

# Desenvolvimento de um Posicionador Digital em FPGA para Compensar o Atrito de uma Válvula de Controle Pneumática

Francisco Flauzino Franco Neto \* Fellipe Garcia Marques \*\*  
Claudio Garcia \*\*\*

*Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle,  
Universidade de São Paulo, SP*

\* (e-mail: francisco.flauzino@gmail.com)

\*\* (e-mail: fellipe.marques@alumni.usp.br)

\*\*\* (e-mail: clgarcia@lac.usp.br)

---

**Abstract:** This article presents a digital positioner for pneumatic spring / diaphragm valves, developed with a commercial FPGA. The positioner is tested using a flow pilot plant with industrial grade equipment. The results show that the positioner is quite good to compensate the diaphragm valve friction.

**Resumo:** Este artigo apresenta um posicionador digital para válvulas do tipo mola/diafragma pneumáticas, desenvolvido com um FPGA comercial. O posicionador é testado utilizando uma planta piloto de vazão que utiliza equipamentos de classe industrial. Os resultados demonstram que o posicionador é capaz de compensar o atrito da válvula de controle pneumática.

*Keywords:* Diaphragm Control Valve; FPGA; PID; Friction; Digital Positioner.

*Palavras-chaves:* Válvula de Controle Pneumática; FPGA; PID; Atrito; Posicionador Digital.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As válvulas de controle são utilizadas para dosar as misturas das substâncias para a produção de um produto, sendo as válvulas do tipo mola/diafragma pneumáticas amplamente utilizadas nas indústrias de processo para regular a vazão (Garcia, 2008). A válvula do tipo mola/diafragma pneumática transforma a pressão de ar em força para movimentar a haste e assim fazer sua abertura e fechamento, de acordo com a necessidade do controle do processo. Com o passar do tempo, as válvulas de uma planta sofrem desgastes em suas partes móveis e estas alterações das características modificam a produtividade, a qualidade, o consumo de energia, o custo da produção e o esforço de controle da planta. Uma das características que é alterada pelo desgaste é o atrito entre a haste e as *gaxetas*. O comportamento da válvula muda significativamente à medida que o atrito aumenta (Romano e Garcia, 2011). Um aumento do atrito pode causar alteração na posição desejada da haste, afetando o desempenho do sistema e por consequência o desempenho da malha de controle. A manutenção em plantas industriais ocorre em intervalos entre 6 meses a 3 anos (Srinivasan e Rengaswamy, 2005). Neste período a válvula com problema opera de maneira sub-ótima, afetando diretamente o consumo de material e a qualidade do produto. Para a correção deste problema pode-se realizar a manutenção da válvula, mas para realizar a manutenção tem-se que parar o processo. Caso não seja uma parada programada isto não é desejável. Outra forma de se corrigir o atrito é realizando a compensação do atrito. A compensação de atrito pode ser feita no

controlador do processo como em Hägglund (2002), onde a compensação de atrito reduz significativamente o erro de controle comparado ao controle sem compensação. Outra forma de compensar o atrito é utilizando posicionadores digitais como em Hidalgo e Garcia (2017) e em Marques (2020), que estão instalados acoplados às válvulas. A função do posicionador consiste em colocar a haste da válvula na posição desejada, por meio da realimentação da posição.

O uso de posicionadores inteligentes está se tornando mais frequente, pois atualmente se tem mais instrumentação incorporada na válvula (di Capaci e Scali, 2018), desta forma é possível se ter um controlador dedicado apenas para a malha de controle da posição da válvula. Para a criação do modelo da válvula com atrito, é utilizado o algoritmo de Marques e Garcia (2020), que utiliza um método invasivo, usando dados que podem ser medidos durante a parada da planta. No entanto, Marques (2020) apresenta uma metodologia capaz de estimar os parâmetros do modelo da válvula de forma não invasiva, possibilitando a estimação em malha fechada, durante a operação normal da planta. A compensação de atrito é uma solução temporária, que melhora o desempenho do sistema e posterga a parada da planta, gerando ganhos relevantes para o processo. Este artigo é uma continuação do trabalho de Marques (2020), utiliza os algoritmos para o cálculo do modelo de uma válvula com alto índice de atrito e os parâmetros do controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) utilizado para compensar o atrito da válvula. O controlador PID é embarcado em um posicionador digital utilizando um FPGA (*Field Programmable Gate Array*) comercial.

## 2. PLANTA PILOTO DE VAZÃO

Para realizar os experimentos do posicionador digital foi utilizada a Planta Piloto de Vazão, instalada no Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O fluxograma simplificado da planta piloto é exibido na Figura 1. A planta é um circuito fechado, sendo composta por um tanque de armazenamento de água, uma bomba centrífuga e válvulas para realizar experimentos de controle de vazão. O controle da vazão é realizado pelo *kit* da National Instruments controlável em tempo real pelo SIMULINK/MATLAB, com uma frequência de amostragem de 100 ms. A vazão volumétrica é medida utilizando a placa de orifício FE-10 com medidor de pressão diferencial FIT-10A. Existem duas válvulas com atuadores pneumáticos, a FV-10G com gaxetas de grafite com alto atrito e a FV-10T com gaxetas de teflon com baixo atrito. Este trabalho é realizado utilizando a válvula com gaxetas de grafite para as análises da influência do atrito no controle de válvulas do tipo mola/diafragma pneumáticas, enquanto que a válvula FV-10T é utilizada nos experimentos para inserir perturbações no sistema. Ambas as válvulas são produzidas pela *Fisher* e são do tipo globo, com atuador diafragma *Fisher* 657 do tipo ar para abrir.

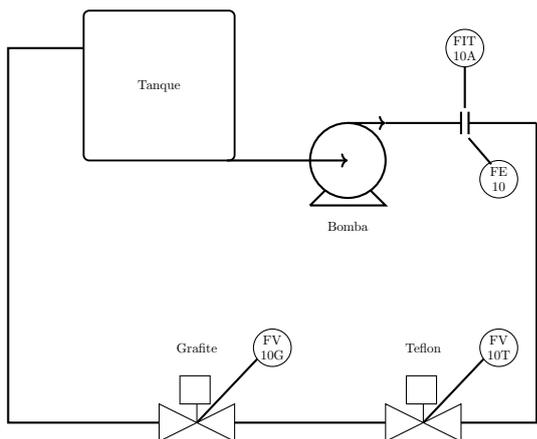


Figura 1. Diagrama simplificado da Planta Piloto de Vazão.

A Figura 2 exibe, em diagrama de blocos, a plataforma utilizada para o desenvolvimento deste artigo. O sistema é composto por controlador de vazão (Cv), posicionador digital, conversor I/P (Corrente para Pressão), válvula pneumática e planta de vazão, onde  $R$  é o sinal de referência da posição para o posicionador,  $OP$  é o sinal enviado para o conversor I/P,  $P$  a pressão de saída do conversor I/P,  $x$  é a posição da haste da válvula e  $Q$  a vazão da planta.

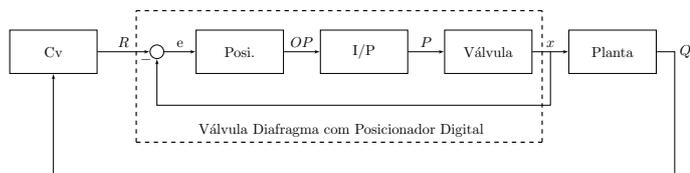


Figura 2. Diagrama esquemático do controle da vazão.

## 3. POSICIONADOR DIGITAL

A Figura 3 apresenta o diagrama esquemático do Posicionador Digital proposto neste artigo, indicando as interfaces de entradas, saídas e comunicações. O posicionador é composto por: três entradas analógicas, uma saída analógica, uma comunicação serial e uma comunicação UDP/IP (*User Datagram Protocol/Internet Protocol*). A parte pontilhada representa as estruturas internas ao FPGA, enquanto que as estruturas externas ao pontilhado são circuitos para o condicionamento dos sinais de entrada e saída.

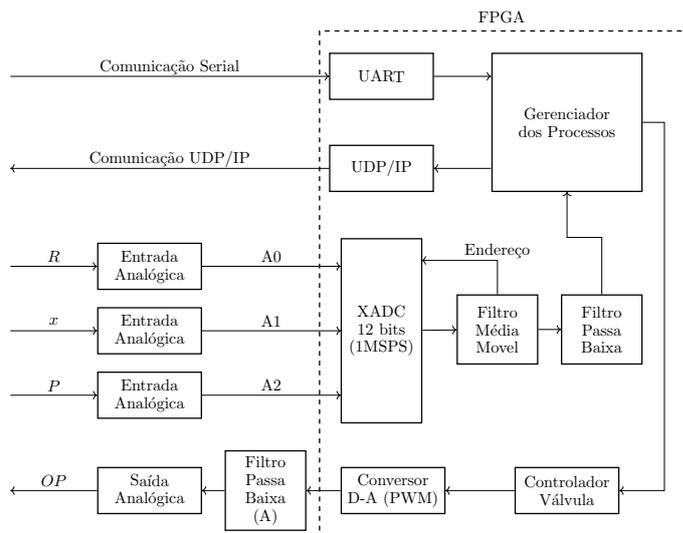


Figura 3. Diagrama esquemático do posicionador digital.

### 3.1 FPGA

Para o desenvolvimento do posicionador digital é utilizado o *kit* de desenvolvimento Arty da Digilent, o qual é equipado com um FPGA que apresenta características de alta velocidade e paralelismo, podendo rodar rotinas sem a necessidade de realizar interrupções, como ocorre nos microcontroladores. Desta forma é possível garantir que o controle seja realizado em tempo real. Com o paralelismo é possível que uma rotina responsável por atuar no controle da válvula pneumática seja realizado juntamente com a aquisição, filtragem e as rotinas de comunicações. É utilizado o *kit* Arty da Digilent equipado com o FPGA Artix-35T (xc7a35ticsg324-1L) para o desenvolvimento do posicionador digital proposto neste artigo.

### 3.2 Entrada analógica e Filtros

O FPGA utilizado apresenta apenas um conversor A/D (Analogico/Digital), sendo que para amostrar mais de uma entrada é necessário utilizar um multiplexador para endereçar as entradas analógicas. O bloco XADC da XILINX realiza a conversão A/D e apresenta uma entrada para endereçamento da entrada desejada. Os sinais amostrados apresentaram ruído, sendo utilizados dois filtros em cascata para remover o ruído, um de média móvel e um IIR (*Infinite Impulse Response*) de primeira ordem. O filtro de média móvel armazena amostras e depois faz uma média dos sinais amostrados, filtrando altas frequências.

O bloco do filtro de média móvel faz o endereçamento das entradas analógicas do XADC, espera a conversão, lê a saída convertida do XADC e realiza a filtragem por canal, disponibilizando as saídas filtradas como apresentado na Figura 3. O filtro de média móvel é o primeiro estágio da filtragem, as entradas foram amostradas em 333,333kHz e sendo utilizadas 32 amostras para cada entrada. O filtro passa baixa IIR de primeira ordem é o segundo estágio da filtragem, utilizado para filtrar os sinais do filtro de média móvel. A válvula é um sistema passa-baixa, sendo a constante de tempo dominante a do conversor I/P (Marques e Garcia, 2020), o  $\tau_{I/P}$  calculado é de 1,59s, então a frequência adotada de corte da válvula é de 0,6302rad/s ou 0,1003Hz. Desta forma, a frequência de corte adotada para o filtro passa baixa IIR é de 200Hz, filtrando os ruídos de frequências mais elevadas e deixando passar a dinâmica da planta. O filtro é implementado em um BIQUAD na forma direta II. Foram realizadas amostras de uma entrada sem e com os filtros, a partir das amostras são calculadas as relações de sinal ruído dos sinais. A relação sinal ruído sem o filtro foi de 29,64dB enquanto que para o sinal filtrado foi 34,52dB, com o filtro foi possível aumentar a relação sinal ruído em três vezes, diminuindo o ruído dos sinais amostrados. Os sinais filtrados são utilizados no gerenciador de processos e são disponibilizados para a comunicação UDP/IP e para o controlador da válvula.

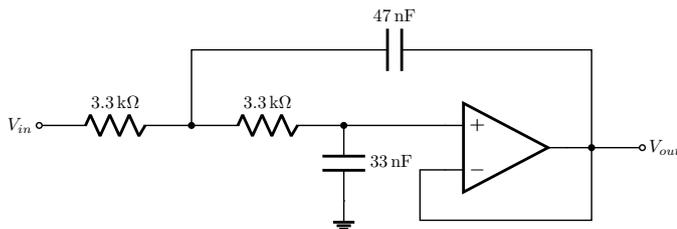


Figura 4. Filtro Passa Baixa Sallen-Key.

### 3.3 Filtro Passa Baixa Analógico e Conversor D-A

Por falta de uma saída analógica no FPGA, é necessário modular uma saída digital com um PWM (*Pulse Width Modulation*) interligado a um filtro passa baixa analógico. O filtro passa baixa utilizado é o Sallen-Key, por não apresentar *ripple* e ter uma resposta em frequência mais plana. A Figura 4 exibe o filtro utilizado para gerar a saída analógica. Os componentes foram escolhidos da forma a se obter uma frequência de corte de 1224,61Hz. O PWM é desenvolvido utilizando a linguagem de descrição de *hardware* Verilog. A saída PWM é ajustada adotando a relação de 10 vezes a frequência de corte do filtro passa baixa, sendo ajustada em 12kHz.

### 3.4 Controlador da Válvula

O controlador da válvula é implementado em linguagem C no Vivado HLS. Após a validação do código é criado um núcleo para o controlador. Neste trabalho é utilizado o controlador PID, mas é possível utilizar outros controladores. Os parâmetros do controlador podem ser alterados com o posicionador operando, facilitando a alteração dos parâmetros, sem a necessidade de gerar o código de programação do FPGA todas as vezes que se deseje alterar

os parâmetros do controlador. O controlador é sintonizado utilizando o método apresentado em Marques (2020), que é baseado no Controle Adaptativo Inverso. O diagrama esquemático do controlador PID utilizado é indicado na Figura 5.

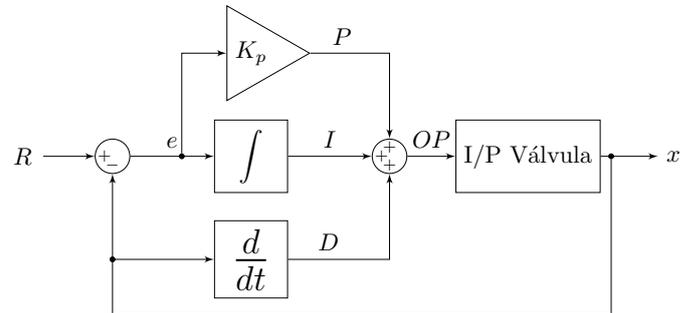


Figura 5. Diagrama esquemático do controlador PID.

O controlador PID é definido pelas Equações (2) a (5), onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  é o ganho integral,  $K_d$  é o ganho derivativo,  $T_s$  é o período de amostragem,  $T_{df}$  é a constante de tempo do filtro derivativo,  $x[n]$  é a posição da válvula,  $R[n]$  é o valor de referência de posição da haste,  $e[n]$  é o erro de posição,  $OP[n]$  é a saída do PID e  $x[n] = x(n \cdot T_s)$ .

O erro é calculado pela resposta do sistema:

$$e[n] = R[n] - x[n] \quad (1)$$

A parcela proporcional ( $P$ ) é o produto do ganho proporcional pelo erro calculado anteriormente.

$$P[n] = K_p \cdot e[n] \quad (2)$$

A parcela integral ( $I$ ) é calculada pela Equação (3).

$$I[n] = I[n-1] + K_i \frac{T_s}{2} (e[n-1] + e[n]) \quad (3)$$

A parcela derivativa ( $D$ ) é calculada pela Equação (4).

$$D[n] = \frac{-K_d \cdot (x[n] - x[n-1]) + T_{df} D[n-1]}{T_{df} + T_s} \quad (4)$$

Por fim, é realizada a soma de cada parcela para se obter a saída do controlador PID:

$$OP[n] = P[n] + I[n] + D[n] \quad (5)$$

### 3.5 Comunicações

O Posicionador utiliza dois tipos de comunicação: a UDP/IP e a serial RS-232. A comunicação UDP/IP é no sentido do posicionador para o computador, utilizada para transmitir para o computador as informações de referência do controlador de vazão, posição da haste, pressão do diafragma e a saída do controlador. Os dados adquiridos via UDP/IP foram utilizados para a estimação dos parâmetros e verificação dos resultados. É utilizada a comunicação UDP/IP por sua alta taxa de transmissão de dados, sendo possível transmitir até 1024 bytes a cada 100 $\mu$ s para a configuração adotada, transmitindo 10,24MB/s na sua configuração mais rápida. A comunicação serial é unidirecional, no sentido do computador para o posicionador digital, sendo utilizada apenas para zerar a estampa de tempo que é utilizada na amostragem dos sinais.

### 3.6 Gerenciador dos Processos

No Gerenciador dos Processos é onde ocorre o controle dos processos do posicionador digital, sendo realizadas as seguintes funções: o controle das comunicações, o gerenciamento dos sinais filtrados, o gerenciamento do controlador da válvula, a estampa de tempo e é possível ignorar o controlador da válvula e enviar um sinal diretamente para o conversor D/A (PWM). O Gerenciador dos Processos é dividido em cinco núcleos, sendo um para a estampa de tempo, um para a comunicação serial, um para a comunicação UDP/IP, um para o controlador da válvula e o último para fazer a amostragem das entradas. O Gerenciador dos Processos atua ativando os blocos descritos anteriormente e espera um sinal de conclusão da tarefa do bloco, desta forma ele atua apenas gerenciando o início, o fim das tarefas e gerando a estampa de tempo do sistema. São utilizados núcleos separados para não ser necessário realizar interrupções no controle dos blocos, os núcleos trabalham independentes ou ficam em espera até receber um sinal para iniciar a sua função. Pela estampa de tempo é possível verificar o tempo de amostragem. Os registradores da estampa de tempo estão divididos em horas, minutos, segundos, milissegundos e microssegundos. Como abordado anteriormente, a comunicação serial está sendo utilizada apenas para zerar os registradores da estampa de tempo.

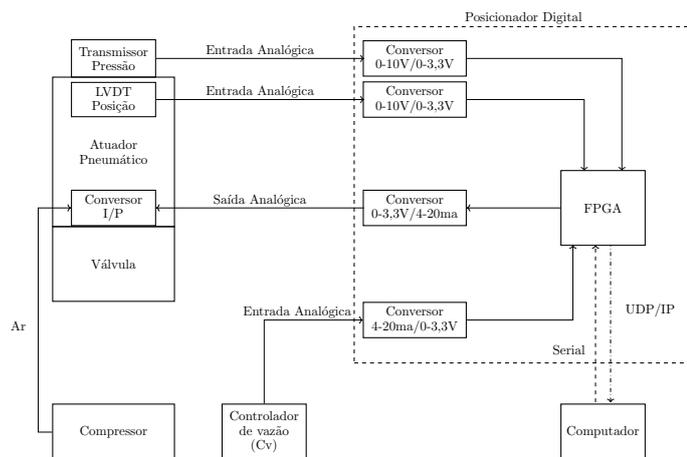


Figura 6. Ligações entre o Posicionador e a Válvula.

### 3.7 Conexões

A Figura 6 exibe o diagrama esquemático das ligações entre o Posicionador Digital, o computador, os sensores, o controlador de vazão (Cv) e o conversor I/P. O Posicionador Digital apresenta três entradas analógicas, sendo elas a pressão da câmara do atuador pneumático, a posição da haste e a referência do controlador de vazão. A pressão e a posição são entradas de tensão, enquanto a referência do controlador de vazão é uma entrada de corrente. A saída analógica é de corrente, utilizada para ativar o conversor I/P na pressão desejada pelo Posicionador Digital. O controlador de vazão utilizado é um computador com a placa PCI-6229 da National Instruments em conjunto com o software MATLAB/SIMULINK. Com a placa injetam-se sinais de excitação diretamente no Posicionador Digital e

também é utilizada para controlar a vazão da planta em malha fechada.

## 4. METODOLOGIA

Os experimentos realizados foram o controle da vazão da planta piloto com e sem o posicionador digital, para duas formas de controle: servo e regulatório. No modo regulatório ocorre uma perturbação entre 300 s e 600 s, enquanto no modo servo a referência de vazão é alterada. A perturbação foi gerada pelo fechamento da válvula de teflon presente no circuito. O controlador de vazão foi sintonizado de duas formas, a primeira utilizando os parâmetros do PI (Proporcional Integral) mais agressivos e com melhor desempenho (configuração 1) e a segunda forma com os parâmetros mais robustos e com pior desempenho (configuração 2). Para a configuração 1 foram realizados os experimentos com e sem o posicionador, enquanto para a configuração 2 foram realizados apenas experimentos sem o posicionador. A configuração 2 é utilizada para comparar o desempenho do posicionador com uma técnica simples de correção da sintonia do controlador de vazão, para minimizar as oscilações da malha de controle, que são geradas pelo alto atrito da válvula. O posicionador foi configurado para trabalhar com período de amostragem de 100µs, assim como os filtros utilizados. O modelo de atrito utilizado para compensar o atrito e sintonizar o PID foi o modelo de Kano (Kano et al., 2004), a Tabela 1 indica os dados da válvula calculados com o modelo de Kano, onde  $S$  é o *deadband*,  $J$  é o *slip-jump*,  $D$  é a força inicial da mola normalizada,  $x_{max}$  e  $x_{min}$  são as posições máxima e mínima da haste da válvula, respectivamente.

Tabela 1. Dados da válvula pelo modelo de Kano.

$S(\%)$	$J(\%)$	$D(\%)$	$x_{min}(\text{mm})$	$x_{max}(\text{mm})$
26,775	0,019	13,279	1	25

Os parâmetros do controlador PID calculados pelos algoritmos de Marques (2020) são apontados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do PID.

$K_p$	$K_i$	$K_d$	$T_{df}$
19,77	3,17	3,25	0,17

O modelo do sistema hidráulico foi estimado aplicando um degrau de amplitude 30% (iniciando em 50%) na entrada do conversor I/P. Com os dados de entrada e saída da planta, um modelo de primeira ordem mais tempo morto do sistema hidráulico foi estimado:

$$G(s) = \frac{-1,68 e^{-0,15 s}}{1 + 3,76 s} \quad (6)$$

O controlador PI do sistema hidráulico da configuração 1 foi sintonizado para obter uma banda passante em malha fechada de 1,5 rad/s (5,6 vezes maior que a da planta em malha aberta) e uma margem de fase de 65 graus.

O controlador PI usado para diminuir o ciclo limite da malha de controle, configuração 2, foi sintonizado para obter uma banda passante em malha fechada de 0,45 rad/s (1,7 vezes maior que a da banda passante da planta em malha aberta) e uma margem de fase de 80 graus. Os

parâmetros do controlador PI para as duas configurações estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do Controlador PI.

Parâmetro	Configuração 1	Configuração 2
$K_p$	3,12	0,9241
$K_i$	2,00	0,3157

## 5. RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta o Erro Quadrático Médio (EQM), o desvio padrão da saída do posicionador (STD) e a distância percorrida pela haste (DIST), para todas as configurações testadas. O STD é calculado utilizando o OP de 600 segundos em diante, ou seja, utiliza os dados quando o  $SP_Q$  está constante e não há perturbações. Valores altos de STD indicam que há presença de oscilações constantes na malha de controle.

Tabela 4. Índices de desempenho.

Controle	Posici.	Conf.	EQM(%)	STD(%)	DIST(%)
Regu.	Ausente	1	26,10	23,03	6386,58
	Presente	1	0,15	13,42	2427,41
Servo	Ausente	1	50,33	27,19	10124,79
	Presente	1	0,50	14,41	2795,26
Regu.	Ausente	2	4,42	10,57	1438,39
Servo	Ausente	2	2,53	4,28	1955,52

As figuras apresentadas nesta seção comparam as variáveis  $SP_Q$  (referência da vazão do controlador de vazão),  $Q$  (vazão da planta),  $R$  (referência da posição da haste) e  $x$  (posição da haste).

A Figura 7 exibe as vazões e a posição da haste do experimento na configuração 1 no modo regulatório, sem o posicionador, com o posicionador e a posição da haste com o posicionador, respectivamente. A vazão sem o posicionador, oscila com grande amplitude no intervalo sem a perturbação e durante a perturbação a oscilação diminui, enquanto que na configuração com o posicionador a vazão se mantém próxima do valor de referência. O modo regulatório sem o posicionador para a configuração 2 é apresentado na Figura 8. Apesar das oscilações ainda estarem presentes na configuração 2, nota-se que elas foram bastante reduzidas, quando comparada com a configuração 1 sem o posicionador. No entanto, a configuração 2 apresenta um desempenho bastante inferior para a rejeição de perturbações.

A Figura 9 indica as vazões e a posição da haste do experimento na configuração 1 no modo servo, sem o posicionador, com o posicionador e a posição da haste com o posicionador, respectivamente. A vazão sem o posicionador oscila com grande amplitude por todo o período do experimento, enquanto que na configuração com o posicionador a vazão se mantém próxima do valor de referência. O modo servo sem o posicionador para a configuração 2 é apresentado na Figura 10. A configuração 2 apresentou pouca oscilação em relação à configuração 1 quando sem o posicionador, podendo ser uma solução para a compensação do atrito, dependendo da necessidade da resposta do controle e sua precisão.

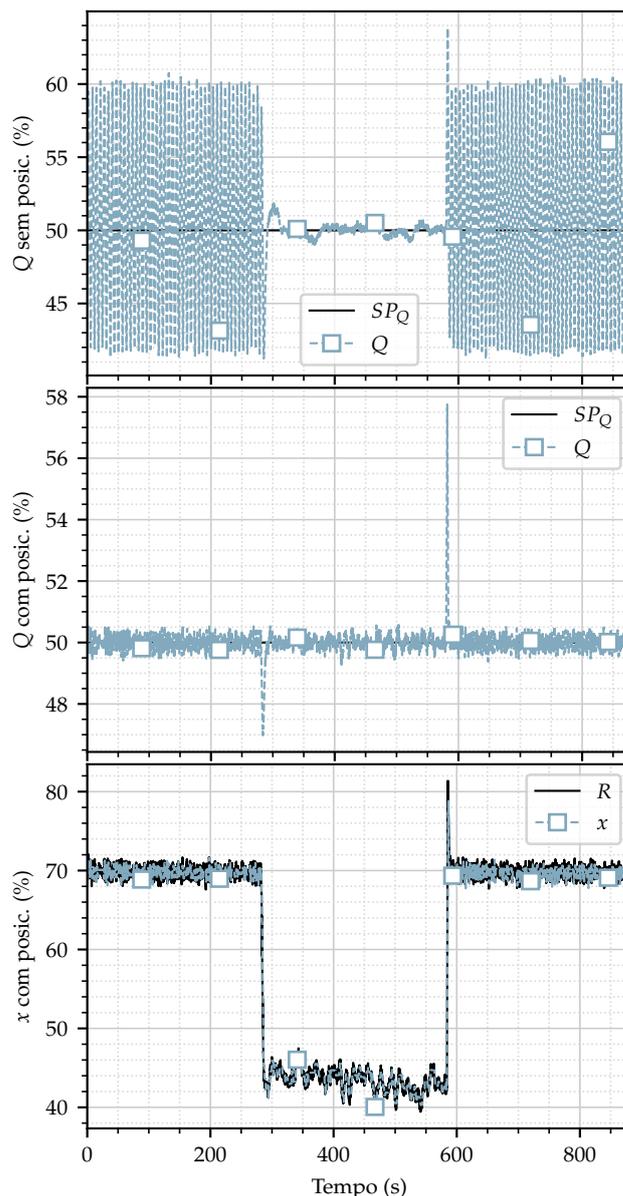


Figura 7. Modo Regulatório sem o posicionador, com o posicionador e posição da haste com o posicionador.

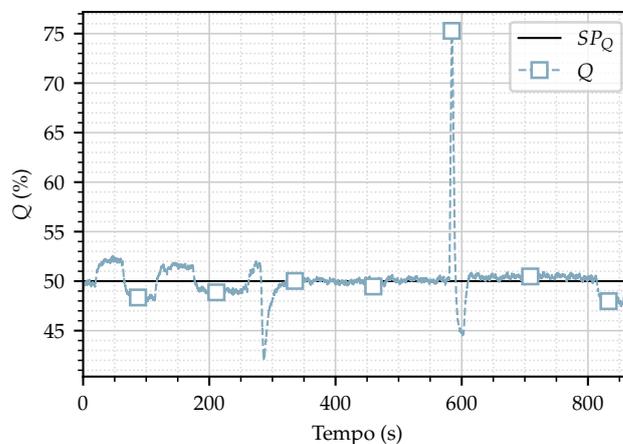


Figura 8. Vazão no modo regulatório - Configuração 2.

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou o desenvolvimento de um posicionador utilizando FPGA, o qual pode servir de base para diversas pesquisas relacionadas à compensação de atrito em válvulas pneumáticas, utilizando altas taxas de amostragem no controlador. Com os experimentos realizados, foi possível verificar o funcionamento e o desempenho do posicionador para compensar o atrito de uma válvula do tipo mola/diafragma pneumática. O PID foi sintonizado baseado no modelo de Kano obtido através dos métodos de Marques e Garcia (2020). O alto desempenho do posicionador e a sintonia otimizada do controlador foram capazes de compensar o atrito da válvula pneumática, como se observa pelo erro médio quadrático (EQM) e o desvio padrão (STD) com a presença do posicionador, obtendo índices de desempenho melhores do que para as configurações sem o posicionador. A oscilação do controle pode ser observada pela distância percorrida pela haste da válvula (DIST), as configurações com a presença do posicionador foram as que menos oscilaram. A configuração 2, apesar de ter um desempenho inferior à configuração 1 com posicionador, demonstra que sintonizar a malha de controle com maiores índices de robustez é capaz de minimizar as oscilações da malha de controle geradas pelo alto índice de atrito da válvula pneumática, sendo esta a configuração que apresentou as menores oscilações, como se observa pela distância percorrida pela haste (DIST), o que corresponde a um menor desgaste da válvula.

## REFERÊNCIAS

- di Capaci, R.B. e Scali, C. (2018). Review and Comparison of Techniques of Analysis of Valve Stiction: From Modeling to Smart Diagnosis. *Chemical Engineering Research and Design*, 130, 230–265.
- Garcia, C. (2008). Comparison of Friction Models Applied to a Control Valve. *Control Engineering Practice*, 16(10), 1231–1243.
- Hägglund, T. (2002). A friction compensator for pneumatic control valves. *Journal of process control*, 12(8), 897–904.
- Hidalgo, M.C. e Garcia, C. (2017). Friction compensation in control valves: Nonlinear control and usual approaches. *Control Engineering Practice*, 58, 42–53.
- Kano, M., Maruta, H., Kugemoto, H., e Shimizu, K. (2004). Practical Model and Detection Algorithm for Valve Stiction. In *Proceedings of the 7th IFAC DYCOPS*. IFAC, Boston, USA.
- Marques, F. (2020). *Modeling and Automatic Friction Compensation of Pneumatic Diaphragm Valves with Digital Positioners*. Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Marques, F.G. e Garcia, C. (2020). Parameter estimation and performance comparison of friction models for pneumatic valves. *Control Engineering Practice*, 104, 104629.
- Romano, R.A. e Garcia, C. (2011). Valve friction and nonlinear process model closed-loop identification. *Journal of Process Control*, 1(1), 667–677.
- Srinivasan, R. e Rengaswamy, R. (2005). Stiction compensation in process control loops: A framework for integrating stiction measure and compensation. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(24), 9164–9174.

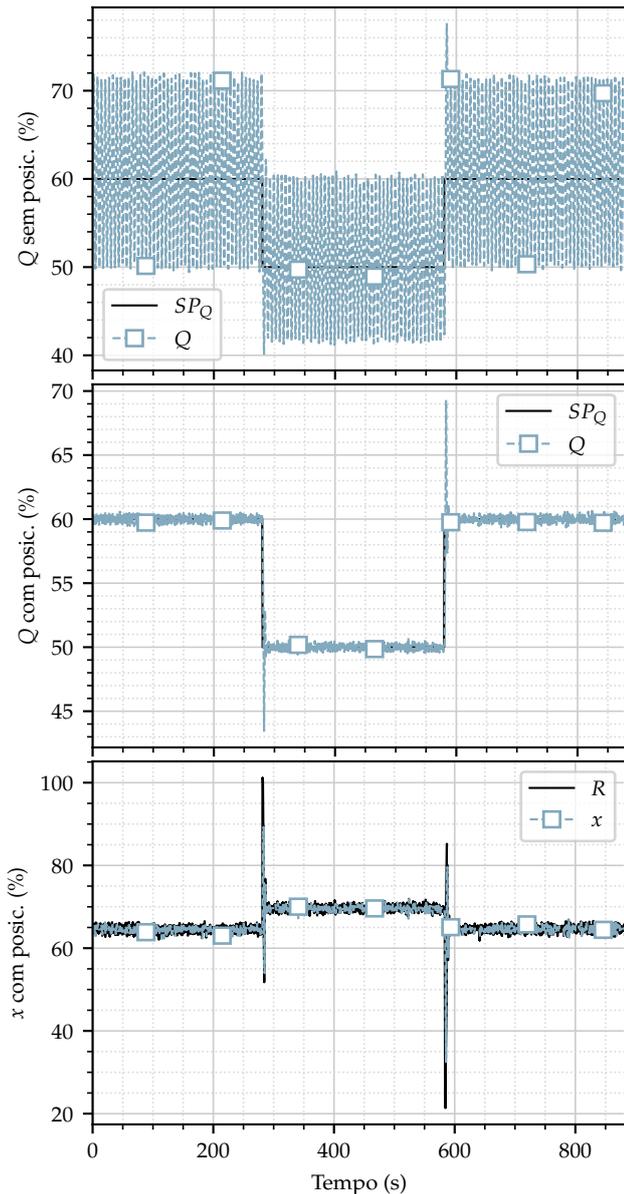


Figura 9. Modo Servo sem o posicionador, com o posicionador e posição da haste com o posicionador.

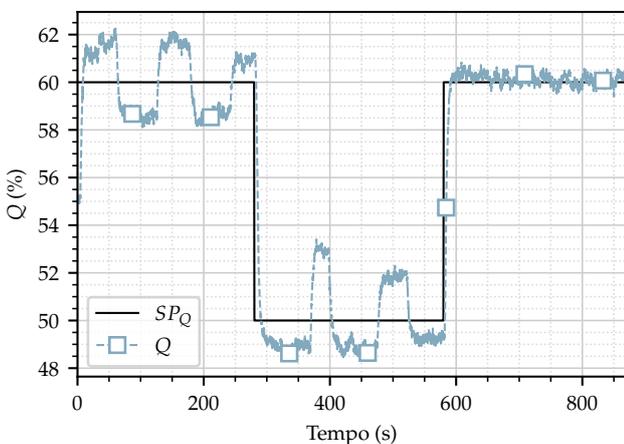


Figura 10. Vazão no modo servo - Configuração 2.