer as características que descrevem o sistema, para assim, implementar um controlador digital que melhor se adaptasse as necessidades de controle desejadas.

Ao final do processo, o controlador digital desenvolvido, foi comparado com o controlador analógico, etapa esta que foi feita com ambos os controladores operando sob as mesmas condições de trabalho.

Com a análise de dados realizada durante a execução do teste, foi possível levantar a relação de desempenho entre as ações de controle propostas, onde o controlador digital apresentou desempenho satisfatório e até mesmo superior em algumas situações em relação ao analógico, apresentando como principal vantagem a facilidade de manutenção da ação de controle desejada, uma vez que toda a rotina é desenvolvida através de software, sem a necessidade de alteração no hardware.

Vale ressaltar que durante o teste, foi implementado uma rotina de controle proporcional para o controlador digital, uma sugestão de futuros estudos e aprimoramentos seria desenvolver uma rotina de controle PID completa, e comparar novamente o desempenho com o controlador analógico.

## AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação - IFSP e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro a este projeto.

## REFERÊNCIAS

DORF, R. C., BISHOP, R. H. **Sistemas de controles modernos**. Rio de Janeiro: LTC, 11ª ed., 2011.

LANGJORD, H.; KAASA, G. O.; JOHANSEN, T.A. "Adaptive Nonlinear Observer for Electropneumatic Clutch Actuator With Position Sensor", **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, p. 1033 - 1040, v. 20, Issue: 4, 2012.

MICROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec, 2ª ed. 2015.

OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson, 5ª ed., 2011.

PANDIAN, S. R.; et al, "Pressure observer-controller design for pneumatic cylinder actuators," **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 7, n. 4, 2002.

RASPBERRYPI, **Site da fundação raspberrypi.org**. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>. Acesso em: 30 de nov. de 2015.

TASSA, Y.; et al, "Modeling and identification of pneumatic actuators", **IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)**, p. 437-443. 2013.

THE SCIPY COMMUNITY, **Site da comunidade das bibliotecas SCIPY, NUMPY e MATPLOTLIB do PYTHON**. Disponível em: <<http://docs.scipy.org/doc/>>. Acesso em: 30 de nov. de 2015.

ARDUINO, **Site oficial da plataforma Arduino**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 3 de jul. de 2016.