

Francisco Flauzino Franco Neto

Desenvolvimento de um Posicionador Digital em FPGA para a Compensação do Atrito
em Válvulas de Controle Pneumáticas

São Paulo
2023

Francisco Flauzino Franco Neto

Desenvolvimento de um Posicionador Digital em FPGA para a Compensação do Atrito
em Válvulas de Controle Pneumáticas

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas.

Orientador:
Prof. Dr. Claudio Garcia.

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Flauzino, Francisco

Desenvolvimento de um Posicionador Digital em FPGA para a Compensação do Atrito em Válvulas de Controle Pneumáticas / F. Flauzino -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

86 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.válvulas pneumáticas 2.FPGA 3.atrito 4.posicionador digital
5.controle adaptativo inverso I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

Nome: FLAUZINO, Francisco

Título: Desenvolvimento de um Posicionador Digital em FPGA para a Compensação do Atrito em Válvulas de Controle Pneumáticas

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Agradecimentos

É com sentimento de gratidão que expresso meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização desta tese.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Claudio Garcia pelo seu apoio, ensinamentos e confiança neste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Fellipe Garcia Marques pelas suas contribuições valiosas enriqueceram o trabalho. Sua disponibilidade para discussões e apoio foram fundamentais para a obtenção dos resultados desta tese.

Agradeço a minha esposa, pelo apoio incondicional, estando ao meu lado no momentos mais difíceis e pela compreensão da minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram nos estudos, dedicando seu tempo e recursos para minha formação.

As minhas irmãs por sempre estarem ao meu lado, me apoiando nas minhas escolhas.

Por fim, agradeço a todos os professores, que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Muito obrigado.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.
(Charles Chaplin)

Abstract

Friction in pneumatic spring/diaphragm control valves generates variability in the control loops and impacts the quality of the final product, accelerating equipment wear and increasing the waste of energy and raw materials. This work presents the development of a digital positioner for pneumatic spring/diaphragm valves, the positioner was used to compensate friction and improve the flow control loop. In the development a commercial FPGA hardware was used. Four friction models were used to tune the digital positioner controller, the models used were Kano, Karnopp, He and GMS. The positioner was tested using the Flow Pilot Plant of the Industrial Process Control Laboratory (LCPI), which uses industrial grade equipment. Experiments were carried out in open loop and in closed loop. In the open loop experiments the signature curves of the valve were raised without friction compensation and with compensation, making it possible to carry out a comparison, another experiment carried out in open loop was the insertion of a random signal using the digital positioner with friction compensation. In the closed-loop experiments, flow controls were performed in servo mode and in regulatory mode, the results obtained from the positioner were compared with the type of compensation CR2 and with a configuration without positioner and without friction compensation. The results demonstrated that the positioner was able to compensate for the friction of the pneumatic control valve.

Keywords: diaphragm valves; FPGA; friction; digital positioner; adaptive inverse control.

Resumo

O atrito em válvulas de controle do tipo mola/diafragma pneumática, geram variabilidade nas malhas de controle e impactam na qualidade do produto final, acelerando o desgaste dos equipamentos e aumentando o desperdício de energia e matéria prima. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um posicionador digital para válvulas do tipo mola/diafragma pneumáticas. O posicionador foi utilizado para compensar o atrito e melhorar a malha de controle de vazão. No desenvolvimento foi utilizado um *hardware* FPGA comercial. Foram utilizados quatro modelos de atrito para a sintonia do controlador do posicionador digital, os modelos utilizados foram o de Kano, o de Karnopp, o de He e o de GMS. O posicionador foi testado utilizando a Planta Piloto de Vazão do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI), que utiliza equipamentos de classe industrial. Foram realizados experimentos em malha aberta e em malha fechada. Para os experimentos em malha aberta foram levantados as curvas de assinatura da válvula sem a compensação do atrito e com a compensação, sendo possível realizar uma comparação, outro experimento realizado em malha aberta foi a inserção de um sinal aleatório utilizando o posicionador digital com a compensação do atrito. Para os experimentos em malha fechada foram realizados os controles da vazão no modo servo e no modo regulatório, os resultados obtidos do posicionador foram comparados com o tipo de compensação CR2 e com uma configuração sem o posicionador e sem a compensação do atrito. Os resultados demonstraram que o posicionador foi capaz de compensar o atrito da válvula de controle pneumática.

Palavras-chaves: válvulas pneumáticas; FPGA; atrito; posicionador digital; controle adaptativo inverso.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama da planta piloto de vazão.	7
Figura 2.2 – Diagrama esquemático do posicionador digital.	8
Figura 2.3 – FPGA Arty.	10
Figura 2.4 – <i>Softwares</i>	11
Figura 2.5 – Circuito para a entrada 4-20mA.	11
Figura 2.6 – Circuito para a entrada 0-10V.	12
Figura 2.7 – Conversor de tensão 0-3,3V para 4-20mA.	12
Figura 2.8 – Filtro passa baixa Sallen-Key.	13
Figura 2.9 – Filtro passa baixa Butterworth - 2 ^a ordem.	14
Figura 2.10 – Resposta ao degrau - Filtro Butterworth.	14
Figura 2.11 – Núcleo PWM.	15
Figura 2.12 – XADC Wizard - conversor A/D.	16
Figura 2.13 – Filtro de média móvel.	16
Figura 2.14 – Filtro passa baixa IIR.	17
Figura 2.15 – Bloco do Filtro IIR.	18
Figura 2.16 – Sinal original x filtrado.	18
Figura 2.17 – Controlador PID.	19
Figura 2.18 – Diagrama esquemático do controlador PID.	20
Figura 2.19 – Bloco de comunicação UDP/IP.	21
Figura 2.20 – Bloco de Comunicação Serial - UART.	22
Figura 2.21 – Núcleos do Gerenciador dos Processos.	22
Figura 2.22 – Bloco Gerenciador dos Processos.	23
Figura 2.23 – Conexões entre o posicionador e a válvula.	24
Figura 2.24 – Atuador Fisher 657.	25
Figura 2.25 – Atuadores 667 e 657.	25
Figura 2.26 – Posicionador digital.	26
Figura 3.1 – Assinatura da válvula de controle.	29
Figura 3.2 – Fluxograma do modelo de Kano.	32
Figura 3.3 – Fluxograma do modelo de He.	33
Figura 3.4 – Processo de sintonia dos controladores.	36
Figura 3.5 – Controle Adaptativo Inverso - Sintonia do Posicionador.	36
Figura 4.1 – Diagrama esquemático da excitação da válvula.	38
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do controle da vazão.	38
Figura 5.1 – Diagrama esquemático do posicionador digital - sem o controlador.	40
Figura 5.2 – Sinal Assinatura.	41
Figura 5.3 – Sinal Banda Morta.	41

Figura 5.4 – Sinal Identifica I/P.	42
Figura 5.5 – Sinal Mínimo e Máximo.	42
Figura 5.6 – Sinal Rampas.	43
Figura 5.7 – Sinal Velocidade Aleatória.	43
Figura 5.8 – Sinal Velocidade Senoidal.	44
Figura 5.9 – Sinal Velocidade Senoidal Aleatória.	44
Figura 5.10 – Diagrama do Posicionador Digital - com PID.	45
Figura 5.11 – Sinal Assinatura com o PID.	46
Figura 5.12 – Sinal Banda Morta com o PID.	46
Figura 5.13 – Sinal Identifica I/P com o PID.	47
Figura 5.14 – Assinatura da Válvula - Experimental.	48
Figura 6.1 – OP x Pressão no atuador - Válvula.	51
Figura 6.2 – Referência x Posição da haste - Válvula.	52
Figura 6.3 – Assinatura da válvula.	52
Figura 6.4 – OP x Pressão no atuador - Kano.	53
Figura 6.5 – Referência x Posição da haste - Kano.	53
Figura 6.6 – Assinatura da válvula - Kano.	54
Figura 6.7 – OP x Pressão no atuador - He.	54
Figura 6.8 – Referência x Posição da haste - He.	55
Figura 6.9 – Assinatura da válvula - He.	55
Figura 6.10 – OP x Pressão no atuador - Karnopp.	56
Figura 6.11 – Referência x Posição da haste - Karnopp.	56
Figura 6.12 – Assinatura da válvula - Karnopp.	57
Figura 6.13 – OP x Pressão no atuador - GMS.	57
Figura 6.14 – Referência x Posição da haste - GMS.	58
Figura 6.15 – Assinatura da válvula - GMS.	58
Figura 6.16 – Sinal aleatório - P e OP - Kano.	60
Figura 6.17 – Sinal aleatório - x - Kano.	61
Figura 6.18 – Sinal aleatório - P e OP - He.	61
Figura 6.19 – Sinal aleatório - x - He.	62
Figura 6.20 – Sinal aleatório - P e OP - Karnopp.	62
Figura 6.21 – Sinal aleatório - x - Karnopp.	63
Figura 6.22 – Sinal aleatório - P e OP - GMS.	63
Figura 6.23 – Sinal aleatório - x - GMS.	64
Figura 6.24 – Diagrama do controle da vazão sem posicionador.	65
Figura 6.25 – Diagrama do controle da vazão com posicionador.	66
Figura 6.26 – Vazão controle regulatório sem posicionador.	67
Figura 6.27 – Posição da haste controle regulatório sem posicionador.	67
Figura 6.28 – Vazão controle regulatório CR2.	68
Figura 6.29 – Posição da haste controle regulatório CR2.	68

Figura 6.30 – Vazão controle regulatório Kano.	69
Figura 6.31 – Posição da haste controle regulatório Kano.	69
Figura 6.32 – Vazão controle regulatório He.	70
Figura 6.33 – Posição da haste controle regulatório He.	70
Figura 6.34 – Vazão controle regulatório Karnopp.	71
Figura 6.35 – Posição da haste controle regulatório Karnopp.	71
Figura 6.36 – Vazão controle regulatório GMS.	72
Figura 6.37 – Posição da haste controle regulatório GMS.	72
Figura 6.38 – Vazão controle servo sem posicionador.	75
Figura 6.39 – Posição da haste controle servo sem posicionador.	75
Figura 6.40 – Vazão controle servo CR2.	76
Figura 6.41 – Posição da haste controle servo CR2.	76
Figura 6.42 – Vazão controle servo Kano.	77
Figura 6.43 – Posição da haste controle servo Kano.	77
Figura 6.44 – Vazão controle servo He.	78
Figura 6.45 – Posição da haste controle servo He.	78
Figura 6.46 – Vazão controle servo Karnopp.	79
Figura 6.47 – Posição da haste controle servo Karnopp.	79
Figura 6.48 – Vazão controle servo GMS.	80
Figura 6.49 – Posição da haste controle servo GMS.	80

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Parâmetros do PID.	45
Tabela 6.1 – Parâmetros do Controlador PID.	49
Tabela 6.2 – Parâmetros do CR2.	50
Tabela 6.3 – Índices da assinatura da válvula.	59
Tabela 6.4 – Índices do sinal aleatório com posicionador.	64
Tabela 6.5 – Parâmetros do Controlador PI de vazão (Cv).	66
Tabela 6.6 – Índices do controle regulatório.	73
Tabela 6.7 – Índices do controle servo.	81

Lista de Abreviaturas e Siglas

A/D	Analógico/Digital
AIC	Controle Adaptativo Inverso, do Inglês, <i>Adaptive Inverse Control</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CR2	Constant Reinforcement 2
D/A	Digital/Analógico
DDR3L	Fluxo de Dados Duplo Tipo 3, do Inglês, <i>Double Data Rate 3</i>
DIST	Distância Percorrida pela Haste da Válvula
DSP	Processador Digital de Sinal
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EQM	Erro Quadrático Médio
Fd	Força de Atrito Dinâmica
FPGA	Arranjo de Porta Programável em Campo, do Inglês, <i>Field Programmable Gate Array</i>
Fs	Força de Atrito Estática
I/P	Corrente/Pressão
IAE	Integral Absoluta do Erro
IIR	Resposta ao Impulso de Duração Infinita, do Inglês, <i>Infinite Impulse Response</i>
ISA	Sociedade Internacional de Automação, do Inglês, <i>International Society of Automation</i>
JTAG	Grupo de Ação de Teste Conjunto, <i>Joint Test Action Group</i>
LCPI	Laboratório de Controle de Processos Industriais
LUT	Tabela de Consulta do Inglês, <i>LookUp Table</i>
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear, do Inglês, <i>Linear Variable Differential Transformer</i>

PCI	Interconector de Componentes Periféricos, do Inglês, <i>Peripheral Component Interconnect</i>
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLL	Loop de Travamento de Fase, <i>Phase-Locked Loop</i>
Pmod	Módulos Periféricos, do Inglês, <i>Peripheral Module</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso, do Inglês, <i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	Memória de Acesso Aleatório, <i>Random Access Memory</i>
REQM	Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio
RS-232	Do Inglês, <i>Recommended Standard 232</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SDRAM	Memória de Acesso Aleatório Dinâmica Síncrona, do Inglês, <i>Synchronous Dynamic Random-Access Memory</i>
UART	Receptor/Transmissor Universal Assíncrono, do Inglês, <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UDP/IP	Do Inglês, <i>User Datagram Protocol/Internet Protocol</i>
USB	Porta Serial Universal, do Inglês, <i>Universal Serial Bus</i>
XADC	Conversor Analógico para Digital da Xilinx, <i>Xilinx Analog to Digital Converter</i>

Identificação da Instrumentação e Equipamentos da Planta Piloto

FV-10G	Válvula com Atuador Pneumático - Gaxeta de Grafite
FV-10T	Válvula com Atuador Pneumático - Gaxeta de Teflon
FE-10	Placa de Orifício
FIT-10A	Medidor de Pressão Diferencial
FE-10A	Medidor de Vazão Coriolis

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Motivação	3
1.3	Revisão da Literatura	3
1.4	Estrutura da Dissertação	5
2	METODOLOGIA APLICADA	6
2.1	Planta Piloto de Vazão	6
2.2	Descrição Funcional do Posicionador Digital Proposto	7
2.2.1	FPGA	8
2.2.2	Softwares	10
2.2.3	Entradas e Saída	11
2.2.4	Filtro Passa Baixa Analógico e Conversor D-A	12
2.2.5	Filtro Média Móvel e XADC	15
2.2.6	Filtro Passa Baixa - IIR 1ª ordem	17
2.2.7	Controlador da Válvula	19
2.2.8	Comunicações	21
2.2.9	Gerenciador dos Processos	22
2.3	Conexões	24
2.4	A Válvula e o Atuador Pneumático	24
2.5	O Posicionador	26
3	MODELAGEM DO ATRITO	27
3.1	Atrito	27
3.1.1	O estado de pré-deslizamento	29
3.1.2	O estado de deslizamento	29
3.2	Modelos de Atrito	30
3.3	Modelos Empíricos	30
3.3.1	Modelo de Kano	31
3.3.2	Modelo de He	32
3.4	Modelos Físicos	33
3.4.1	Modelo de Karnopp	33
3.4.2	Modelo GMS	34
3.5	Framework de Controle Adaptativo Inverso	34
4	FASES DO TRABALHO DE PESQUISA	37

4.1	Primeira Fase – Posicionador Digital e Validação	37
4.2	Segunda Fase – Compensador de Atrito e Experimentos	38
5	RESULTADOS PRELIMINARES	39
5.1	Experimentos	39
5.1.1	Levantamento das Características da Válvula	39
5.1.2	Controlador PID	45
5.2	Assinatura da Válvula	47
6	RESULTADOS FINAIS	49
6.1	Sintonia do Controlador PID do Posicionador Digital	49
6.2	Sintonia do CR2	50
6.3	Assinatura	50
6.4	Sinal Aleatório	60
6.5	Controle da vazão	65
6.5.1	Sintonia do Controlador de Vazão	66
6.5.2	Controle Regulatório	66
6.5.3	Controle Servo	74
7	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 Introdução

A importância de se estudar o atrito em válvulas de controle se deve à variabilidade da variável controlada gerada por essa não linearidade (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008).

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 utiliza a força da pressão do ar para movimentar a haste, modulando a sua abertura e fechamento de acordo com o controle do processo. A variabilidade nas malhas de controle impactam na qualidade do produto final, acelera o desgaste do equipamento e aumenta o desperdício da energia e da matéria prima (CAPACI; SCALI; PANNOCCHIA, 2016).

Com o passar do tempo, as válvulas de uma planta sofrem desgastes em suas partes móveis, ocasionando o aumento da magnitude do atrito 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.

O atrito se apresenta entre a haste e a gaxeta, o desgaste da gaxeta ou um aperto exagerado podem elevar demasiadamente os níveis de atrito, contribuindo inclusive para o aparecimento do atrito estático (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008).

O comportamento da válvula muda significativamente à medida que o atrito aumenta (ROMANO; 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 tipicamente ocorre em intervalos entre 6 meses a 3 anos (SRINIVASAN; RENGASWAMY, 2005). Neste período, a válvula com problema opera de maneira sub-ótima, afetando diretamente o consumo 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 et al. (2019) e em Marques (2019), que estão

instalados nos atuadores das válvulas. A função do posicionador consiste em colocar a haste de comando da válvula na posição desejada, por meio de uma realimentação da posição da haste.

O uso de posicionadores inteligentes está se tornando mais frequente, pois atualmente se tem mais instrumentação incorporada na válvula (CAPACI; 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, são utilizados os algoritmos de Marques e Garcia (2020), que utilizam um método invasivo, sendo necessário que a válvula seja excitada sem vazão na planta, em malha aberta, pois este teste pode gerar uma grande perturbação na malha de controle. Para esta dissertação, a estimação dos parâmetros do atrito é realizada por um método invasivo, sendo necessário que a válvula seja excitada sem vazão na planta.

Os modelos físicos descrevem o fenômeno do atrito usando o balanço de forças e a segunda lei do movimento de Newton (GARCIA, 2008), sendo a principal desvantagem destes modelos a necessidade de se conhecer vários parâmetros da válvula, como massa das partes móveis, coeficiente da mola entre outros. Por outro lado, os modelos empíricos simplificam a simulação de uma válvula com atrito e têm sido utilizados para estudar o atrito da válvula (GARCIA, 2008).

Nesta dissertação são utilizados dois modelos empíricos de Kano e de He e dois modelos físicos (fenomenológicos) de Karnopp e de GMS, sendo possível abranger várias características de cada modelo e por fim comparar os resultados obtidos pela compensação do atrito obtidos por cada modelo.

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.

Os sistemas de controle industriais cada vez mais demandam melhor desempenho, e ao mesmo tempo, redução de custo de operação, desta forma um *hardware* que apresente altas velocidades, baixo consumo de energia e reconfiguração é desejável em aplicativos de controle.

Por fim, este trabalho verificará o controle de vazão de uma planta de vazão, utilizando o posicionador digital embarcado em FPGA, com período de amostragem de 1ms, como em um dos experimentos de Hidalgo e Garcia (2017) e o controlador PID sintonizado pelo método do trabalho de Marques e Garcia (2020).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um posicionador digital utilizando um FPGA comercial, para ser utilizado na amostragem dos dados e na compensação do atrito

nos ensaios da válvula (em malha aberta) e da vazão (em malha fechada). Para alcançar este objetivo é necessário realizar os seguintes passos:

1. Realizar a amostragem em alta frequência das entradas;
2. Filtrar as entradas;
3. Controlar a saída com um controlador;
4. Gerar gráficos temporais para analisar as amostras;
5. Comunicação entre o posicionador e um computador;
6. Comparação entre os modelos de atrito utilizados na compensação via posicionador digital.

1.2 Motivação

A motivação desta dissertação é desenvolver um posicionador digital, que permita controlar com uma elevada taxa de amostragem uma válvula de controle tipo mola/diafragma pneumática com alto índice de atrito. O posicionador digital será implementado em FPGA devido à sua capacidade de processamento elevado, realizar tarefas de processamento críticas, para implementar funções personalizadas, inexistência de processadores e a realização de operações paralelas. Os FPGAs são amplamente empregados na indústria para substituir componentes sensíveis ou obsoletos. Na indústria nuclear, eles desempenham um papel fundamental em sistemas críticos, como o sistema de proteção, devido à sua alta confiabilidade e à ausência de obsolescência programada, comum em processadores convencionais. No entanto, a utilização de FPGAs apresenta desafios, como a dificuldade de realizar operações em ponto flutuante. Isso demanda o desenvolvimento de processadores específicos para executar tais operações, constituindo um aspecto crítico. Finalmente, a escolha de empregar FPGA no controle de processos industriais baseia-se em sua elevada taxa de amostragem e a possibilidade de atingir o determinismo. Essa decisão segue a abordagem proposta por (HIDALGO; GARCIA, 2017), que tentou implementar um posicionador digital com alta taxa de amostragem em um microcontrolador, sem sucesso em atingir uma taxa inferior a 10ms. Portanto, a justificativa para utilizar um hardware como o FPGA é a sua capacidade de alcançar tempos de amostragem significativamente menores.

1.3 Revisão da Literatura

Para se gerar o modelo de válvulas tipo mola/diafragma pneumáticas, pode-se utilizar modelos físicos que descrevem o fenômeno do atrito, usando o balanço de forças e

a segunda lei do movimento de Newton (GARCIA, 2008) e os modelos empíricos baseados em simplificações da curva de Stribeck e fornece diretamente o modelo da válvula, já com o atrito. Estes modelos são frequentemente usados para modelos de válvulas sem sensores incorporados e controladores de posição, pois seria difícil estimar os parâmetros de um modelo da válvula mais complexo sem sensores adequados. O modelo de Kano é capaz de prever o comportamento esperado das curvas de assinatura da válvula, que são utilizadas para diagnóstico de válvulas (GARCIA, 2008).

Karnopp (1985) utiliza a curva de Stribeck para simular a transição do atrito estático para o atrito dinâmico. Vários pesquisadores estudam a estimativa dos parâmetros de atrito da válvula do tipo mola/diafragma pneumática, alguns propõem métodos mais diretos pela análise da curva de assinatura da válvula, usando a posição da haste e a saída do controlador do processo (KANO et al., 2004; CHOUDHURY; JAIN; SHAH, 2008). Existem outros métodos que assumem que não está disponível a posição da haste e os parâmetros de atrito são calculados pela análise do comportamento oscilatório da saída do controlador e a variável do processo como apresentado nos trabalhos de (KANO et al., 2004; CHOUDHURY; JAIN; SHAH, 2006), (HÄGGLUND, 2007) e (ROMANO, 2010).

Em Uehara, Romano e Garcia (2008) é realizada a estimação dos coeficientes do modelo de Kano e Karnopp, comparando-se as curvas de assinatura experimentais com as dos modelos de atrito. A estimação do atrito é uma etapa bastante crítica para o desenvolvimento de compensadores de atrito, visto que a dinâmica de uma malha de controle é modificada caso o atrito varie (CHOUDHURY; THORNHILL; SHAH, 2005). Romano e Garcia (2011) utilizaram amostragem de 1ms para melhorar a precisão do sistema nas derivadas, apesar de essa alta frequência ser muito mais rápida que a dinâmica do sistema.

Em Hidalgo e Garcia (2017) foi realizada uma análise do desempenho da compensação de atrito, atuando no controlador do processo e no posicionador digital, para várias taxas de amostragem. O controlador utilizado para o controle da válvula foi o Sliding Mode Control, alcançando melhores resultados para maiores taxas de amostragem.

Em Marques (2019) foram desenvolvidos algoritmos para a estimação dos modelos de atrito e a compensação dos parâmetros do controlador do posicionador digital e foi realizada a comparação entre os modelos com dados reais da válvula em operação.

Quanto menor o período de amostragem utilizado nos trabalhos descritos anteriormente, se torna necessária a utilização de um hardware dedicado que trabalhe com alta taxa de amostragem e realize outras operações ao mesmo tempo. O FPGA é um arranjo de portas programáveis em campo, um tipo de circuito integrado, programado após sua fabricação. Os FPGAs são referidos como uma forma de hardware programável, pois normalmente não há *software* ou sistema operacional em execução no próprio FPGA (MCNELLES; LU, 2014).

Devido à natureza de alta velocidade do FPGA, a frequência de amostragem é bem maior do que a que pode ser alcançada usando um controlador digital convencional, baseado apenas em microcontroladores ou em um Processador Digital de Sinal (DSP) (JUNG et al., 1999).

Em Gaikwad e Chavan (2017) foi implementado um filtro digital em um FPGA da Xilinx, o filtro foi analisado utilizando um sinal de eletrocardiograma como entrada, para taxa de amostragem de 1ms, obtendo uma filtragem para ruídos de alta frequência.

Por fim, devido à sua reprogramabilidade, o FPGA apresenta baixo custo de desenvolvimento e além disso, em um sistema baseado em FPGA, o controlador pode ser adaptado em tempo de execução às necessidades da planta, reconfigurando-a dinamicamente.

O resultado é um ambiente de projeto que permite todos os aspectos funcionais do sistema a ser considerado simultaneamente, aumentando assim o determinismo do sistema, minimizando o tempo de resposta, e maximizando o desempenho operacional, para alcançar alta eficiência e diminuição de consumo de energia, permitindo simultaneamente a prototipagem rápida de controladores digitais em FPGA (MONMASSON; CIRSTE, 2007).

1.4 Estrutura da Dissertação

Este trabalho segue a seguinte estrutura: A secção 1.3 é composta por uma revisão da literatura, com as referências adotadas para esta pesquisa. No Capítulo 2 são descritos as estruturas e equipamentos utilizados na pesquisa, sendo descritos a Planta Piloto de Vazão, o posicionador digital desenvolvido, as conexões do posicionador e a válvula com atuador pneumático. No Capítulo 3 é descrito, de forma sucinta, o atrito e os modelos de atrito que serão utilizados. No Capítulo 4 são apresentadas as etapas da pesquisa desenvolvida, identificando os passos realizados no desenvolvimento. No Capítulo 5 são apresentados os resultados da primeira fase da pesquisa, como a aquisições de dados do posicionador na Planta Piloto de Vazão do Laboratório de Controle de Processos Industriais - LCPI, os testes iniciais do controlador PID, sintonizado por parâmetros empíricos. No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos para o posicionador, em malha aberta e em malha fechada. Ao final, Capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas da análise dos resultados

2 Metodologia Aplicada

Neste capítulo são apresentados e descritos todos os componentes utilizados para a realização dos experimentos desta dissertação. Nas subseções posteriores são descritas a Planta Piloto de Vazão do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI), as válvulas com atuador pneumático utilizadas e, por fim, o posicionador digital desenvolvido neste trabalho.

2.1 Planta Piloto de Vazão

Para realizar os experimentos do posicionador digital, é utilizada a Planta Piloto de Vazão instalada no Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). O diagrama simplificado da planta piloto é exibido na Figura 2.1, a planta é um circuito fechado sendo composta por um tanque, uma bomba, sensor de vazão, sensores de posição das hastes das válvulas e válvulas para realizar a modulação do controle de vazão. A bomba transporta a água do tanque, força sua passagem pelas tubulações e válvulas, retornando para o tanque. O controle da vazão é realizado pelo Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) da ABB 800xA ou pelo *kit* da National Instruments controlável em tempo real pelo Matlab[®]. A vazão volumétrica é medida utilizando a placa de orifício FE-10 com medidor de pressão diferencial FIT-10A ou via medidor de vazão Coriolis FE-10B. Existem duas válvulas com atuadores pneumáticos: a FV-10G com gaxetas de grafite e a FV-10T com gaxetas de teflon, sendo que esta última apresenta baixo atrito. Este trabalho foi realizado utilizando a válvula com gaxeta de grafite para as análises da influência do atrito no controle de válvulas pneumáticas.

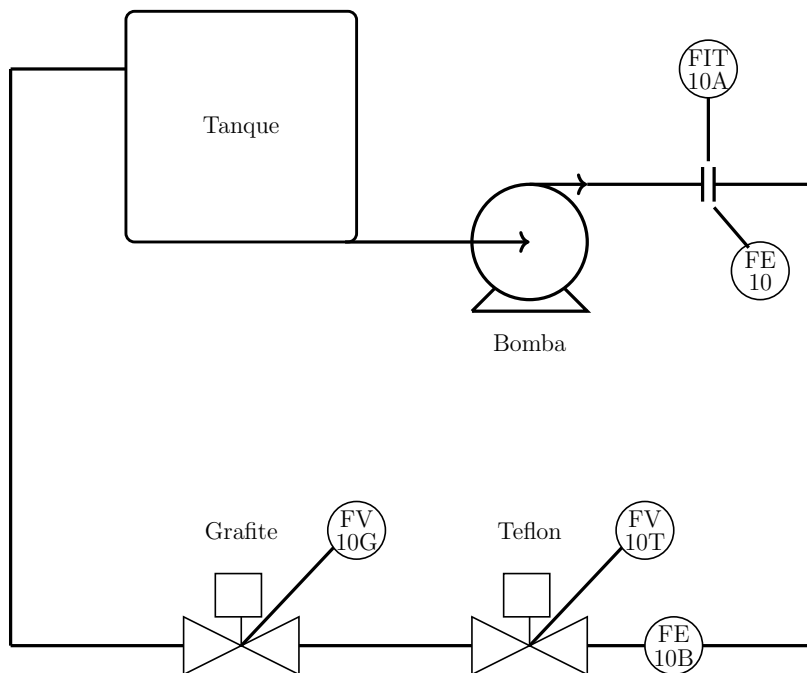


Figura 2.1 – Diagrama da planta piloto de vazão.

Fonte: do Autor.

2.2 Descrição Funcional do Posicionador Digital Proposto

A Figura 2.2 apresenta o diagrama esquemático em blocos do Posicionador Digital sendo proposto nesta dissertação, 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 dentro da área pontilhada, representa as estruturas internas ao FPGA, enquanto que as estruturas externas a área pontilhada são circuitos para condicionamento dos sinais de entradas e saída. As três entradas analógicas de campo são representadas por R , x e P , enquanto a saída analógica do posicionador é OP . Sendo R a posição de referência da haste, x a posição da haste da válvula, P a pressão da câmara do atuador pneumático da válvula e OP a saída do controlador do posicionador digital.

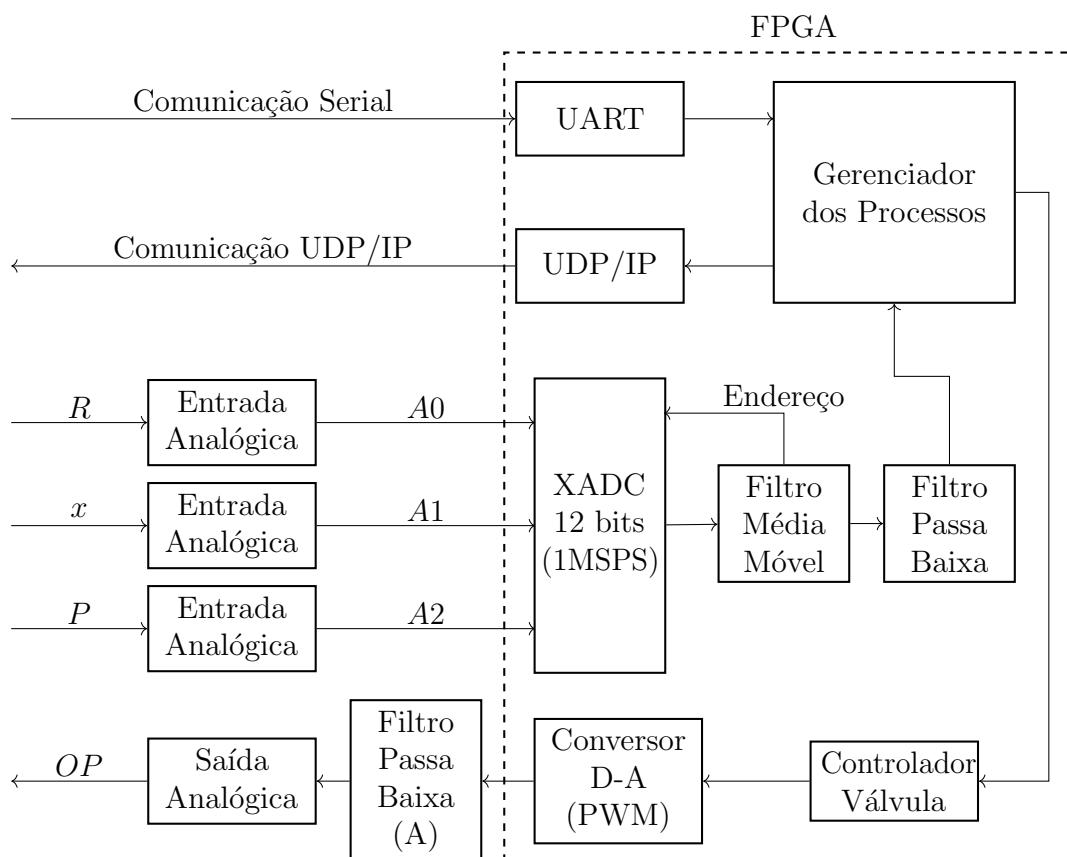


Figura 2.2 – Diagrama esquemático do posicionador digital.

Fonte: do Autor.

2.2.1 FPGA

O *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) é um dispositivo eletrônico programável, composto por uma matriz de blocos lógicos configuráveis, que podem ser programados para executar funções específicas. Sendo que a sua flexibilidade permite que o FPGA seja utilizado em uma variedade de aplicações, desde o processamento de dados em tempo real até o controle de sistemas complexos em ambientes industriais. Os FPGAs são altamente customizáveis, permitindo que seja configurado de acordo com as necessidades específicas de cada processo, sendo possível criar soluções mais eficientes e econômicas para as necessidades específicas. Também são altamente confiáveis, com baixo risco de falhas e tempos de resposta muito rápidos. O tempo de processamento é uma das principais características do FPGA, isso vem da possibilidade de paralelizar o processamento em diferentes partes do circuito, permitindo a implementação de sistemas altamente eficientes, capazes de processar grandes quantidades de dados em tempo real e com alta precisão.

Para o desenvolvimento do posicionador digital foi utilizado o *kit* de desenvolvimento Arty da Digilent, o qual é equipado com o FPGA Artix-35T(xc7a35ticsg324-1L). O *kit* Arty da Digilent mostrado na Figura 2.3 foi selecionado para o desenvolvimento do posicionador digital, pois além de vir equipado com o FPGA, dispõe de interfaces de comunicações,

chaves, botões, memória, entradas e saídas digitais. São apresentadas abaixo com maiores detalhes as características dos componentes presentes no *kit*:

- FPGA Xilinx Artix-35T(xc7a35ticsg324-1L):
 - 5200 fatias (cada fatia contém quatro 6-entradas LUTs e 8 flip-flops);
 - 1800 kbits de blocos RAM;
 - Cinco blocos de gerenciamento de *clock*, cada um com PLL;
 - 90 DSP;
 - *Clock* máximo de 464MHz;
 - Conversor analógico-digital interno (XADC);
 - Programável em JTAG e Quad-SPI Flash.

- Placa Arty:
 - 256MB DDR3L com 16-bits de barramento @ 667MHz;
 - 16MB Quad-SPI Flash;
 - Circuito de programação USB-JTAG;
 - Alimentada pela USB ou qualquer fonte de 7V-15V.

- Conectividade do sistema:
 - 10/100 Mbps Ethernet;
 - USB-UART.

- Interações e sensores:
 - 4 chaves;
 - 4 botões;
 - 1 botão de Reset;
 - 4 Leds;
 - 4 leds RGB.

- Conectores de expansão:
 - 4 conectores Pmod;
 - Conector Arduino/ChipKit Shield.

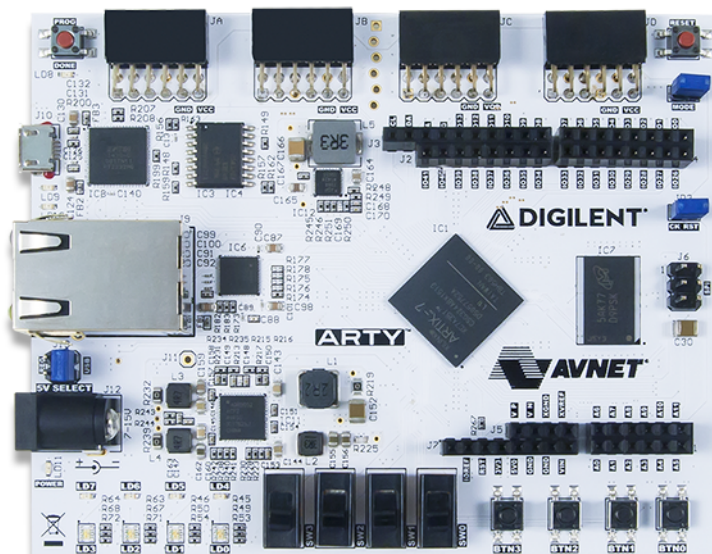


Figura 2.3 – FPGA Arty.

Fonte: Arty 7 35T Arty FPGA Evaluation Kit, AMD XILINX, disponível em: <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/artly.html>. Acesso em 19 out. 2023.

Com o paralelismo é possível que uma rotina responsável por atuar no controle da válvula pneumática seja realizada juntamente com a aquisição, filtragem das entradas e as rotinas de comunicações, sem a necessidade de realização de interrupções.

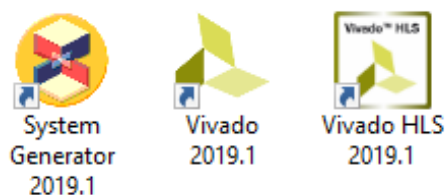
2.2.2 Softwares

Para o desenvolvimento dos códigos do FPGA são utilizados o Vivado HLS 2019.1[®], System Generator 2019.1[®] e o Vivado 2019.1[®], *softwares* da Xilinx, sendo que cada um apresenta suas vantagens dependendo das necessidades do código. O Vivado HLS 2019.1[®] utiliza linguagem C e C++ para o desenvolvimento de um núcleo, sendo possível utilizar números com ponto flutuante e várias bibliotecas da linguagem C e C++. É utilizado para criar os controladores que serão utilizados no posicionador digital.

O System Generator é uma interface que utiliza o Simulink[®] do Matlab[®], onde existem blocos da Xilinx que podem ser utilizados para se criar a função desejada, sendo possível utilizar as ferramentas do Simulink[®] para testar o núcleo desenvolvido. É utilizado para se criar o filtro passa baixa IIR de 1^a ordem.

O Vivado 2019.1[®] é o principal *software*, sendo nele que ocorre a junção de todos os núcleos desenvolvidos nos outros *softwares* e com a arquitetura pronta é gerado o *bitstream* para programar o FPGA.

Foi utilizado o Python para criar o link de comunicação entre o FPGA e o computador, pois existem bibliotecas próprias para a comunicação serial e a UDP, agilizando o desenvolvimento da comunicação.

Figura 2.4 – *Softwares*.

2.2.3 Entradas e Saída

O Posicionador Digital é composto por uma saída e três entradas analógicas, sendo que nas entradas são realizadas a aquisição das variáveis posição, pressão e o sinal de referência do controlador de vazão do processo. Enquanto que a saída gera o sinal para atuar o conversor I/P da válvula. As entradas de pressão e posição são de 0-10V e o sinal de referência do controlador de vazão do processo é 4-20mA, conforme foi apresentado na Figura 2.23. São necessários conversores para realizar o condicionamento dos sinais dos instrumentos com o FPGA, sendo que para as entradas são utilizados dois conversores de tensão de 0-10V para 0-3,3V, conforme apresentado na Figura 2.6, e um conversor de corrente de 4-20mA para 0-3,3V, Figura 2.5. Para atuar o conversor I/P é utilizado um conversor de tensão para corrente de 0-3,3V para 4-20mA, Figura 2.7.

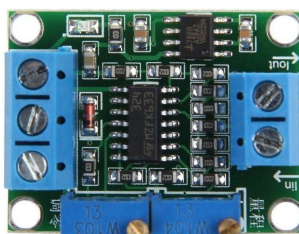


Figura 2.5 – Circuito para a entrada 4-20mA.

Fonte: Conversor 4 A 20ma para 3.3V, MC1 Componentes, disponível em: https://www.mc1componentes.com.br/MLB-911438786-conversor-4-a-20ma-para-0-a-5v-33v-10v-15v-cod09-_JM. Acesso em 19 out. 2023.

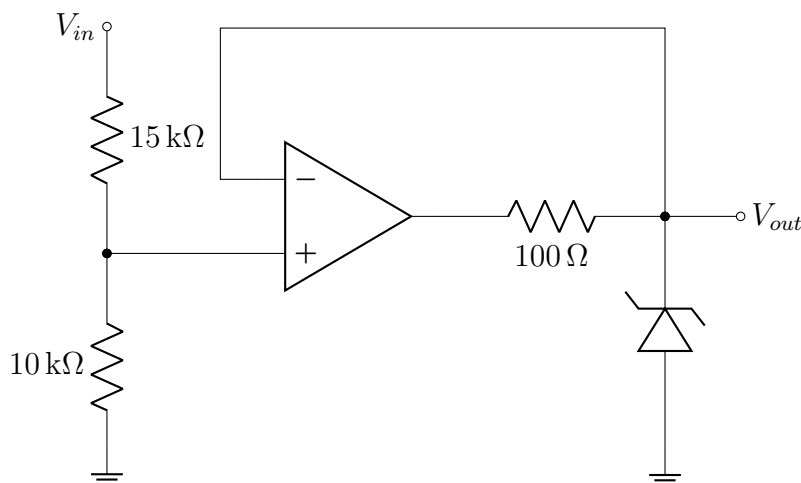


Figura 2.6 – Circuito para a entrada 0-10V.

Fonte: do Autor.

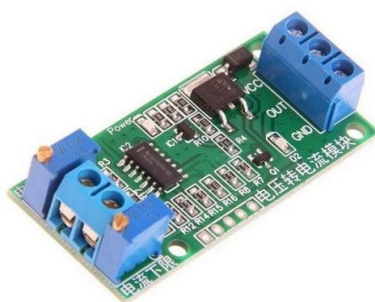


Figura 2.7 – Conversor de tensão 0-3,3V para 4-20mA.

Fonte: Conversor de tensão 0-3.3V para 4-20mA, Marino Store, disponível em: <https://www.marinostore.com/automacao/conversor-de-tensao-0-3-3v-para-4-20ma>. Acesso em 19 out. 2023.

2.2.4 Filtro Passa Baixa Analógico e Conversor D-A

Por falta de uma saída analógica no FPGA, foi necessário modular uma saída digital com um PWM interligado a um filtro passa baixa analógico. O filtro passa baixa utilizado foi o *Sallen-Key* de 2^a ordem, por apresentar uma resposta em frequência mais plana e não apresentar *ripple*. A Figura 2.8 exibe o filtro utilizado para gerar a saída analógica, os componentes foram escolhidos de forma a se obter uma frequência de corte de 1224,61Hz, de acordo com a Figura 2.9. A resposta do filtro ao degrau unitário pode ser observada na Figura 2.10, observando sua resposta rápida, plana e sem *ripple*. O PWM foi desenvolvido utilizando a linguagem de descrição de *hardware* Verilog, após a validação do código foi criado um bloco com as interfaces de entradas e saída como indicado na Figura

2.11. A saída PWM foi ajustada adotando a relação de 10 vezes a frequência de corte do filtro passa baixa, sendo ajustada em 12kHz.

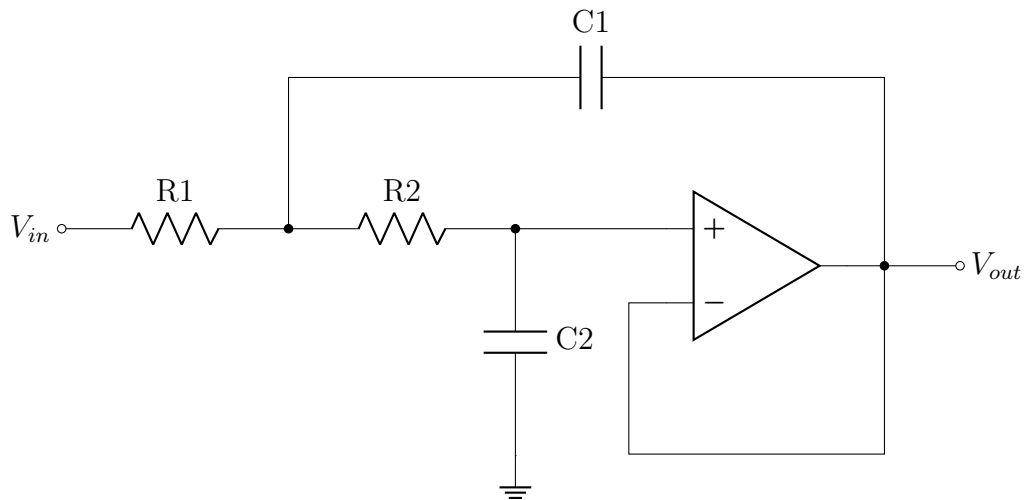


Figura 2.8 – Filtro passa baixa Sallen-Key.

Fonte: do Autor.

A função de transferência do filtro *Sallen-Key* utilizado com os componentes é apresentada na equação (2.1).

$$\frac{vout(s)}{vin(s)} = \frac{\frac{1}{R1.C1.R2.C2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R2.C1} + \frac{1}{R1.C1}\right) + \frac{1}{R1.C1.R2.C2}} \quad (2.1)$$

A frequência de corte (f_c) do filtro é calculada por (2.2), com os componentes selecionados obteve-se $f_c = 1224,61$ Hz.

$$f_c = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{R1.R2.C1.C2}} \quad (2.2)$$

O fator de qualidade indicado por Q é calculado por (2.3) e pode ser simplificada com a frequência de corte por (2.4).

$$Q = \frac{\sqrt{R1.R2.C1.C2}}{C2(R1 + R2)} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{1}{2.\pi.f_c.C2(R1 + R2)} \quad (2.4)$$

O fator de Qualidade encontrado foi de $Q = 0,5967$, apresentando características entre o filtro Bessel e Butterworth.

A função de transferência do filtro relacionada com a frequência de corte (f_c) e o fator de qualidade (Q) e indicada na equação (2.5).

$$H(s) = \frac{(2.\pi.f_c)^2}{s^2 + \left(\frac{2.\pi.f_c}{Q}\right).s + (2.\pi.f_c)^2} \quad (2.5)$$

A função transferência com os parâmetros calculados é apresentada pela equação (2.6).

$$H(s) = \frac{(2\pi \cdot fc)^2}{s^2 + \left(\frac{2\pi \cdot fc}{Q}\right) \cdot s + (2\pi \cdot fc)^2} \quad (2.6)$$

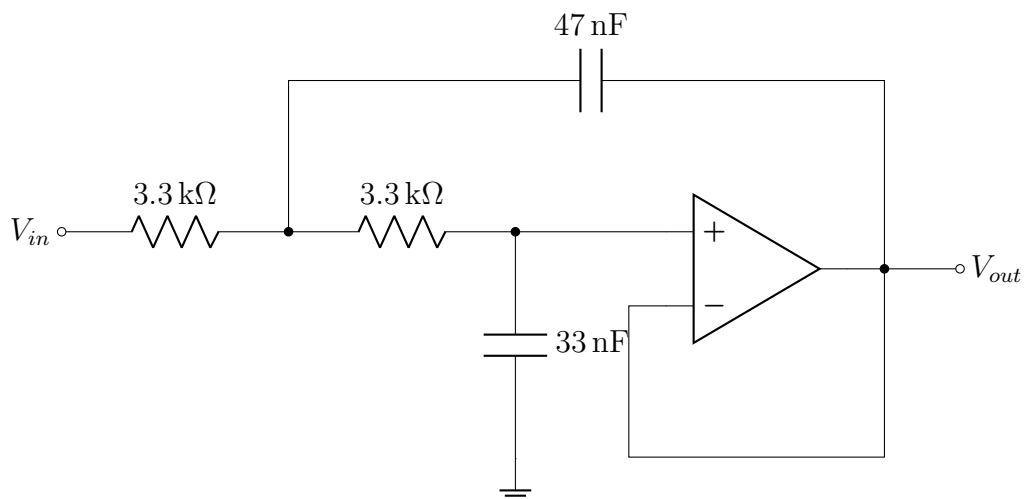


Figura 2.9 – Filtro passa baixa Butterworth - 2ª ordem.

Fonte: do Autor.

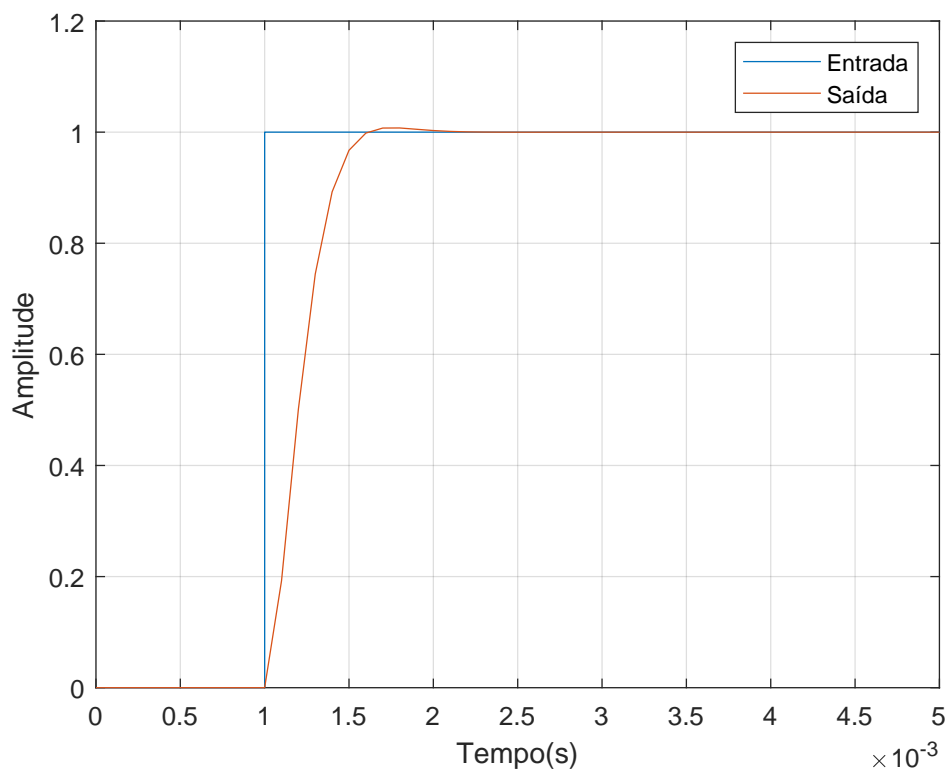


Figura 2.10 – Resposta ao degrau - Filtro Butterworth.

Fonte: do Autor.

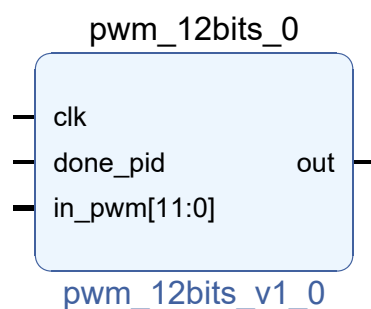


Figura 2.11 – Núcleo PWM.

Fonte: Extraído do *software* Vivado[®].

2.2.5 Filtro Média Móvel e XADC

O filtro média móvel e o bloco XADC trabalham de forma independente das outras estruturas do posicionador, não havendo influência de outros blocos no seu processamento. O FPGA escolhido para o desenvolvimento do posicionador digital apresenta apenas um conversor A/D, o FPGA utiliza um multiplexador para endereçar as entradas analógicas e assim ser possível utilizar mais de uma entrada analógica, no *software* Vivado[®] o bloco XADC da Xilinx é responsável por endereçar a entrada analógica desejada e realizar a conversão A/D, o bloco utilizado é apresentado na Figura 2.12. Para o desenvolvimento do posicionador foram utilizadas três entradas analógicas Vaux4, Vaux5 e Vaux6, como apresentado na Figura 2.12. As três entradas são utilizadas para amostrar o valor da referência da posição da haste, a posição da haste e o valor da pressão da câmara do atuador pneumático. O controle de qual entrada analógica está sendo utilizada foi realizado pelo bloco do filtro de média móvel, ele é responsável por endereçar a entrada analógica no bloco XADC, esperar a conversão ser realizada e salvar em um registrador a saída analógica convertida. As saídas analógicas convertidas são submetidas ao filtro de média móvel, para remover ruídos e flutuações nos sinais coletados, apresentando uma saída mais clara e precisa.

O bloco do filtro de média móvel utilizado é exibido na Figura 2.13, sendo responsável por endereçar uma entrada analógica no XADC, esperar a conversão, ler a saída convertida do XADC pela entrada `signal_in[15:0]` e realizar uma filtragem de média móvel para cada sinal de entrada. O bloco do filtro de média móvel controla o bloco de conversão XADC, sendo eles independentes dos outros blocos da arquitetura do posicionador, ou seja, eles trabalham em conjunto e não são influenciados pelos outros blocos do posicionador. A filtragem é realizada pela média do número de sinais amostrados, dividido pelo número de amostras, gerando um sinal de saída filtrado. Para facilitar a divisão de números inteiros, foi utilizado um número de amostras múltiplas de 2^n , sendo n o número de amostras. A divisão é realizada com um deslocamento de " n " casas para a direita do número binário. A

vantagem dessa abordagem é que a divisão à direita por uma potência de 2 é eficiente em hardware, pois é rápida e economiza recursos do FPGA. No desenvolvimento do posicionador a taxa de amostragem por canal utilizada foi de 333,33 kHz e foram amostrados 256 sinais por entrada analógica, as amostras foram acumuladas em um registrador de 24 bits e divididas pela divisão direita, movendo os bits do acumulador 8 casas a direita, na Equação 2.7 A equivale a saída filtrada e $x(\text{acumulador})$ as entradas somadas. O filtro de média móvel realiza uma primeira filtragem e disponibiliza seus sinais filtrados nas três saídas do bloco, Figura 2.13, sendo elas A0, A1 e A2.

$$A = x(\text{acumulador}) \gg 8 \quad (2.7)$$

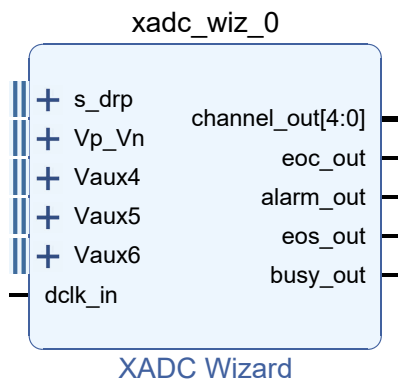


Figura 2.12 – XADC Wizard - conversor A/D.

Fonte: Extraído do *software* Vivado®.

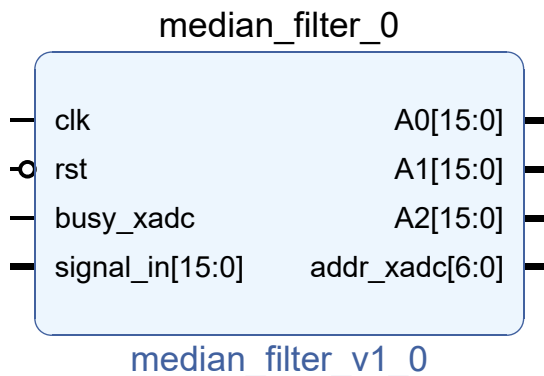


Figura 2.13 – Filtro de média móvel.

Fonte: Extraído do *software* Vivado®.

2.2.6 Filtro Passa Baixa - IIR 1^a ordem

O filtro passa baixa IIR de 1^a ordem é o segundo estágio de filtragem, utilizado para filtrar os sinais de entrada do Posicionador Digital. A válvula é um sistema passa-baixa, sendo a constante de tempo dominante a do conversor I/P (MARQUES; GARCIA, 2020), o $\tau_{I/P}$ calculado foi de 1,59s, então a frequência de corte da válvula adotada é de 0,6302rad/s ou 0,1003Hz. Desta forma a frequência de corte adotada para o filtro passa baixa IIR foi 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, como é indicado na Figura 2.14. O bloco do filtro IIR é exibido na Figura 2.15, internamente ele contém três circuitos iguais ao da Figura 2.14, sendo um circuito para cada canal de entrada. A Figura 2.16 apresenta uma comparação entre o mesmo sinal sem filtro e utilizando o filtro, os sinais foram obtidos utilizando a mesma entrada de campo. O sinais filtrados são utilizados no Gerenciador dos Processos e são disponibilizados para a comunicação UDP/IP e para o controlador da válvula.

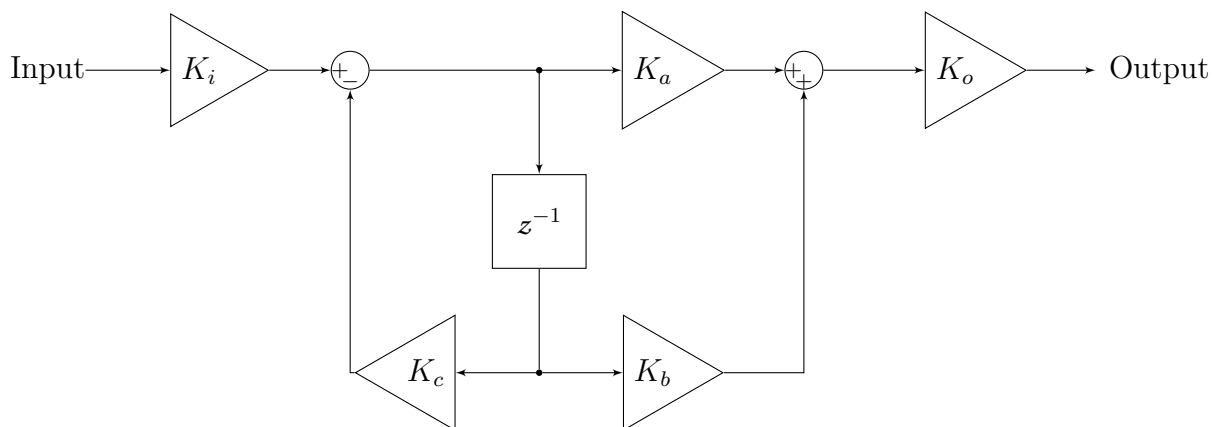


Figura 2.14 – Filtro passa baixa IIR.

Fonte: do Autor.

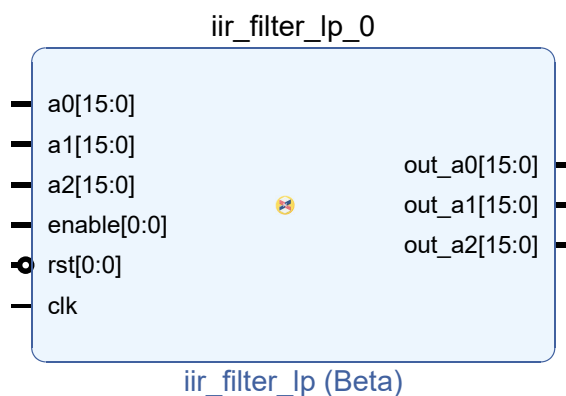


Figura 2.15 – Bloco do Filtro IIR.

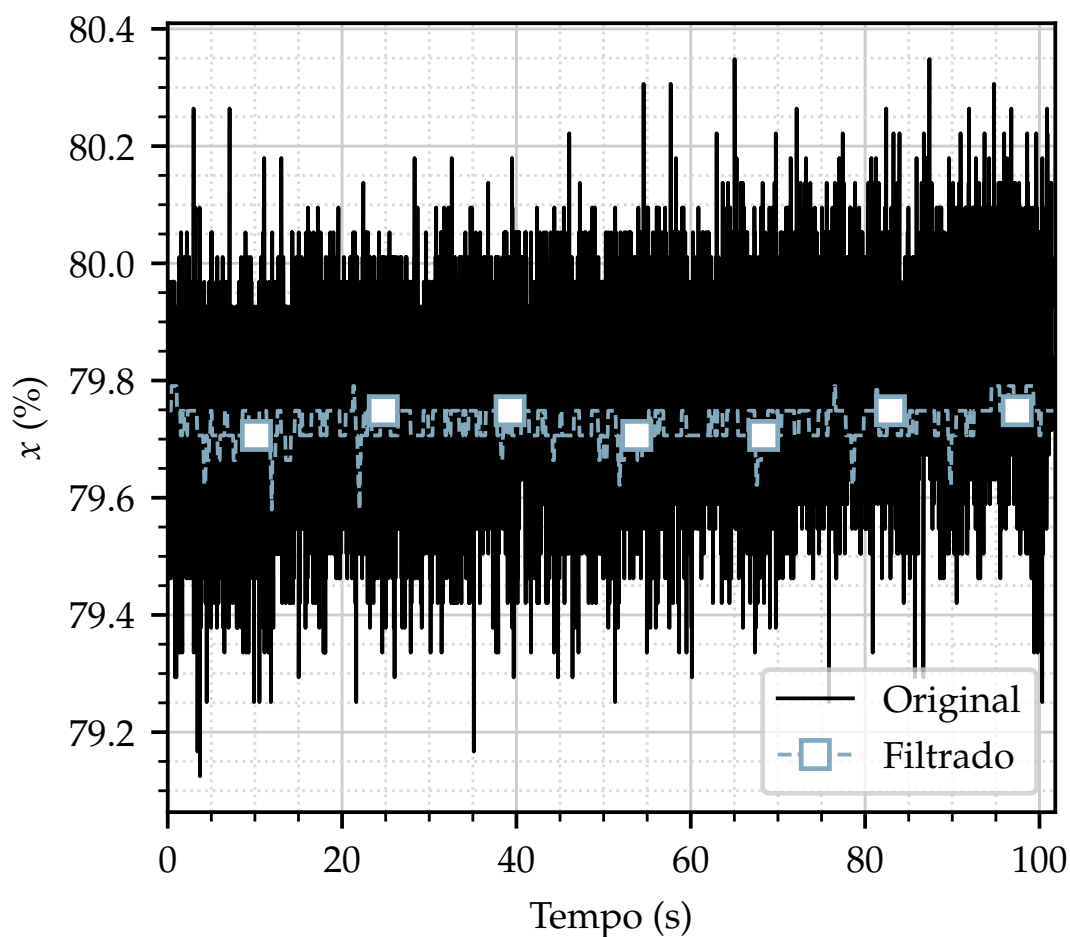
Fonte: Extraído do *software* Vivado®.

Figura 2.16 – Sinal original x filtrado.

Fonte: do Autor.

2.2.7 Controlador da Válvula

O controlador da válvula é implementado em linguagem C, após a validação do código é criado um núcleo para o controlador, como exemplo tem-se o PID na Figura 2.17. Os parâmetros do controlador podem ser alterados com o posicionador operando. Neste trabalho foi utilizado o controlador PID no posicionador digital. O controlador foi sintonizado com os parâmetros calculados a partir dos dados adquiridos pelos testes em malha aberta e com a utilização dos algoritmos de estimação de parâmetros de Marques e Garcia (2020).

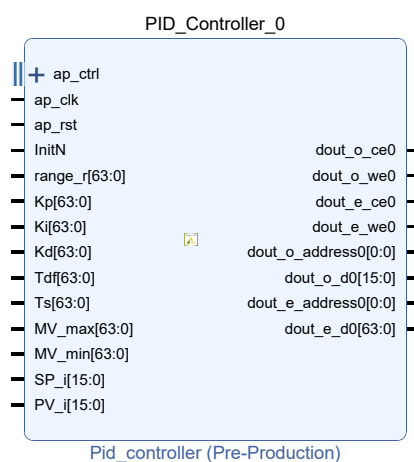


Figura 2.17 – Controlador PID.

Fonte: Extraído do *software* Vivado[®].

O diagrama esquemático do controlador PID utilizado é indicado na Figura 2.18, de acordo com (GARCIA, 2021).

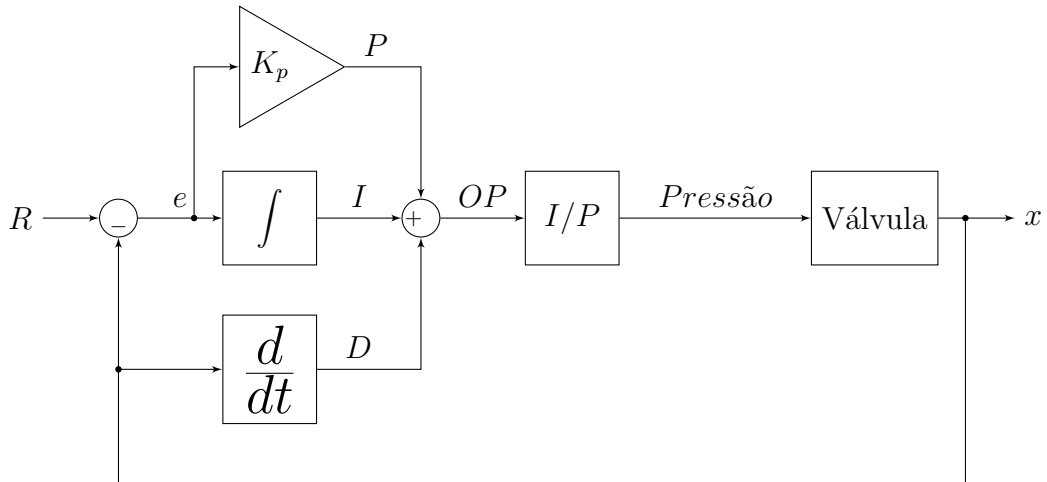


Figura 2.18 – Diagrama esquemático do controlador PID.

Fonte: do Autor.

O erro é calculado pela resposta do sistema:

$$e[n] = R[n] - x[n] \quad (2.8)$$

O controlador PID é definido pelas Equações (2.9) a (2.12), onde Kp é o ganho proporcional, Ki é o ganho integral, Kd 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 $x[n] = x(n \cdot T_s)$.

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

$$P[n] = Kp \cdot e[n] \quad (2.9)$$

A parcela integral (I) é calculada pela Equação (2.10).

$$I[n] = I[n-1] + Ki \frac{T_s}{2} (e[n-1] + e[n]) \quad (2.10)$$

A parcela derivativa (D) é calculada pela Equação (2.11).

$$D[n] = \frac{-Kd \cdot (x[n] - x[n-1]) + T_{df} D[n-1]}{T_{df} + T_s} \quad (2.11)$$

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

$$OP[n] = P[n] + I[n] + D[n] \quad (2.12)$$

2.2.8 Comunicações

O Posicionador utiliza dois tipos de comunicações: a UDP/IP e a serial RS-232. A comunicação UDP/IP é no sentido do posicionador para o computador, para transmitir as informações de referência do controlador de vazão, posição da haste, pressão da câmara do atuador pneumático e a saída do controlador para o computador. Os dados adquiridos via UDP/IP são utilizados para a estimação dos parâmetros e verificação dos resultados. É utilizada a comunicação UDP/IP por sua velocidade de transmissão ser maior, sendo possível transmitir até 1024 bytes a cada 100µs. Para a configuração adotada no posicionador, é possível trabalhar com taxa de amostragem máxima de 100µs e transmissão de dados de 10,24MB/s. A Figura 2.19 apresenta o bloco da comunicação UDP/IP com suas entradas e saídas, as conexões iniciadas com *eth* são ligações do FPGA com o conector Ethernet, enquanto as demais são interfaces internas ao FPGA.

A comunicação serial é no sentido do computador para o posicionador digital, Figura 2.19, sendo utilizada apenas para zerar a estampa de tempo, que é utilizada na amostragem dos sinais. A Figura 2.20 indica o bloco de comunicação serial UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), o bloco pode ser utilizado tanto para receber quanto transmitir dados. Os registradores de leitura e escrita apresentam 8 bits, possibilitando escrever ou ler 1 byte por ciclo de trabalho do bloco.

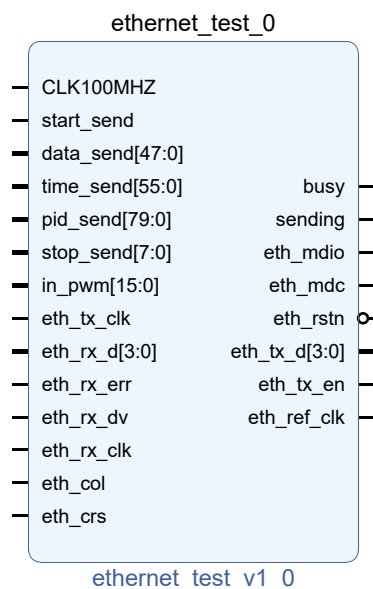


Figura 2.19 – Bloco de comunicação UDP/IP.

Fonte: Extraído do *software* Vivado®.

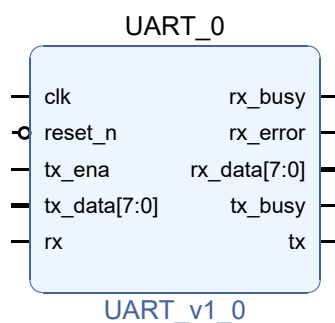


Figura 2.20 – Bloco de Comunicação Serial - UART.

Fonte: Extraído do *software* Vivado[®].

2.2.9 Gerenciador dos Processos

No Gerenciador dos Processos são 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). A Figura 2.21 indica as funções como núcleos, onde cada núcleo realiza sua função, independentemente das outras funções. As funções de estampa de tempo, o controle das comunicações, o gerenciamento do controlador da válvula pode ser inabilitadas independentemente umas das outras, utilizando os botões contidos na placa.



Figura 2.21 – Núcleos do Gerenciador dos Processos.

Fonte: do Autor.

O Gerenciador dos Processos é dividido em cinco núcleos, sendo eles o da 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 independentemente uns dos outros ou ficam em espera até receber um sinal para iniciar a sua função. Por não utilizar interrupções, é possível conseguir determinismo nas operações. Pela estampa de tempo é possível verificar o tempo de amostragem e o tempo de operação do posicionador, sendo que os registradores da estampa de tempo estão divididos em horas, minutos, segundos, mili segundos e micro segundos. Os registros podem ser zerado por botão ou comando via comunicação serial. No momento, a comunicação serial foi utilizada apenas para zerar os registradores da estampa de tempo. A Figura 2.22 apresenta as entradas e saídas do bloco Gerenciador dos Processos. As entradas *A0_in*, *A1_in* e *A2_in* são as entradas do campo filtradas, enquanto que as entradas iniciadas com *start* são utilizadas para ativar e desativar os núcleos. As entradas *done_pid*, *out_pid* e *err_pid* são os sinais de saída do bloco Controlador da Válvula. A saída *enable_filter* ativa o filtro IIR. Os sinais *start_send*, *tx_data*, *time_stamp* e *pid_out* são os dados transmitidos pela comunicação UDP/IP. Os sinais *start_pid*, *InitN_pid* e *rst_pid* os sinais de controle do núcleo Controlador da Válvula. As saídas *A0*, *A1* são os sinais de campo filtrados utilizadas pelo Controlador da Válvula.

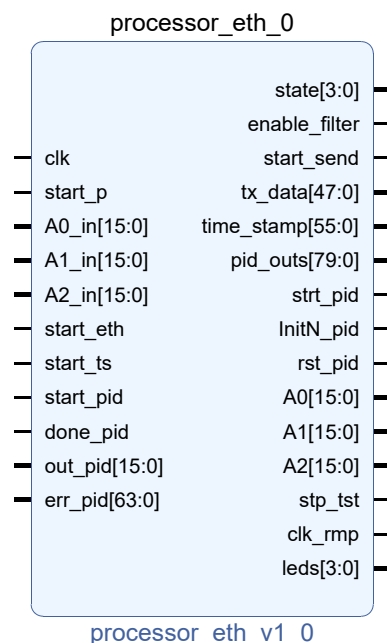


Figura 2.22 – Bloco Gerenciador dos Processos.

Fonte: Extraído do *software* Vivado®.

2.3 Conexões

A Figura 2.23 apresenta o diagrama esquemático das conexões entre o Posicionador Digital, o computador, os sensores, o controlador de vazão (Cv), o compressor e o conversor I/P. O Posicionador Digital dispõe de três entradas analógicas, sendo elas a pressão da câmara do atuador pneumático, a posição da haste e a referência do controlador de vazão. As entradas de pressão e da posição são entradas analógicas de tensão, enquanto a referência do controlador de vazão é uma entrada de corrente. A saída analógica do posicionador digital é uma saída de corrente (4-20mA), 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 ele foi possível injetar sinais de excitação no Posicionador Digital e também foi utilizado para controlar a vazão da planta em malha fechada.

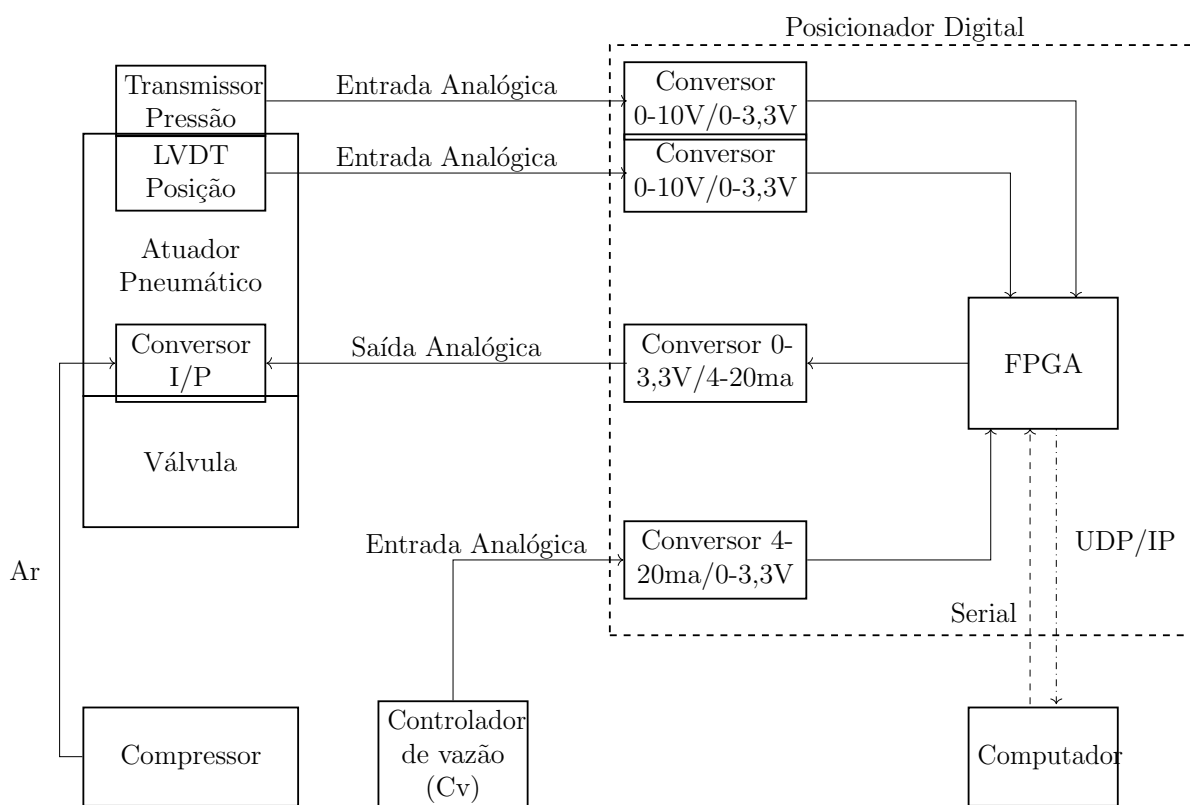


Figura 2.23 – Conexões entre o posicionador e a válvula.

Fonte: do Autor.

2.4 A Válvula e o Atuador Pneumático

A válvula utilizada é equipada com o atuador Fisher 657 com ação direta, sendo que o atuador tem a haste normalmente na posição superior, quando não há pressão na câmara a válvula estará aberta pela força da mola, sendo necessário injetar ar na câmara que para que o atuador saia da posição aberta e feche o quanto desejado. A Figura 2.24

ilustra o atuador 657 instalado na válvula da Fisher e a Figura 2.25 apresenta os detalhes dos componentes dos atuadores Fisher 667 e 657 com suas diferenças construtivas. O atuador da Fisher tem área de secção $Sa = 445 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, trabalhando com pressão de 6 a 30 psi (EMERSON, 2000) e a posição excursionando de x_{min} a x_{max} $28,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. É informado pela EMERSON que a massa das partes móveis é $m = 1,6\text{kg}$. O atuador está instalado em uma válvula tipo globo de 2 polegadas modelo FSNT-217 da Fisher. A pressão do diafragma do atuador normalmente não é utilizada, mas em Marques e Garcia (2020) é usada para a estimação do modelo da válvula.



Figura 2.24 – Atuador Fisher 657.

Fonte: Emerson (2000)

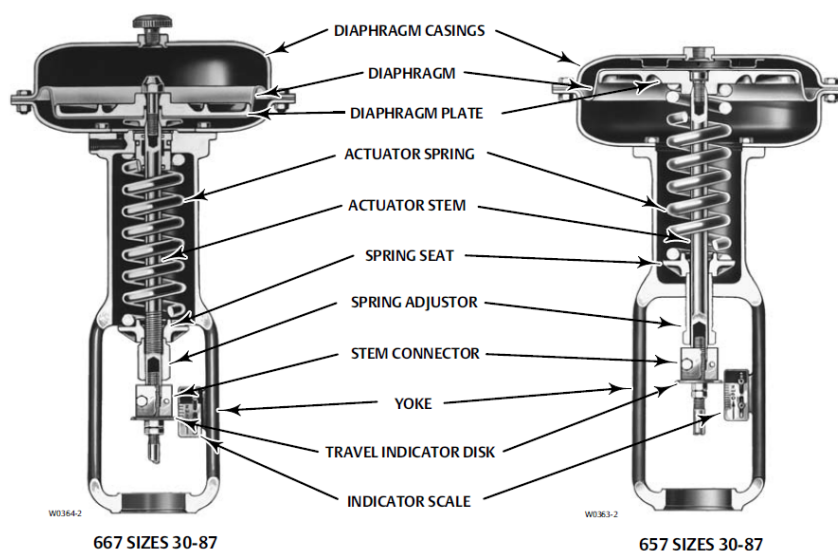


Figura 2.25 – Atuadores 667 e 657.

Fonte: Emerson (2000)

2.5 O Posicionador

A Figura 2.26 exhibe o posicionador digital desenvolvido nesta dissertação, com suas conexões com os instrumentos de campo e suas conexões de comunicação. Na Figura 2.26, o apontamento número 1 indica os três módulos de entrada analógica (4-20mA), o apontamento número 2 aponta a saída analógica (4-20mA), o número 3 indica a comunicação UDP/IP, o número 4 a comunicação serial, o número 5 apresenta a placa onde as duas entradas analógicas de tensão (0-10V) estão montadas, também no número 5 está o o filtro passa baixa de filtragem da saída PWM do FPGA, o apontamento número 6 exhibe o kit da Arty com o FPGA e por fim o apontamento número 7 exhibe a entrada da alimentação de todos os módulos do posicionador digital.

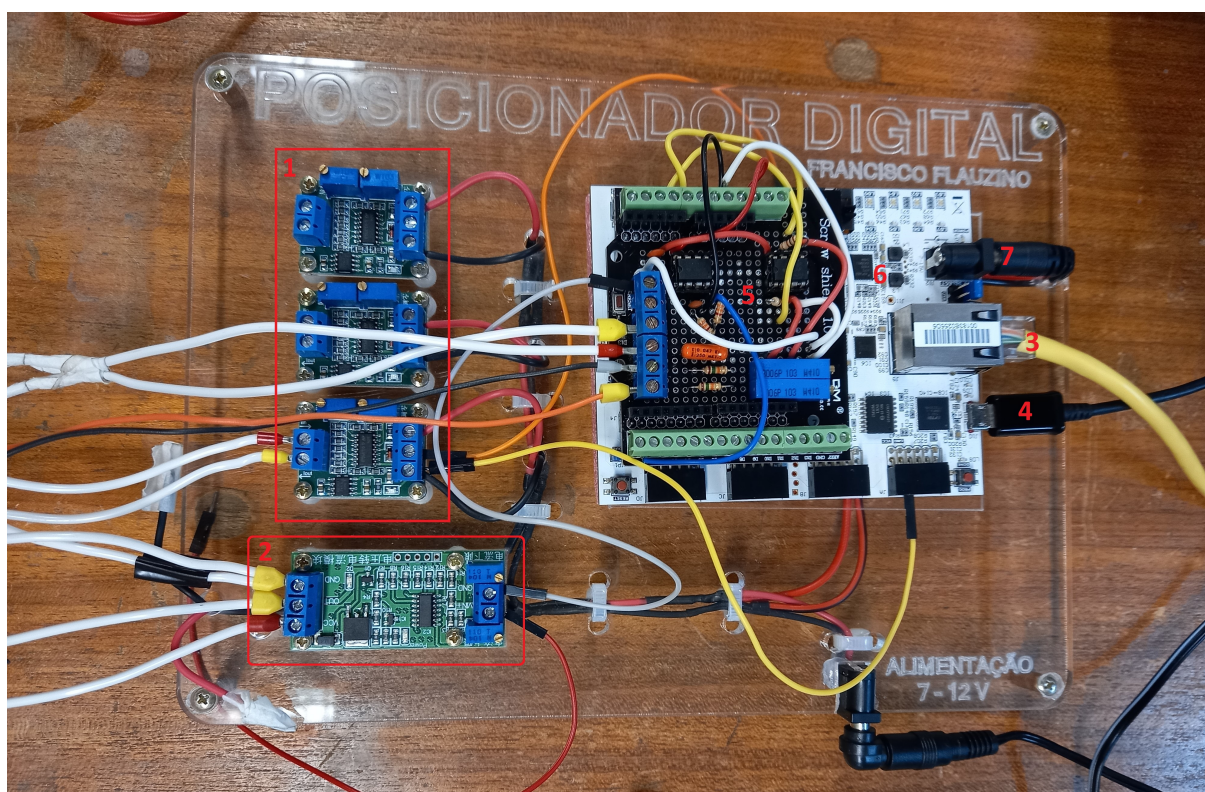


Figura 2.26 – Posicionador digital.

Fonte: do Autor.

3 Modelagem do Atrito

3.1 Atrito

Uma válvula pneumática de controle apresenta não linearidades, as quais afetam a sua dinâmica de operação. Uma não linearidade das válvulas de controle é o atrito de suas partes móveis, principalmente entre a gaxeta e a haste de comando, desta forma é importante conhecer os termos utilizados para a descrição das características da válvula, estes termos são definidos nas normas ISA (2000) e ISA (1993), sendo os termos descritos abaixo.

- Atrito estático
É a resistência ao início do movimento.
- Atrito dinâmico
É a resistência de quando já se está em movimento.
- Banda morta
É a faixa que a entrada pode ser variada, mediante reversão de direção, sem iniciar uma mudança observável no sinal de saída. A banda morta produz atraso de fase entre a entrada e a saída.
- Zona morta
É uma faixa da entrada em que a saída permanece inalterada.
- Histerese
É uma propriedade de um elemento evidenciada pela dependência do valor da saída, para uma dada excursão da entrada, sobre o histórico de excursões e a direção do movimento atual.

Os termos definidos anteriormente são obtidos através da curva de assinatura da válvula de controle, a qual relaciona a intensidade do sinal aplicado ao posicionador da válvula com a respectiva abertura resultante. Pela Figura 3.1 pode-se obter os valores dos termos apresentados, assim como é possível fazer relações entre os termos descritos.

Os termos S e J são definidos a partir das forças de atrito estático e dinâmico, onde o termo S representa o tempo em que a haste fica travada para uma variação do sinal de entrada no atuador, enquanto o termo J equivale ao salto da haste quando a força consegue vencer o atrito estático levando ao deslizamento. Os termos S e J são calculados de acordo com (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008), da seguinte forma:

S é o somatório da força de atrito estático com a força de atrito dinâmico, representando a variação do sinal de controle necessária para movimentar a haste da válvula, quando se tem uma troca de direção do movimento.

$$S = F_s + F_d \quad (3.1)$$

Enquanto J é a diferença entre a força de atrito estático e a força de atrito dinâmico, sendo a variação do sinal de controle necessário para movimentar a haste da válvula quando ocorrem paradas e é necessário iniciar o movimento na mesma direção.

$$J = F_s - F_d \quad (3.2)$$

A zona morta equivale à força de atrito dinâmico ou a diferença entre S e J dividido por dois.

$$ZonaMorta = F_d = \frac{(S - J)}{2} \quad (3.3)$$

A banda morta é igual à histerese da válvula e pode ser calculada pelo dobro da força de atrito dinâmico ou a diferença entre S e J , os quais são obtidos na curva de assinatura da válvula.

$$BandaMorta = Histerese = 2.F_d = S - J \quad (3.4)$$

Pela curva da assinatura da válvula de controle, Figura 3.1, é possível observar o movimento completo do deslocamento da haste da válvula, o movimento completo da haste caracteriza a assinatura da válvula, contendo na sua assinatura as características da válvula. Na Figura 3.1 F_{est} equivale a força de atrito estática que é representado nas equações por F_s , enquanto F_{din} equivale a força de atrito dinâmico que é representado nas equações por F_d . Para que a haste da válvula se mova, a força exercida pelo diafragma deve ser incrementada até superar a força de atrito estático, F_s . Assim que excedida a força de atrito estático F_s , assume-se que a força de atrito decresça instantaneamente para a força de atrito dinâmico, F_d . A diferença entre F_s e F_d causa um escorregamento da haste da válvula, sendo caracterizado por um salto repentino da haste. Caso a haste seja parada e se deseja movimentá-la no mesmo sentido do movimento anterior à parada, a força de atrito estático deve ser superada novamente, gerando um novo escorregamento da haste. Se for necessário reverter o sentido do movimento da haste, deve-se superar toda a banda morta e a banda de escorregamento.

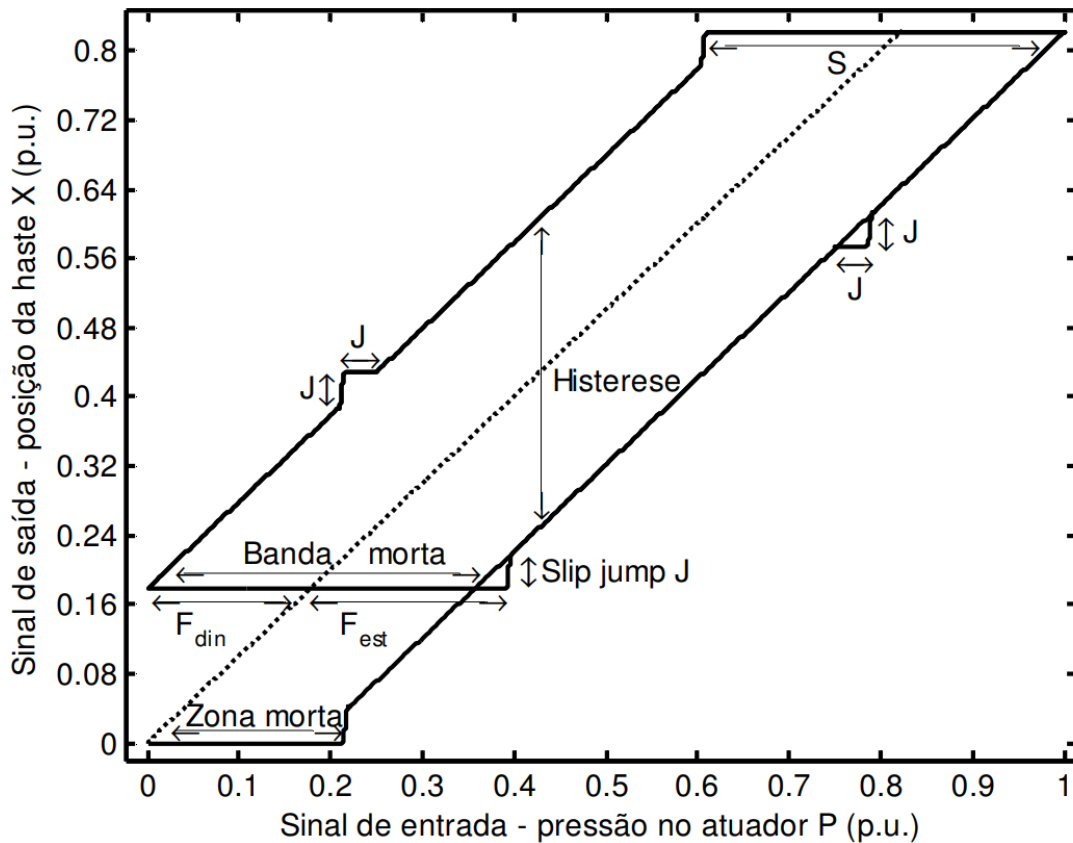


Figura 3.1 – Assinatura da válvula de controle.

Fonte: Uehara (2009).

O atrito pode provocar como consequência em válvulas de controle o surgimento de ciclos limite. A detecção de oscilações em uma malha de controle pode ser um indicativo de alto índice de atrito da válvula. A estimação do atrito é realizada utilizando técnicas para estimar parâmetros de um determinado modelo de atrito, onde a detecção do atrito está naturalmente contida.

3.1.1 O estado de pré-deslizamento

O pré-deslizamento é um estado onde uma força externa (F) é maior que a força de atrito estático (F_s). Alguns modelos consideram que não há movimento até que a força externa (F) seja maior que a força de atrito estático (F_s), $F > F_s$.

3.1.2 O estado de deslizamento

O deslizamento é um estado onde a superfície de um corpo desliza em contato com outra superfície. O estado de deslizamento é modelado pela combinação dos efeitos relacionados aos materiais, viscosidade e a força normal. A força de atrito de Coulomb é modelada por uma força constante oposta à direção do movimento, quando a velocidade for diferente de zero. O atrito viscoso é diretamente proporcional à relação entre a força

de atrito e a velocidade. Outro comportamento corresponde à transição entre os estados de pré-deslizamento e o de deslizamento.

3.2 Modelos de Atrito

Modelos baseados em princípios físicos, bem como empíricos ou orientados por dados foram propostos para simular a válvula de controle com atrito. Os modelos físicos descrevem o fenômeno de fricção usando equilíbrio de forças e a segunda lei de Newton do movimento. A principal desvantagem desses modelos é que necessitam do conhecimento de vários parâmetros, como massa das peças móveis, coeficiente de mola e vários coeficientes de atritos (viscoso, Coulomb e estático), coeficientes que não são facilmente estimados (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008). Por outro lado, os modelos baseados em dados simplificam a simulação de uma válvula com atrito e têm sido usados para estudar o atrito da válvula (HE et al., 2007). Para os modelos orientados a dados, as características da válvula e do atrito sendo simplificadas, perde-se um pouco de precisão do modelo. Modelos empíricos são frequentemente usados para modelos de válvulas sem sensores incorporados e controladores de posição, pela dificuldade da estimação dos parâmetros de um modelo da válvula mais complexo, sem a utilização dos sensores adequados. Para estimar os parâmetros de um modelo de atrito são utilizadas técnicas que demonstrem as características da válvula. O experimento para identificação deve utilizar sinais que excitam a válvula nos modos de pré-deslizamento e deslizamento, para assim os parâmetros serem identificados corretamente. Neste trabalho, são utilizados quatro modelos de atrito para gerar o modelo da válvula de controle, sendo dois modelos empíricos, o modelo de Kano e o de He e dois modelos baseados em princípios físicos, o modelo de Karnopp e GMS.

3.3 Modelos Empíricos

São modelos baseados em simplificações da curva de Stribeck para fornecer diretamente o modelo da válvula, com os efeitos do atrito embutidos no modelo. Os modelos de atrito empíricos são aproximados por uma banda morta e um escorregamento. Esses modelos consideram que a força de atrito pode ser representada apenas pelas forças de atrito estático e de Coulomb, apresentando a troca instantânea entre as forças quando o sistema sai do estado pré-deslizante para o estado deslizante, sendo a dinâmica da válvula simplificada, pois é considerado que o sistema mecânico é instantâneo. Apesar dos modelos empíricos terem muitas simplificações, as pesquisas de compensação do atrito em válvulas de controle pneumáticas na sua maioria se baseiam nestes modelos. Os modelos empíricos são úteis na grande maioria das válvulas já instaladas na indústria, por elas não possuírem sensores que meçam a posição da haste e sua posição ser controlada apenas adotando a

relação linear da força da mola.

3.3.1 Modelo de Kano

Dentre os modelos empíricos de válvulas de controle, o de Kano é o que melhor representa o comportamento das válvulas de controle pneumáticas, englobando o fenômeno do atrito (GARCIA, 2008). O modelo de Kano, pela sua simplicidade, necessita de apenas dois parâmetros e possui uma grande eficiência computacional, apresenta a desvantagem de desconsiderar diversas características do fenômeno de atrito, as quais podem ter influência no desempenho da malha de controle, principalmente em relação aos sinais de excitação de alta frequência. O modelo de Kano considera que o comportamento da válvula pode ser definido por um banda morta (S) e uma banda deslizante (J), sendo eles:

- S : representa a variação do sinal de controle necessário para movimentar a haste da válvula quando se tem uma troca de direção do movimento (*deadband + stickband*).
- J : é a variação do sinal de controle necessária para movimentar a haste da válvula quando ocorre paradas e é necessário iniciar o movimento na mesma direção do movimento (*slip jump*).

Os parâmetros S e J são obtidos pela curva de assinatura da válvula de controle, Figura 3.1, a curva de assinatura é gerada aplicando uma onda trapezoidal de 0 a 100% na pressão do posicionador da válvula. A curva de excitação da entrada deve apresentar baixa frequência tanto para a subida quanto para a descida, de forma que seja possível capturar as características da válvula (GARCIA, 2008). Este modelo despreza o efeito do atrito viscoso e considera que a transição do pré-deslizamento para o deslizamento ocorre instantaneamente, com um salto da força de atrito estático para força de atrito de Coulomb. O modelo de Kano é capaz de prever o comportamento esperado das curvas de assinatura da válvula, as quais são utilizadas para o diagnóstico de válvulas (GARCIA, 2008).

O modelo de Kano utilizado nesta dissertação foi modificado por (MARQUES, 2019), a Figura 3.2 apresenta o fluxograma do modelo de Kano modificado utilizado, a modificação foi a inserção de uma força inicial e a utilização de uma função de saída adequada para corresponder à posição da haste da válvula. Os limites da haste da válvula não são os limites físicos, mas sim a posição máxima e mínima quando a pressão do diafragma é a máxima e a mínima, respectivamente.

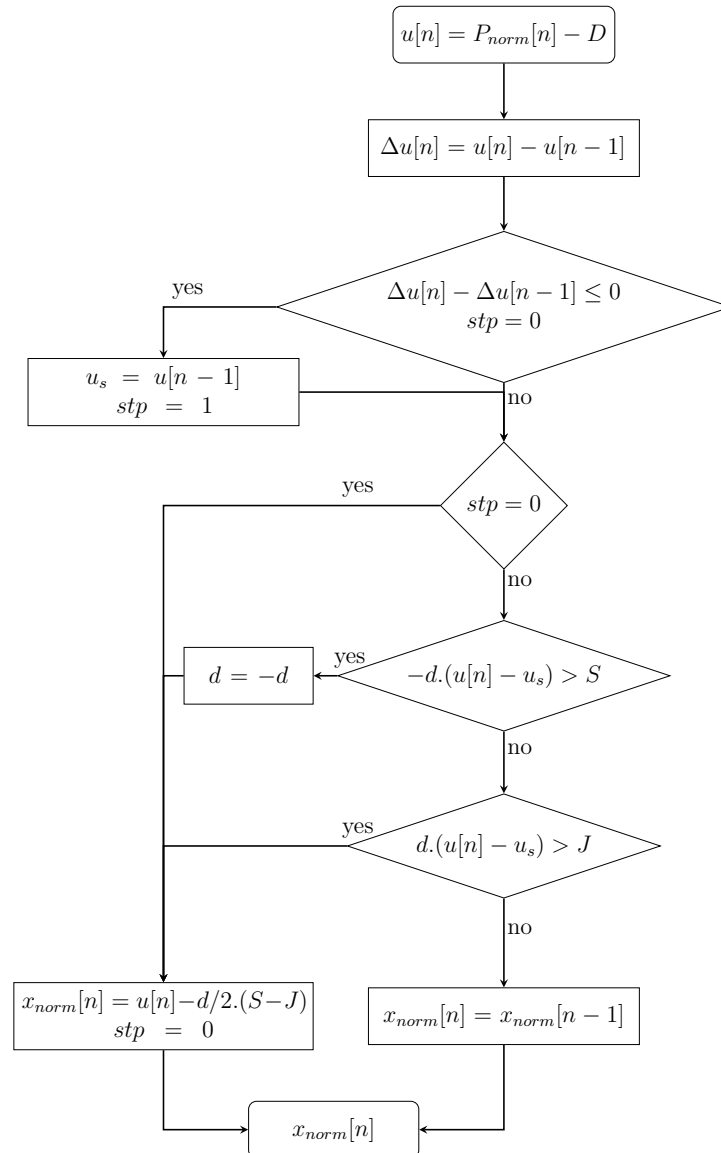


Figura 3.2 – Fluxograma do modelo de Kano.

Fonte: Marques e Garcia (2020)

3.3.2 Modelo de He

(HE; WANG, 2010) propuseram uma modificação no modelo original, baseada nos modelos físicos da válvula, esta modificação foi realizada com o intuito de se obter o aprimoramento da predição da posição da haste. Foi observado pelos autores que a modificação do modelo de He, é mais simples que o modelo original e apresentou uma performance similar ao modelo Clássico. O modelo utiliza dois parâmetros, a força de atrito estática (F_s) e dinâmica (F_d) normalizadas pela diferença absoluta entre a entrada normalizada e a posição da haste normalizada. É necessário que a força do diafragma supere F_s para a troca do estado de pré-deslizamento para o estado de deslizamento e quando no estado de deslizamento a força de atrito é igual a F_d . Para a normalização da posição da haste é utilizada a pressão máxima e mínima da câmara do atuador.

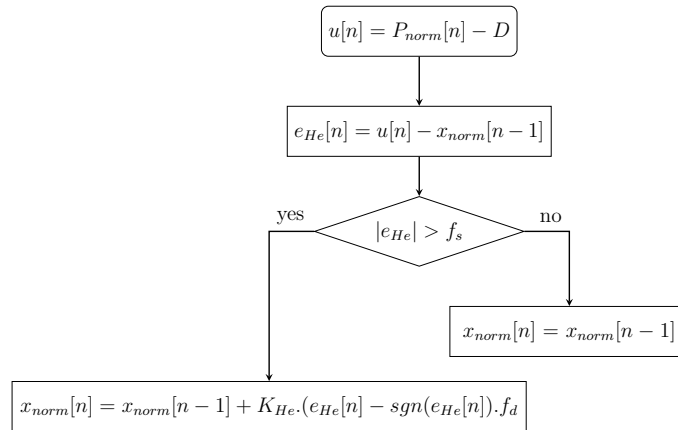


Figura 3.3 – Fluxograma do modelo de He.

Fonte: Marques e Garcia (2020)

3.4 Modelos Físicos

Os modelos fenomenológicos necessitam de vários parâmetros físicos da válvula, como a massa das peças móveis, coeficiente da mola e vários coeficientes de atrito, coeficiente difíceis de serem estimados. Os modelos físicos utilizam a equação de balanço de forças para descrever as características do modelo. A equação de balanço de forças realiza o somatório das forças do sistema mecânico da válvula de controle.

3.4.1 Modelo de Karnopp

É uma melhoria do Modelo Clássico, foi desenvolvido para eliminar as dificuldades na região em torno da velocidade igual a zero, permitindo uma explicação da descontinuidade entre a força de atrito estático de Coulomb nas proximidades onde a velocidade é zero. Karnopp (1985) utiliza a curva Stribeck para simular a transição do atrito estático para o atrito dinâmico. O modelo de Karnopp utiliza uma faixa de velocidades das partes móveis da válvula, sendo a força de atrito uma função estática da velocidade da haste. No intervalo de velocidade, é considerado que a velocidade é nula e a força de atrito é diretamente relacionada à força externa aplicada, por outro lado, fora deste intervalo de velocidade, a força de atrito é representada em função da velocidade. O modelo de Karnopp é capaz de simular o movimento aderência-deslizamento, que não é observado no modelo de Coulomb. A equação do modelo de Karnopp, Equação 3.5, é dividida em três partes, a primeira representa quando a magnitude da velocidade da haste é menor que o limite da velocidade DV , nesta região a haste é considerada parada, a segunda parte representa quando a haste está colada na iminência do movimento e a terceira parte representa a situação de ruptura, início do movimento, seguindo a curva de Stribeck, Equação 3.7.

$$F_f = \begin{cases} F, & |v| < DV \text{ e } |F| \leq F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F), & |v| < DV \text{ e } |F| > F_s \\ F_d(v), & |v| \neq DV \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde:

- F : Força externa;
- DV : É o limite de velocidade, onde se considera que a haste não movimentada;
- v : velocidade relativa do sistema;
- $\operatorname{sgn}(x)$: função sinal, Equação 3.6, representa a direção do movimento;
- $F_d(v)$: Curva de Stribeck.

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$F_d(v) = [F_c + (F_s - F_c)e^{-(v/v_s)^2}] \operatorname{sgn}(v) + F_v v \quad (3.7)$$

3.4.2 Modelo GMS

O modelo GMS é o modelo mais complexo entre os modelos utilizados neste trabalho, foi desenvolvido para melhor representar os dados experimentais no regime de pré-deslizamento. O modelo utiliza N elementos de Maxwell sem massa, conectados em paralelo, para modelar o efeito total do atrito. Este modelo pode reproduzir qualitativamente todas as características macroscópicas do atrito, porém é mais preciso, pois não apresenta uma derivada quando o sistema é excitado por uma força menor que a força de atrito estático. Por outro lado, o modelo apresenta uma alta complexidade, necessitando de sete parâmetros para a estimação de apenas um elemento e de mais dois parâmetros para cada elemento adicional a ser considerado no modelo.

3.5 Framework de Controle Adaptativo Inverso

O *framework* de (MARQUES, 2019) utiliza os dados coletados da válvula do tipo mola/diafragma pneumática, que foram adquiridos a partir da resposta a injeção de sinais de excitação na válvula de controle. A amostragem é realizada para capturar as características da válvula com alto índice de atrito. O *framework* utiliza os dados para gerar os modelos da válvula com alto índice de atrito, a partir do modelo da válvula é possível calcular os parâmetros de sintonia do controlador contido no posicionador digital. A Figura

3.4 apresenta as etapas para sintonia e a ordem da realização dos testes do posicionador sintonizado. A etapa 1 apresenta as curvas de excitação que são aplicadas no conversor I/P presente na válvula. São necessários sinais de excitação intrusivos para identificar os parâmetros da válvula de controle, sendo aplicados outros sinais de excitação para que seja possível capturar as características da válvula. Para a estimação dos parâmetros de atrito a válvula deve ser excitada nos regimes de pré-deslizamento e deslizamento. As curvas de excitação utilizadas para capturar das características da válvula são apresentadas na Subsecção 5.1.1. Com os sinais aplicados no conversor I/P, as respostas à excitação são amostradas na etapa 3, os sinais amostrados são a posição da haste (x) e a pressão na câmara do posicionador (P), os sinais são armazenados no computador para depois serem utilizados nos modelos, apontado na etapa 4. Os modelos foram divididos em modelos empíricos, etapa 5, e modelos físicos, etapa 6. Os modelos empíricos utilizados foram o de Kano e o de He, enquanto os modelos físicos utilizados foram os modelos de Karnopp e o GMS. Após a estimação dos modelos, tanto os modelos físicos quanto os modelos empíricos, eles são utilizados para gerar a sintonia do controlador, etapa 7. A sintonia dos controladores do posicionador digital são realizadas utilizando o controle adaptativo inverso, Figura 3.5. O controle adaptativo inverso, assim como no trabalho de (MARQUES, 2019), é realizado de forma *offline*. No trabalho mencionado, o posicionador digital foi implementado no computador, onde a sintonia é executada internamente. Em contraste, neste projeto, o processamento dos dados adquiridos nos experimentos de excitação ocorre externamente ao posicionador digital, sendo conduzido no computador responsável pelo armazenamento dos dados amostrados. A necessidade de realizar o controle adaptativo inverso fora do posicionador surgiu devido à limitação de capacidade do FPGA, que não comportava a adição de mais funções para o posicionador digital. O modelo de referência apontado na Figura 3.5 é o comportamento desejado do controle de todo o conjunto posicionador mais o modelo da válvula. Um sinal aleatório é utilizado para excitar paralelamente o conjunto posicionador mais o modelo da válvula e o modelo de referência, as saídas dos conjuntos são subtraídas e quando a diferença entre os sinais for zero, o valor dos parâmetros do controlador do posicionador (Cp) foi encontrado.

Com os parâmetros calculados na etapa 7, as sintonias do posicionador são utilizadas nos experimentos de deslocamento da válvula (malha aberta), etapa 8, e os experimentos de controle de vazão (malha fechada), etapa 9.

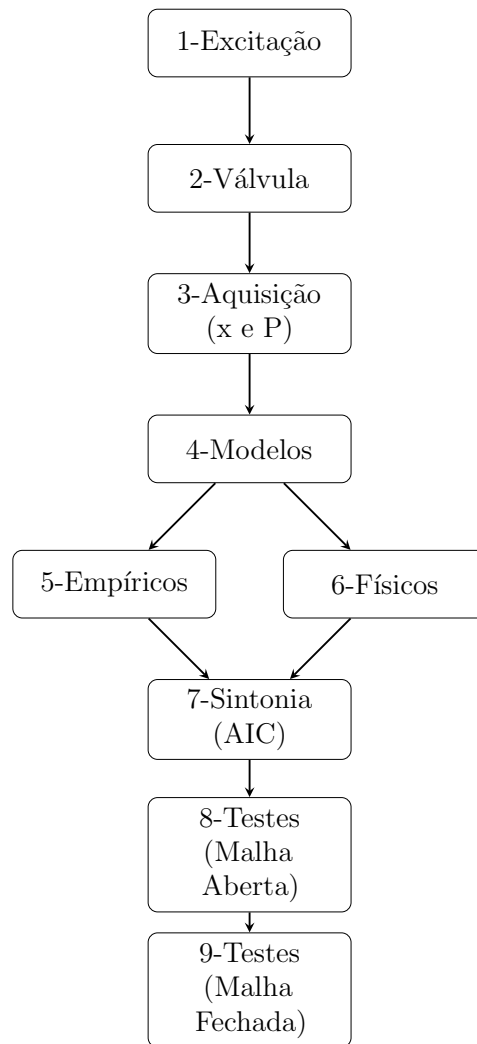


Figura 3.4 – Processo de sintonia dos controladores.

Fonte: do Autor.

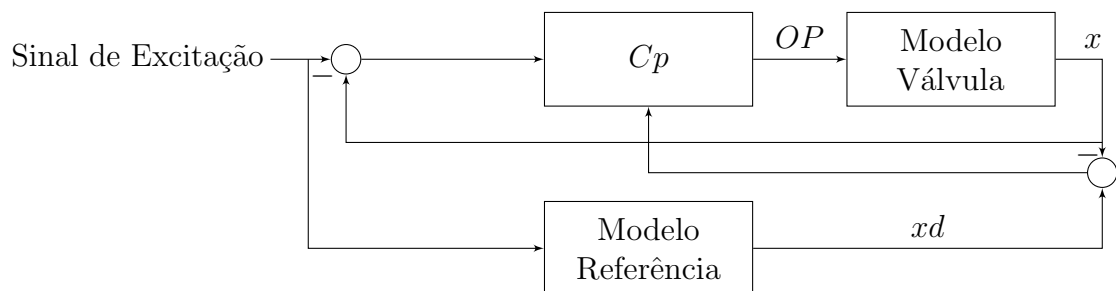


Figura 3.5 – Controle Adaptativo Inverso - Sintonia do Posicionador.

Fonte: baseado em Marques (2019)

4 Fases do Trabalho de Pesquisa

Este capítulo apresenta como o trabalho foi dividido para se atingir os objetivos da pesquisa. O trabalho foi dividido em duas fases. A primeira fase foi o desenvolvimento do posicionador digital e a realização de testes iniciais para a sua validação. A segunda fase foi a realização dos experimentos de aquisição dos dados que foram utilizados no *framework* do trabalho de Marques e Garcia (2020), a sintonia do controlador de vazão, a sintonia do controlador do posicionador e a realização dos experimentos.

4.1 Primeira Fase – Posicionador Digital e Validação

A primeira fase foi o desenvolvimento do posicionador digital apresentado na Seção 2.2, após a conclusão foi necessário realizar a validação das suas funcionalidades, a primeira validação realizada foi a aquisição dos dados de campo. Para a validação da aquisição dos dados de campo, a válvula foi estimulada com sinais de excitação específicos que foram utilizados para estimar o modelo da válvula, pois com estes sinais se obtêm as características desejadas para se calcular os modelos de atrito utilizados. As funções foram criadas no Matlab[®]/Simulink[®] *real time* e os sinais físicos foram enviados pelo *kit* PCI-6229 da National Instruments para o posicionador digital, este por sua vez faz a aquisição do sinal de excitação e envia o sinal para o conversor I/P, o qual transforma o sinal de corrente recebido do posicionador digital em pressão, que vai para o atuador da válvula gerar o movimento da haste para a posição desejada. O posicionador digital foi utilizado no primeiro momento para amostrar os valores da referência do controlador (R), pressão da câmara (P) e a posição da haste (x), como apresentado na Figura 4.1. A amostragem pode ser configurada, sendo utilizado na primeira fase o valor de 100us, pois este foi o menor valor possível de taxa de amostragem obtido no desenvolvimento do posicionador digital. Os resultados coletados das aquisição dos dados de campo são apresentados na Subseção 5.1.1. Com a aquisição dos dados realizada, concluiu-se a primeira parte da validação do posicionador digital, no próximo passo os dados coletados de campo foram enviados via comunicação UDP/IP e armazenados no computador, com os dados no computador foi possível utilizar o *framework* e gerar os parâmetros para sintonizar o controlador do posicionador digital. Nesta primeira fase o controlador não foi sintonizado pelo *framework*, nos testes realizados o controlador do posicionador digital foi sintonizado com valores de outros trabalhos.

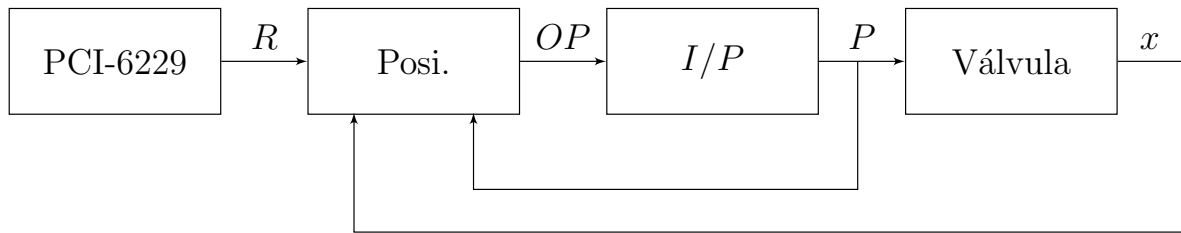


Figura 4.1 – Diagrama esquemático da excitação da válvula.

Fonte: do Autor.

4.2 Segunda Fase – Compensador de Atrito e Experimentos

Na segunda fase foi alterada a taxa de amostragem de $100\mu\text{s}$ para 1ms , assim como foi utilizado o trabalho de Hidalgo e Garcia (2017). Pelos experimentos realizados na primeira fase (Seção 4.1), os resultados são apresentados na Subseção 5.1.1, o posicionador apresentou baixo ruído de medição, baixa taxa de amostragem e poderá trabalhar com período de amostragem de até $100\mu\text{s}$. Os dados levantados foram inseridos no *framework*, foram escolhidos quatro modelos de atrito para o levantamento dos parâmetros do controlador do posicionador digital, utilizaram-se os modelos de Kano, He, Karnopp e GMS. Com os parâmetros calculados, os controladores do posicionador digital foram sintonizados, os primeiros experimentos realizados foram a excitação com as curvas de assinatura e sinal aleatório, resultados apresentados nas Seções 6.3 e 6.4, respectivamente. O próximo passo foi a realização dos experimentos de controle da vazão, de acordo com o diagrama de blocos da Figura 4.2, para esta configuração foram realizados dois experimentos para o controle, sendo eles o modo servo e o regulatório, seus resultados são apresentados nas Subseções 6.5.3 e 6.5.2, respectivamente.

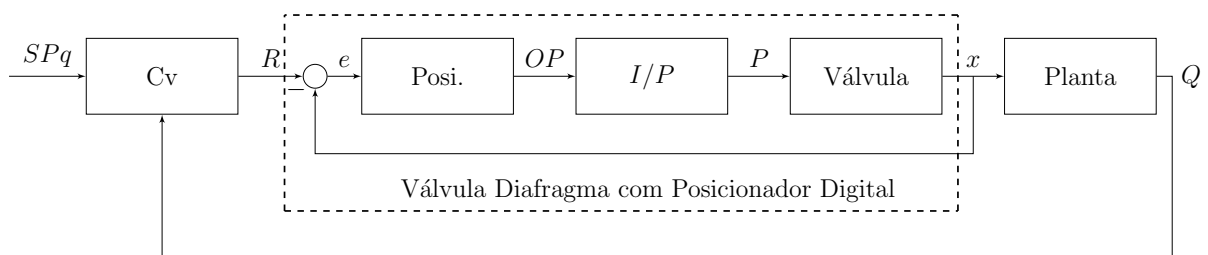


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do controle da vazão.

Fonte: do Autor.

5 Resultados Preliminares

Os primeiros experimentos para verificar o funcionamento do posicionador digital foram realizados utilizando-se a válvula pneumática de controle com alto índice de atrito. O conversor I/P da válvula foi excitado por um sinal de referência e foram realizadas as aquisições da posição da haste e da pressão da câmara do atuador pneumático. O levantamento das curvas foi realizado em malha aberta, sem nenhum controlador para compensar a posição da válvula, sendo possível verificar que a haste da válvula não chega na posição desejada pelo valor de referência inserido. O período de amostragem pode ser configurável no posicionador digital. No primeiro levantamento os dados são amostrados a cada 100us para se ter uma maior quantidade de dados, a quantidade de dados é importante na aplicação dos algoritmos de Marques e Garcia (2020). Caso a amostragem seja menor utiliza-se a interpolação dos dados para se obter mais pontos. Os dados amostrados nos experimentos são as entradas do *framework* do trabalho de Marques e Garcia (2020), o *framework* utiliza os dados para estimar o modelo da válvula, com o modelo da válvula estimado é realizada a sintonia dos parâmetros do controlador que está no posicionador digital.

5.1 Experimentos

Nesta primeira fase foram realizados dois experimentos com o posicionador digital desenvolvido, o primeiro foi o levantamento das características da válvula realizado em malha aberta, dados estes que foram utilizados como entrada do *framework*, e o segundo experimento foi a verificação do funcionamento do posicionador digital com o controlador PID realimentado pela posição da haste.

5.1.1 Levantamento das Características da Válvula

Para o levantamento das características foram inseridos sinais de excitação na válvula, as curvas inseridas estão apresentadas nas Figuras 5.2 a 5.9. Sendo A0 o valor de referência do controlador do processo, A1 a posição da haste da válvula e A2 a pressão dentro da câmara do atuador. O diagrama esquemático do posicionador digital para os testes não utiliza o controlador da válvula como pode-se observar na Figura 5.1, sendo que o sinal de excitação da válvula passa apenas pelo posicionador para ser amostrado e é enviado para a saída, neste caso não foi utilizado o controlador da válvula.

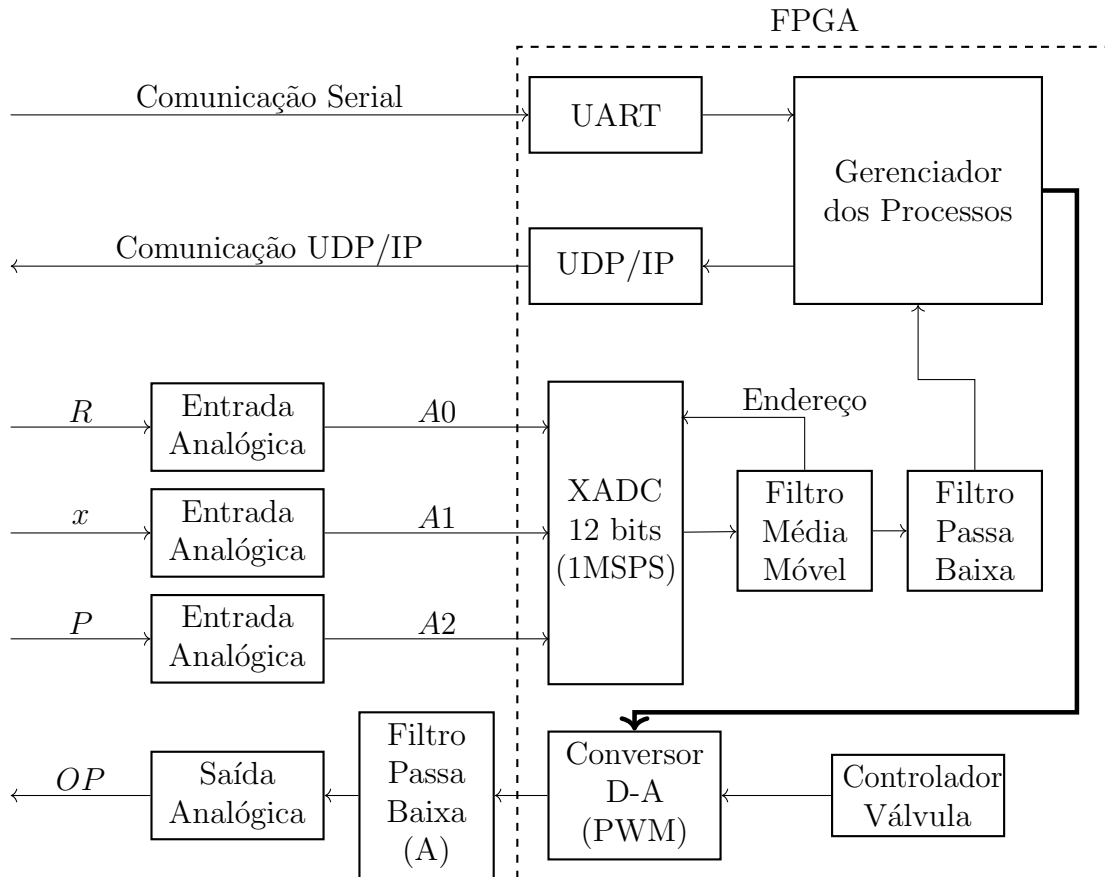


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do posicionador digital - sem o controlador.

Fonte: do Autor.

Nas curvas utilizadas para excitar a válvula para se obter a maior variedade de características desejáveis para a estimação do modelo do sistema, a amplitude foi normalizada de 0 a 100%. A Figura 5.2 é utilizada para se obter a assinatura da válvula, esta permite fazer uma análise inicial da válvula. Com a excitação pelo sinal banda morta é realizada uma primeira estimação da banda morta do modelo da válvula, Figura 5.3. O próximo sinal chamado de identifica I/P é utilizada para estimar o modelo do conversor I/P, Figura 5.4. Os sinais mínimo e máximo são utilizados para verificar a posição da haste nos extremos de pressão, Figura 5.5. O sinal rampas é utilizada para se estimar a constante da mola e a força inicial do modelo, Figura 5.6. Enquanto que os sinais de excitações apresentados nas Figuras 5.7 a 5.9 são utilizados para a estimação do atrito.

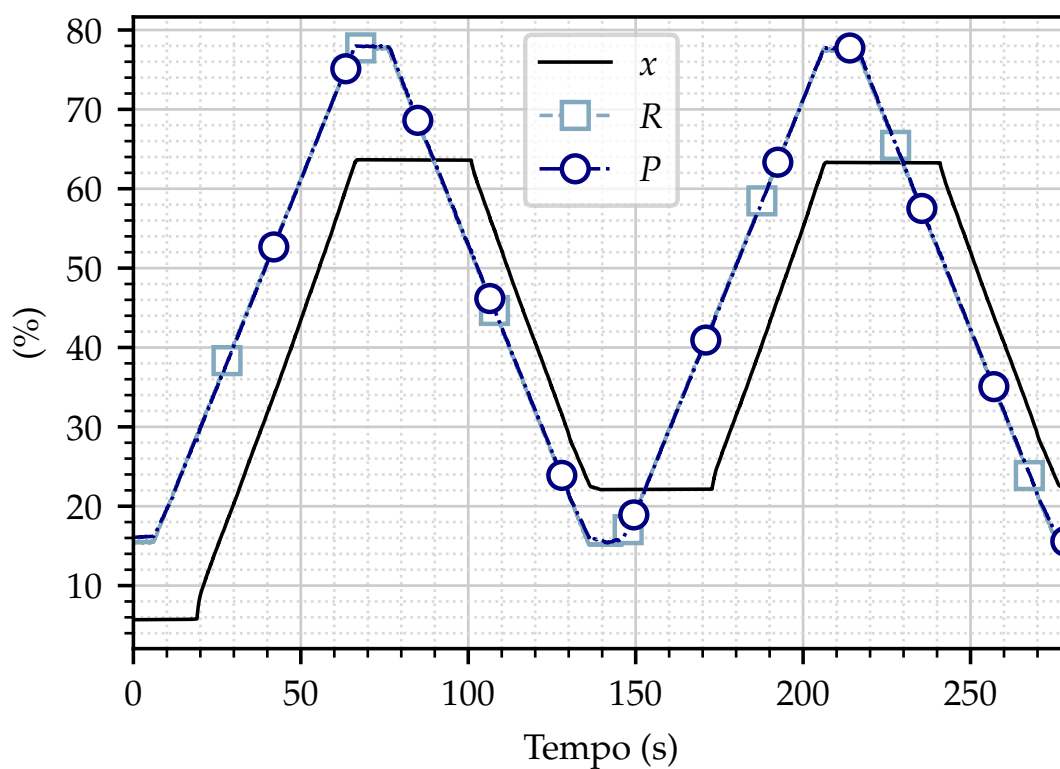


Figura 5.2 – Sinal Assinatura.

Fonte: do Autor.

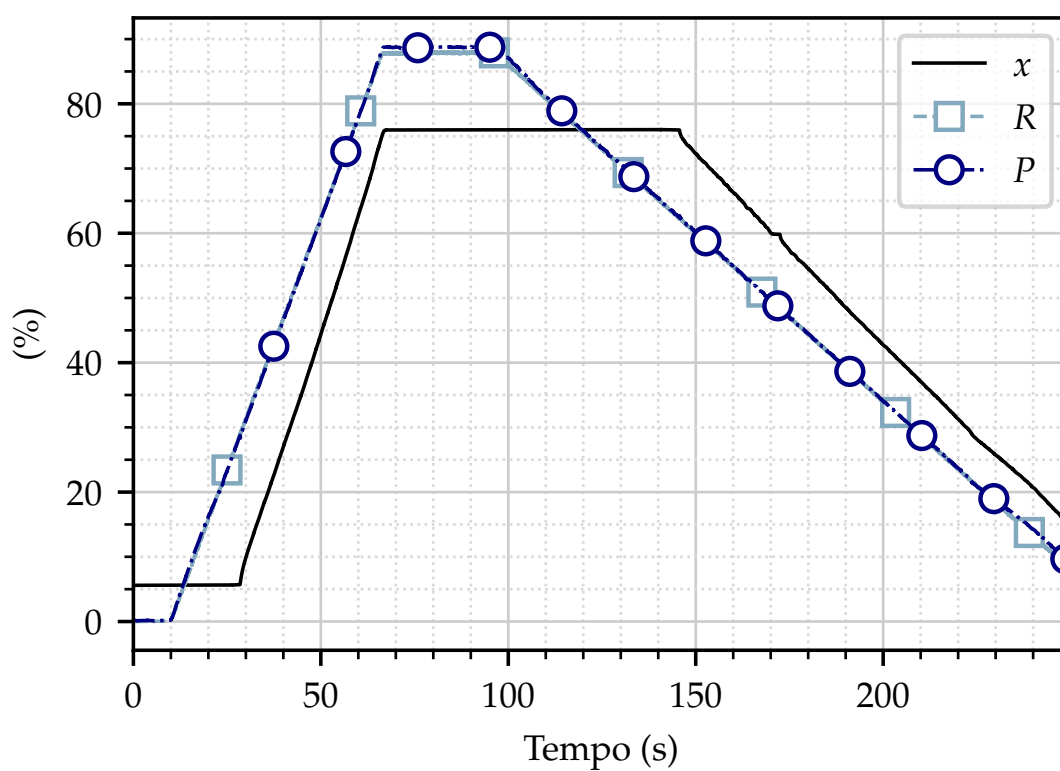


Figura 5.3 – Sinal Banda Morta.

Fonte: do Autor.

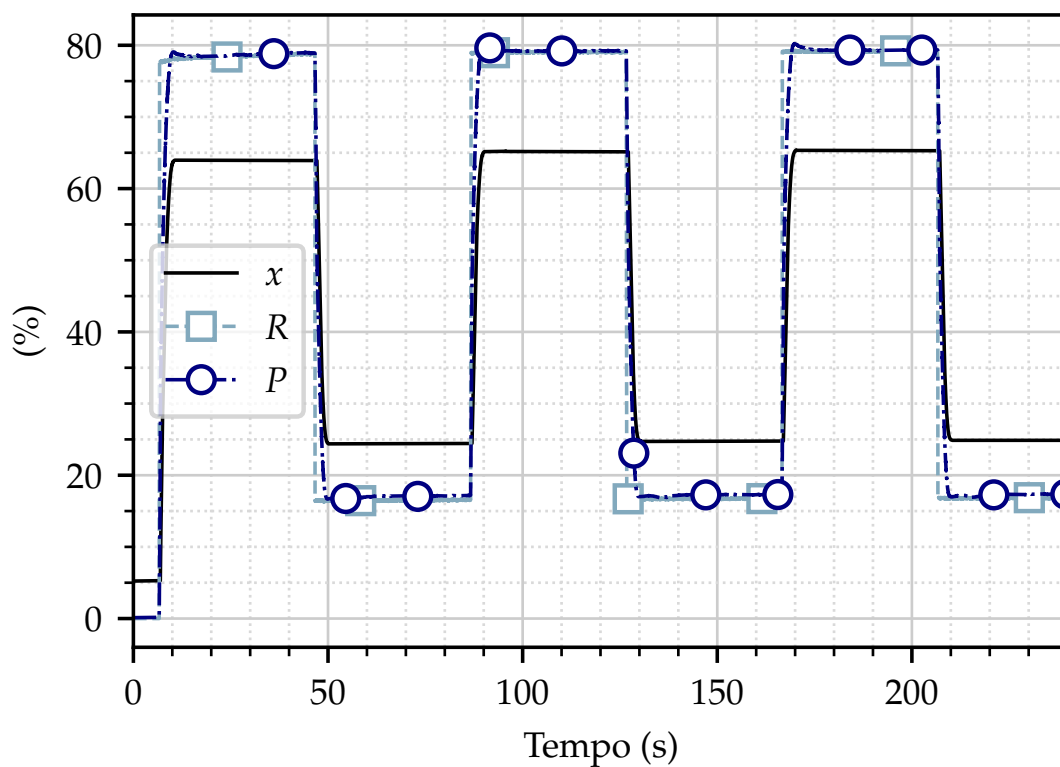


Figura 5.4 – Sinal Identifica I/P.

Fonte: do Autor.

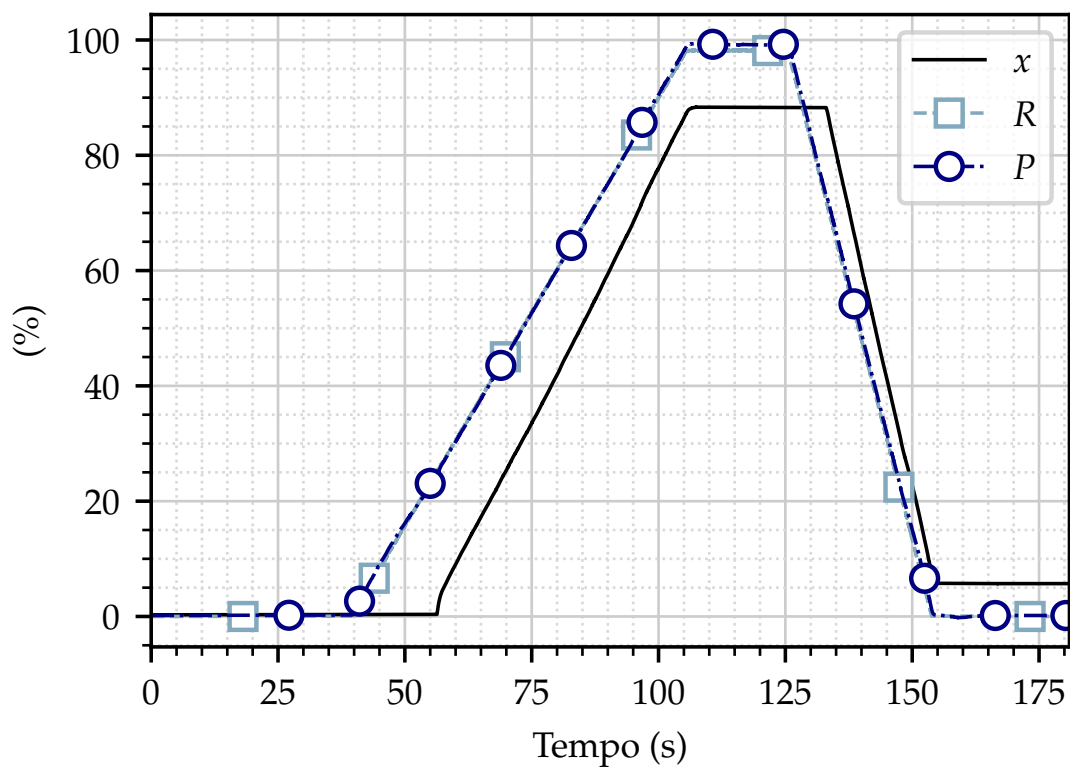


Figura 5.5 – Sinal Mínimo e Máximo.

Fonte: do Autor.

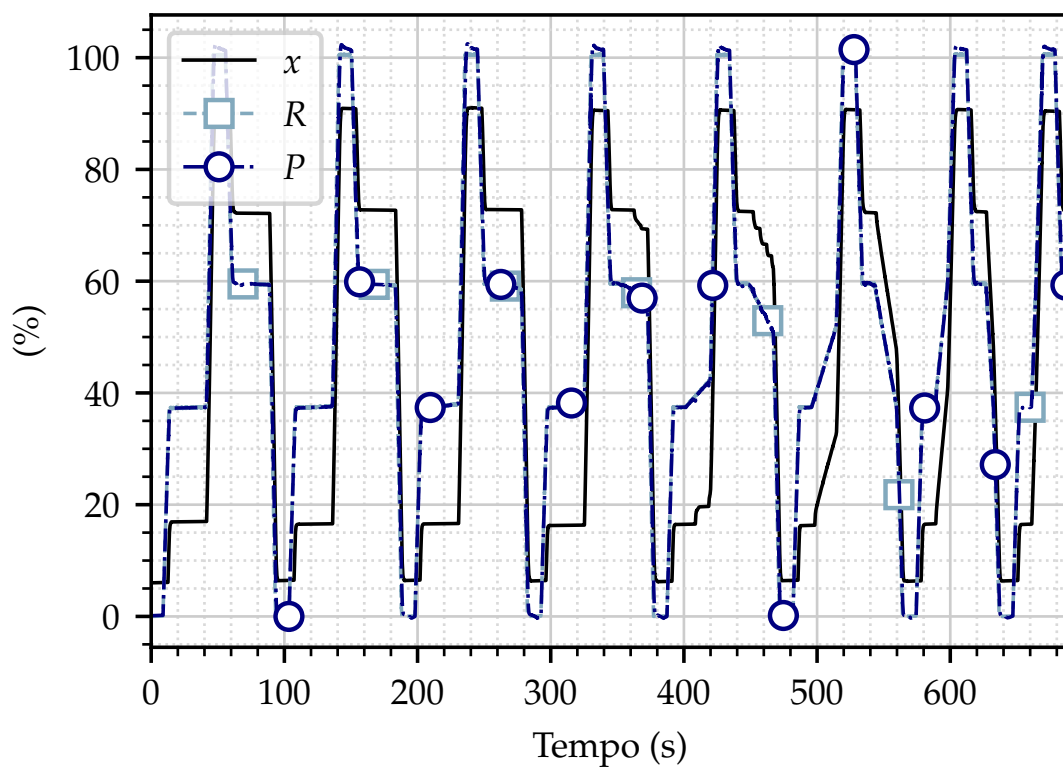


Figura 5.6 – Sinal Rampas.

Fonte: do Autor.

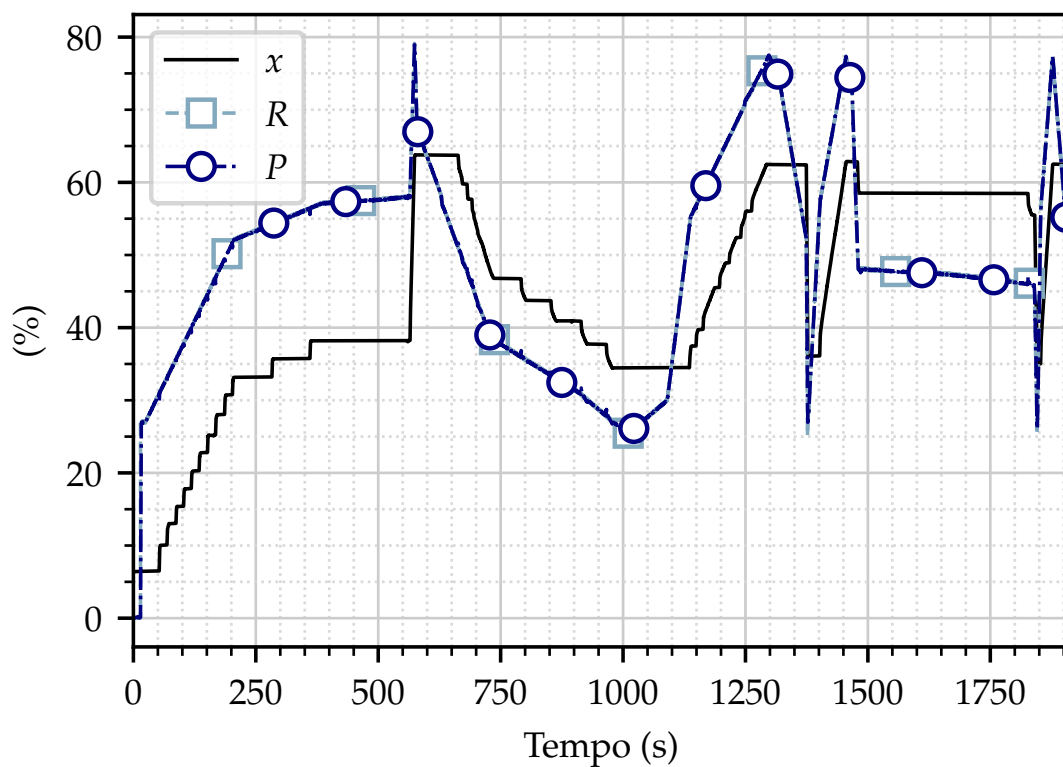


Figura 5.7 – Sinal Velocidade Aleatória.

Fonte: do Autor.

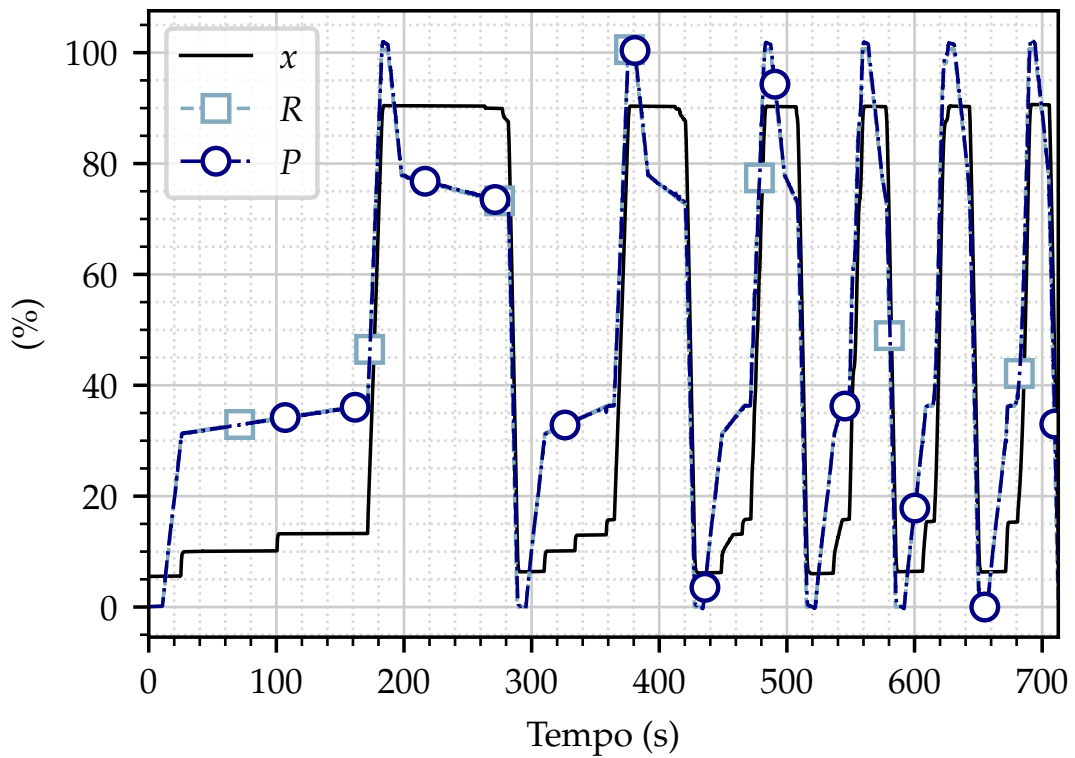


Figura 5.8 – Sinal Velocidade Senoidal.

Fonte: do Autor.

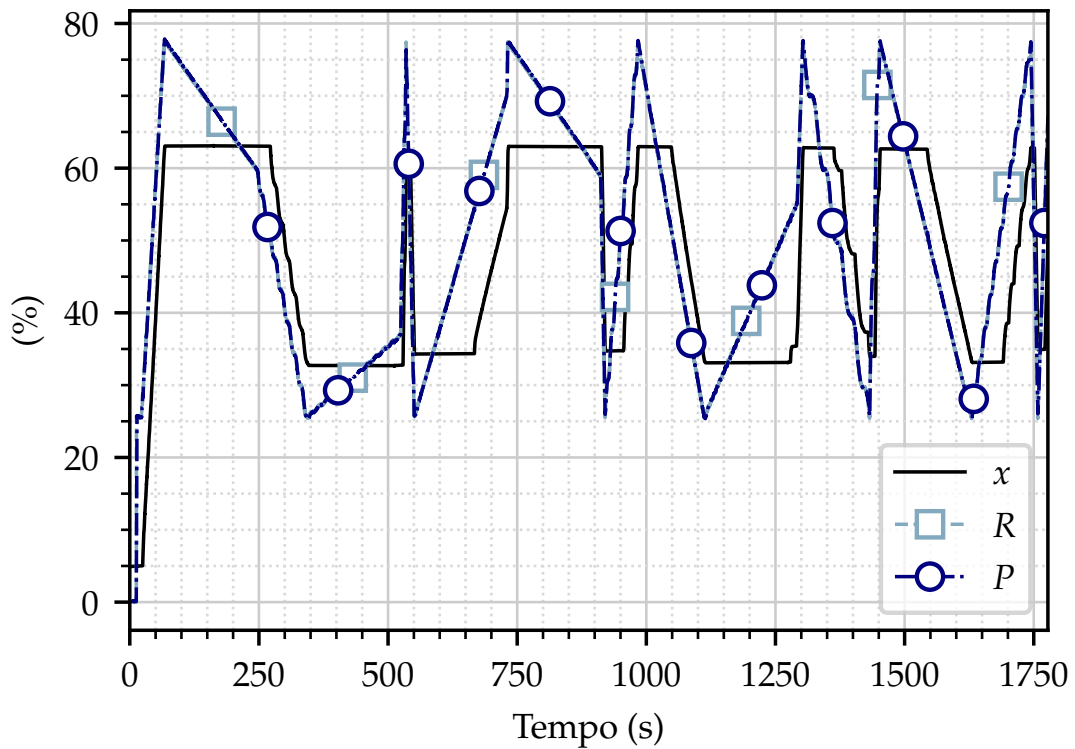


Figura 5.9 – Sinal Velocidade Senoidal Aleatória.

Fonte: do Autor.

5.1.2 Controlador PID

Após a aquisição das curvas utilizadas para capturar as características da válvula de controle, foi realizado o experimento utilizando o controlador PID do posicionador digital, neste caso foi utilizado a posição da haste como realimentação do controlador. O diagrama esquemático do posicionador é indicado na Figura 2.2. O período de amostragem utilizado neste experimento foi de 1ms como em Hidalgo e Garcia (2017). Foi utilizado como sinal de referência para o controlador as funções assinatura, banda morta e identifica I/P, as quais foram utilizadas no experimento de levantamento de características da válvula.

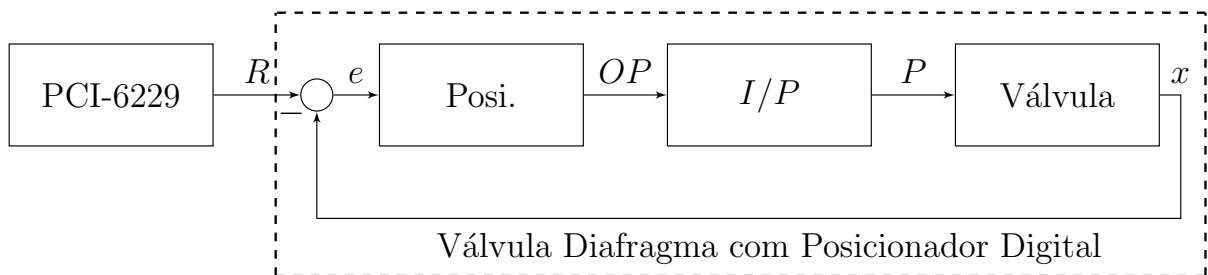


Figura 5.10 – Diagrama do Posicionador Digital - com PID.

Fonte: do Autor.

O controlador PID do posicionador digital foi sintonizado com o parâmetros apresentados na Tabela 5.1, de acordo com as equações (2.9), (2.10) e (2.11).

Tabela 5.1 – Parâmetros do PID.

Parâmetro	Valor
Kp	1,8545
Ki	4,7111
Kd	0,0185
Ts	0,001 s
Tdf	0,0005 s

Fonte: do Autor.

As Figuras 5.11 a 5.13 apresentam as respostas da válvula com o posicionador digital controlado pelo PID, a saída do controlador PID é o sinal de controle (OP), indicando o valor da saída do posicionador digital para que a válvula siga o sinal de referência. Nota-se que neste experimento o valor da posição da haste já atinge o valor de referência desejado.

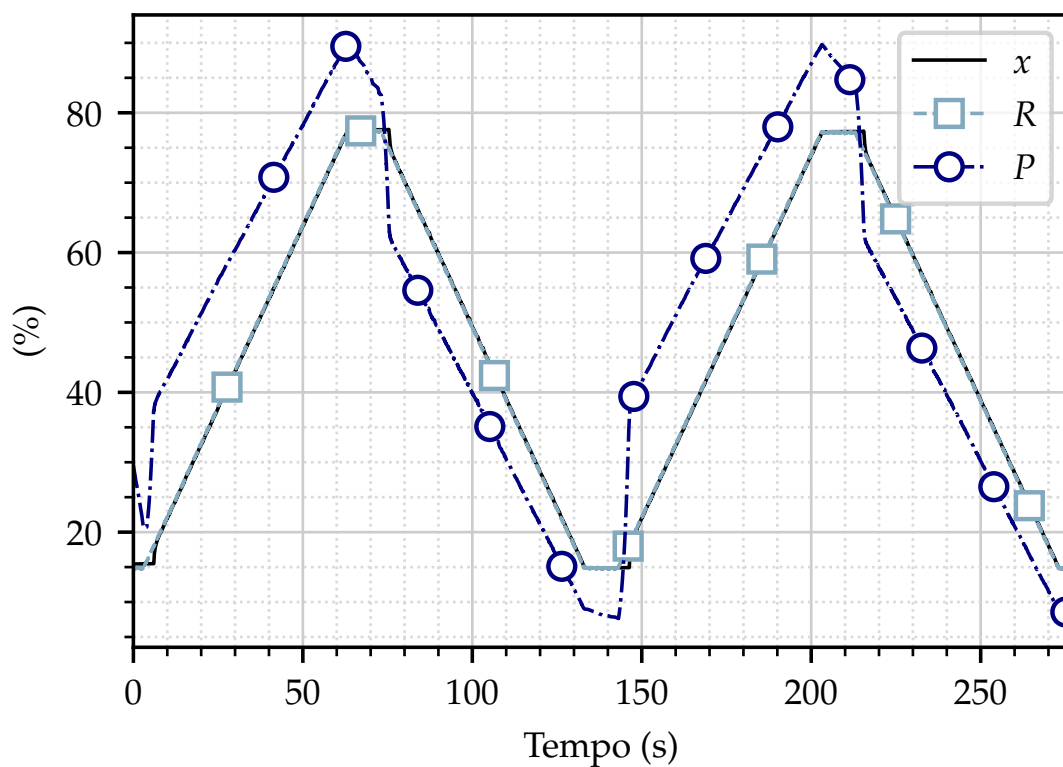


Figura 5.11 – Sinal Assinatura com o PID.

Fonte: do Autor.

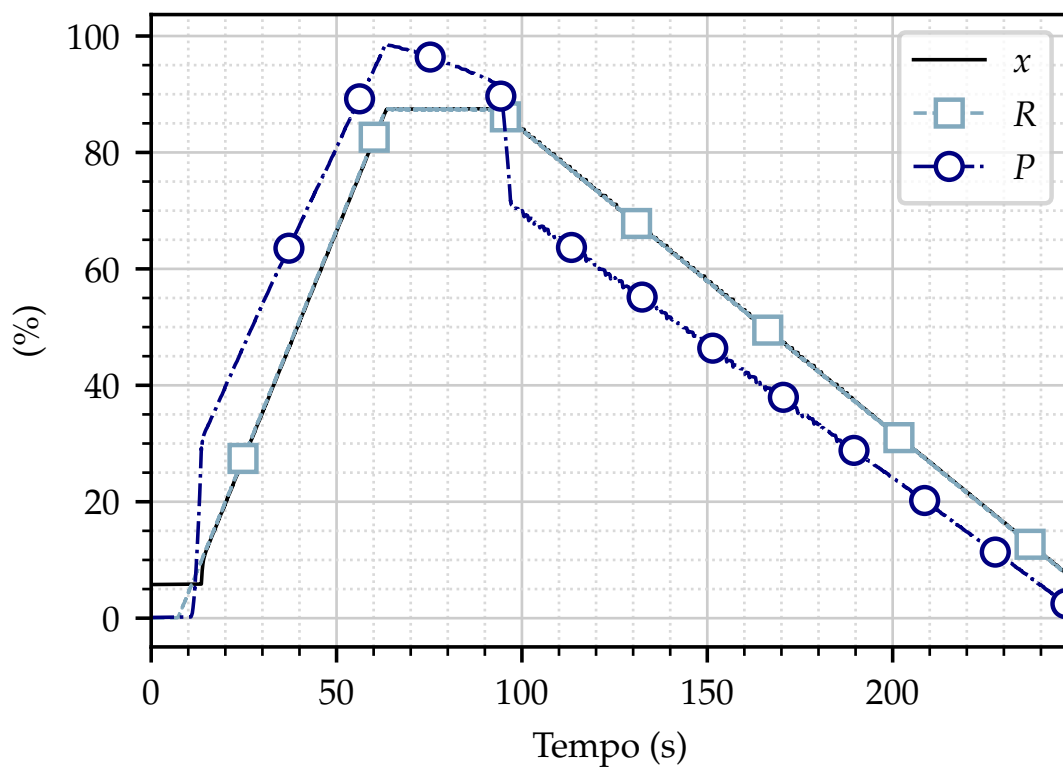


Figura 5.12 – Sinal Banda Morta com o PID.

Fonte: do Autor.

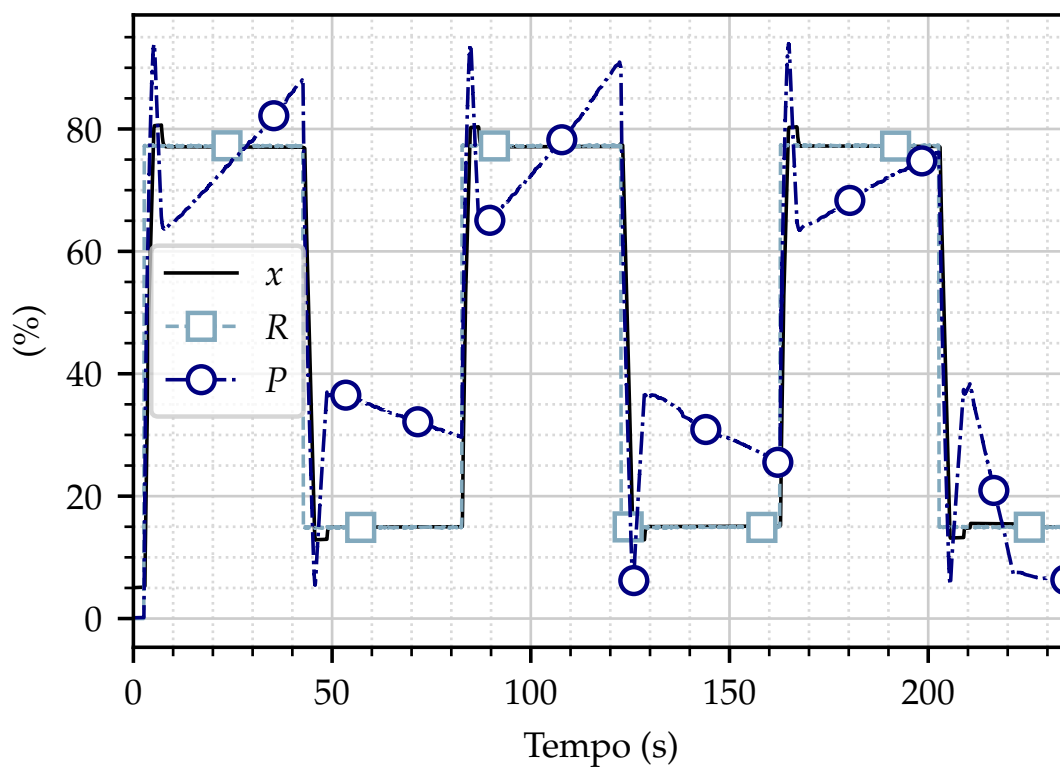


Figura 5.13 – Sinal Identifica I/P com o PID.

Fonte: do Autor.

5.2 Assinatura da Válvula

Por fim, foi plotado o gráfico da assinatura da válvula com os dados obtidos nos testes. A partir dos dados do sinal assinatura, Figura 5.2, plota-se o gráfico da referência pela posição da haste, Figura 5.14. Sendo possível observar pelo gráfico a banda morta, a histerese e os parâmetros S e J do atrito, como definido na Seção 3.1.

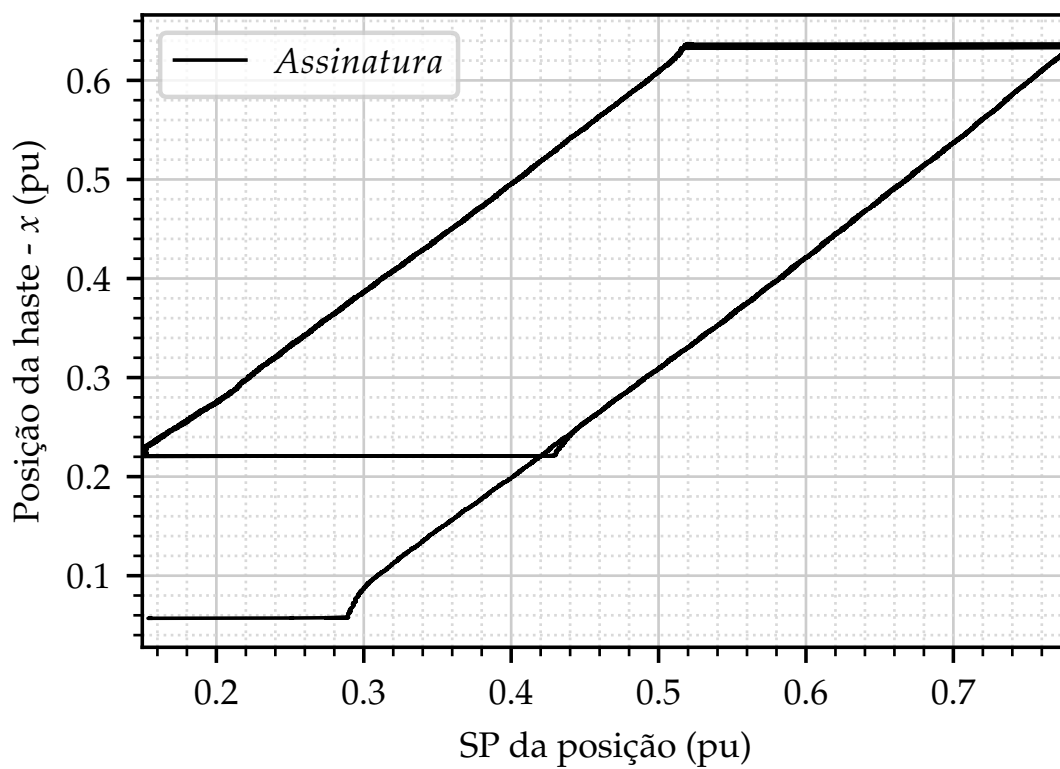


Figura 5.14 – Assinatura da Válvula - Experimental.

Fonte: do Autor.

6 Resultados Finais

A partir da validação do posicionador digital com os experimentos preliminares realizados no capítulo anterior, neste capítulo são realizados os experimentos para comparar os modelos utilizados para sintonizar o posicionador digital. Os experimentos foram realizados primeiramente em malha aberta e posteriormente em malha fechada. Para os experimentos em malha aberta a válvula foi excitada com dois ciclos de um sinal trapezoidal para se obter a assinatura da válvula com e sem o posicionador digital. Para a configuração com o posicionador digital são utilizados os parâmetros de sintonia do controlador gerados a partir dos modelos de Kano, de He, de Karnopp e GMS. Em um segundo experimento ainda em malha aberta a válvula foi excitada com um sinal aleatório, neste experimento o posicionador digital também foi utilizado sintonizado com os parâmetros gerados a partir dos modelos de Kano, de He, de Karnopp e GMS. O último experimento foi em malha fechada, sendo realizado o controle de vazão da planta piloto nos modos regulatório e servo. Os experimentos de controle de vazão foram divididos em três configurações, a primeira configuração foi utilizando apenas o controlador de vazão sem o posicionador digital, a segunda configuração foi utilizando o controlador de vazão mais o compensador CR2 e a última configuração foi utilizando o controlador de vazão mais o posicionador digital sintonizado com os parâmetros calculados dos modelos.

6.1 Sintonia do Controlador PID do Posicionador Digital

O controlador PID que está contido no posicionador digital foi sintonizado com os parâmetros calculados pelo *framework* de (MARQUES, 2019). Foram utilizados quatro modelos para sintonizar o controlador do posicionador digital. A Tabela 6.1 exibe os valores dos parâmetros para o controlador PID do posicionador, sendo K_p o ganho proporcional, K_i o ganho integral, K_d o ganho derivativo e T_{df} a constante de tempo derivativo. Os parâmetros apresentam diferenças em seus valores, pois a metodologia de sintonia do *framework* de (MARQUES, 2019) tenta otimizar o controlador para cada modelo utilizado.

Tabela 6.1 – Parâmetros do Controlador PID.

Modelo	K_p	K_i	K_d	T_{df}
Kano	20,341	3,092	3,499	0,184
He	15,264	3,157	2,338	0,605
Karnopp	20,314	3,125	3,169	0,158
GMS	22,091	3,385	3,620	0,134

Fonte: do Autor.

6.2 Sintonia do CR2

O controlador CR2 utilizado foi o mesmo do trabalho de (HIDALGO; GARCIA, 2017) com os parâmetros de sintonia apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros do CR2.

Parâmetro	Valor
K_c	0,367
$T_i(s/rep)$	3,375
$\delta(\%)$	0,5
T_{stop}	2s
T_{mov}	5s

Fonte: Hidalgo e Garcia (2017).

Onde:

- K_c : Ganho Proporcional;
- T_i : Tempo Integral;
- δ : Erro para reabilitar/desabilitar o controlador;
- T_{stop} : Tempo para desabilitar o controlador;
- T_{mov} : Tempo para reabilitar o controlador.

6.3 Assinatura

Nesta seção, são apresentados os resultados da análise da assinatura da válvula, para as configurações com e sem o posicionador digital. A Figura 4.1 apresenta a configuração interna do posicionador digital quando o controlador PID da posição não é utilizado, o diagrama mostra as interfaces para excitação da válvula, bem como a captura dos sinais de posição da haste (x), da pressão da câmara do atuador (P) e a referência do controlador (R). Observa-se que, nos experimentos em que o posicionador não foi utilizado, este ainda foi mantido no circuito, porém com o controlador de posição desabilitado. Nesta configuração, o posicionador foi utilizado somente para capturar as informações de referência, posição e pressão da câmara da válvula. As Figuras 6.4 a 6.14 apresentam os sinais correspondentes à variável manipulada (OP), à pressão no atuador (P), à referência (R) e à posição da haste (x), respectivamente. Observa-se que os sinais P , R e x são os sinais obtidos pelas entradas filtradas do posicionador digital. A partir desses valores, foram geradas as curvas de assinatura para a válvula sem compensação do atrito, bem como as curvas de assinatura

com a compensação do atrito pelo posicionador digital, sintonizado com os quatro modelos utilizados.

Para cada experimento, são apresentadas tabelas com os índices de desempenho para a comparação dos experimentos. Os índices utilizados para a comparação dos resultados foram: integral do valor absoluto do erro (IAE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e distância percorrida pela haste (DIST).

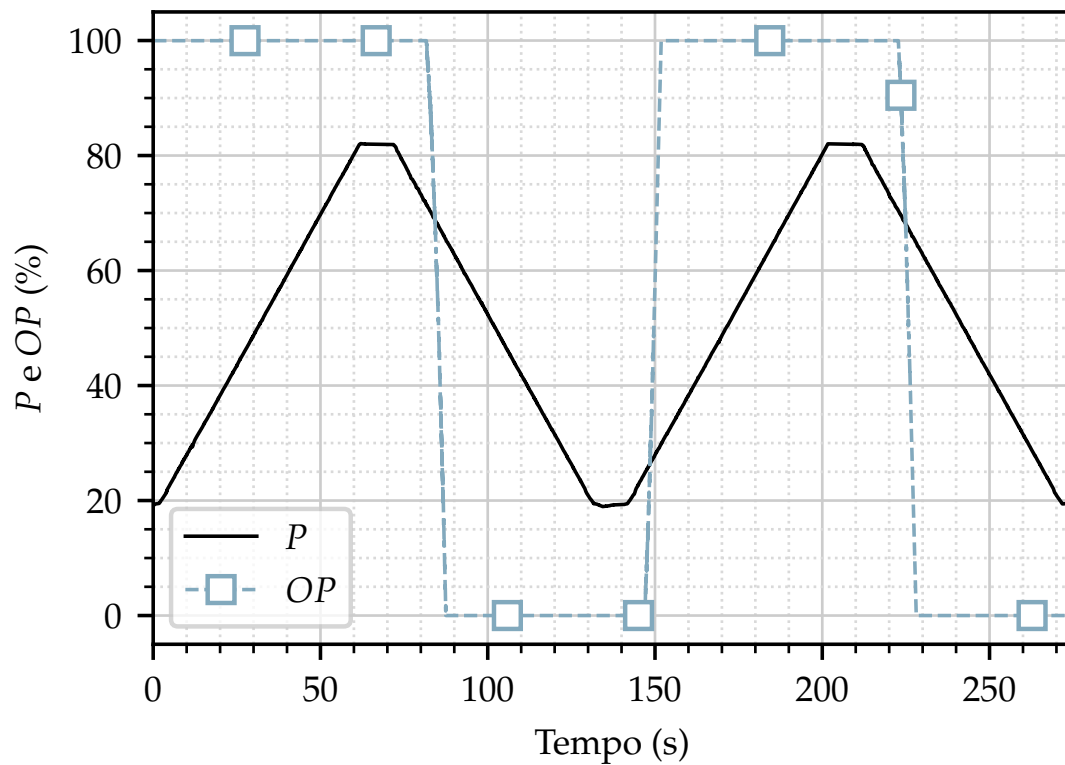


Figura 6.1 – OP x Pressão no atuador - Válvula.

Fonte: do Autor.

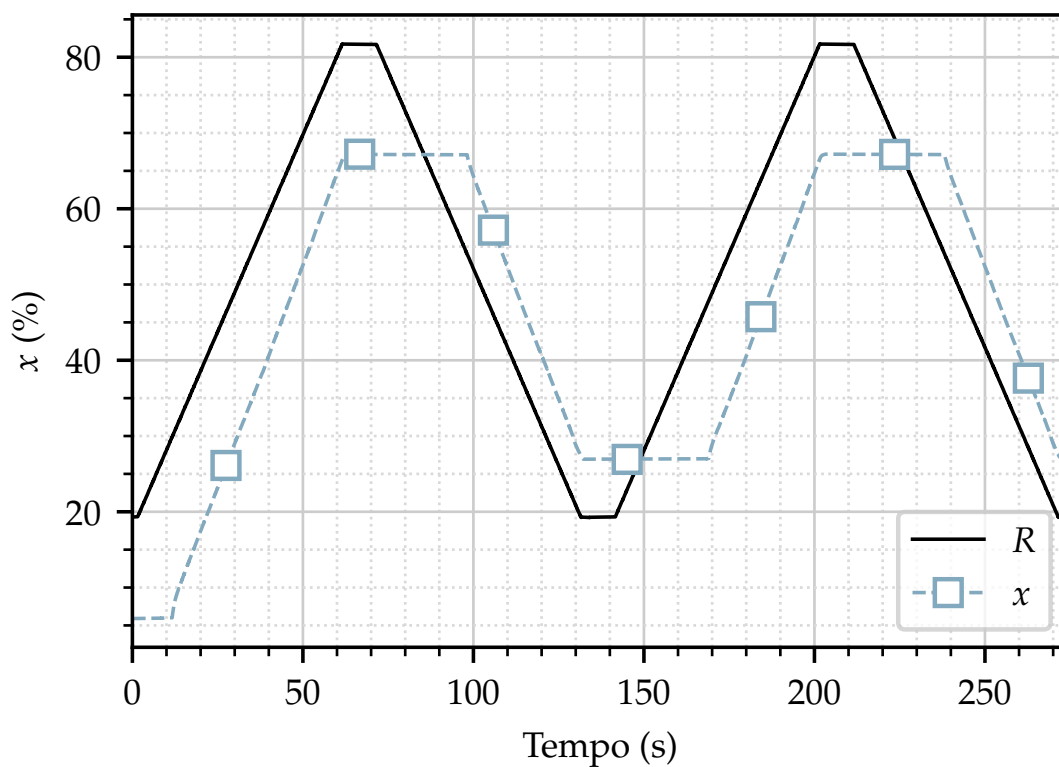


Figura 6.2 – Referência x Posição da haste - Válvula.

Fonte: do Autor.

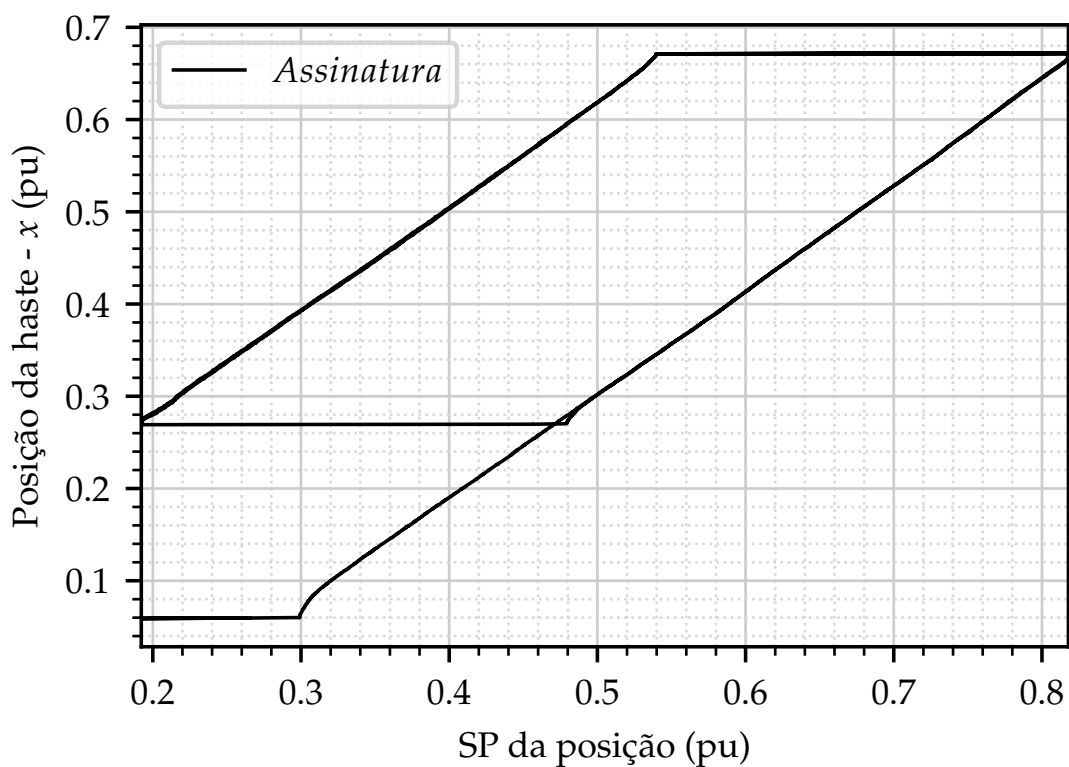


Figura 6.3 – Assinatura da válvula.

Fonte: do Autor.

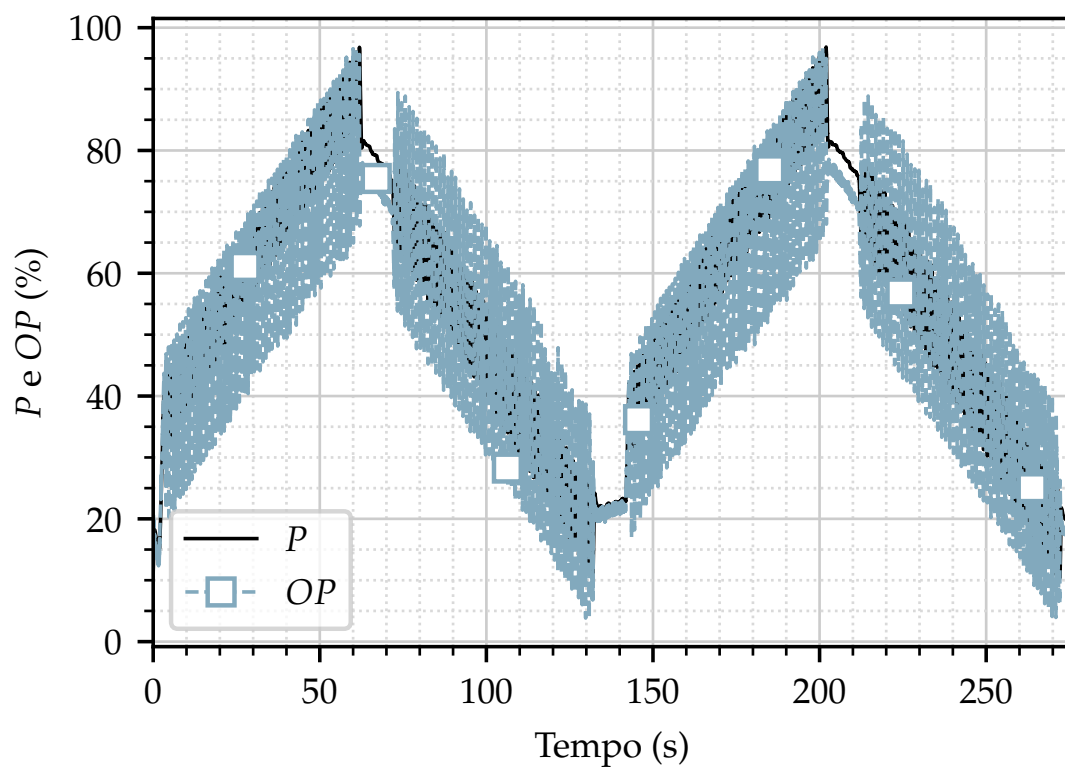


Figura 6.4 – OP x Pressão no atuador - Kano.

Fonte: do Autor.

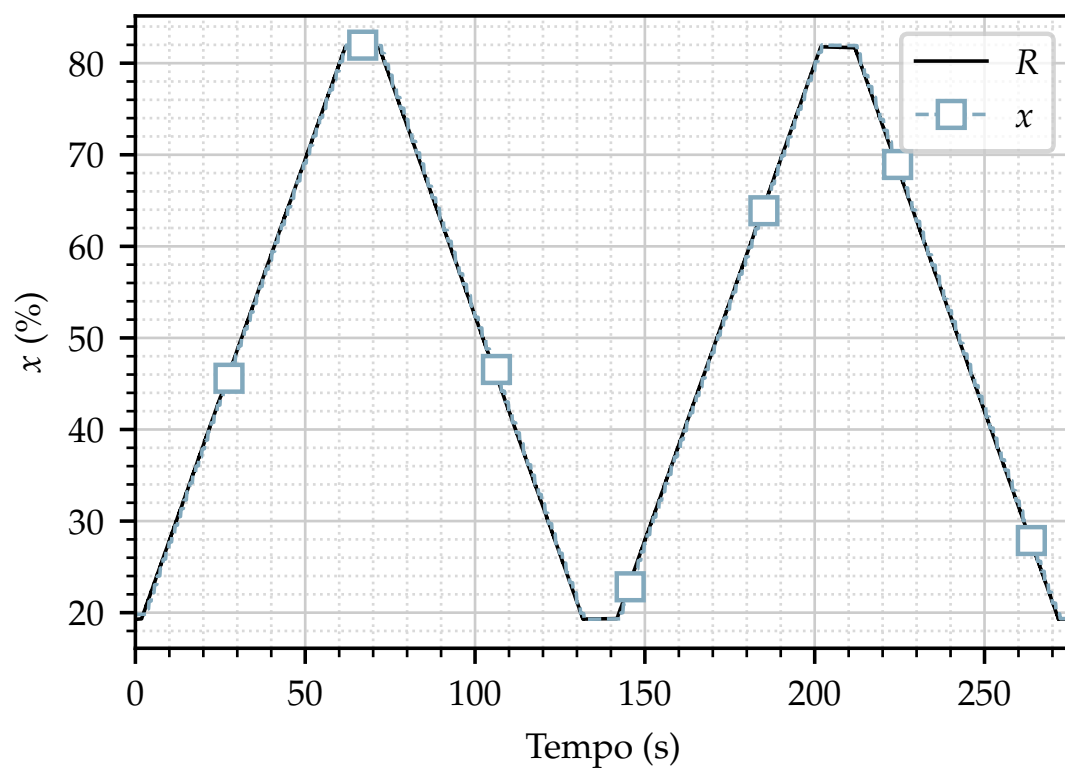


Figura 6.5 – Referência x Posição da haste - Kano.

Fonte: do Autor.

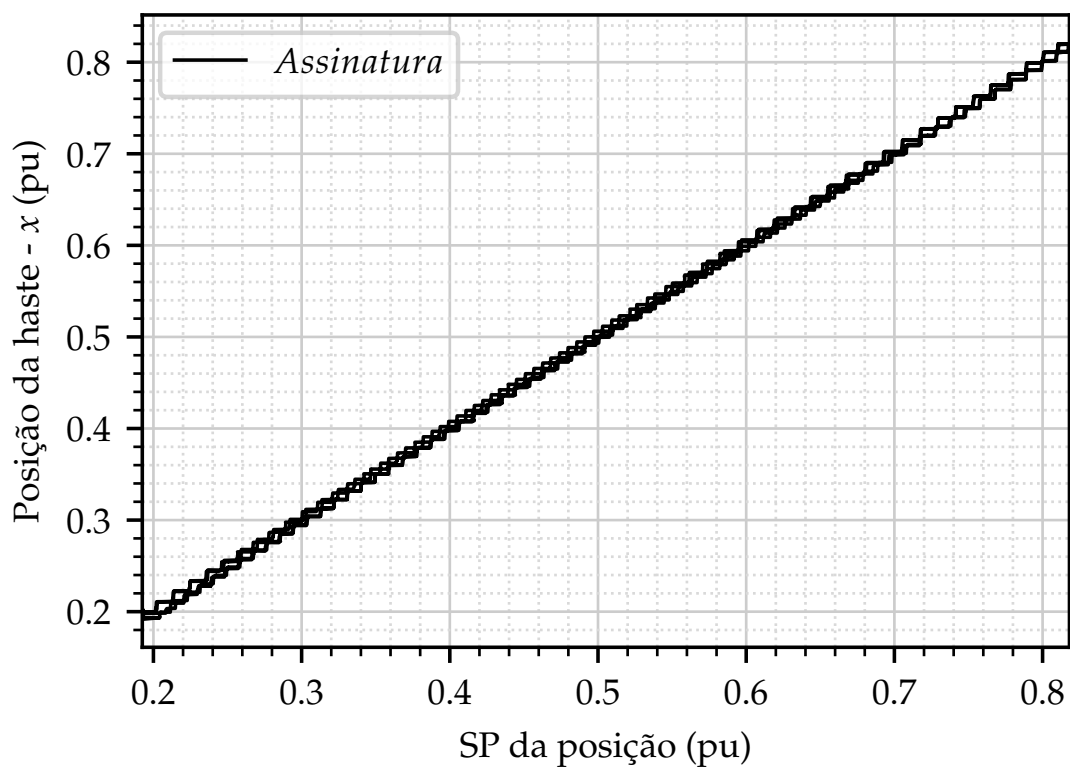


Figura 6.6 – Assinatura da válvula - Kano.

Fonte: do Autor.

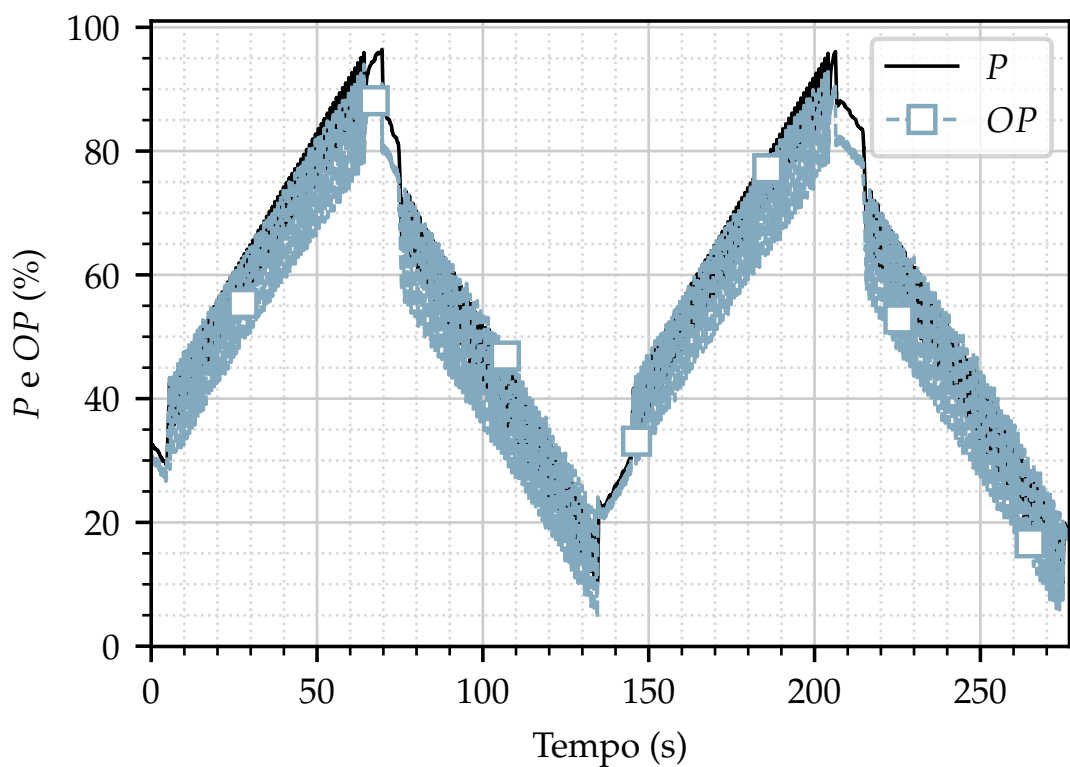


Figura 6.7 – OP x Pressão no atuador - He.

Fonte: do Autor.

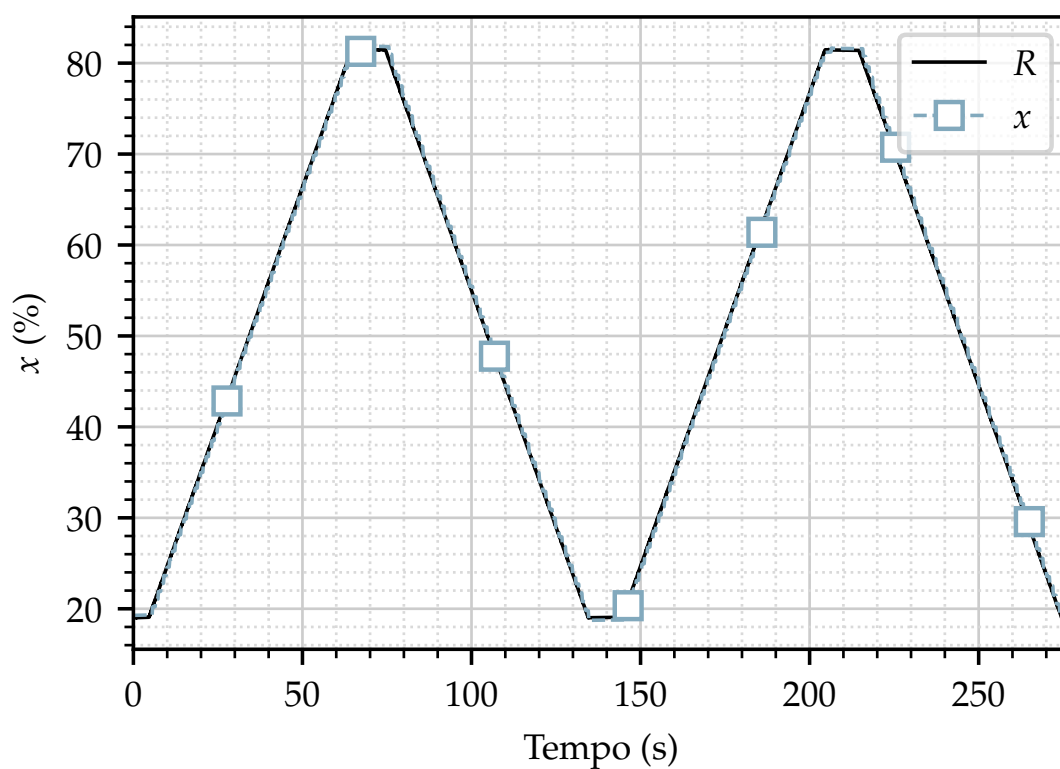


Figura 6.8 – Referência x Posição da haste - He.

Fonte: do Autor.

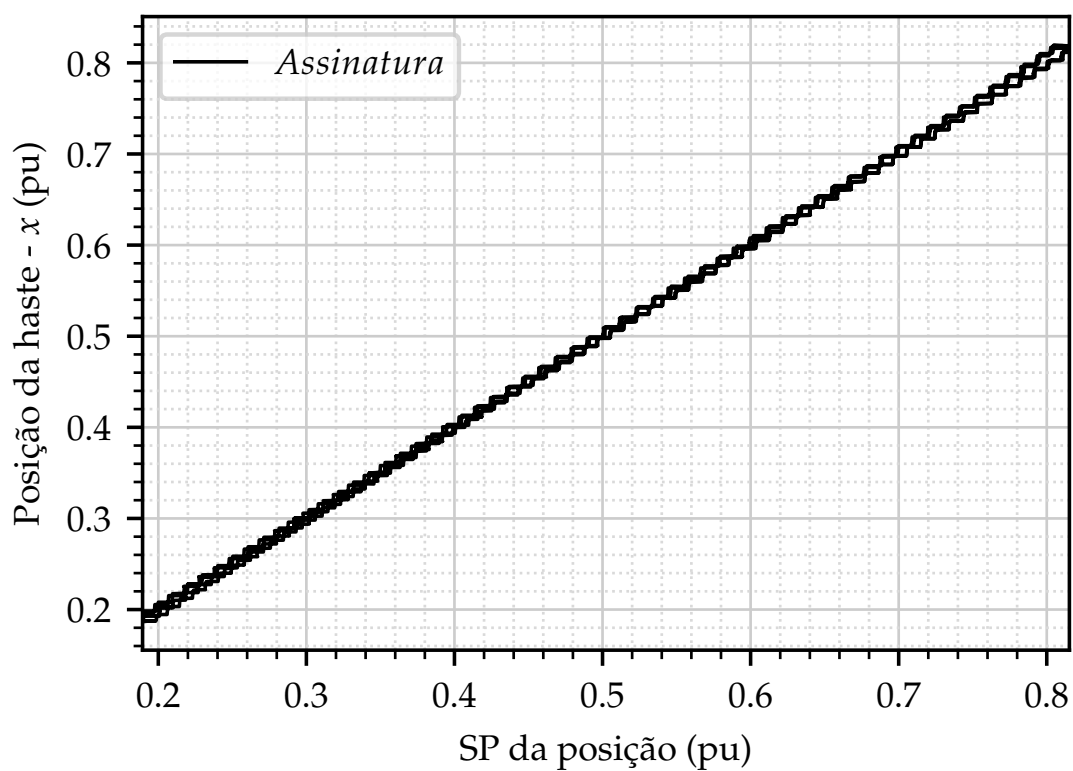


Figura 6.9 – Assinatura da válvula - He.

Fonte: do Autor.

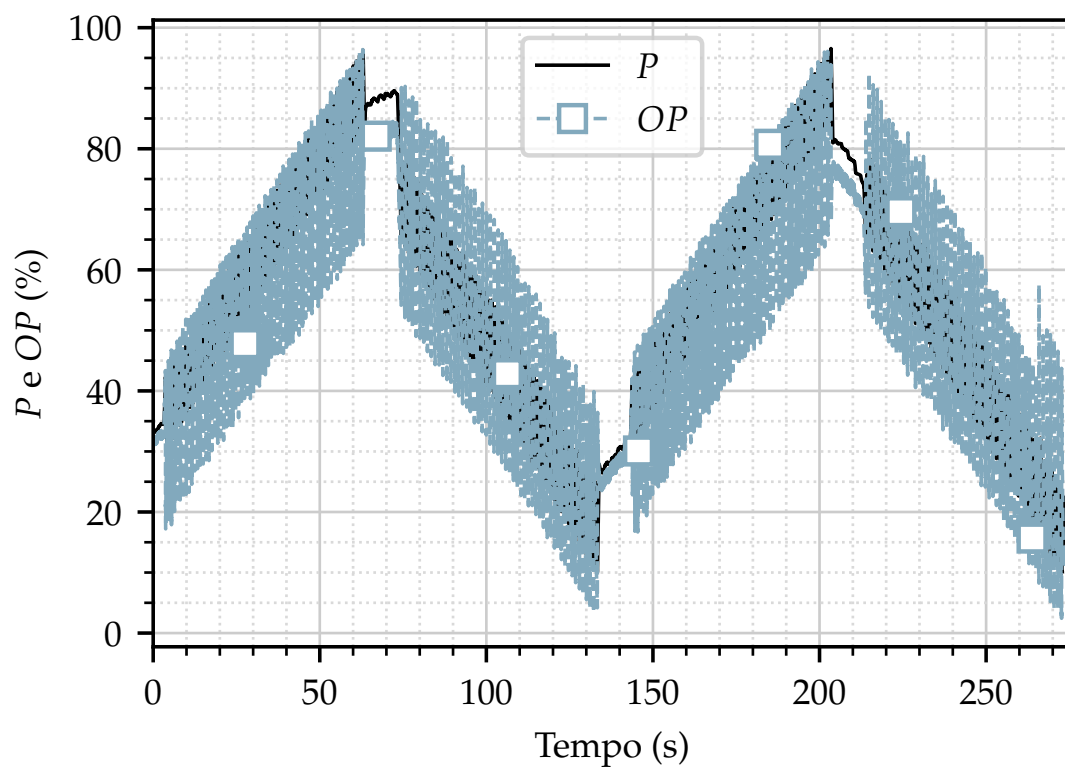


Figura 6.10 – OP x Pressão no atuador - Karnopp.

Fonte: do Autor.

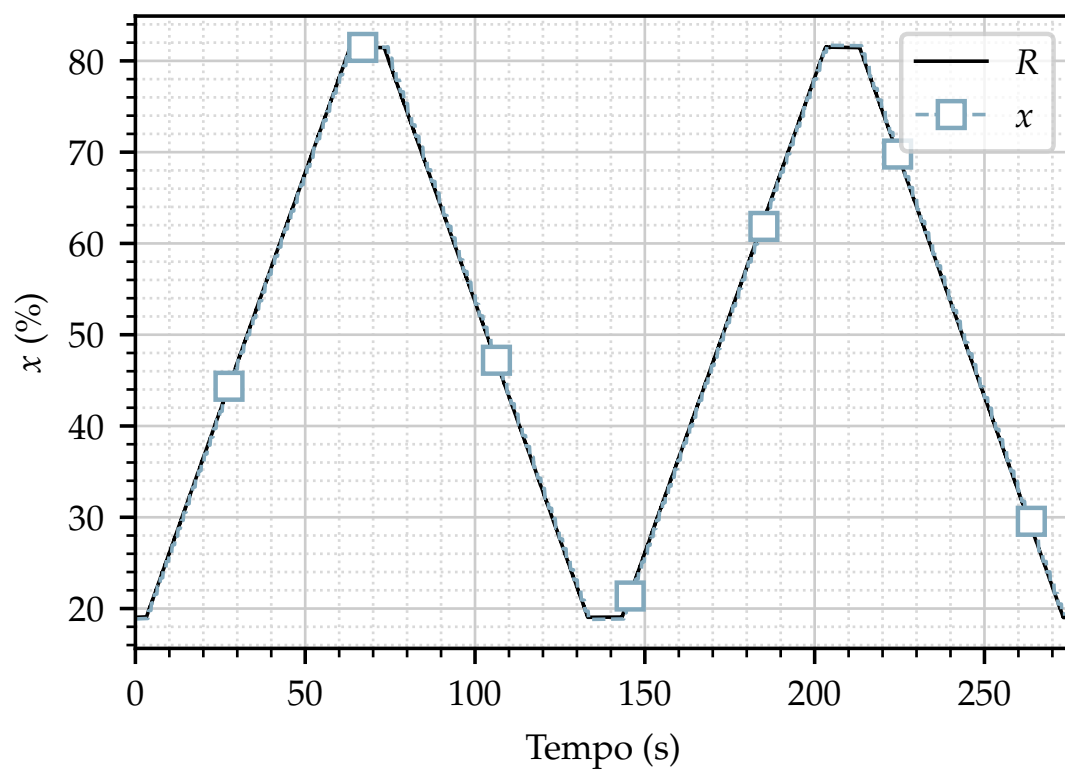


Figura 6.11 – Referência x Posição da haste - Karnopp.

Fonte: do Autor.

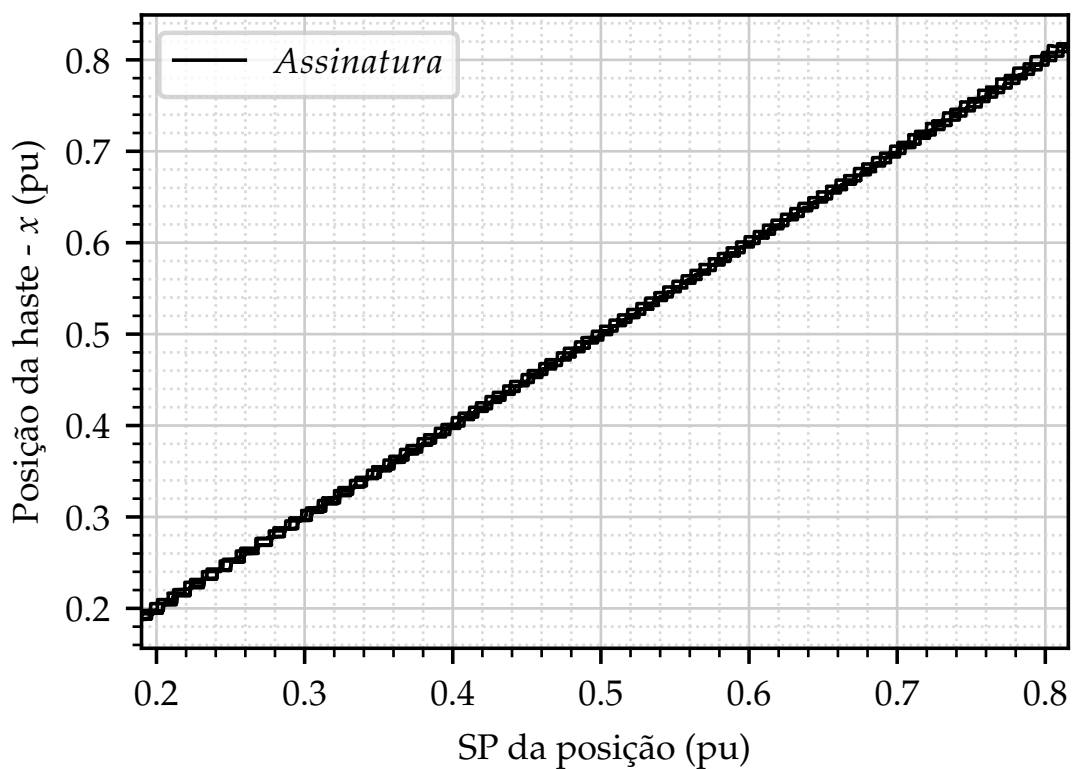


Figura 6.12 – Assinatura da válvula - Karnopp.

Fonte: do Autor.

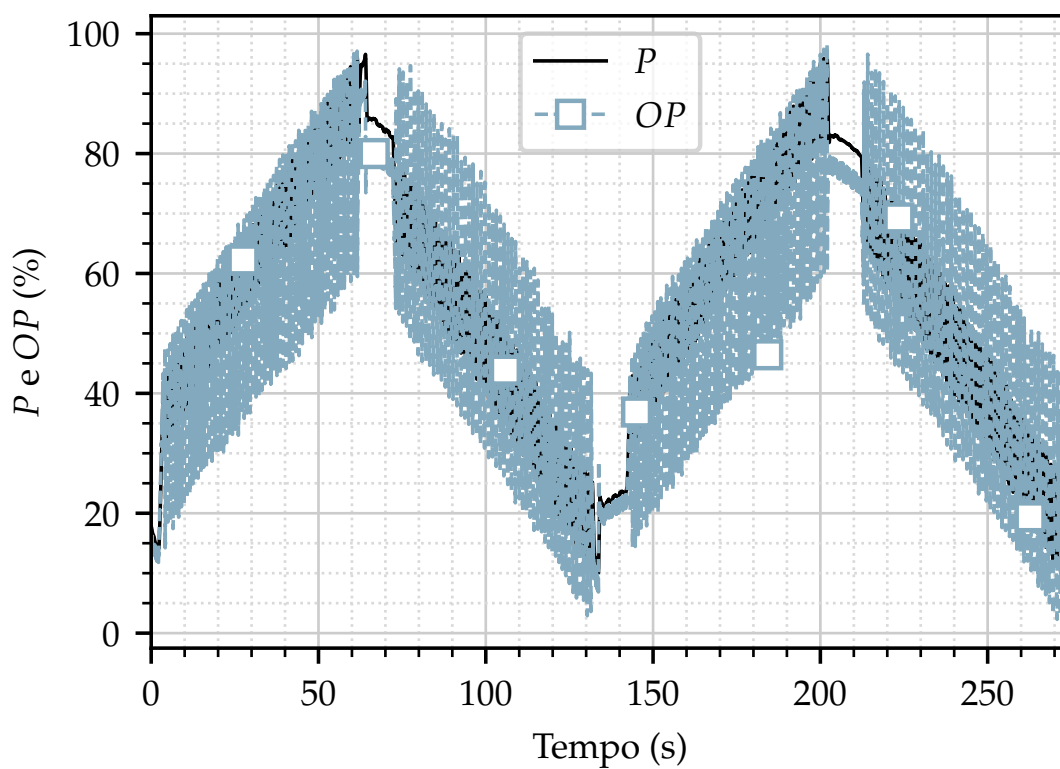


Figura 6.13 – OP x Pressão no atuador - GMS.

Fonte: do Autor.

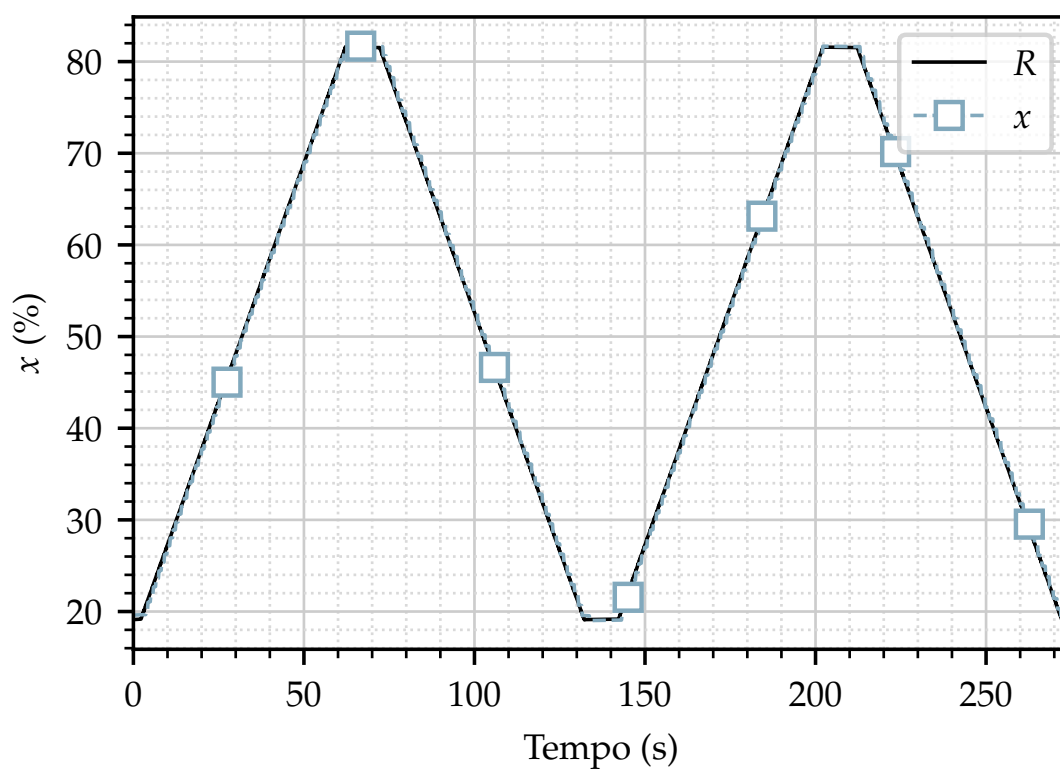


Figura 6.14 – Referência x Posição da haste - GMS.

Fonte: do Autor.

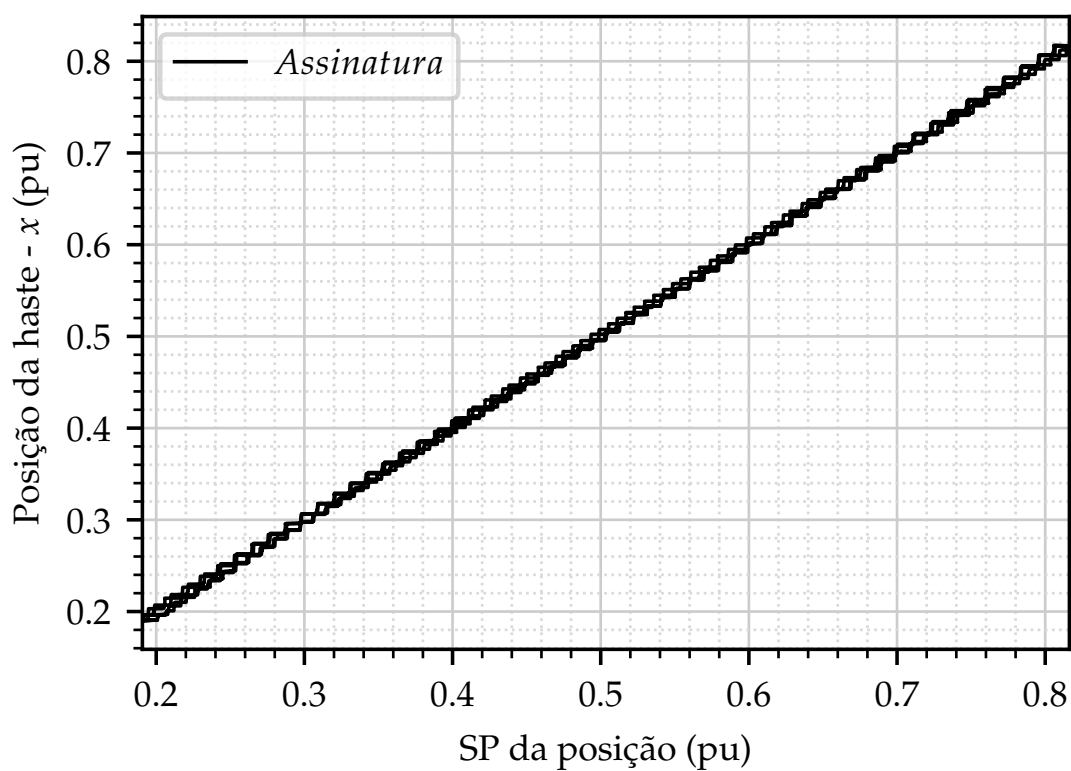


Figura 6.15 – Assinatura da válvula - GMS.

Fonte: do Autor.

A Tabela 6.3, apresenta os índices para a análise dos resultados dos experimentos da assinatura da válvula, nas configurações sem e com o posicionador digital, sendo possível fazer uma comparação dos resultados da utilização do posicionador digital.

Tabela 6.3 – Índices da assinatura da válvula.

	IAE(%)	EQM(%)	REQM(%)	DIST(%)
Sem Posici.	3412977,67	185,88	13,63	949,27
Kano	93506,55	0,18	0,42	1131,73
He	95859,17	0,18	0,43	1067,69
Karnopp	90494,43	0,17	0,41	1150,28
GMS	89506,06	0,17	0,41	1038,99

Fonte: do Autor.

Analisando a integral absoluta do erro (IAE), a configuração utilizando o posicionador digital e sintonia pelo modelo GMS foi a que apresentou o menor índice, enquanto a que utilizou o modelo de He foi a que apresentou o maior índice entre as quatro configurações que utilizaram o posicionador digital. Quando se compara a integral absoluta do erro para a configuração sem o posicionador com as configurações que utilizaram o posicionador digital, foi observado que os quatro modelos apresentaram o índice na razão de 37 vezes menor do que em relação à configuração que não utilizou o posicionador. Na análise do erro quadrático médio (EQM), os modelos de Kano e He e os modelos de Karnopp e GMS apresentaram os mesmos valores, respectivamente. Observa-se que os modelos tiveram um erro quadrático médio na faixa de 1000 vezes menor do que para a configuração sem o posicionador digital. Para a análise da raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), observa-se que a configuração sem compensação do atrito apresentou o índice 32 vezes maior que para as configurações com compensação de atrito. Entre as configurações que utilizaram o posicionador a configuração que utilizou o modelo He foi a que obteve o pior resultado, enquanto as configurações de Karnopp e GMS obtiverem os melhores resultados. Quando se comparam as distâncias percorridas pela haste, a configuração sem o posicionador digital foi a que obteve o menor deslocamento, pois o alto índice de atrito da válvula faz com que a haste não consiga chegar na posição desejada e pare em uma posição não desejada, levando a um menor deslocamento para a haste. A configuração que utiliza o posicionador digital sintonizada pelo modelo de Karnopp apresentou o maior deslocamento para a haste da válvula entre todas as configurações.

É possível observar pelos gráficos da assinatura, a diferença entre o caso sem o posicionador digital, Figuras 6.1 a 6.3, para as configurações com o posicionador digital, Figuras 6.4 a 6.15. Para a configuração sem o posicionador digital é possível observar a histerese, o *slip jump* e a banda morta, enquanto que para a configuração com o posicionador digital, a curva de assinatura se aproximam da linearidade.

6.4 Sinal Aleatório

Nesta seção, a válvula foi estimulada por um sinal aleatório, na resposta ao estímulo foi possível observar várias características de transições em um único experimento. Para este experimento foi utilizado o posicionador digital com a compensação pelos modelos de Kano, He, Karnopp e GMS. Os gráficos apresentados para visualizar este experimento foram o da pressão da câmara do atuador com a saída do posicionador e o da posição da haste com a referência.

Nas Figuras 6.16, 6.18, 6.20 e 6.22 observa-se a relação da pressão na câmara do posicionador da válvula (P) e o sinal da saída do controlador (OP). Já nas Figuras 6.17, 6.19, 6.21 e 6.23 observa-se a posição da haste (x) pelo sinal da referência da posição (R). Observa-se que os sinais P , R e x são os sinais obtidos pelas entradas filtradas do posicionador digital.

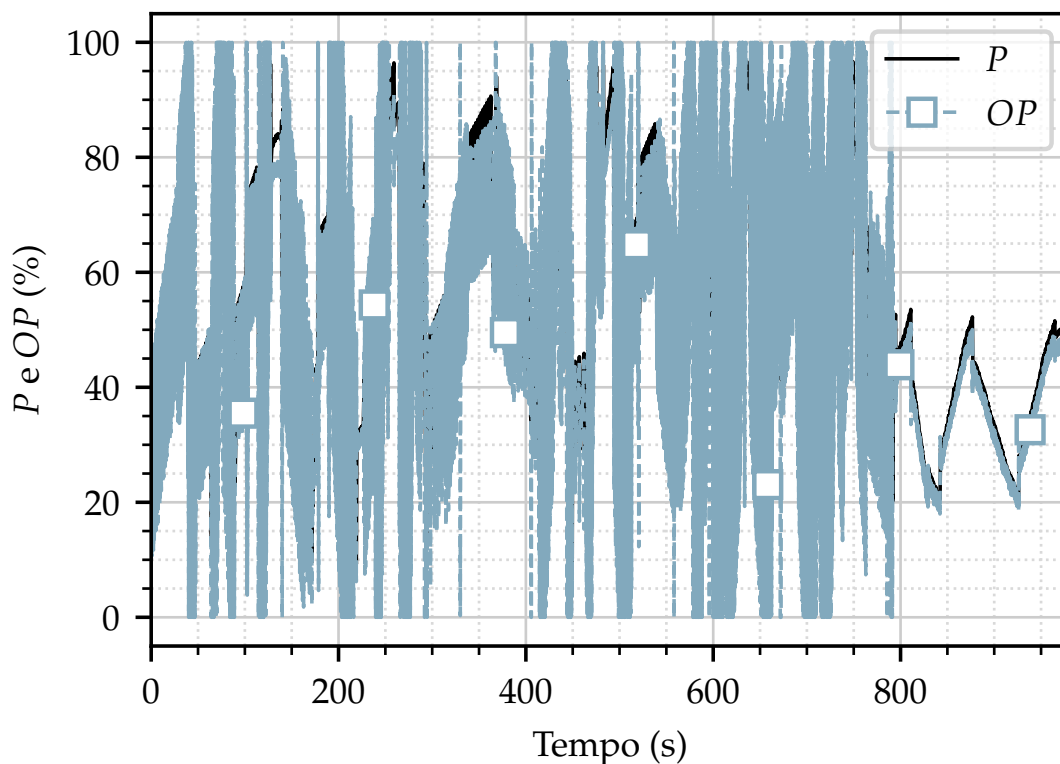


Figura 6.16 – Sinal aleatório - P e OP - Kano.

Fonte: do Autor.

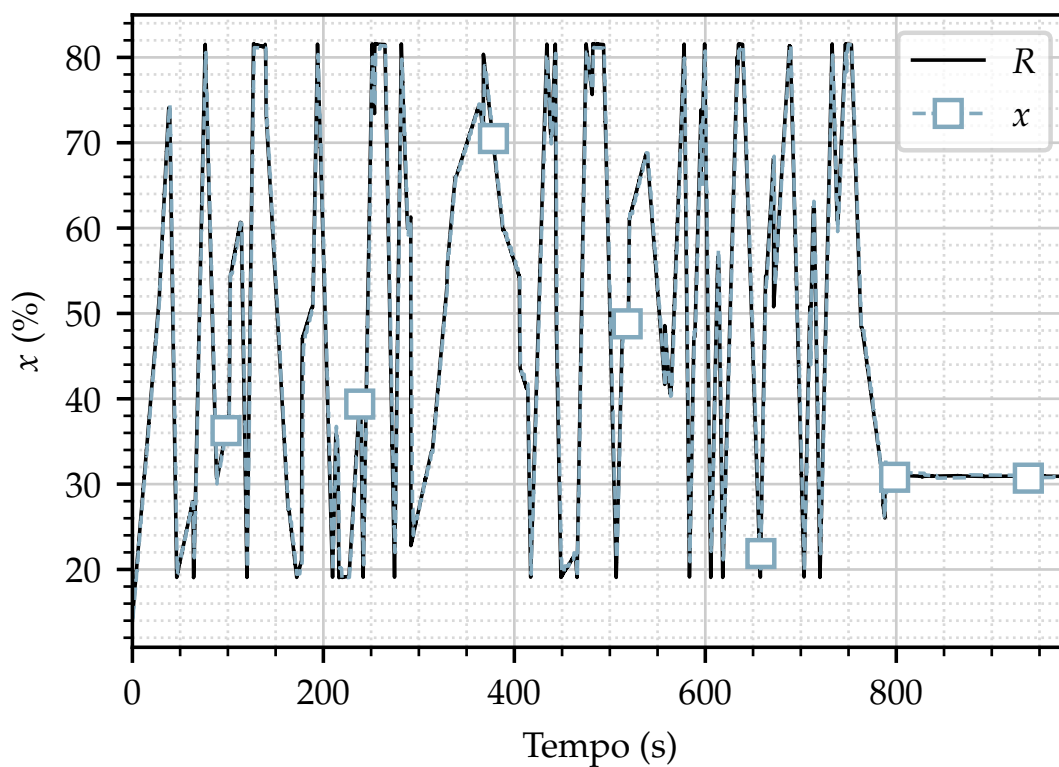


Figura 6.17 – Sinal aleatório - x - Kano.

Fonte: do Autor.

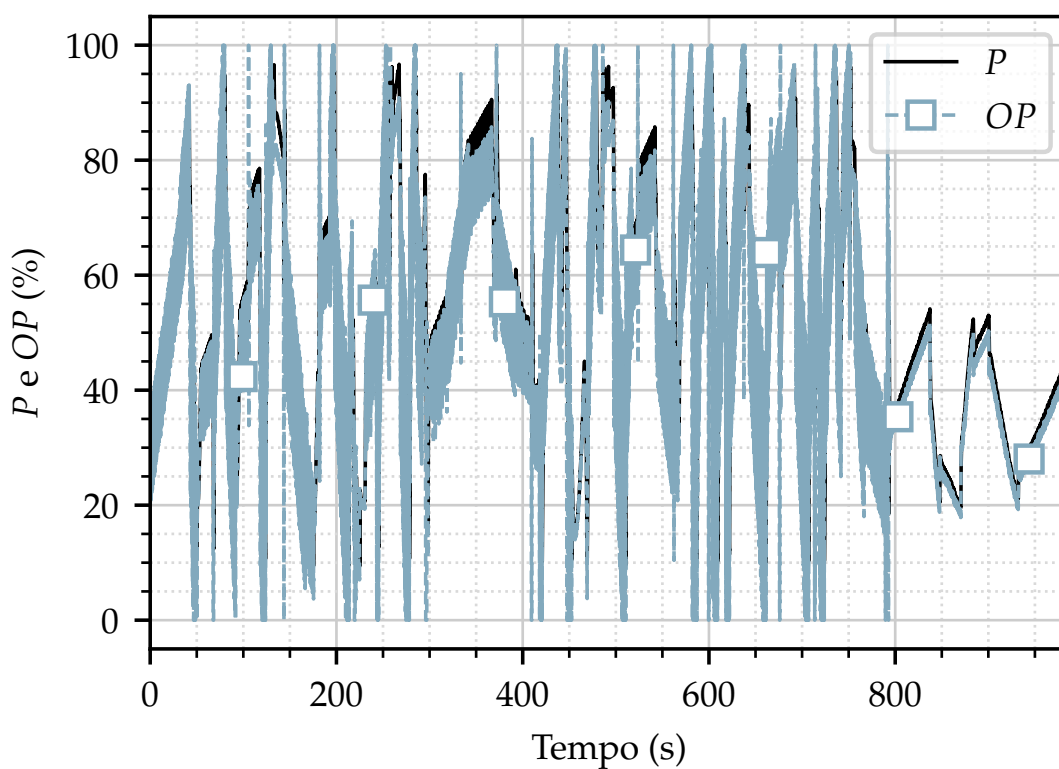
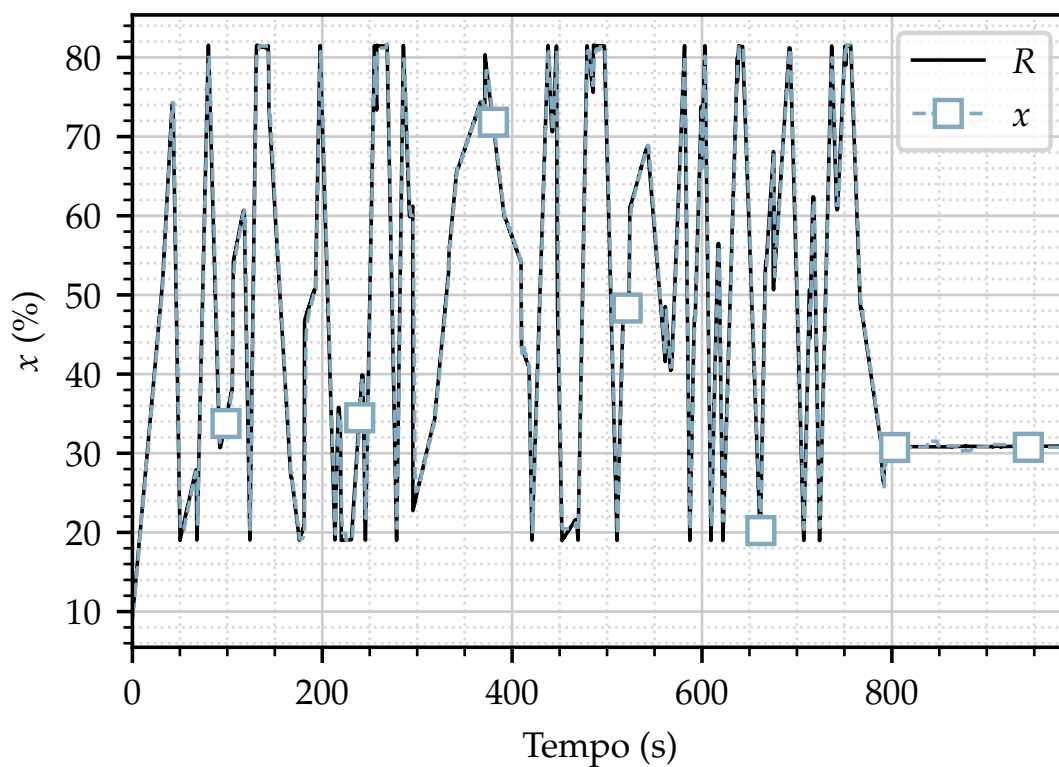
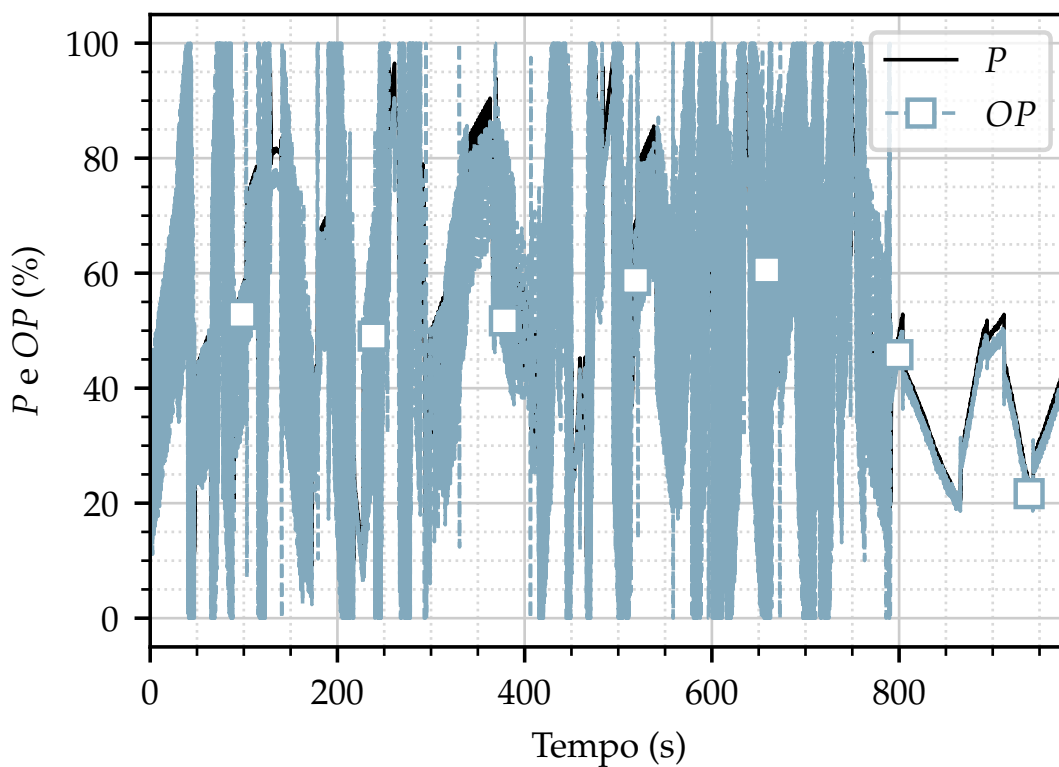


Figura 6.18 – Sinal aleatório - P e OP - He.

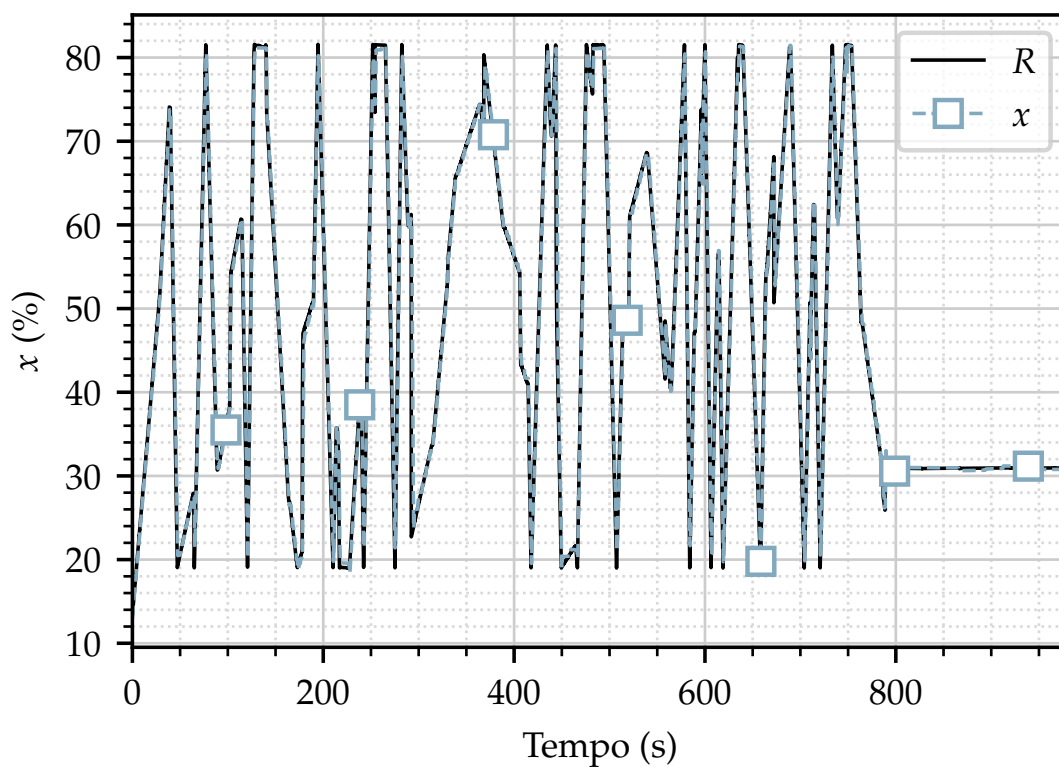
Fonte: do Autor.

Figura 6.19 – Sinal aleatório - x - He.

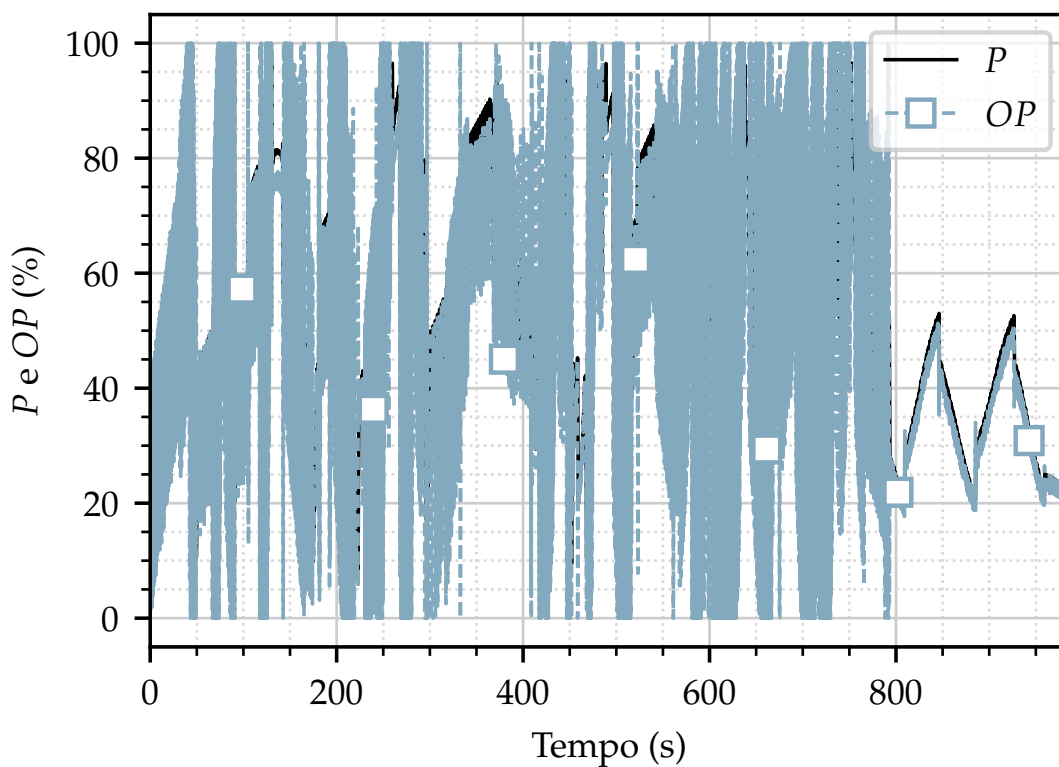
Fonte: do Autor.

Figura 6.20 – Sinal aleatório - P e OP - Karnopp.

Fonte: do Autor.

Figura 6.21 – Sinal aleatório - x - Karnopp.

Fonte: do Autor.

Figura 6.22 – Sinal aleatório - P e OP - GMS.

Fonte: do Autor.

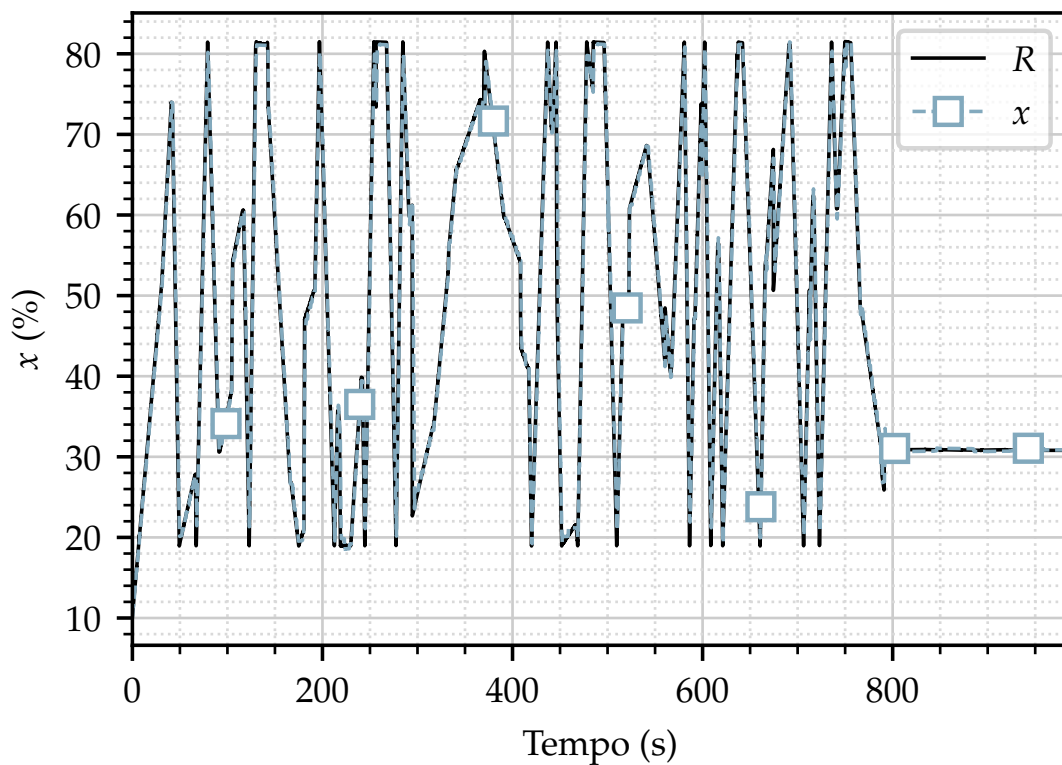


Figura 6.23 – Sinal aleatório - x - GMS.

Fonte: do Autor.

Os índices calculados para o experimento do sinal aleatório são apresentados na Tabela 6.4, nela são apresentados os índices para a posição e a distância percorrida pela haste da válvula (DIST).

Tabela 6.4 – Índices do sinal aleatório com posicionador.

Modelo	IAE(%)	EQM(%)	REQM(%)	DIST(%)
Kano	874831,04	4,01	2,00	4952,38
He	944438,83	3,95	1,99	4901,48
Karnopp	853100,44	3,99	1,99	4889,84
GMS	838944,66	3,91	1,98	5157,33

Fonte: do Autor.

Analisando a integral absoluta do erro (IAE), o modelo GMS foi o que apresentou o menor índice, enquanto o modelo de He foi o que apresentou o maior índice entre os quatro modelos utilizados, da mesma forma como foi observado no experimento de assinatura.

Na análise do erro quadrático médio (EQM), a configuração utilizando o modelo GMS foi a que apresentou o menor índice entre as sintonias pelos quatro modelos, enquanto a sintonia pelo modelo de Kano foi a que apresentou o maior índice.

Para a raiz quadrada do erro quadrático médio, os valores foram muito próximos entre os modelos, sendo que o GMS apresentou o menor índice e o Kano o que apresentou o maior índice.

Quando se analisou a distância percorrida pela haste (DIST), a sintonia pelo modelo de Karnopp foi a que apresentou o menor índice, enquanto o maior índice foi observado para a configuração sintonizada pelo modelo GMS. Neste caso, observa-se que o modelo mais complexo, GMS, tende a ter uma maior precisão, mas esta precisão demanda um maior deslocamento para a haste.

6.5 Controle da vazão

Os resultados apresentados anteriormente foram para a configuração em malha aberta, utilizando apenas a válvula sem e com o posicionador digital. Nesta seção a malha é fechada, a válvula é utilizada para controlar a vazão no modo de controle regulatório e servo, para as duas formas de controle são utilizadas a configuração com e sem o posicionador digital. Na configuração sem o posicionador digital é utilizada uma configuração contendo apenas o controlador de vazão (Cv) e outra configuração que utiliza o controlador de vazão (Cv) mais o compensador CR2, Figura 6.24.

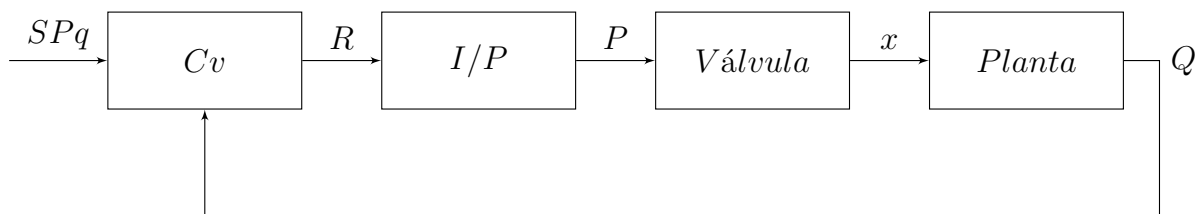


Figura 6.24 – Diagrama do controle da vazão sem posicionador.

Fonte: do Autor.

Para a configuração que utiliza o posicionador digital, são utilizados o controlador de vazão (Cv) em série com o posicionador, Figura 6.25. No modo regulatório o valor de referência de vazão não é alterado durante todo o experimento, é gerada uma perturbação entre 300 s e 600 s, esta perturbação é gerada pelo fechamento da válvula de teflon presente no circuito da planta de vazão. Já no controle no modo servo o valor de referência é alterado durante o período do experimento e não há perturbação gerada pela outra válvula.

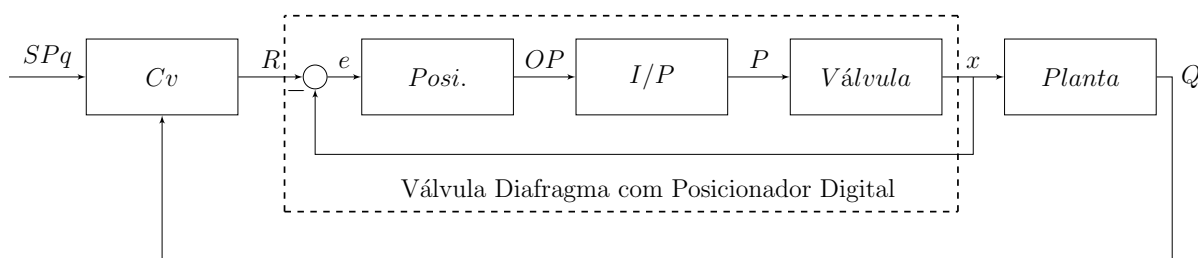


Figura 6.25 – Diagrama do controle da vazão com posicionador.

Fonte: do Autor.

6.5.1 Sintonia do Controlador de Vazão

O controlador de vazão (Cv) utilizado é um Proporcional Integral (PI), sintonizado pelo método de sintonia da síntese direta. Para os experimentos de controle da vazão na configuração sem o posicionador digital foram adotados os mesmos parâmetros de sintonia para o controlador de vazão (Cv), enquanto para os experimentos de controle de vazão para a configuração com o posicionador digital foram realizadas sintonias distintas para o controlador de vazão (Cv), para cada modelo de atrito. Os parâmetros de sintonia utilizados para o controlador de vazão (Cv) são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Parâmetros do Controlador PI de vazão (Cv).

Posicionador	Modelo	K	Ti
Ausente	-	0,4410	3,3747
	CR2	0,4410	3,3747
Presente	Kano	0,3822	3,3108
	He	0,3824	3,3706
	Karnopp	0,3935	3,1230
	GMS	0,3833	3,4094

Fonte: do Autor.

6.5.2 Controle Regulatório

Nesta subseção são apresentados os resultados para os experimentos de controle regulatório. Foram utilizadas as configurações sem o posicionador, utilizando apenas o controlador de vazão sintonizado pelo método da síntese direta, a configuração com o controlador de vazão mais a compensação por CR2 e por último a configuração com o controlador de vazão mais o posicionador digital sintonizado com os parâmetros calculados pelos modelos de Kano, de He, de Karnopp e GMS.

Para cada configuração são apresentados dois gráficos, sendo o primeiro a referência de vazão (SPq) e a vazão medida (Q), sendo observados nas Figuras 6.26,6.28,6.30,6.32,6.34 e 6.36. O segundo gráfico faz a relação da posição da haste (x) e a referência da posição da haste (R), sendo estes observados nas Figuras 6.27,6.29,6.31,6.33,6.35 e 6.37.

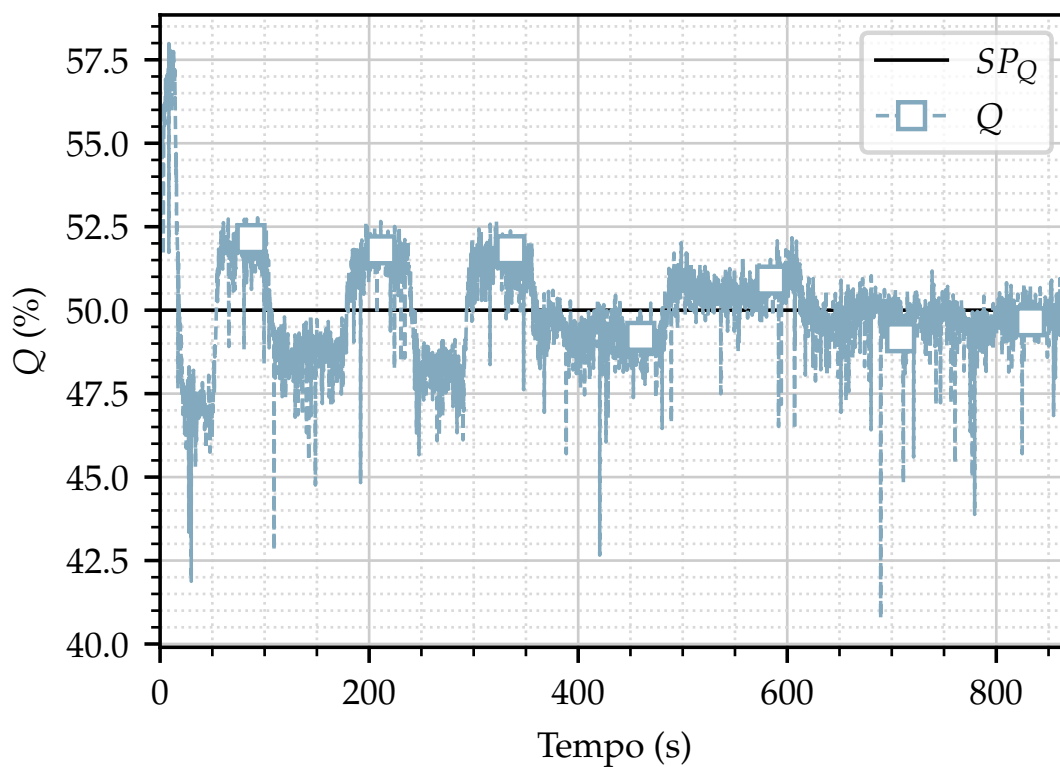


Figura 6.26 – Vazão controle regulatório sem posicionador.

Fonte: do Autor.

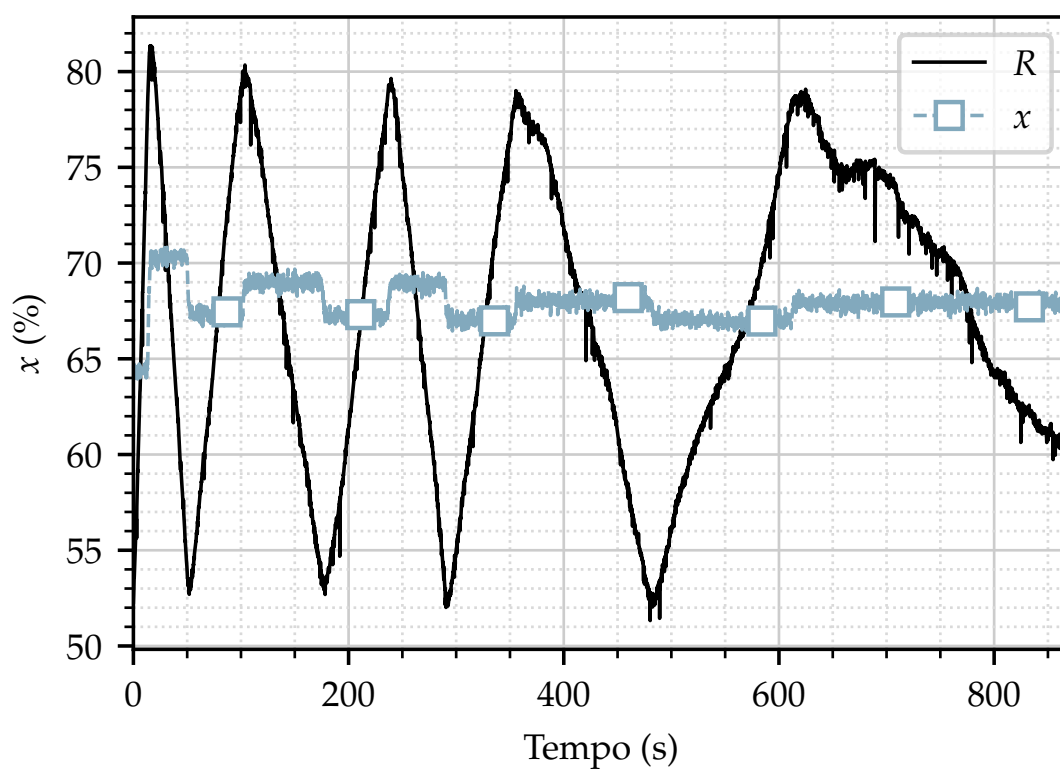


Figura 6.27 – Posição da haste controle regulatório sem posicionador.

Fonte: do Autor.

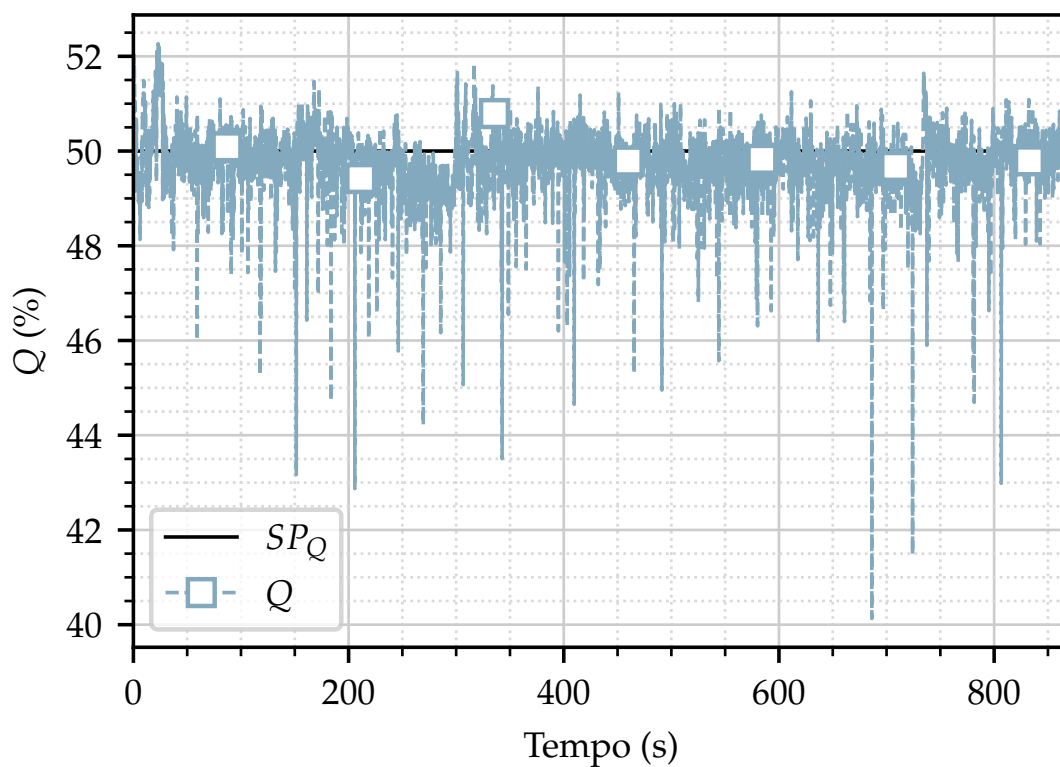


Figura 6.28 – Vazão controle regulatório CR2.

Fonte: do Autor.

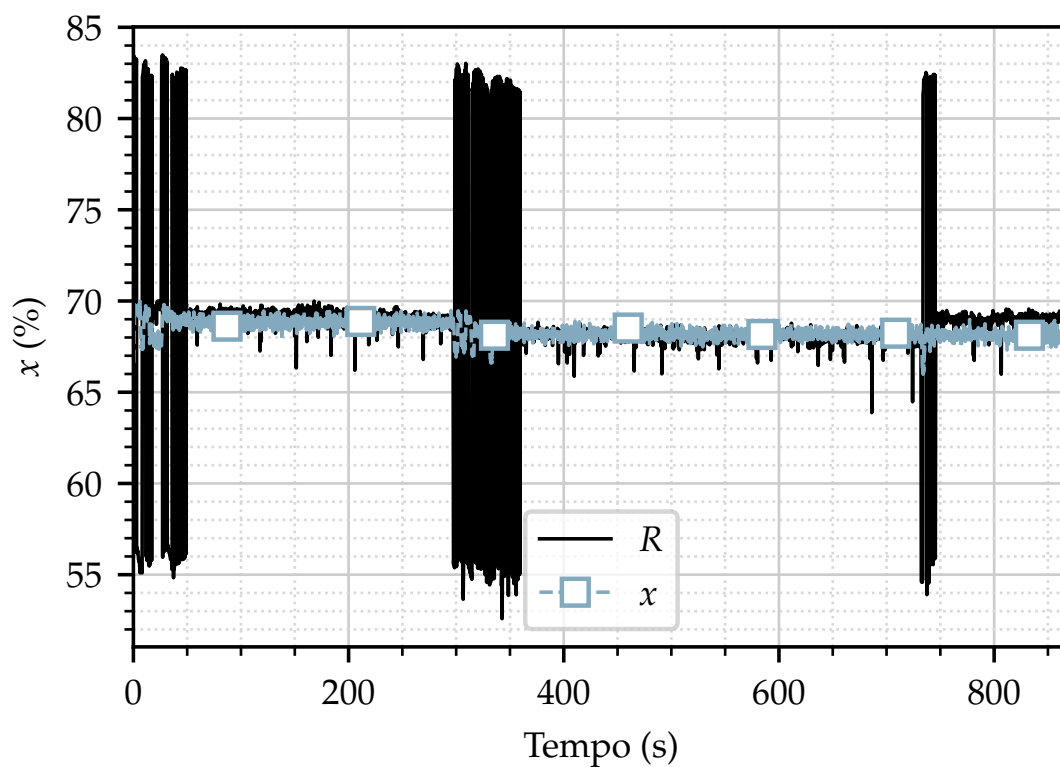


Figura 6.29 – Posição da haste controle regulatório CR2.

Fonte: do Autor.

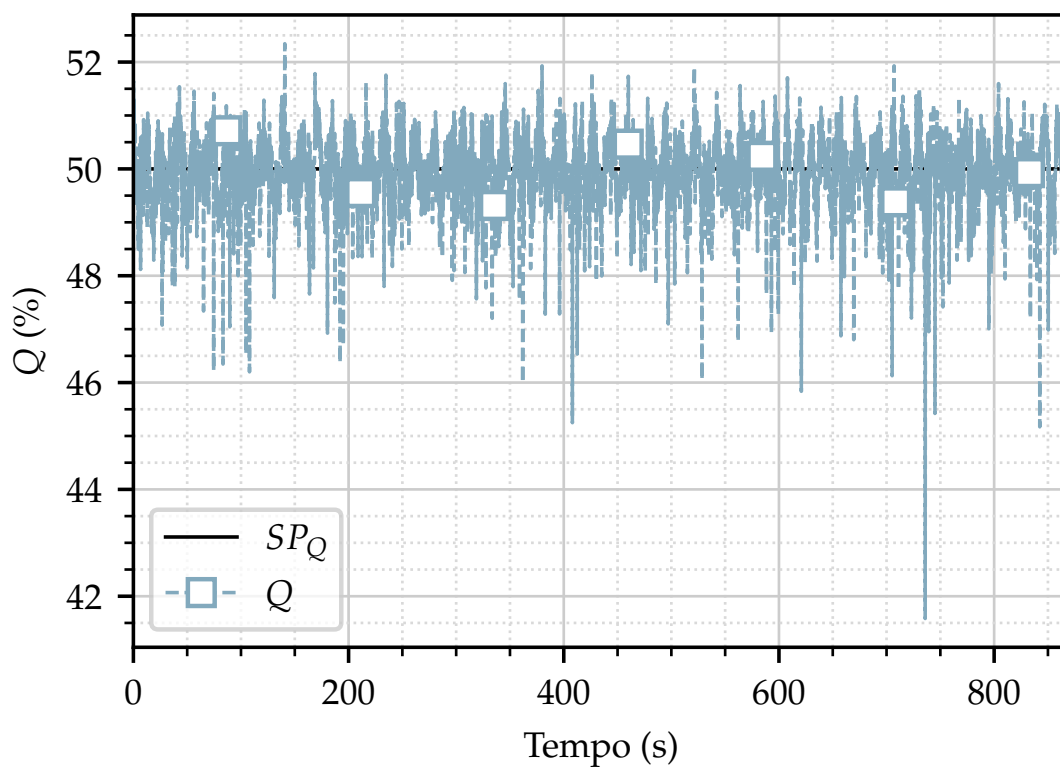


Figura 6.30 – Vazão controle regulatório Kano.

Fonte: do Autor.

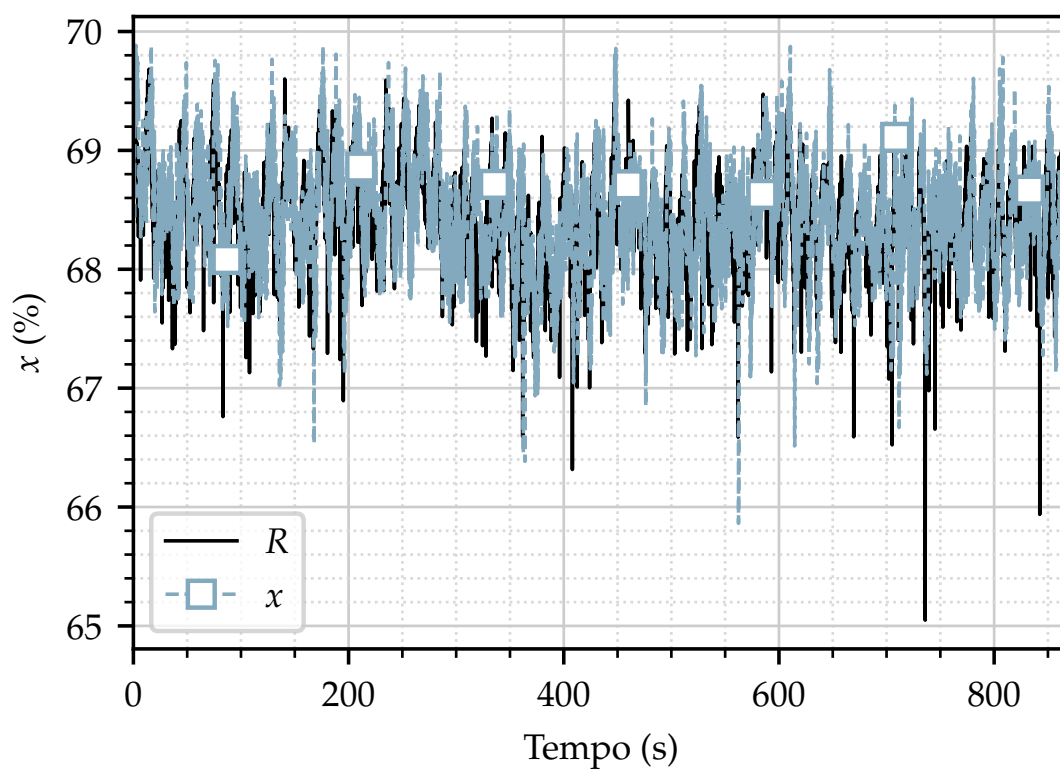


Figura 6.31 – Posição da haste controle regulatório Kano.

Fonte: do Autor.

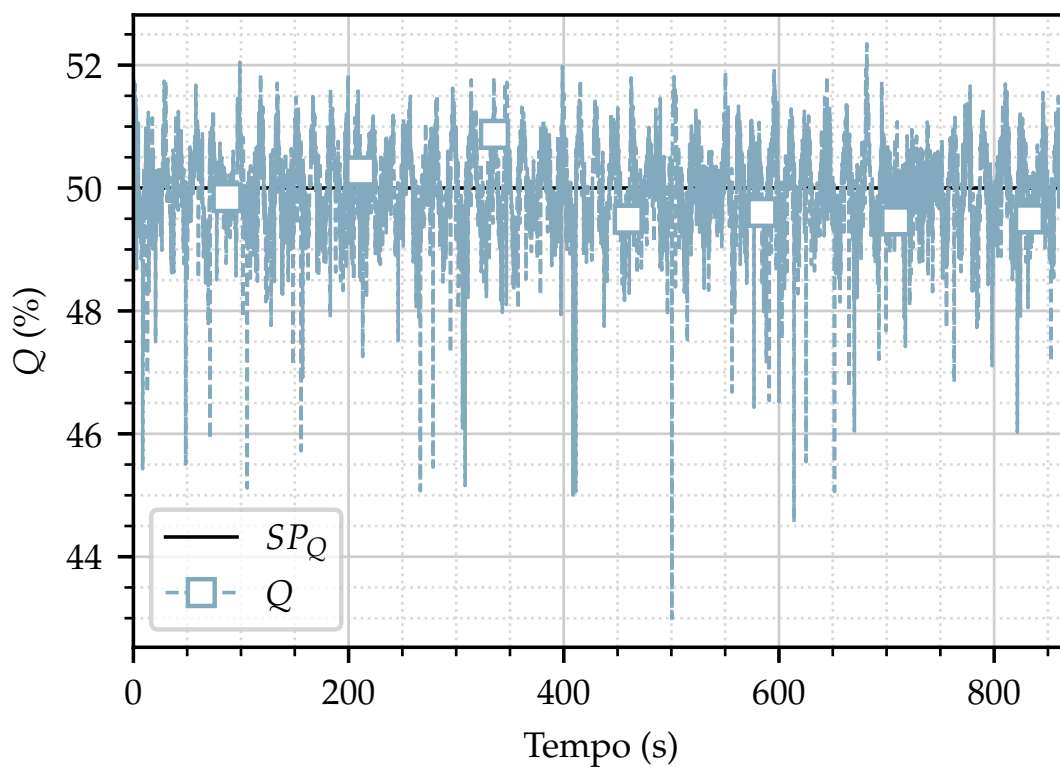


Figura 6.32 – Vazão controle regulatório He.

Fonte: do Autor.

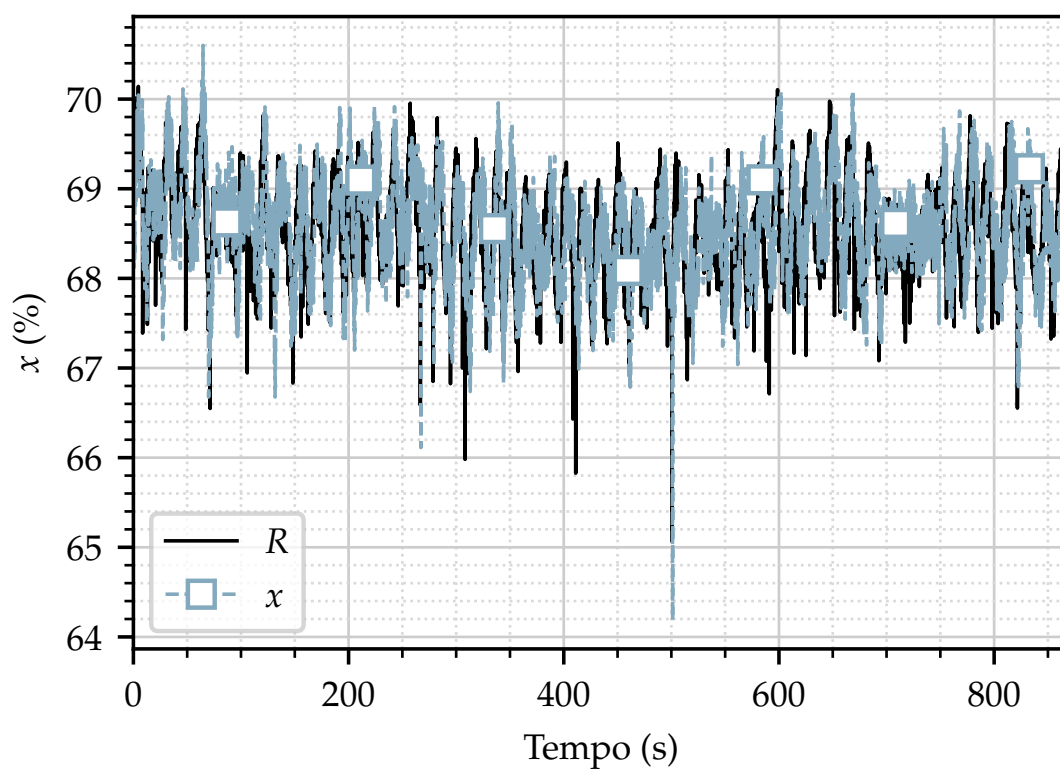


Figura 6.33 – Posição da haste controle regulatório He.

Fonte: do Autor.

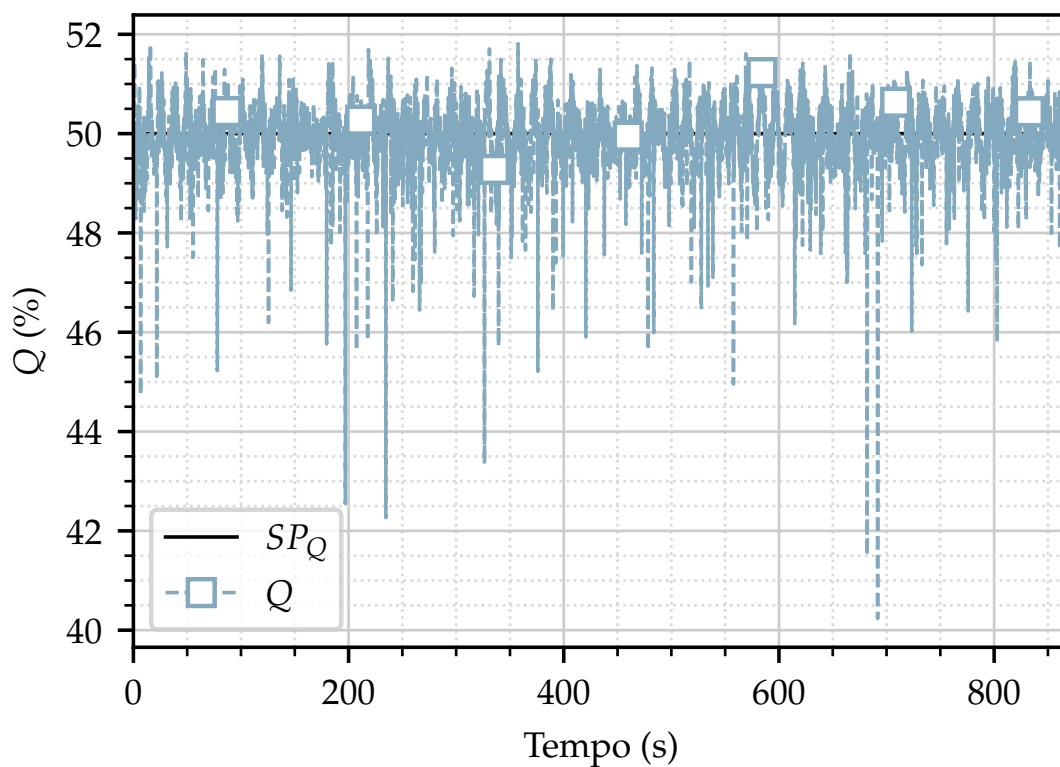


Figura 6.34 – Vazão controle regulatório Karnopp.

Fonte: do Autor.

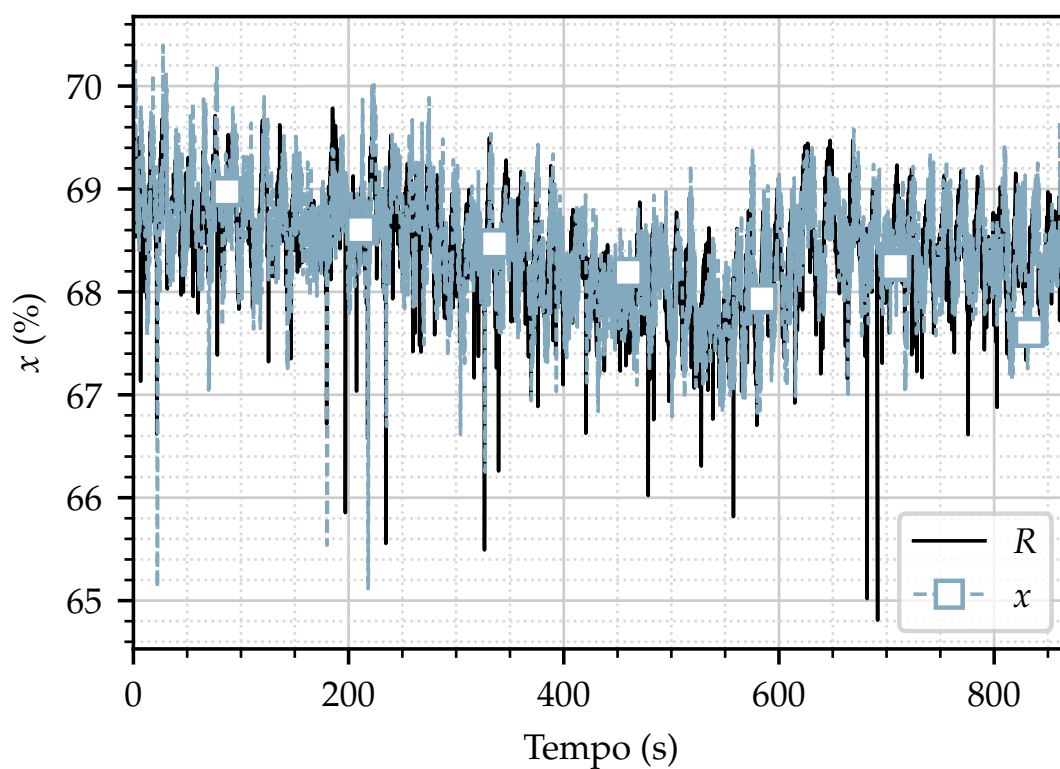


Figura 6.35 – Posição da haste controle regulatório Karnopp.

Fonte: do Autor.

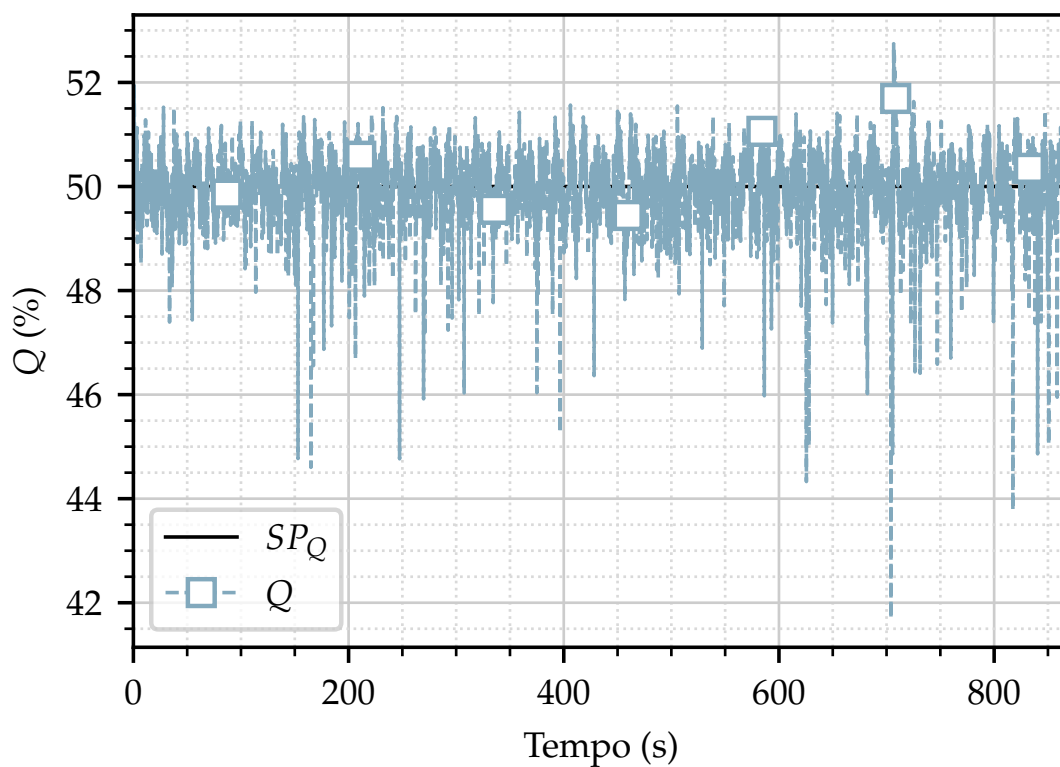


Figura 6.36 – Vazão controle regulatório GMS.

Fonte: do Autor.

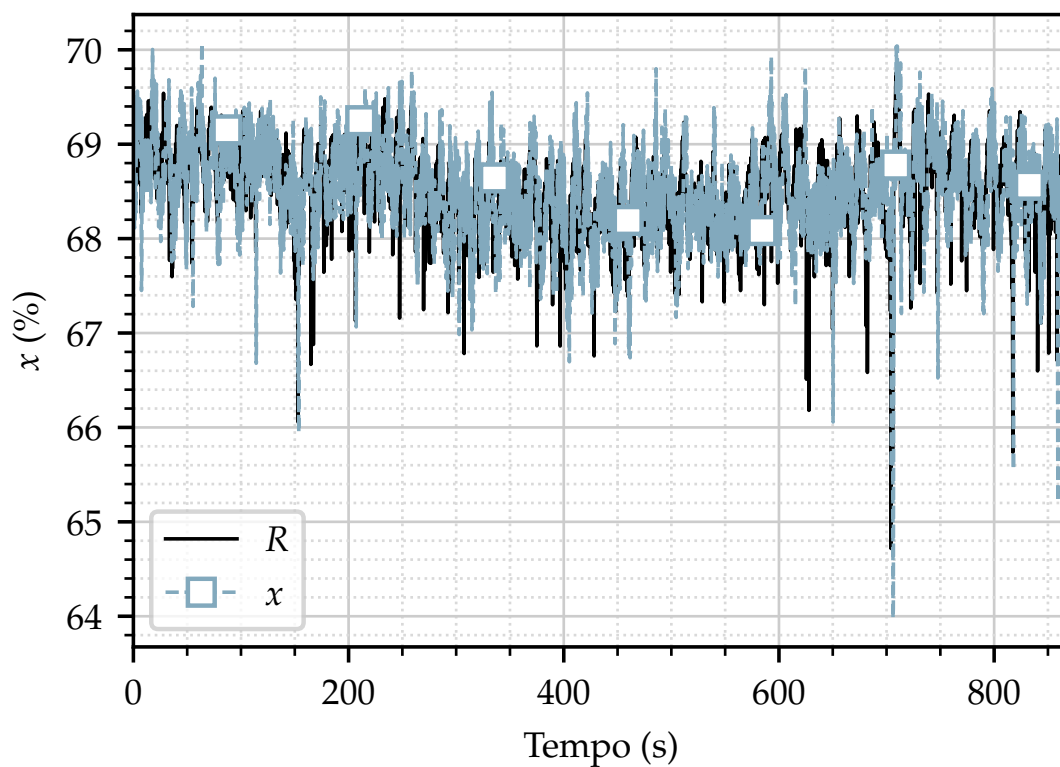


Figura 6.37 – Posição da haste controle regulatório GMS.

Fonte: do Autor.

Os índices calculados para o experimento do controle de vazão no modo regulatório são apresentados na Tabela 6.6, nela são apresentados os índices para a vazão e a distância percorrida pela haste da válvula (DIST).

Tabela 6.6 – Índices do controle regulatório.

	IAE_Q(%)	EQM_Q(%)	REQM_Q(%)	DIST(%)
S_Pos.	9169,25	2,19	1,48	73599974,89
CR2	3468,79	0,38	0,61	34893905,88
Kano	3692,98	0,33	0,57	40672656,64
He	4491,95	0,45	0,67	47012569,15
Karnopp	3687,77	0,36	0,60	46538178,88
GMS	3456,25	0,32	0,56	40712810,19

Fonte: do Autor.

Analisando a integral absoluta do erro (IAE) para a vazão, o modelo GMS foi o que apresentou o menor índice entre as configurações, seguida pela configuração CR2, a configuração que utilizou o modelo de He foi a que apresentou o maior índice em relação às configurações com o posicionador digital. Observa-se que as configurações que utilizaram o posicionador e a configuração CR2 apresentaram a integral absoluta do erro na faixa de 2,4 vezes menor do que para a configuração sem posicionador.

Na análise do erro quadrático médio (EQM) para a vazão, observa-se que o maior erro foi para o caso sem o posicionador digital, sendo o erro na faixa de 5,7 vezes maior do que para as configurações com compensação de atrito. Quando se comparam as configurações com compensação do atrito, a que apresentou o maior erro foi a configuração com posicionador e sintonia pelo modelo He, neste caso a configuração com posicionador digital obteve o erro 1,18 vezes maior do que para a configuração CR2.

Quando se analisa a raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM) a configuração sem o posicionador digital também foi a que apresentou o maior erro, sendo o erro na faixa de 2,4 vezes maior do que para as configurações com compensação do atrito. Quando se comparam as configurações com compensação do atrito, observa-se que o maior erro ocorreu para a configuração com posicionador e sintonia pelo modelo He, o erro com o modelo de He foi 1,09 vezes maior do que para a configuração CR2.

Para a análise da distância percorrida pela haste (DIST), observou-se que a configuração CR2 foi a que obteve a menor distância percorrida pela haste, seguida pelas configurações que utilizaram o posicionador digital.

A distância percorrida pela haste na configuração CR2 foi 2,1 vezes menor do que para a configuração sem o posicionador digital. Quando se comparam as configurações com o posicionador digital e a configuração CR2, sendo as duas com compensação do atrito, observa-se que na configuração CR2 a distância percorrida foi 1,25 vezes menor. Entre as

configurações com o posicionador digital, a configuração com a sintonia pelo modelo de He foi a que apresentou a maior distância percorrida pela haste em relação às configurações com alguma compensação do atrito. Diferentemente do experimento de assinatura, onde as menores distâncias ocorreram para a configuração sem o posicionador, quando a malha é fechada a configuração sem o posicionador apresentou as maiores distâncias percorridas pela haste, por outro lado as configurações com alguma compensação de atrito apresentaram as menores distâncias. A configuração sem posicionador apresentou a maior distância percorrida pela haste, caracterizada pela oscilação da malha de controle, ocasionada pelo alto índice de atrito da válvula de controle.

6.5.3 Controle Servo

Nesta subseção são apresentados os resultados para os experimentos de controle no modo servo. Foram utilizadas as configurações sem o posicionador, utilizando apenas o controlador de vazão sintonizado pelo método da síntese direta, a configuração com o controlador de vazão mais a compensação por CR2 e por último a configuração com o controlador de vazão mais o posicionador digital sintonizado com os parâmetros calculados pelos modelos de Kano, de He, de Karnopp e GMS.

Para cada configuração são apresentados dois gráficos, sendo o primeiro a referência de vazão (SPq) e a vazão medida (Q), sendo observados nas Figuras 6.38,6.40,6.42,6.44,6.46 e 6.48. E o segundo gráfico mostra a relação da posição da haste (x) e a referência da posição da haste (R), sendo estes observados nas Figuras 6.39,6.41,6.43,6.45,6.47 e 6.49.

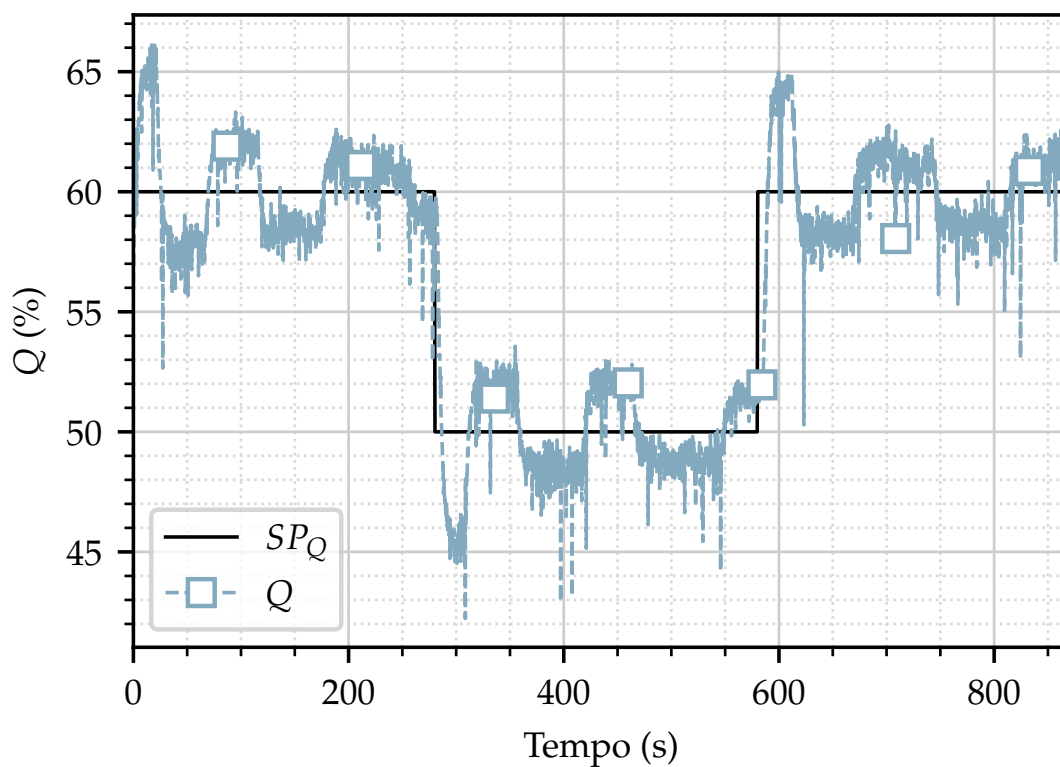


Figura 6.38 – Vazão controle servo sem posicionador.

Fonte: do Autor.

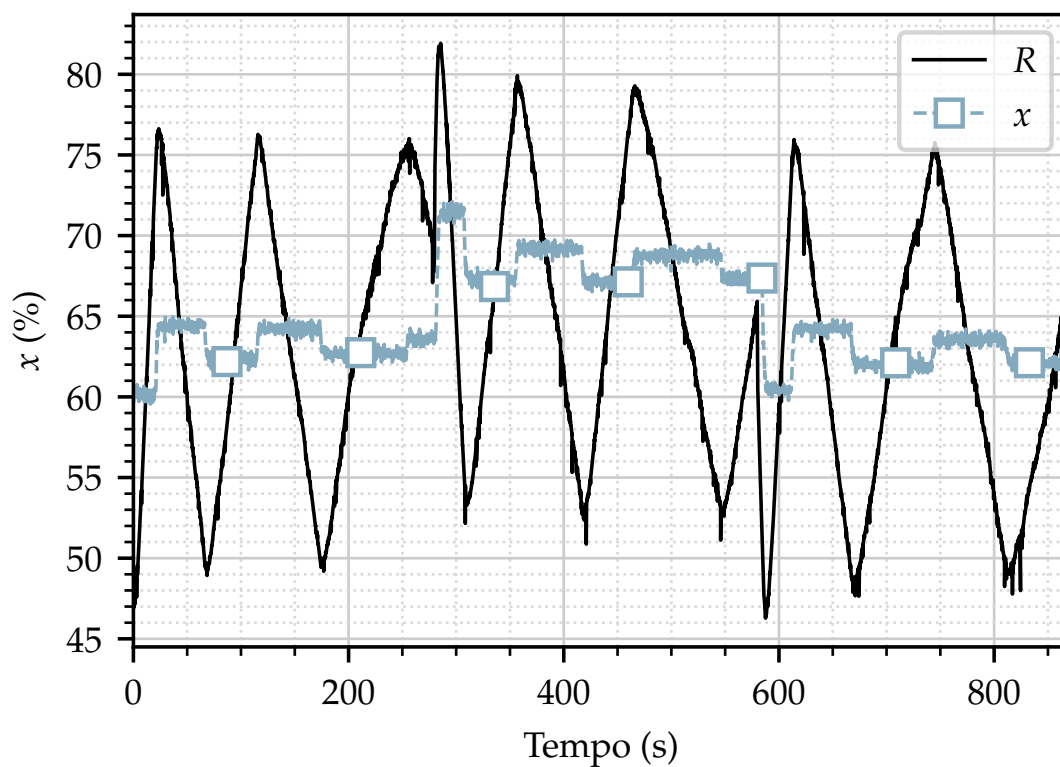


Figura 6.39 – Posição da haste controle servo sem posicionador.

Fonte: do Autor.

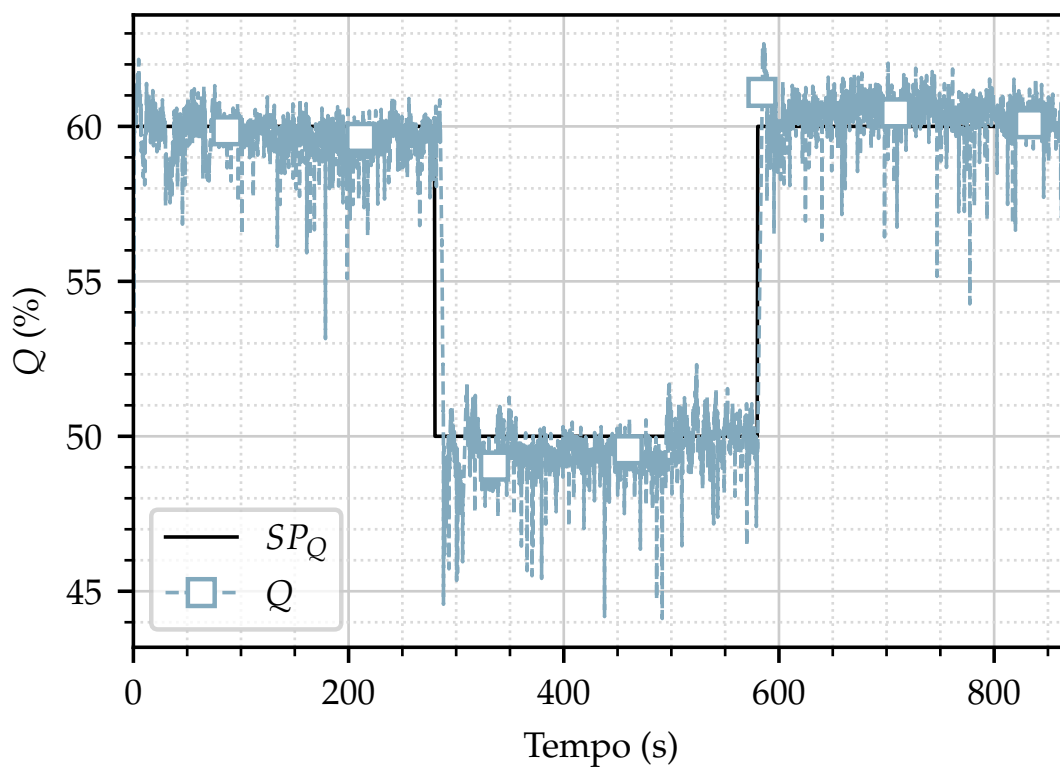


Figura 6.40 – Vazão controle servo CR2.

Fonte: do Autor.

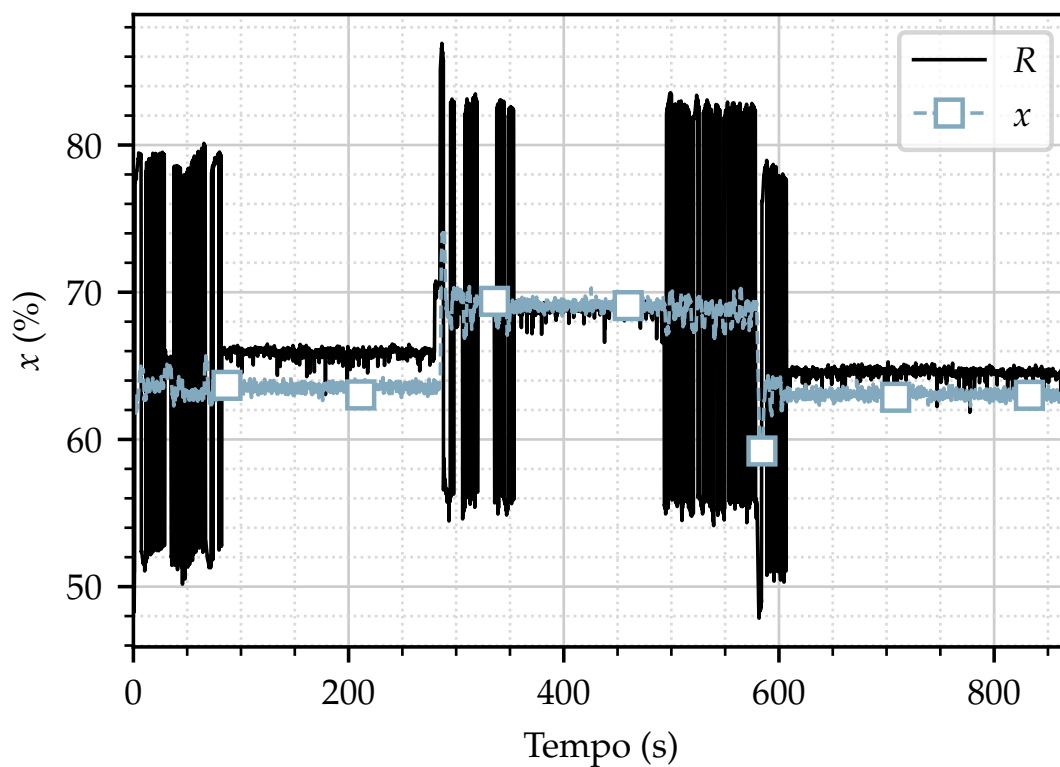


Figura 6.41 – Posição da haste controle servo CR2.

Fonte: do Autor.

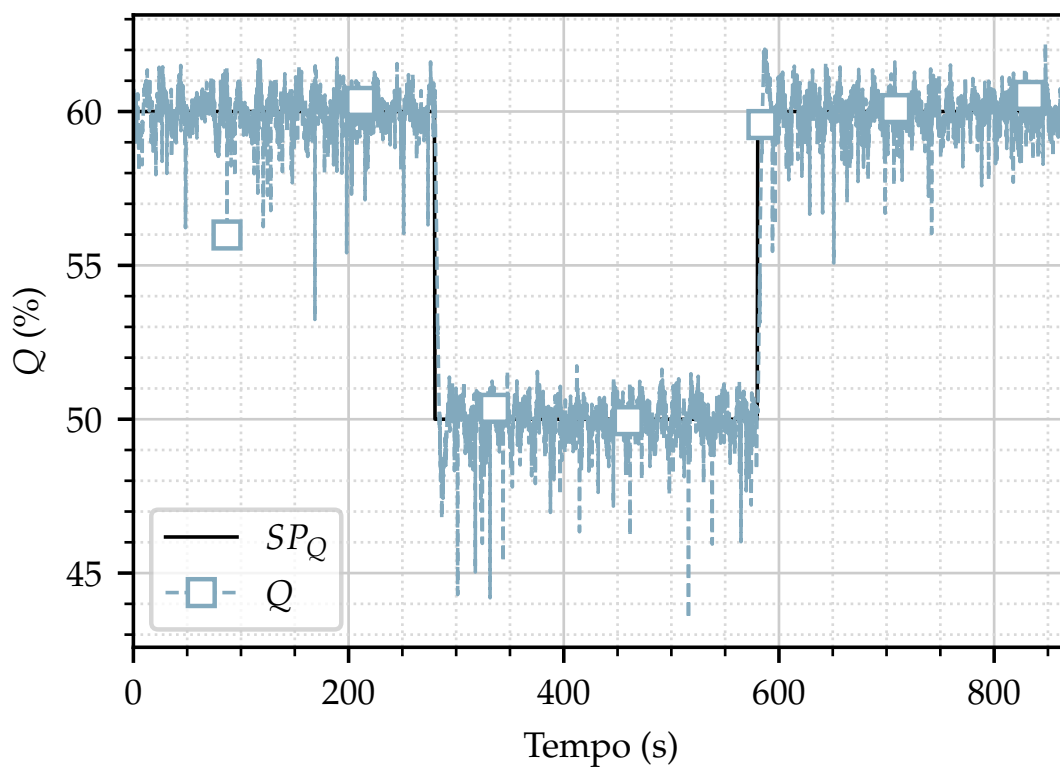


Figura 6.42 – Vazão controle servo Kano.

Fonte: do Autor.

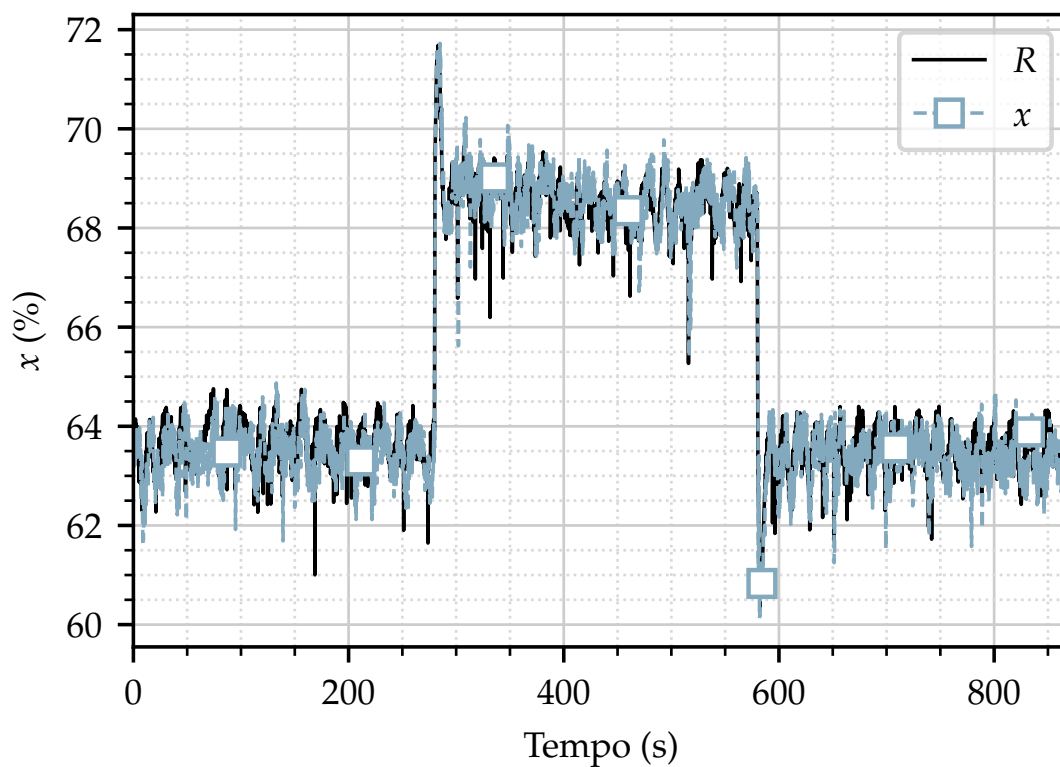


Figura 6.43 – Posição da haste controle servo Kano.

Fonte: do Autor.

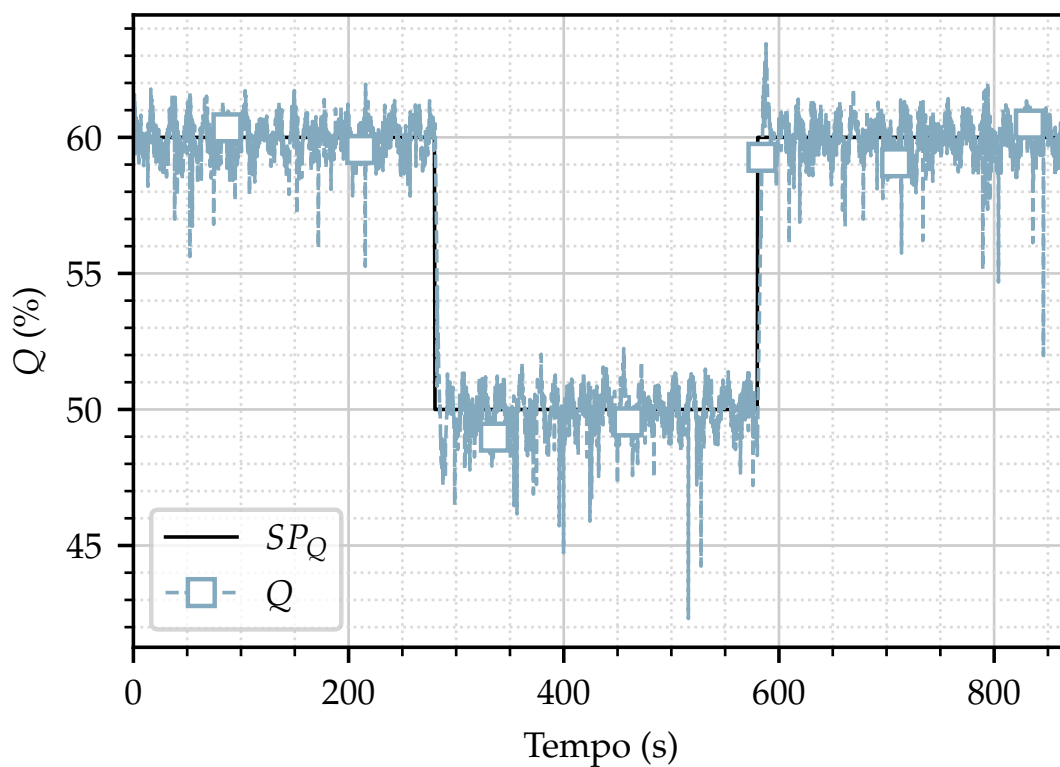


Figura 6.44 – Vazão controle servo He.

Fonte: do Autor.

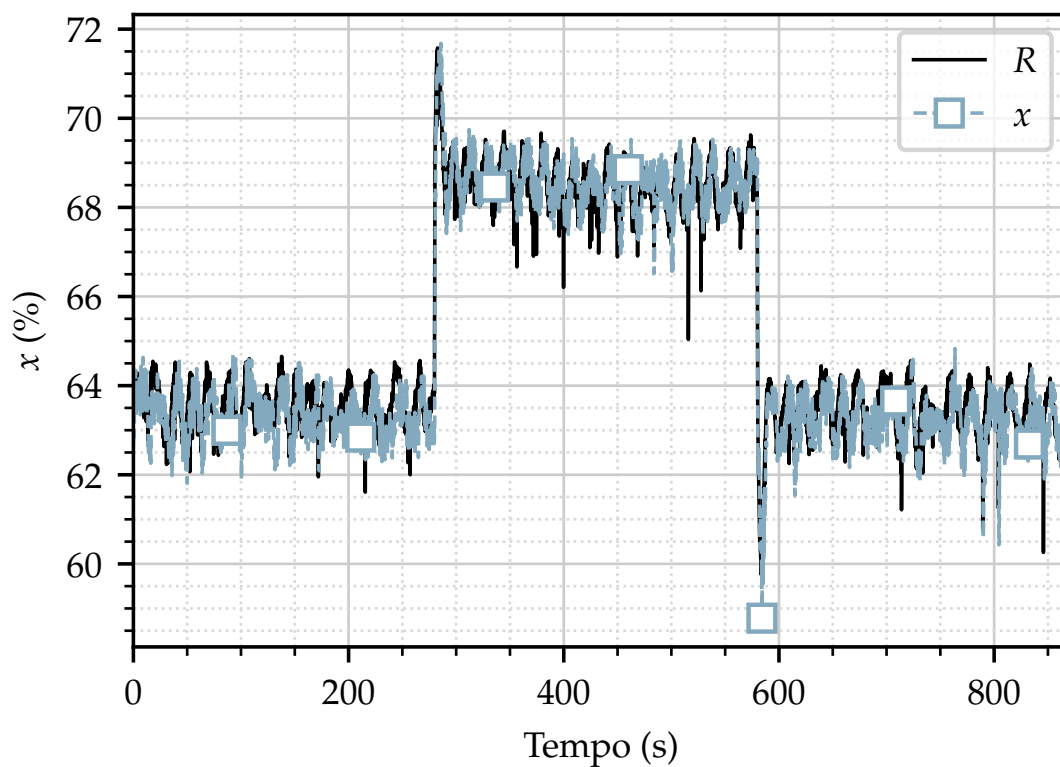


Figura 6.45 – Posição da haste controle servo He.

Fonte: do Autor.

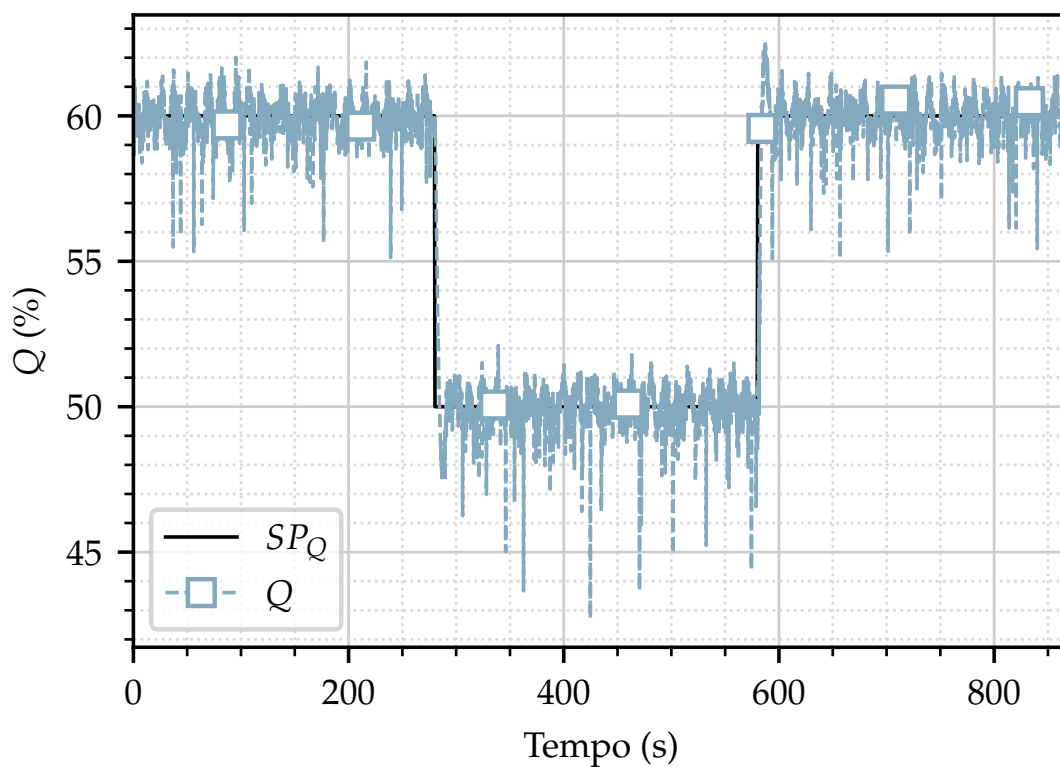


Figura 6.46 – Vazão controle servo Karnopp.

Fonte: do Autor.

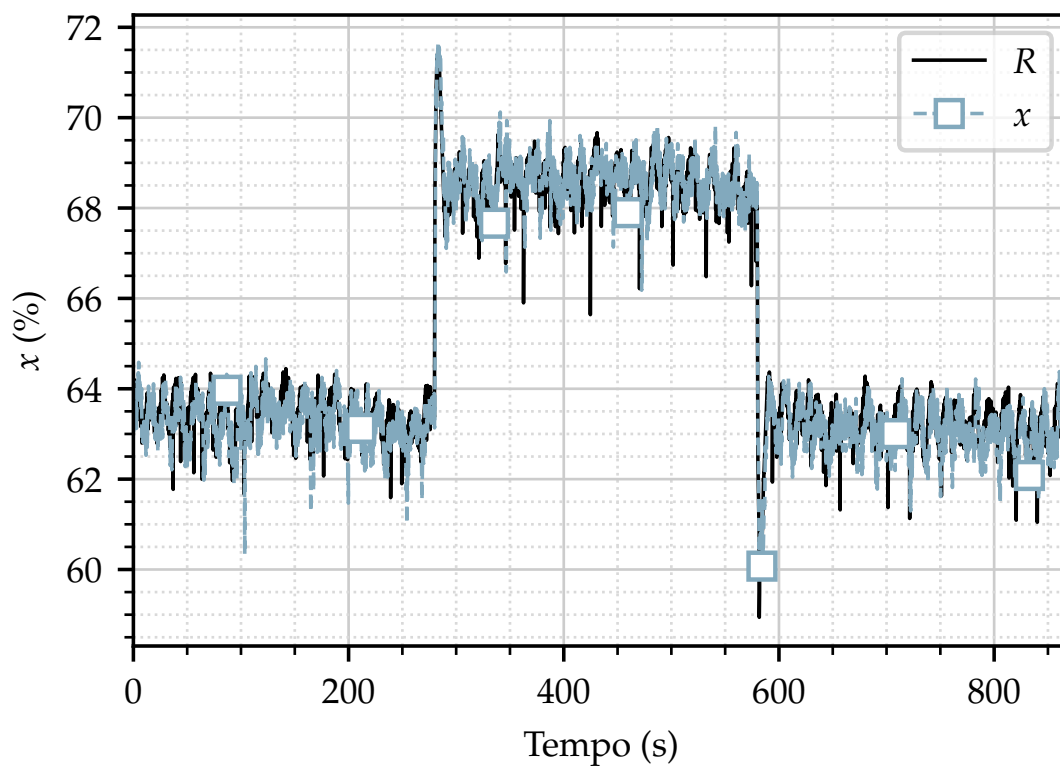


Figura 6.47 – Posição da haste controle servo Karnopp.

Fonte: do Autor.

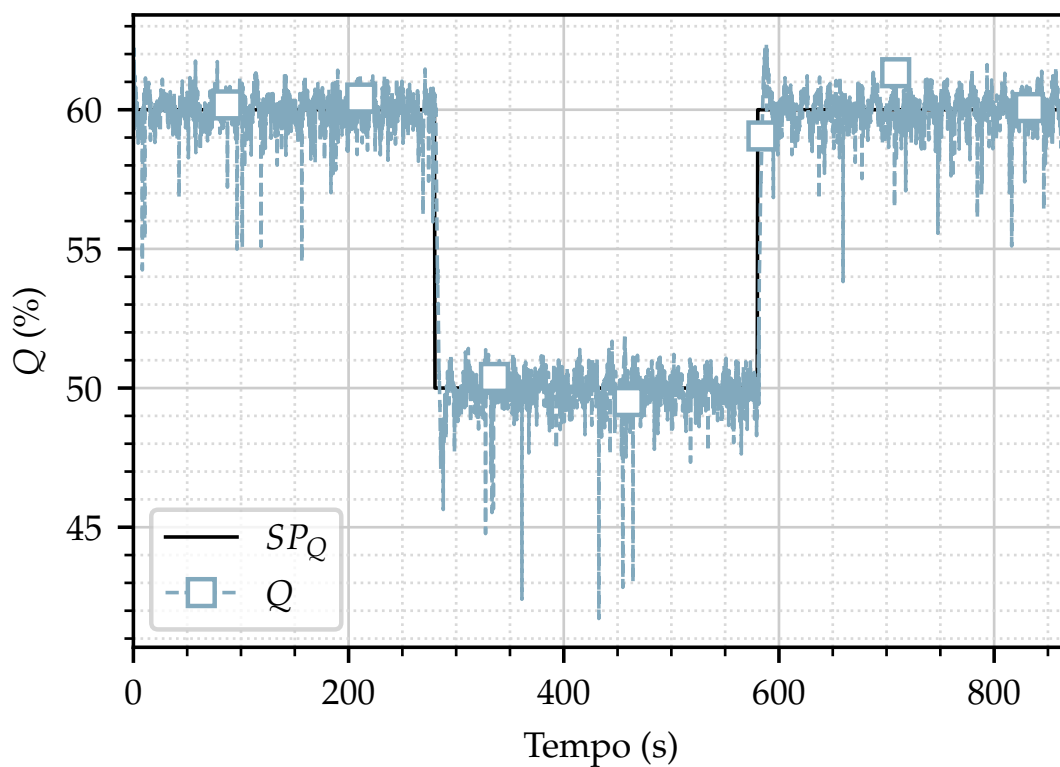


Figura 6.48 – Vazão controle servo GMS.

Fonte: do Autor.

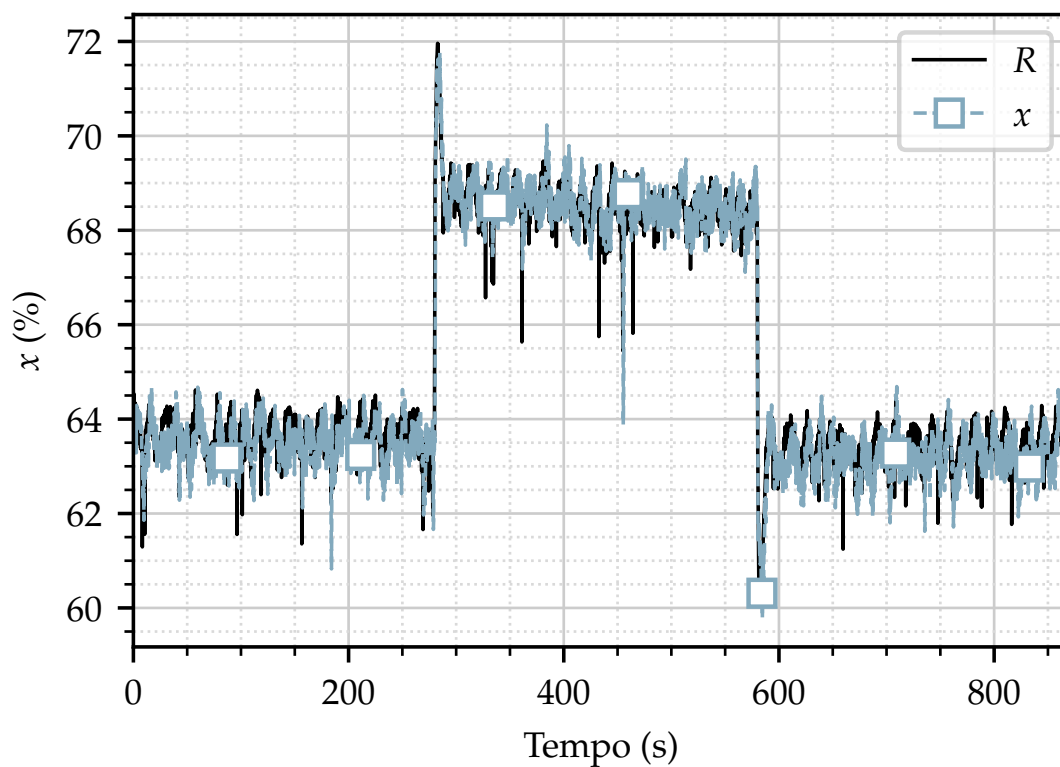


Figura 6.49 – Posição da haste controle servo GMS.

Fonte: do Autor.

Os índices calculados para o experimento do controle de vazão no modo servo, são apresentados na Tabela 6.7, a qual aponta os índices para a vazão e a distância percorrida pela haste da válvula (DIST).

Tabela 6.7 – Índices do controle servo.

	IAE_Q(%)	EQM_Q(%)	REQM_Q(%)	DIST(%)
S_Pos.	14975,93	4,44	2,11	244508174,07
CR2	5753,27	1,49	1,22	217285153,77
Kano	4277,14	0,77	0,88	202608915,82
He	4984,73	0,91	0,95	207779008,37
Karnopp	4329,64	0,78	0,88	213570298,52
GMS	4128,92	0,82	0,90	203958642,11

Fonte: do Autor.

Analisando a integral absoluta do erro (IAE) para a vazão, a configuração com o posicionador digital e sintonizado pelo modelo GMS foi a que apresentou o menor índice entre todas as configurações, enquanto o modelo de He foi o que apresentou o maior índice entre as configurações com o posicionador, da mesma forma como visto anteriormente no experimento de assinatura. Entre as configurações com alguma compensação do atrito a configuração CR2 ficou com o maior valor da integral absoluta do erro (IAE), sendo a integral absoluta do erro 1,39 vezes maior do que a configuração com posicionador sintonizado pelo modelo GMS. A configuração sem compensação do atrito apresentou a integral absoluta do erro na ordem de 3 vezes maior em relação às configurações com compensação.

Na análise do erro quadrático médio (EQM) para o controle de vazão no modo servo, observa-se que o maior erro foi para a configuração sem o posicionador digital, apresentando erro na faixa de 5,7 vezes maior do que para as configurações com compensação de atrito utilizando o posicionador digital. Quando a comparação é realizada entre as configurações com compensação do atrito, a configuração CR2 foi a que apresentou o maior erro, neste caso a configuração CR2 obteve o erro na faixa de 2 vezes maior do que para as configurações que utilizaram o posicionador digital.

Quando se analisa a raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), foi verificado também que a configuração sem o posicionador digital apresentou o maior erro entre todas as configurações. Quando a comparação é realizada entre as configurações com alguma compensação do atrito, a configuração CR2 foi a que apresentou o maior erro, na faixa de 1,35 vezes maior que as configurações que utilizaram o posicionador digital.

Para a análise da distância percorrida pela haste (DIST), última coluna da Tabela 6.7, foi observado que a configuração com posicionador e sintonia pelo modelo de Kano apresentou a menor distância percorrida pela haste, enquanto a maior distância entre

as configurações com compensação ocorreu para a configuração CR2. Diferentemente do experimento de assinatura, onde as menores distâncias ocorreram para a configuração sem o posicionador, quando a malha é fechada a configuração sem o posicionador apresentou as maiores distâncias percorridas pela haste e as configurações com alguma compensação de atrito apresentaram as menores distâncias. A configuração sem posicionador apresentou a maior distância percorrida pela haste, caracterizada pela oscilação da malha de controle, ocasionada pelo alto índice de atrito da válvula de controle, assim como foi observado no modo regulatório.

7 Conclusão

O trabalho apresentou o desenvolvimento de um posicionador digital utilizando o *hardware* FPGA, o qual pode servir de base para diversas pesquisas relacionadas à compensação de atrito em válvulas pneumáticas, pois com o mesmo é possível utilizar altas taxas de amostragem de sinais de campo e processamento em paralelo dos dados. Com os experimentos de assinatura, sinal aleatório e o controle da vazão, foi possível verificar o funcionamento e o desempenho do posicionador para compensar o atrito de uma válvula do tipo mola/diafragma pneumática com alto índice de atrito. Entre os experimentos utilizados no trabalho, foram utilizadas uma configuração sem o posicionador digital, uma com compensação no controlador do processo e uma com o posicionador digital sintonizado por quatro modelos de atrito. Para as configurações que utilizaram o posicionador digital, foi utilizado o controlador PID para controlar a posição da haste, os parâmetros do controlador foram sintonizados de acordo com os dados obtidos através do *framework* de (MARQUES; GARCIA, 2020), sendo utilizados quatro modelos de atrito para verificar as sintonias geradas pelo *framework*.

As configurações com alguma compensação de atrito obtiveram os melhores desempenhos em relação à precisão no controle e na menor variabilidade na movimentação da haste da válvula, em relação à configuração sem compensação do atrito. Foi verificado que para a configuração sem compensação do atrito, a malha apresentou oscilações, sendo verificado pelo maior deslocamento da haste de controle (DIST).

Quando foi analisado o experimento de assinatura, a configuração sem o posicionador digital apresentou um menor deslocamento da haste de controle em relação às configurações com o posicionador, neste caso foi observado que a haste não chegou na posição desejada, característica ocasionada pelo alto índice de atrito da válvula de controle.

As sintonias otimizadas no posicionador digital foram capazes de compensar o atrito da válvula pneumática, como se observou pelos índices de desempenho calculados e os gráficos de assinatura, sinal aleatório e o controle de vazão.

Com os resultados obtidos é possível concluir que o posicionador digital sintonizado utilizando o modelo GMS apresentou os menores índices da integral absoluta do erro, tanto no modo servo quanto no modo regulatório, caracterizando a maior precisão na vazão entre as configurações. O posicionador digital sintonizado utilizando o modelo de Kano, quando se analisou a distância percorrida pela haste, foi o que apresentou as menores distâncias nos dois modos de controle da vazão.

Com os resultados obtidos é possível concluir que o posicionador digital sintonizado utilizando o modelo de Kano é bastante robusto, obtendo índices para o controle da vazão

na mesma faixa do modelo GMS que é mais complexos. Um trabalho futuro pode ser a aplicação do o *framework* de (MARQUES, 2019) dentro do posicionador digital, utilizando o modelo de Kano por sua simplicidade e por ter se mostrado tão bom quanto o modelo GMS que apresentou a melhor precisão.

Por fim, o posicionador digital desenvolvido sintonizado com o *framework* de (MARQUES, 2019) foi capaz de compensar o alto índice de atrito em uma válvula de controle do tipo mola/diafragma, cumprindo os objetivos desejados no início desta dissertação.

Referências Bibliográficas

- CAPACI, R. B. di; SCALI, C. Review and Comparison of Techniques of Analysis of Valve Stiction: From Modeling to Smart Diagnosis. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 130, p. 230–265, 2018.
- CAPACI, R. B. di; SCALI, C.; PANNOCCHIA, G. System identification applied to stiction quantification in industrial control loops: A comparative study. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 46, p. 11–23, 2016.
- CHOUDHURY, M. A. A. S.; JAIN, M.; SHAH, S. L. Detection and Quantification of Valve Stiction. In: *American Control Conference*. Minneapolis, USA: [s.n.], 2006. p. 2097–2106.
- CHOUDHURY, M. A. A. S.; JAIN, M.; SHAH, S. L. Stiction – Definition, Modelling, Detection and Quantification. *Journal of Process Control*, v. 18, n. 3–4, p. 232–243, 2008.
- CHOUDHURY, M. A. A. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L. Modelling Valve Stiction. *Control Engineering Practice*, v. 13, n. 5, p. 641–658, 2005.
- EMERSON. *Fisher 657 and 667 Diaphragm Actuators*. Iowa, USA: Fisher Control International, 2000.
- GAIKWAD, K.; CHAVAN, M. Design and implementation of digital butterworth iir filter using xilinx system generator for noise reduction in ecg signal. *International Journal of Signal Processing*, International Association of Research and Science, v. 2, 2017.
- GARCIA, C. Comparison of Friction Models Applied to a Control Valve. *Control Engineering Practice*, v. 16, n. 10, p. 1231–1243, 2008.
- GARCIA, C. *Controle de processos industriais: estratégias convencionais*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. v. 1.
- HÄGGLUND, T. A friction compensator for pneumatic control valves. *Journal of process control*, Elsevier, v. 12, n. 8, p. 897–904, 2002.
- HÄGGLUND, T. Automatic on-line estimation of backlash in control loops. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 17, n. 6, p. 489–499, 2007.
- HE, Q.; WANG, J. Valve stiction modeling: First-principles vs data-drive approaches. In: IEEE. *Proceedings of the 2010 American control conference*. [S.l.], 2010. p. 3777–3782.
- HE, Q. P. et al. A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 46, n. 13, p. 4549–4560, 2007.
- HIDALGO, M. C.; GARCIA, C. Friction compensation in control valves: Nonlinear control and usual approaches. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 58, p. 42–53, 2017.

- HIDALGO, M. C. et al. Embedded sliding mode controller applied to control valves with high friction. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 30, p. 677–687, 2019.
- ISA. *Norma ISA-51.1-1993 - Process Instrumentation Terminology*. 1993.
- ISA. *Norma ANSI/ISA-75.25.01-2000 - Test Procedures for Control Valve Response Measurement from Steps Inputs*. ISA, Eindhoven, Holanda: [s.n.], 2000.
- JUNG, S.-L. et al. Design and implementation of an fpga-based control ic for ac-voltage regulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 522–532, 1999.
- KANO, M. et al. Practical Model and Detection Algorithm for Valve Stiction. In: *Proceedings of the 7th IFAC DYCOPS*. Boston, USA: IFAC, 2004.
- KARNOFF, D. Computer Simulation of Stick–Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v. 107, n. 1, p. 100–103, 1985.
- MARQUES, F. *Modeling and Automatic Friction Compensation of Pneumatic Diaphragm Valves with Digital Positioners*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.
- MARQUES, F. G.; GARCIA, C. Parameter estimation and performance comparison of friction models for pneumatic valves. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 104, p. 104629, 2020.
- MCNELLES, P.; LU, L. Lab-scale design, demonstration and safety assessment of an fpga-based post accident monitoring system for westinghouse ap1000 nuclear power plants. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS DIGITAL COLLECTION. *2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering*. [S.l.], 2014.
- MONMASSON, E.; CIRSTEA, M. N. Fpga design methodology for industrial control systems—a review. *IEEE transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 54, n. 4, p. 1824–1842, 2007.
- ROMANO, R. A. *Identificação de processos não-lineares e quantificação de atrito em válvulas de controle*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- ROMANO, R. A.; GARCIA, C. Valve friction and nonlinear process model closed-loop identification. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 667–677, 2011.
- SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Stiction compensation in process control loops: A framework for integrating stiction measure and compensation. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 44, n. 24, p. 9164–9174, 2005.
- UEHARA, D. *Detecção e quantificação de atrito em válvulas de controle*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.
- UEHARA, D.; ROMANO, R. A.; GARCIA, C. Comparação e equivalência dos modelos de atrito de kano e karnopp aplicados a válvulas de controle. In: *Anais do 17th Congresso Brasileiro de Automatica*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 14–17.