

CASSIO DE CARVALHO BERNI

**Posicionador digital com capacidade de reduzir a variabilidade gerada
pelo atrito em válvulas de controle**

São Paulo
(2024)

CASSIO DE CARVALHO BERNI

**Posicionador digital com capacidade de reduzir a variabilidade gerada pelo atrito
em válvulas de controle**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que abriga o Programa de Pós-Graduação)

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

Área de Concentração: Engenharia de Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Claudio Garcia

São Paulo
(2024)

Nome: Berni, Cassio de Carvalho

Título: Posicionador digital com capacidade de reduzir a variabilidade gerada pelo atrito em válvulas de controle

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

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

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 alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ____ de _____ de 2024

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Berni, Cassio

Posicionador digital com capacidade de reduzir a variabilidade gerada pelo atrito em válvulas de controle / C. Berni – versão corr. -- São Paulo, 2024.

127 p.

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

1.Posicionador 2.Válvula de controle 3.Compensação de Atrito 4.Redução de variabilidade 5.Predição de falhas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

À Katarina.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Claudio Garcia, que mais uma vez acreditou na ideia de trabalharmos juntos.

À minha família, em especial, Cleo, Rê, Bro e Kata, pelo apoio incondicional de sempre.

À Universidade de São Paulo.

Ao Luiz Corrochano, do Instituto InovaNEX, pelos materiais e infraestrutura de apoio.

A Deus.

Everything should be made as simple as possible,
but no simpler.

(Albert Einstein)

RESUMO

BERNI, Cassio de Carvalho. Posicionador digital com capacidade de reduzir a variabilidade gerada pelo atrito em válvulas de controle. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Uma válvula de controle com posicionador eletropneumático é um elemento essencial nas indústrias de processos, seja qual for o segmento. A quase totalidade das plantas industriais no mundo possuem válvulas dessa natureza, em significativas quantidades. O posicionador é a interface entre o sistema de controle e a válvula de controle em si. Como a válvula é um dispositivo essencialmente mecânico, cabe ao posicionador a função principal de servir como uma malha de controle secundária entre o controlador primário da malha e a válvula de controle; e, como funções secundárias, implementar as conversões de energia do atuador (elétrica para mecânica) e do sensor de posição da haste (mecânica para elétrica). Um dos maiores problemas que afligem a indústria, no que diz respeito às válvulas, é o gradual aumento da variabilidade das malhas de controle em função do atrito crescente, proporcional ao tempo de operação da válvula. Esse é o ponto central deste trabalho: o desenvolvimento de um posicionador digital com capacidade de compensar o atrito da válvula, permitindo um aumento do seu tempo de operação antes de uma manutenção para troca de gaxetas, cujo envelhecimento aumenta o índice de atrito com a haste da válvula; e, como consequência, aumenta a variabilidade na malha de controle em que a válvula está inserida. Além disso, o equipamento pode atuar como preditor de falhas.

Palavras-Chave: Válvula de controle. Posicionador. Compensação de Atrito.

Redução de variabilidade. Predição de falhas.

ABSTRACT

BERNI, Cassio de Carvalho. Digital positioner with the ability to reduce the variability generated by friction in control valves. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A pneumatic control valve with electropneumatic positioner is an essential element in the process industries, whatever the segment. Almost all industrial plants in the world have valves of this nature in significant quantities. The positioner is the interface between the control system and the control valve itself. As the valve is essentially a mechanical device, the positioner has the main function of serving as a secondary control loop between the primary loop controller and the control valve; and, as secondary functions, implementing the energy conversions of the actuator (electrical to mechanical) and the stem position sensor (mechanical to electrical). One of the biggest problems that afflicts the industry, with regard to valves, is the gradual increase in control loop variability due to increasing friction, proportional to valve operating time. This is the central point of this work: to develop a digital positioner that has the capacity to compensate the friction of the valve, allowing an increase in its operating time before a maintenance to change the gaskets, whose aging increases the friction index with the valve stem. As a consequence, it increases the variability in the control loop into which the valve is inserted. In addition, the equipment may act as a failure predictor.

Keywords: Control valve. Positioner. Friction compensation. Variability reduction. Failure prediction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	- Diagrama P&ID da Planta Piloto de Vazão do LCPI	13
Figura 2.2	- Diagrama P&ID do entorno da válvula FV-11	14
Figura 2.3	- Conjunto da válvula FV-11 e instrumentação associada – LCPI	15
Figura 2.4	- Estrutura básica de uma válvula de controle	15
Figura 2.5	- Corte de uma válvula de controle pneumática do tipo globo .	16
Figura 2.6	- Curva de assinatura típica de válvula com agarramento	16
Figura 3.1	- Conceito de Posicionador junto à válvula	17
Figura 3.2	- Posicionador Pneumático	18
Figura 3.3	- Posicionador Eletropneumático	18
Figura 3.4	- Posicionador Digital	19
Figura 3.5	- Posicionadores digitais FY300 e FY500	19
Figura 3.6	- Posicionador Digital Fisher® (Emerson™) DVC6010	20
Figura 3.7	- Diagrama interno do posicionador DVC6000F	21
Figura 3.8	- Diagrama interno do posicionador FY302	22
Figura 3.9	- Diagrama interno do posicionador FY500	22
Figura 3.10	- Exemplo de Posicionador típico de mercado	23
Figura 3.11	- Exemplo de instalação de um posicionador em campo	23
Figura 4.1	- Diagrama de blocos do sistema proposto	24
Figura 4.2	- Setor de inserção do posicionador na Planta Piloto de Vazão	25
Figura 4.3	- Controle de vazão sem posicionador	26
Figura 4.4	- Controle de vazão pelo ambiente Simulink®, sem posicionador	26
Figura 4.5	- Controle de vazão com posicionador	27
Figura 4.6	- Algoritmo ISMC embarcado (HIDALGO et al., 2019)	28
Figura 4.7	- Diagrama de ensaios em malha aberta	30
Figura 4.8	- Curva de reação – conjunto Atuador V/I/P + Válvula FV-11 .	31
Figura 4.9	- Set point para obtenção dos parâmetros S e J da Válvula FV-11	32
Figura 4.10	- Excitação em malha aberta - Válvula FV-11 – Obtenção de S e J	33

Figura 4.11	- Curva de assinatura da válvula FV-11	33
Figura 5.1	- Malha com compensador CR2 inserido	35
Figura 5.2	- Fluxograma do Algoritmo CR2	37
Figura 5.3	- Diagrama de interligações - Compensador CR2	38
Figura 5.4	- Controle com algoritmo PID + CR2 em cascata	38
Figura 5.5	- Diagrama de interligações – posicionador + compensador CR2 em cascata	39
Figura 5.6	- Malha com compensador ISMC inserido	40
Figura 5.7	- Diagrama de interligações - Compensador ISMC	47
Figura 6.1	- Placa de aquisição PCI-6229	48
Figura 6.2	- Diagrama Simulink® - teste da planta em malha aberta.	50
Figura 6.3	- Diagrama Simulink® - Malha externa com controlador PI (sem posicionador)	51
Figura 6.4	- Diagrama de blocos - Malha externa com controlador PI (sem posicionador)	51
Figura 6.5	- Interfaces – PCI-6229 + Planta de Vazão + Posicionador PD-CCB-01	52
Figura 6.6	- Interligações da placa Relés com a PCI-6229 + Planta de Vazão + Posicionador PD-CCB-01	54
Figura 6.7	- Visão do <i>rack</i> com as borneiras da PCI-6229	55
Figura 6.8	- Detalhe das borneiras da PCI-6229	55
Figura 6.9	- Conjunto das borneiras da PCI-6229 + Placa de Relés	56
Figura 6.10	- Diagrama Simulink® - Posicionador com controlador PID	58
Figura 6.11	- Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente - posicionador PID	61
Figura 6.12	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador PID	61
Figura 6.13	- Diagrama Simulink® - Compensador com algoritmo CR2	62
Figura 6.14	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Compensador CR2	64
Figura 6.15	- Diagrama Simulink® - Posicionador PID + Compensador CR2 em cascata	65

Figura 6.16	-	Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PID + CR2	66
Figura 6.17	-	Diagrama Simulink® - Posicionador com algoritmo ISMC . . .	67
Figura 6.18	-	Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente - posicionador ISMC	70
Figura 6.19	-	Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador ISMC	70
Figura 6.20	-	Diagrama Simulink® - Posicionador ISMC + Compensador CR2 em cascata	71
Figura 6.21	-	Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – ISMC + CR2	72
Figura 7.1	-	Diagrama de blocos - <i>hardware</i> do posicionador	74
Figura 7.2	-	Esquema Eletrônico das interfaces analógicas	77
Figura 7.3	-	Esquema Eletrônico da giga de testes	77
Figura 7.4	-	Placa da <i>cpu</i> microcontrolada STM32H753	78
Figura 7.5	-	Protótipo do posicionador PD-CCB-01	79
Figura 7.6	-	Protótipo do conjunto PD-CCB-01 + Giga de testes (à direita)	79
Figura 7.7	-	Fluxogramas – <i>Firmware</i> do posicionador PD-CCB-01	82
Figura 7.8	-	Diagrama Simulink® - Validação do posicionador <i>embedded</i> com algoritmo PID	83
Figura 7.9	-	Diagrama de Blocos – Interfaces dos posicionadores não embarcado e PD-CCB-01 – PID e ISMC	84
Figura 7.10	-	Diagrama Simulink® - Compensador <i>embedded</i> com algoritmo CR2	85
Figura 7.11	-	Diagrama de Blocos – Interfaces dos posicionadores não embarcado e PD-CCB-01 – CR2	86
Figura 7.12	-	Diagrama Simulink® - Posicionador <i>embedded</i> com algoritmo PID ou ISMC + CR2 em cascata	87
Figura 7.13	-	Diagrama de Blocos – Interfaces dos posicionadores não embarcado e PD-CCB-01 – PID ou ISMC + CR2 em cascata	87
Figura 7.14	-	Ruído de saída do ISMC - Posicionador PD-CCB-01 (detalhe na imagem inferior)	88
Figura 7.15	-	Teste de estabilidade – ISMC em Matlab®	89

Figura 7.16	- Reprodução de saída com ruído – ISMC em Matlab®	89
Figura 7.17	- Validação de ISMC em Matlab® sem perturbações	90
Figura 7.18	- Validação de ISMC no PD-CCB-01 sem perturbações	90
Figura 7.19	- ISMC no PD-CCB-01 com filtro <i>LPF</i> de saída	91
Figura 7.20	- Posicionador PD-CCB-01 instalado no <i>rack</i> da Planta de Vazão	92
Figura 7.21	- Destaque - Posicionador PD-CCB-01 instalado no <i>rack</i> da Planta de Vazão	93
Figura 8.1	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PI sem Posicionador	94
Figura 8.2	- Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente - PID embarcado	95
Figura 8.3	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PID embarcado	96
Figura 8.4	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – CR2 embarcado	97
Figura 8.5	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PID + CR2 embarcado	98
Figura 8.6	- Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente - ISMC embarcado	99
Figura 8.7	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – ISMC embarcado	99
Figura 8.8	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – ISMC + CR2 embarcado	100
Figura 8.9	- Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente – Posicionador Eletropneumático comercial	101
Figura 8.10	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador eletropneumático comercial	102
Figura 8.11	- Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador eletropneumático comercial + CR2	102

Figura 8.12	-	Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente – Posicionador Digital <i>Foundation Fieldbus</i> ® comercial	103
Figura 8.13	-	Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador Digital <i>Foundation Fieldbus</i> ® comercial	104
Figura 8.14	-	Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador Digital <i>Foundation Fieldbus</i> ® comercial + CR2	104
Figura 8.15	-	Curvas de ensaios em modo Servo – PI e compensadores em Matlab®	106
Figura 8.16	-	Curvas de ensaios em modo Regulatório – PI e compensadores em Matlab®	106
Figura 8.17	-	Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – PI e compensadores em Matlab®	107
Figura 8.18	-	Curvas de ensaios em modo Servo – CR2 Matlab® x CR2 embarcado	109
Figura 8.19	-	Curvas de ensaios em modo Servo – PID Matlab® x PID embarcado	109
Figura 8.20	-	Curvas de ensaios em modo Servo – ISMC Matlab® x ISMC embarcado	110
Figura 8.21	-	Curvas de ensaios em modo Servo – PI x Compensadores embarcados	110
Figura 8.22	-	Curvas de ensaios em modo Regulatório – PI x Compensadores embarcados	111
Figura 8.23	-	Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – PI x Compensadores embarcados	111
Figura 8.24	-	Curvas de ensaios em modo Servo – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais	113
Figura 8.25	-	Curvas de ensaios em modo Regulatório – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais	113
Figura 8.26	-	Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais	114

Figura 8.27	-	Curvas de ensaios em modo Servo – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais – com CR2 em cascata	114
Figura 8.28	-	Curvas de ensaios em modo Regulatório – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais – com CR2 em cascata	115
Figura 8.29	-	Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais – com CR2 em cascata	115
Figura 8.30	-	Curvas de ensaios em modo Servo – Malha de posição – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais .	117
Figura 8.31	-	Curvas de ensaios em modo Regulatório/Regime Permanente – Malha de posição – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	- Parametrização da discretização do controlador ISMC em função de T_s	45
Tabela 6.1	- Mapa de chaves da placa Relés para aplicações distintas . . .	54
Tabela 6.2	- Microcontroladores possíveis candidatos à <i>CPU</i> do posicionador	73
Tabela 7.1	- Sinais analógicos (0 a +10 Vdc) necessários para cada algoritmo	75
Tabela 8.1	- PI sem posicionador e posicionadores em Matlab®	105
Tabela 8.2	- Posicionadores em Matlab® x Equivalentes embarcados	107
Tabela 8.3	- Posicionadores embarcados x FF x Eletropneumático	112
Tabela 8.4	- Posicionadores x FF x Eletropneumático – Apenas malha de posição	116

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analog to Digital conversion
CF	Control Freezing
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Central Processing Unit
CR2	Constant Reinforcement 2
DAQ	Data Acquisition
D/A	Digital to Analog conversion
FISMC	Fractional Integrative Sliding Mode Controller
FPGA	Field Programmable Gate Array
HIL	Hardware In the Loop
ISE	Integrated Squared Error
ISMC	Integrative Sliding Mode Controller
ITAE	Integrated Time-weighted Absolute Error
KPI	Key Performance Indicator
LCD	Liquid Crystal Display
LCPI	Laboratório de Controle de Processos Industriais
LPF	Low Pass Filter
LQR	Linear Quadratic Regulator
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MCU	Microcontroller Unit
NPIC	Non Linear Proportional Integral Controller
PC	Personal Computer
PID	Proporcional Integral Derivativo
PI&D	Piping and Instrumentation Diagram
RM	Reference Model
RMSMC	Reference Model Sliding Mode Controller
RTOS	Real Time Operating System
SCIC	Stiction Combating Intelligent Controller
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SIMC	Simple Internal Model Control
SMC	Sliding Mode Controller

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Justificativas	1
1.3	Metodologia	4
1.4	Revisão bibliográfica	5
1.5	Estrutura do texto	10
2	A Planta Piloto de Vazão do LCPI	13
2.1	Descrição básica	13
2.2	Setores de interesse para o projeto	14
2.3	Válvula de controle – visão básica	15
3	Posicionadores para válvulas de controle de processos	17
3.1	Conceito	17
3.2	Características básicas	20
3.3	Evolução	22
4	Proposta de projeto	24
4.1	Visão sistêmica	24
4.2	Diagrama de blocos – visão da planta com o posicionador inserido	25
4.3	Características principais do projeto.	27
4.4	Índices de desempenho	29
4.5	Ensaio de modelagem da válvula e de sintonia do PID	30
5	Algoritmos de compensação de atrito na válvula	35
5.1	Algoritmo CR2 – <i>Constant Reinforcement 2</i>	35
5.2	Algoritmo ISMC – <i>Integrative Sliding Mode Controller</i>	39
5.2.1	Descrição	39
5.2.2	Projeto do controlador ISMC	42
6	Estrutura de <i>hardware & firmware</i> para a implementação do posicionador digital	48

6.1	Placa de aquisição de dados NI PCI-6229 - descrição geral	48
6.2	Sistema supervisor – ambiente Matlab/Simulink®	49
6.3	Visão global – Planta Piloto de Vazão + PCI6229 + Posicionador .	52
6.4	Algoritmos de controle – projeto e validação em ambiente Matlab/Simulink®	56
6.4.1	PID	57
6.4.2	CR2	62
6.4.3	PID + CR2 em cascata	65
6.4.4	ISMC	66
6.4.5	ISMC + CR2 em cascata	71
6.5	Escolha da ferramenta embarcada de <i>hardware & firmware</i> – critérios	72
7	Projeto detalhado do <i>hardware & firmware</i>	74
7.1	Descrição geral e diagrama em blocos do sistema	74
7.2	Projeto do <i>hardware</i>	76
7.2.1	Interfaces analógicas	76
7.2.2	Interfaces digitais	78
7.3	Projeto do <i>firmware</i>	79
7.3.1	Arquitetura e fluxograma principal de tarefas	81
7.4	Posicionador embarcado inserido na Planta Piloto de Vazão do LCPI	83
7.4.1	PID	83
7.4.2	CR2	84
7.4.3	PID + CR2 em cascata	86
7.4.4	ISMC	88
7.4.5	ISMC + CR2 em cascata	91
8	Resultados	94
8.1	Malha externa de controle de vazão com controlador PI, sem posicionador	94
8.2	Posicionador embarcado – PID	95
8.3	Compensador embarcado – CR2	96
8.4	Posicionador embarcado – PID + CR2 em cascata	97
8.5	Posicionador embarcado – ISMC	98

8.6	Posicionador embarcado – ISMC + CR2 em cascata	100
8.7	Posicionador comercial eletropneumático Fisher® (Emerson™) . .	100
8.8	Posicionador comercial digital Fisher® (Emerson™) DVC6010F .	103
8.9	Comparação entre os posicionadores	105
9	Considerações finais	118
9.1	Conclusões	118
9.2	Propostas de trabalhos futuros	119
10	Referências bibliográficas	121
11	Apêndice A – Scripts de cálculo dos índices de desempenho	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Desenvolvimento de um *hardware* programável, capaz de desempenhar o papel de um posicionador digital para uma válvula de controle industrial. Esse posicionador possui em seu *firmware* algoritmos de compensação de atrito na válvula, cuja função é reduzir a variabilidade da malha de controle na qual o posicionador é inserido.

1.2 Justificativas

As pesquisas conduzidas no LCPI – Laboratório de Controle de Processos Industriais da Escola Politécnica da USP - pelo Prof. Dr. Claudio Garcia, a respeito de algoritmos de compensação do atrito em válvulas de controle, já duram mais de quinze anos. Diversos trabalhos (como teses, dissertações, iniciações científicas, artigos etc.) foram produzidos com base nesse assunto. Em cada um deles houve uma abordagem específica, visando obter um conhecimento consolidado sobre essa tecnologia fundamental para a indústria em geral.

Em muitos casos, é possível integrar esse conhecimento em forma de *software* diretamente no sistema de controle (SDCD ou CLP). Entretanto, questões como taxa de execução dos algoritmos, tempo de resposta do controlador, disponibilidade de medição da posição da haste etc., passam a exigir uma dinâmica otimizada, não alcançada pelo acúmulo de funções de um sistema único central.

Assim, para uma aplicabilidade mais direta na Indústria, é necessário agregar e adaptar o núcleo desse conhecimento para um ambiente de *hardware*, que possa vir a se tornar um equipamento com a solução eletrônica embarcada, programável, customizável. Esse é o objetivo central deste trabalho.

Historicamente, o início dos sistemas de posicionamento de válvulas se deu com o uso de conversores I/P (corrente para pressão), em malha externa, ou seja, sem um controle de posição propriamente dito. A 2ª geração introduziu o controle eletropneumático, que se caracterizava por um controle proporcional já em malha interna (*set point* de posição). Depois surgiram os posicionadores digitais, que se caracterizam como controladores de posição com recursos mais sofisticados, como algoritmo PID, sintonia automática por levantamento dinâmico da assinatura da válvula, e, além de outras funções, algoritmos de compensação de atrito.

A compensação de atrito surge como um dos principais elementos de redução da variabilidade da malha de controle, que se caracteriza pelas oscilações da variável controlada ([GARCIA, 2017](#)). Dentre diversas formas de se quantificar a variabilidade de um processo, uma muito usada consiste em duplicar o desvio padrão do erro e dividi-lo pela média da saída:

$$var = \frac{2\sigma}{\mu} \cdot 100 \% \quad (1.1)$$

Algumas das causas da geração de variabilidade da malha de controle são: controladores mal sintonizados, válvulas com atrito excessivo, não linearidades, ruídos de medição, alterações em matérias primas do processo, entre outras.

Notadamente ([GARCIA, 2019](#)), uma das soluções mais usadas na indústria em geral para a redução de variabilidade de malha é a instalação de posicionadores como elementos de controle de malha interna de posição junto às válvulas, principalmente para mitigar ou atenuar os efeitos do crescente atrito com o tempo de operação. E essa aplicação se torna a maior contribuição de um posicionador para a válvula de controle, contendo algoritmos internos de compensação de atrito. A escala de uso é muito alta devido à disseminação e necessidade de válvulas em praticamente qualquer processo industrial. Cita-se ainda o relativo baixo custo do posicionador, quando comparado ao próprio conjunto mecânico + elétrico + pneumático da válvula em si e seus elementos periféricos (instrumentação etc.). Esse custo acaba sendo praticamente eliminado quando se considera o fato de se obter, como resultado adicional, um aumento no intervalo de tempo entre paradas da planta para manutenção das válvulas, parada essa extremamente custosa, por razões óbvias; e, vale a menção de mais um resultado a mais: o aumento de desempenho da malha de controle.

No intuito de se obter dados reais mais atuais, foram feitos contatos com grandes indústrias dos setores Petroquímico e Óleo & Gás, a fim de se quantificar com mais clareza informações como:

- Custo de parada de uma planta;
- Número de válvulas envolvidas;
- Intervalo de parada típico para manutenção (em anos);
- Estatística de falhas em válvulas (falha repentina: ar comprimido; falha progressiva: atrito entre haste e gaxeta), e de variabilidade de malhas;
- O que está sendo usado atualmente em termos de posicionadores e compensadores de atrito?

Os dados obtidos da Petrobras ([PEREZ, 2023](#)), por exemplo, foram:

- Qual o custo estimado de parada da planta para manutenção das válvulas (seja para as paradas programadas e/ou de emergência)? Depende muito da unidade considerada. Unidades como FCC (unidade de craqueamento catalítico fluido) têm um valor agregado muito grande. Outras como o HDT (Unidade de Hidrotratamento de Diesel) têm uma importância que pode afetar toda a refinaria. Tamanha a importância desse tipo de planta, que é extremamente difícil até para a própria Petrobras quantificar o custo de parada dessas unidades.
- Qual o intervalo de parada típico para manutenção (no caso, programada, não de emergência)? De três a cinco anos, pois depende da unidade. Uma unidade de destilação, 5 anos. Uma HDT, 3 ou 4 anos, dependendo da severidade.
- Quanto tempo em média a planta fica parada nesse caso? De uma semana a um mês, dependendo da unidade e do serviço a ser programado.
- Qual o número de válvulas envolvidas? Depende muito da programação.
- Há uma estatística de falhas em válvulas (Ex.: falha repentina: ar comprimido; falha progressiva: atrito entre haste e gaxeta), e de variabilidade de malhas? Segundo [PEREZ \(2023\)](#), não há essa estatística. Mas indica-se que possivelmente a equipe de manutenção tenha esse controle.
- O que a Petrobras está usando atualmente em termos de posicionadores e compensadores de atrito de válvula? Posicionadores inteligentes e sem compensadores de atrito.

Um resultado de referência para o posicionador digital desenvolvido está ilustrado em [GARCIA \(2019\)](#), onde pode-se verificar uma comparação do índice de variabilidade da malha de controle de vazão, para os casos de uso de conversor I/P apenas, e de um posicionador digital da Fisher® (Emerson™) DVC6010F na malha interna de posição. Em média, e considerando-se exclusivamente a parametrização da malha de vazão daquele ensaio, o uso do posicionador digital DVC6010F reduziu em 08 vezes a variabilidade da malha. Esse índice de redução de variabilidade é mais uma meta a ser buscada com o trabalho em questão.

Ressalta-se ainda que o posicionador digital programável pode conter algoritmos de predição de falhas, tecnologia muito pesquisada na atualidade.

Destacam-se como contribuições inéditas dessa tese:

- Construção do núcleo de um posicionador digital, programável, baseado em hardware mínimo, microcontrolado, de baixo custo;

- Implementação embarcada de algoritmo não linear de compensação de atrito, no caso, o ISMC, em curto intervalo de tempo (da ordem de 10 us), o que permite ao sistema desenvolvido a capacidade de processamento de algoritmos tão ou mais complexos que o ISMC;
- Conceito da compensação de atrito em cascata, ou seja, o uso de dupla compensação, uma na malha externa, e outra no posicionador.

1.3 Metodologia

Inicialmente, foram conduzidos estudos sobre as publicações (teses, dissertações etc.) do LCPI sobre o assunto. O intuito foi o de separar os tópicos principais / essenciais para um posicionador de válvulas de controle. São os seguintes:

- Medição da posição da haste (elemento sensor);
- Unidade microcontrolada (*CPU*);
- *Firmware* contendo o controlador da malha interna e algoritmos de compensação de atrito; e
- Elemento atuador.

Foi realizado um estudo, na linha do tempo, dos diversos trabalhos publicados no âmbito das técnicas de compensação de atrito, pelos alunos orientados pelo Prof. Dr. Claudio Garcia.

A partir daí, chegou-se a dois algoritmos principais de compensação de atrito, que foram adaptados para uso em um sistema embarcado. A escolha desses dois algoritmos se deveu aos resultados observados nos trabalhos publicados, além de restringir-se o escopo a uma finalidade aplicável na Engenharia Industrial. A adaptação para o sistema embarcado envolve diversas frentes, como:

- Aquisição de medidas de sensores;
- Taxa de execução (controlador + algoritmos de compensação de atrito);
- Interface com o sistema supervisor; e
- Alimentação elétrica.

Nos testes do posicionador desenvolvido, batizado de PD-CCB-01, foi usada a Planta Piloto de Vazão do LCPI e, como *hardware* base, uma placa de desenvolvimento microcontrolado baseada na MCU STM32®. Um microcomputador com Matlab® serviu como ambiente de controle e supervisão, através de uma placa de aquisição de sinais, modelo PCI-6229, da National Instruments™. Foi necessária ainda a inserção de uma adaptação elétrica entre a placa de aquisição e a Planta Piloto, para permitir a conexão do

hardware embarcado, sem interferir no uso normal da Planta pelos demais pesquisadores.

1.4 Revisão bibliográfica

[OLSSON et al. \(1998\)](#) apresentaram a conceituação teórica e a modelagem dos tipos de atrito de forma geral, não especificamente em válvulas de controle. Os autores também exploraram algoritmos de compensação de atrito, baseados nos modelos dinâmicos de LuGre (autoria própria) e Bliman-Sorine ([BLIMAN; SORINE, 1993](#)).

Um dos primeiros estudos de compensadores de atrito em válvulas de controle foi feito em [KAYIHAN e DOYLE III \(2000\)](#), em que controladores não lineares atuavam como posicionadores, mas apenas para válvulas modeladas, não reais.

Já [HÄGGLUND \(2002\)](#) apresentou uma técnica de inserção de pulsos (*dithering*) na lei de controle, como um método de compensação de atrito estático (*stiction*) em válvulas pneumáticas. A técnica passou a ser conhecida como *Knocker*.

[NING e BONE \(2002\)](#) propuseram um servo sistema de posicionamento pneumático com controlador PVA – *Proporcional – Velocity – Acceleration* – e um algoritmo de compensação de atrito em paralelo, que mede o esforço de controle do PVA, além do erro de posição. Eles aplicaram o sistema em uma válvula da Festo™. Assim como a grande maioria das pesquisas que não são apenas simuladas em computador, mas aplicadas em plantas físicas (didáticas ou não), os autores se utilizaram de um microcomputador + placa de aquisição de dados – DAQ, usualmente da National Instruments™.

[KANO et al. \(2004\)](#) desenvolveram um algoritmo de modelagem e estimação da posição da válvula a partir do esforço de controle aplicado. Para tal, dois parâmetros de assinatura da válvula são necessários: J , que é a porcentagem adicional de esforço de controle para tirar a haste da válvula da inércia, uma vez parada; e S , porcentagem adicional de esforço de controle para mover a haste da válvula na direção oposta à do movimento atual.

Ainda que não se utilize diretamente neste trabalho a pesquisa dos autores acima mencionados, os mesmos são referência essencial no assunto.

[GARCIA \(2007\)](#) apresentou uma técnica para estimação dos parâmetros do modelo de atrito de válvulas de controle, através da excitação do atuador com um sinal triangular, e medindo-se a posição da haste da válvula e a pressão do atuador.

[MOHAMMAD e HUANG \(2011\)](#) avaliaram um método *data-driven* (procura usar o mínimo de parâmetros físicos da válvula) de predição de oscilações em malhas *multi loop*, oscilações essas devidas ao atrito nas válvulas de controle.

[MOHAMMAD e HUANG \(2012\)](#) propuseram uma tentativa de compensação de atrito da válvula através de relativa piora na sintonia de um controlador PI da malha externa. Ou seja, não utiliza controle de posição em si (malha interna). Nesse sentido, é importante ressaltar que neste trabalho também foi realizado o ensaio de desempenho da malha externa de vazão com controlador PI, sem posicionador ou qualquer compensador na malha interna de posição. O intuito desse ensaio foi apenas obter os dados de referência da malha de vazão, antes da inserção de qualquer elemento na malha de posição. Os resultados desse ensaio não servem para efeito de comparação entre os diversos algoritmos de compensação de atrito estudados. Pode-se dizer que boa parte, se não a maioria das pesquisas no mundo na linha de compensação de atrito em válvulas de controle, são baseadas em controladores na malha externa.

Em [SILVA \(2013\)](#), o autor avaliou a eficiência de compensadores de atrito aplicados a válvulas. É desse trabalho a base do compensador CR2 (*Constant Reinforcement 2*) usado aqui, pois, segundo o autor, de todos os compensadores avaliados, o CR2 exibiu o melhor desempenho médio. Os testes foram na Planta Piloto de Vazão do LCPI.

Em [BAEZA \(2013\)](#) foram estudadas as técnicas de controle não linear aplicadas à compensação de atrito na válvula. Nesse trabalho, o autor também usou a Planta Piloto de Vazão do LCPI e a malha estudada foi apenas a interna ao posicionador, sem malha externa de controle de processo. Dentro os algoritmos não lineares avaliados, o autor destaca que o algoritmo ISMC teve um desempenho médio superior ao dos demais e também ao controlador PID. É desse trabalho a base do algoritmo ISMC usado nesta tese.

[ARUMUGAM; PANDA e VELAPPAN \(2014\)](#) propuseram um método de compensação de atrito baseado em sinal senoidal, ao invés de pulsos (Knocker), com o intuito de reduzir o eventual desgaste mecânico da válvula. Segundo os autores, a aplicação de pulsos de onda quadrada ou similar tende a provocar maior desgaste na válvula, não só pela movimentação brusca, como pela quantidade maior de deslocamento total durante a operação da planta.

[MISHRA; KUMAR e RANA \(2015\)](#) propuseram o uso de um controlador PI não linear (NPIC), cuja não linearidade é aplicada no termo integral, para a compensação de atrito de válvula em uma malha de vazão, sem posicionador. Os autores validaram o sistema proposto comparando-o a um PI convencional, obtendo bons resultados.

Em [HIDALGO \(2015\)](#), duas propostas envolvendo o ISMC foram estudadas. A primeira colocou o ISMC no sistema supervisor, ou seja, como parte do controle da malha externa, de fluxo. Os principais problemas apontados nessa topologia são a relativa

complexidade de implantação do algoritmo ISMC no software supervisor, e a também relativa baixa taxa de amostragem. A segunda proposta colocou o ISMC no controlador da malha interna, de posição da haste da válvula (posicionador), enquanto o supervisor atuava na malha externa, de fluxo. Essa topologia evidencia o prenúncio de um instrumento embarcado, que é a ideia central desta tese. Além disso, o autor fez uma avaliação sobre os algoritmos de destaque em [SILVA \(2013\)](#) e [BAEZA \(2013\)](#), concluindo que os dois melhores compensadores foram, de fato, o CR2 e o ISMC de malha interna. Os trabalhos de [HIDALGO \(2015\)](#) e também de [HIDALGO et al. \(2019\)](#) são a base teórica desta tese.

Para os detalhes acerca da Planta Piloto de Vazão do LCPI, foi usado o trabalho de [ALVARADO MORA \(2014\)](#), em que o autor investigou em detalhes cada elemento da planta piloto, visando desenvolver um modelo matemático equivalente da mesma.

Os conceitos essenciais de variabilidade de malhas de controle, bem como dos índices de desempenho comparativo de controladores, são encontrados em [GARCIA \(2017\)](#) e [GARCIA \(2019\)](#).

[DI CAPACI e SCALI \(2018a\)](#) propuseram um compensador de atrito em válvulas com base em um PID aumentado, ou seja, junto ao PID convencional é acoplado um compensador *two move*, sendo que apenas um deles atua por vez, conforme a dinâmica do erro de posição e da saída do PID.

[ARIFIN et al. \(2018\)](#) apresentaram um algoritmo de compensação de atrito *model free*, ou seja, não é necessário ter-se um modelo de atrito da válvula para a geração do compensador. O sistema é baseado em pulsos de amplitude variável, conforme o nível do erro, da saída do controlador principal, e de pulsos gerados no estilo Knocker, CR etc. A ideia principal é fazer uma busca unidirecional da amplitude dos pulsos que produz o menor erro. O compensador trabalha em paralelo com um PID, somando-se os esforços de controle. Os autores testaram o sistema proposto em uma Planta Piloto, via CLP.

[DI CAPACI e SCALI \(2018b\)](#) fizeram uma importante revisão geral dos conceitos de atrito em válvulas de controle, dos métodos de detecção, modelagem e compensação de atrito propostos até a data do artigo. Mencionaram também a capacidade de diagnóstico inteligente, com base em uma maior disponibilidade de dados/grandezas do processo. Essa área, segundo os autores, ainda carece de pesquisas mais recentes – pós 2014.

[NAHID; IFTAKHER e CHOUDHURY \(2019\)](#) desenvolveram um novo algoritmo de compensação de atrito, que reduz a ação de controle, conseqüentemente, a excursão da haste da válvula. Os autores focam nesse ponto, destacando que a maioria dos compensadores com bons resultados na redução da variabilidade da malha acabam por

onerar o desgaste da válvula por excessiva ação de controle. Aqui é interessante destacar um certo paradoxo: alguns compensadores conseguem compensar o atrito crescente nas válvulas, evitando a sua manutenção (parada da planta), mas ao mesmo tempo aumentam o desgaste dessa mesma válvula, por excesso de movimentação e/ou movimentação brusca. Os autores conseguiram bons resultados, mas o modo servo apresenta maior lentidão para atingir o novo *set point*.

[REN et al. \(2019\)](#) avaliaram que uma planta de vazão de gás possui ordem dinâmica fracionária e, com base nisso, propõem um compensador SMC de ordem fracionária, para o controle de um atuador + válvula pneumática. O controle é de posição, portanto, de malha interna, via PC + cartão DAQ. Os autores compararam o sistema proposto com outros tipos de compensadores, como o SMC inteiro, o PID convencional, o PID fracionário etc., obtendo bons resultados, principalmente no modo servo, para *set points* em degrau e senoidal.

[MARQUES e GARCIA \(2020\)](#) estenderam o trabalho de [GARCIA \(2008\)](#) na estimação de parâmetros de modelagem de atrito em válvulas pneumáticas de controle, comparando diversas técnicas e usando para validação um posicionador inteligente digital da Fisher® (Emerson™) na malha interna de posição na Planta Piloto de Vazão do LCPI.

[MISHRA; KUMAR e RANA \(2020\)](#) propuseram um PI não linear (NPIC) para compensação de atrito em válvula pneumática em malhas de controle de razão. Justificaram a proposta pelo fato do controle de razão possuir um *set point* de malha interna, geralmente de vazão, dependente de outra variável de processo, a qual contém ruídos de medição, e é geralmente bastante variável no tempo. Assim, o *set point* da malha interna é continuamente variável, o que somado à questão do atrito da válvula, torna o controle mais complexo. Os autores compararam o NPIC em questão com o SCIC, que é baseado em lógica *fuzzy*, e com um PI linear convencional. Tanto o NPIC como o PI foram sintonizados classicamente pelo método da Síntese Direta.

[CONTE; MARQUES e GARCIA \(2021\)](#) avaliaram comparativamente os controladores PID digital e LQR para uma malha de posição com válvula de alto atrito. Para o projeto dos controladores, utilizaram uma modelagem do conjunto válvula + conversor I-P. O LQR apresentou desempenho superior ao PID digital convencional.

[AMIGUES; POMMIER-BUDINGER e BORDENEUVE-GUIBÈ \(2021\)](#) propuseram um RMSMC – *Reference Model Sliding Mode Controller* – como opção para o controle de válvulas com parâmetros incertos, bem como para lidar com suas não linearidades, como histerese etc. (advindas, por exemplo, do atrito). Essa parte fica a cargo do SMC (de fato, um ISMC). A incerteza do processo é tratada pelo RM – *Reference Model* – que recebe o

set point de posição, e gera para o ISMC a dinâmica desejada (estados e saída) do processo. Isso é feito por modelagem em espaço de estados, com alocação de polos e/ou LQ. A entrada (matrizes A e B) é obtida por uma modelagem prévia da válvula real, feita no caso em questão por *software* específico, gerando um modelo de alta fidelidade.

[NASSIRI; LABBADI e CHERKAOUI \(2023\)](#) propuseram um controlador FISMC, ou seja, um ISMC de ordem fracionária, para otimização de eficiência e robustez de um sistema de bombeamento de água (bomba centrífuga). Apesar de não ter sido usada em válvulas pneumáticas de controle diretamente, é uma técnica mais nova, que pode vir a ser aplicada à área de compensação de atrito.

[FRANCO NETO e GARCIA \(2023\)](#) implementaram um posicionador embarcado, baseado em FPGA, contendo um controlador PID, cuja sintonia é ajustada de acordo com quatro modelos de atrito diferentes. É utilizado um *framework* ([MARQUES, 2020](#)) externo para calcular os parâmetros de sintonia do PID para cada modelo de atrito desejado, coletando-se dados da válvula de alto atrito do LCPI. Além das comparações entre cada sintonia do PID, é feita a comparação de desempenho entre o posicionador e um compensador CR2 na malha externa, com resultados expressivos.

A respeito da área de predição de falhas em conjuntos atuador + válvula de controle, ainda que não seja tema específico desse trabalho, destaca-se a crescente importância dessa linha de pesquisa nos últimos 20 anos. É interessante observar que a maioria das pesquisas de predição de falhas em sistemas de controle baseados em válvula pneumática + posicionador foram feitas com *benchmarks* simulados em computador, não em plantas reais.

Apenas como exemplo de caso testado em Planta Piloto, [DI CAPACI et al. \(2013\)](#) comentou que com uma maior disponibilidade de acesso a mais variáveis de processo, torna-se mais efetiva a aplicação de técnicas preditivas de falhas, como a proposta no artigo. É concebida e testada uma técnica de predição de falhas em uma malha de controle de vazão com posicionador digital na malha interna. Seis KPI's são baseados na diferença entre a posição desejada e a real da haste da válvula.

Como a presente proposta utilizou o ambiente Matlab/Simulink® como sistema supervisório etc., é necessária a consulta aos detalhes técnicos operacionais da placa de aquisição de dados PCI-6229 ([INSTRUMENTS, 2020](#)), da National Instruments™, pois aquela é a interface efetiva entre o Matlab/Simulink® e a planta piloto.

Para os detalhes acerca de posicionadores comerciais de válvulas, foram avaliadas as empresas: Fisher® (Emerson™) - um dos líderes mundiais em automação e controle, pois já há um posicionador desse fabricante instalado na planta piloto; e a Smar™,

fabricante nacional de renome mundial. É crucial ter-se como parâmetros de referência equipamentos líderes em seu segmento industrial. Deseja-se atingir com este trabalho um patamar o mais próximo possível dessa referência.

1.5 Estrutura do texto

Essa tese é composta pelos capítulos descritos a seguir, retirando-se o atual capítulo de introdução.

Capítulo 2 – A Planta Piloto de Vazão do LCPI

Neste capítulo é feita uma descrição resumida da Planta Piloto de Vazão do LCPI, para que o leitor tenha uma visão geral básica do ambiente em que o posicionador digital será aplicado. É exibido o diagrama P&ID da planta, e é dado foco no setor da válvula FV-11, a qual é o elemento de alto atrito, causador da variabilidade da malha de vazão, e para o qual destina-se todo o projeto do posicionador digital.

Ainda no Capítulo 2 é dada ênfase na teoria básica da estrutura de uma válvula de controle, para que haja um entendimento dos problemas comuns que ocorrem na Indústria de Processos, e como um posicionador pode ser considerado um elemento de resolução desses problemas.

Capítulo 3 – Posicionadores para válvulas de controle de processos

O Capítulo 3 apresenta os conceitos principais de um posicionador de válvula de controle, qual sua função e como ele está geralmente inserido na planta. Em seguida, são discutidas as suas características principais e como se deu a evolução dos posicionadores de válvula.

Capítulo 4 – Proposta de projeto

Este capítulo mostra uma visão geral de um posicionador embarcado inserido na planta, junto à válvula FV-11 (alto atrito). Ilustram-se também as principais referências de trabalhos anteriores, bem como as principais características do projeto desenvolvido. São descritos também os índices de desempenho usados, para efeito comparativo entre os diversos algoritmos e posicionadores estudados. Por fim, são apresentados ensaios, primeiro para obtenção dos parâmetros atuais da válvula FV-11, usados nos algoritmos de compensação de atrito, e segundo para a correta sintonia do controlador PID. Ambos os ensaios são feitos em malha aberta.

Capítulo 5 – Algoritmos de compensação de atrito na válvula

Este capítulo é a base teórica dos dois algoritmos de compensação de atrito estudados e implementados, na forma não embarcada e embarcada. Ênfase especial é

dada ao algoritmo ISMC, por ser mais complexo, não linear, e por ter apresentado resultados muito positivos em trabalhos anteriores. Além disso, é, de fato, um controlador que pode se embarcado em um posicionador, sem interferir na malha externa, o que não acontece com o CR2, conforme já explanado.

Capítulo 6 - Estrutura de *hardware* & *firmware* para a implementação do posicionador digital

Para viabilizar o projeto embarcado do posicionador digital com algoritmos de compensação de atrito, optou-se pelo projeto e validação prévios no ambiente Matlab®. Descreve-se inicialmente o ambiente de trabalho, contendo um PC com a placa de aquisição de dados, que é a interface entre a Planta Piloto de Vazão do LCPI e o Matlab®. Em seguida, apontam-se as interfaces do posicionador inserido, ainda de forma não embarcada. A seguir, ilustram-se os diversos algoritmos de compensação de atrito, com a respectiva validação. Por fim, utilizam-se os resultados obtidos para se levantar os critérios necessários para a escolha das ferramentas para o posicionador embarcado em si.

Capítulo 7 - Projeto detalhado do *hardware* & *firmware*

O Capítulo 7 dedica-se integralmente ao projeto eletrônico e de *software* (mais precisamente, o *firmware*, ou seja, a programação interna do posicionador), descrevendo-se as tarefas a serem executadas, ilustrando-as na forma de fluxogramas. Como os códigos fonte referentes aos algoritmos foram criados e validados no capítulo anterior, descreve-se aqui a forma como esses códigos são regeados para o ambiente embarcado, através da ferramenta Matlab Coder®. Para fechamento do capítulo, exibem-se as diagramações do posicionador embarcado inserido na Planta Piloto de Vazão do LCPI, com as interfaces para as diversas versões do algoritmo de compensação de atrito.

Capítulo 8 - Resultados

Uma vez ensaiados em laboratório os diversos algoritmos de compensação de atrito na válvula, tanto em forma não embarcada como embarcada, o Capítulo 8 dedica-se integralmente à exibição tabular e gráfica dos resultados obtidos, de forma comparativa, segundo os índices de desempenho e modos de ensaio já descritos (Servo, Regulatório e Regime Permanente). Destaca-se ainda a importante comparação entre o posicionador embarcado desenvolvido e os posicionadores comerciais da Fisher® (Emerson™), modelos eletropneumático e digital *Foundation Fieldbus*®.

Capítulo 9 – Considerações finais

A partir das análises comparativas feitas no capítulo anterior, colocam-se aqui as observações pertinentes, quanto ao desempenho relativa do posicionador embarcado desenvolvido, as possibilidades de aplicabilidade à Indústria de Processos em geral, e também as propostas para continuidade desse trabalho.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas.

2 A Planta Piloto de Vazão do LCPI

2.1 Descrição básica

A Planta Piloto de Vazão do LCPI resume-se, na sua essência, a um circuito fechado de circulação de água, simulando ambientes industriais das áreas química e petroquímica. Diversos elementos usuais na indústria fazem parte da planta, como inversor de frequência (para controle de rotação do motor da bomba d'água, logo, da vazão), compressor (para a geração de ar comprimido para os dispositivos pneumáticos), válvulas solenoides (entrada e saída de água para a caixa d'água e drenagem para o esgoto), válvulas pneumáticas do tipo mola-diafragma com atuadores eletropneumáticos, sensores de vazão e pressão, CLP para monitoramento e segurança, SDCD para operação completa da planta e ainda uma placa de aquisição de dados, que pode ser operada via ambiente Matlab/Simulink®.

O diagrama PI&D (*Piping and Instrumentation Diagram*) da planta é visto na Figura 2.1.

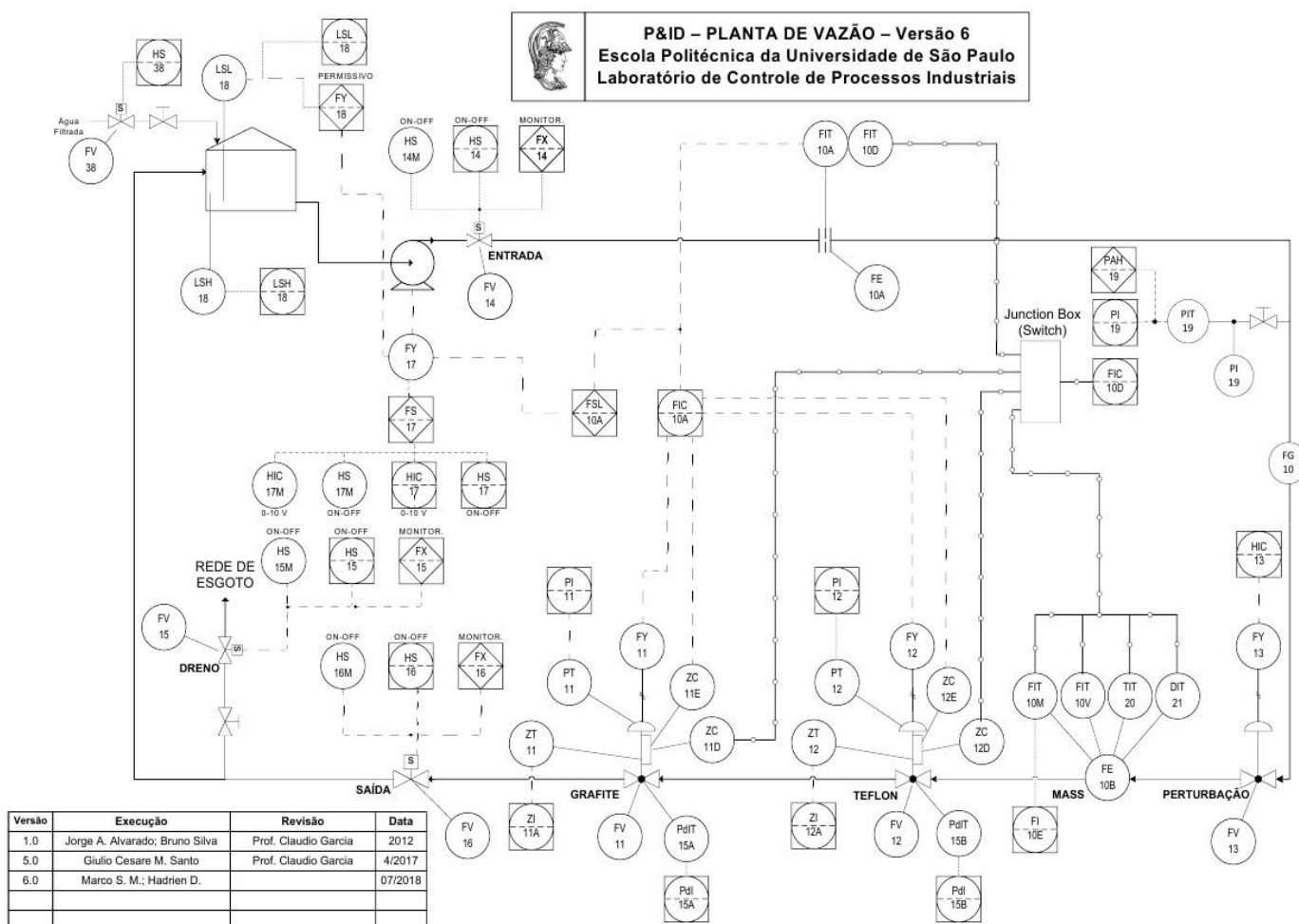


Fig. 2.1 - Diagrama P&ID da Planta Piloto de Vazão do LCPI.

Fonte: Manual de Operação da Planta Piloto de Vazão – LCPI – 2018.

2.2 Setores de interesse para o projeto

A válvula de maior interesse para esse trabalho é a FV-11, que é uma válvula pneumática do tipo globo, com atuador pneumático e com gaxetas de grafite, portanto, de alto atrito na haste. É um dos tipos de válvula mais usados em plantas químicas, petroquímicas, óleo e gás, e outras, pela robustez na operação em ambientes hostis.

O objetivo do trabalho foi justamente desenvolver um posicionador digital de válvula, instalado junto à FV-11, e contendo algoritmos internos de compensação de atrito, reduzindo-se, assim, a variabilidade da malha de controle onde a válvula está inserida.

O diagrama P&ID da válvula FV-11 é apresentado na Figura 2.2.

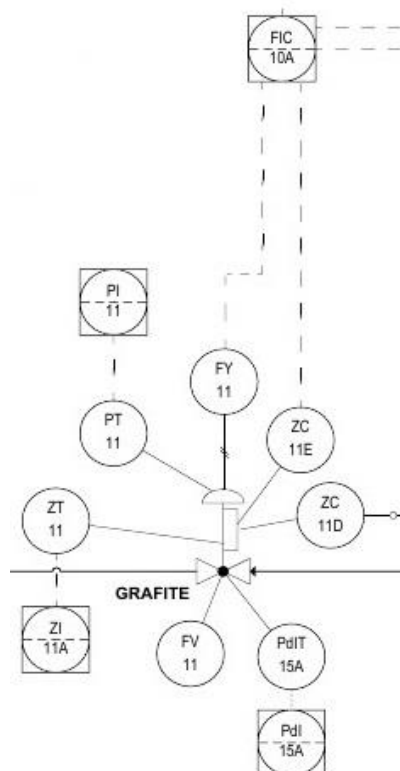


Fig. 2.2 - Diagrama P&ID do entorno da válvula FV-11.

Fonte: Manual de Operação da Planta Piloto de Vazão - LCPI – 2018.

A válvula FV-11 possui como elementos sensores um medidor de pressão (PT-11), um medidor LVDT de posição da haste (ZT-11) e um medidor de pressão diferencial na linha (PdIT-15A). Já entre os atuadores, tem-se um conversor eletropneumático I/P (FY-11) de entrada 4-20 mA, um posicionador eletropneumático (ZC-11E) e um posicionador digital (ZC-11D), modelo DVC-6010F, da Fisher® (Emerson™).

Do ponto de vista do posicionador a ser desenvolvido, os elementos essenciais da Planta Piloto de Vazão são: o medidor de posição da haste (ZT-11) e o conversor I/P (FY-11).

A Figura 2.3 ilustra o conjunto da válvula real FV-11 e sua instrumentação associada.



Fig. 2.3 - Conjunto da válvula FV-11 e instrumentação associada – LCPI.
Fonte: Manual de Operação da Planta Piloto de Vazão - LCPI – 2018.

2.3 Válvula de controle – visão básica

Uma das principais funções da válvula de controle é regular o fluxo de líquido ou gás em uma malha de processo industrial. A estrutura típica de uma válvula de controle é vista na Fig. 2.4. O atuador pneumático regula a posição da haste, cuja extremidade contém o obturador (plug), responsável pelo grau de abertura e fechamento à passagem de fluido.

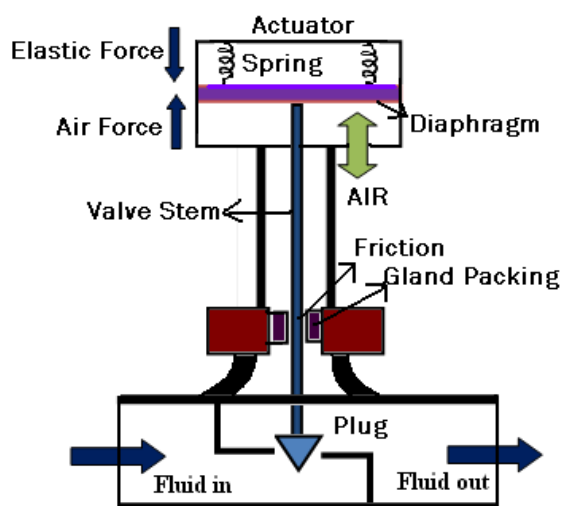


Fig. 2.4 – Estrutura básica de uma válvula de controle.
Fonte: [ARUMUGAM; PANDA e VELAPPAN \(2014\)](#).

Como já mencionado, a válvula de interesse desse trabalho (FV-11) é uma válvula do tipo globo ([SKOUSEN, 2011](#)). Ainda que inúmeros parâmetros existam, neste trabalho o interesse está nos parâmetros relacionados ao atrito gerado pelo envelhecimento das gaxetas de vedação junto à haste (Fig. 2.5).

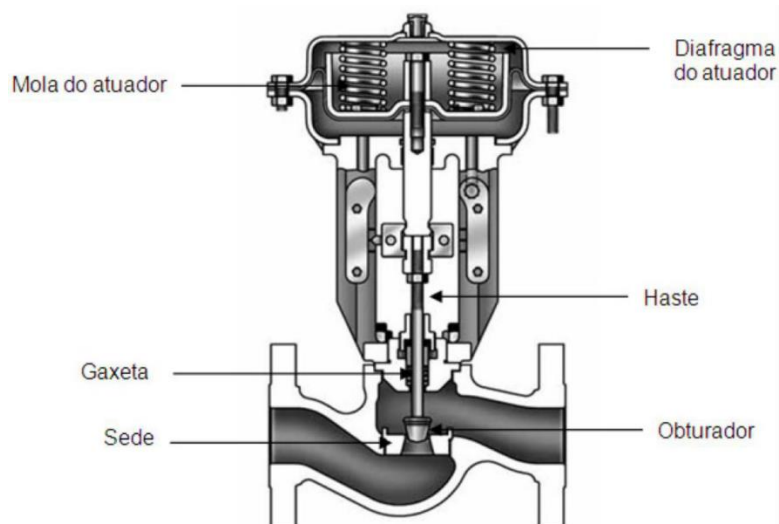


Fig. 2.5 – Corte de uma válvula de controle pneumática do tipo globo.

Fonte: [ALMEIDA \(2015\)](#).

Citam-se como principais os seguintes parâmetros discutidos previamente: S – banda de escorregamento na mudança de sentido de movimento; J – banda de agarramento (ou escorregamento) entre a parada e a retomada de movimento no mesmo sentido; F_c – coeficiente de atrito de Coulomb; F_s – coeficiente de atrito estático; S_a – área da seção transversal do diafragma do atuador; K – constante elástica da mola do atuador. A curva típica de assinatura de uma válvula em questão, evidenciando-se os parâmetros S e J é vista na Fig. 2.6. Note-se que S é a soma das bandas morta e de agarramento.

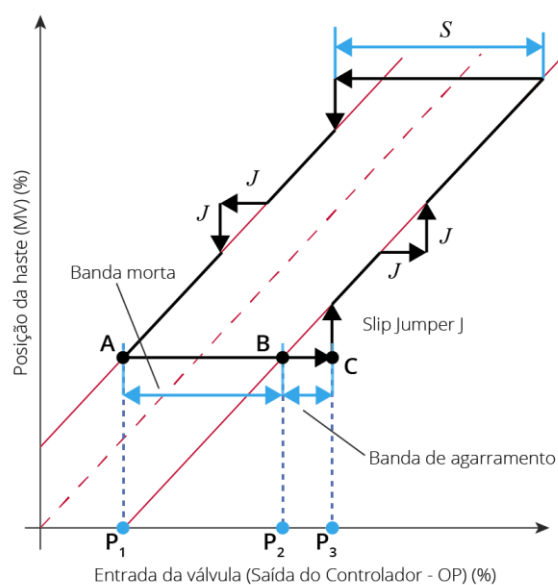


Fig. 2.6 – Curva de assinatura típica de válvula com agarramento.

Fonte: [CUADROS \(2011\)](#).

3 Posicionadores para válvulas de controle de processos

3.1 Conceito

Retornando às origens das malhas de controle, os primeiros atuadores para válvula eram puramente pneumáticos, e recebiam um sinal de variável manipulada diretamente do controlador da malha principal do processo. Nas linhas antigas típicas de 20 psi, os atuadores eram grandes, para conseguirem força necessária de atuação, pois a pressão não podia ser superior a 20 psi. E como a saída pneumática do atuador era única, ele era obrigatoriamente do tipo retorno por mola ([MONSEN, 2023](#)). Pode-se dizer que nessa fase da indústria não existiam posicionadores.

Um posicionador de válvula industrial é um equipamento que visa, basicamente, garantir que a porcentagem de abertura da válvula solicitada pelo controlador da malha seja atingida com a maior exatidão e velocidade possíveis, e com o menor sobressinal possível, entre diversas outras características desejadas de desempenho. Observa-se que o posicionador forma, junto com a válvula, uma malha local de controle de posição, liberando o controlador instalado no sistema de controle (CLP, SDCD etc.) dessa tarefa. A visão elementar de um posicionador junto à válvula é ilustrada pela Fig. 3.1.

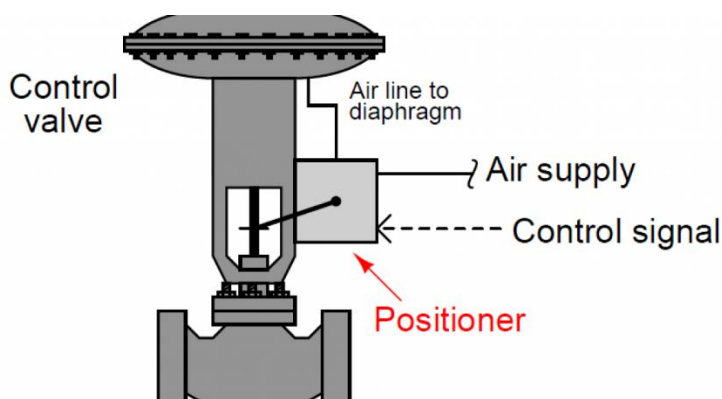


Fig. 3.1 – Conceito de Posicionador junto à válvula.

Fonte: [VRC \(2023\)](#).

A primeira geração de posicionadores era pneumática, com sinal de controle de 3~15 psi, e às vezes contendo externamente um conversor corrente para pressão - I/P (Fig. 3.2). Mesmo assim, esses primeiros posicionadores já trouxeram grandes benefícios, tais como ([MONSEN, 2023](#)):

- Capacidade de pressão de entrada de até 65 psi, o que reduziu bastante a área do atuador, conseqüentemente, seu tamanho em geral;
- Redução do tempo de resposta da válvula;

- Aumento de robustez, pois a malha interna de controle de posição tornava o sistema mais imune a distúrbios;
- Possibilidade de duas saídas de ar, uma para abertura e outra para fechamento. Esse atuador de dupla ação ficou menor, mais leve, e mais barato.

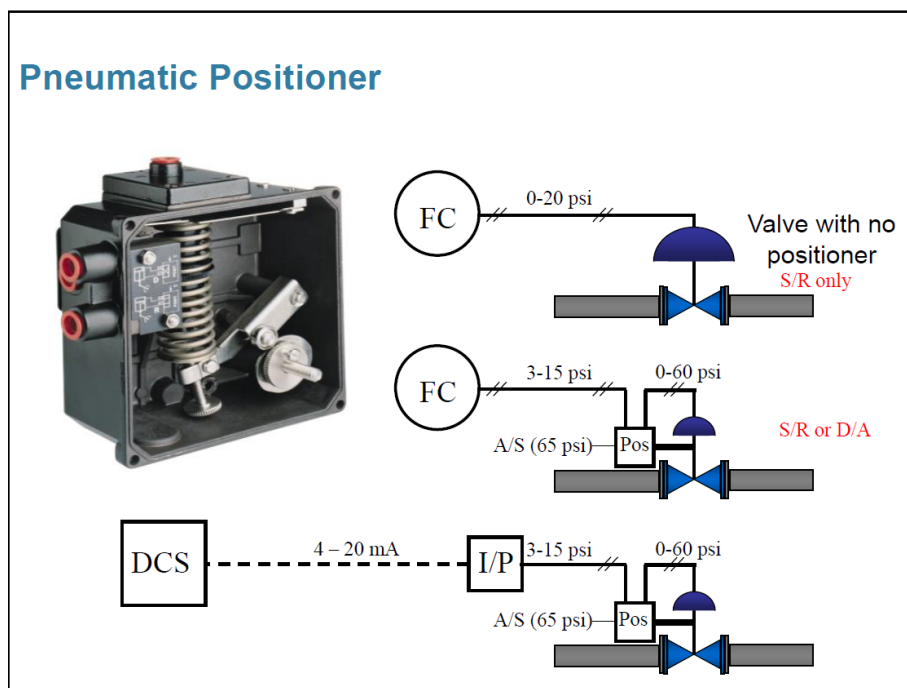


Fig. 3.2 – Posicionador Pneumático.

Fonte: [MONSEN \(2023\)](#).

A segunda geração de posicionadores incorporou no equipamento o conversor I/P, que era externo até então. Esse conceito está ilustrado na Fig. 3.3.

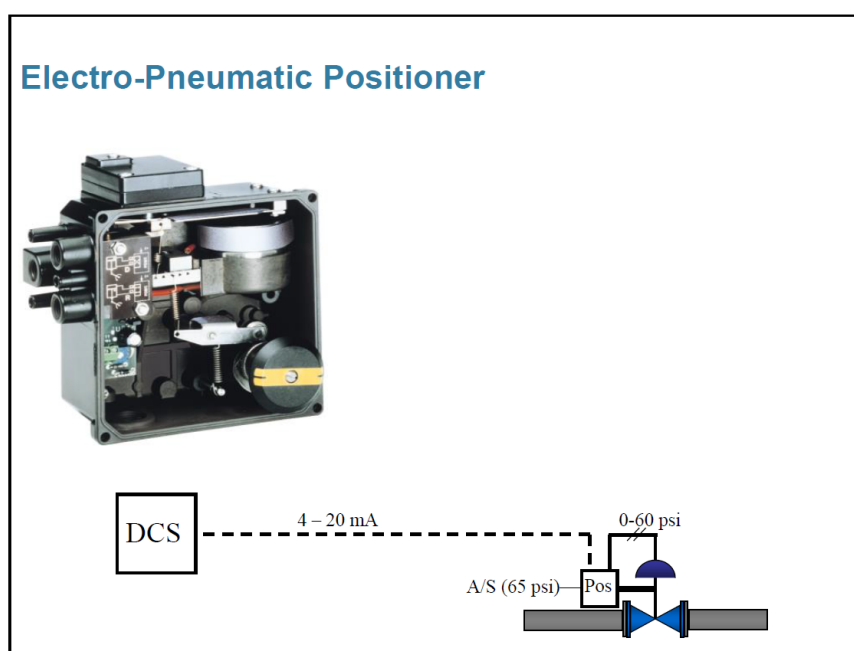


Fig. 3.3 – Posicionador Eletropneumático.

Fonte: [MONSEN \(2023\)](#).

Finalmente, na geração atual, os posicionadores tornaram-se equipamentos programáveis, microcontrolados ou microprocessados, com software embarcado. É o caso, por exemplo, do modelo DVC6010F, da Fisher® (Emerson™). As principais diferenças construtivas entre esse equipamento e o posicionador PD-CCB-01, fruto deste trabalho, é que o último não incorpora dentro de si o sistema de atuador eletropneumático, e nem a interface *Foundation Fieldbus*®, para comunicação com o Supervisório. No caso do PD-CCB-01, a interface com o Supervisório é analógica, e ele utiliza um atuador eletropneumático externo, já instalado junto à válvula FV-11. Uma visão conceitual do posicionador digital (3ª geração) pode ser vista na Fig. 3.4. Para se ter uma ideia de como são fisicamente os posicionadores de mercado, recorre-se às Figuras 3.5 e 3.6.

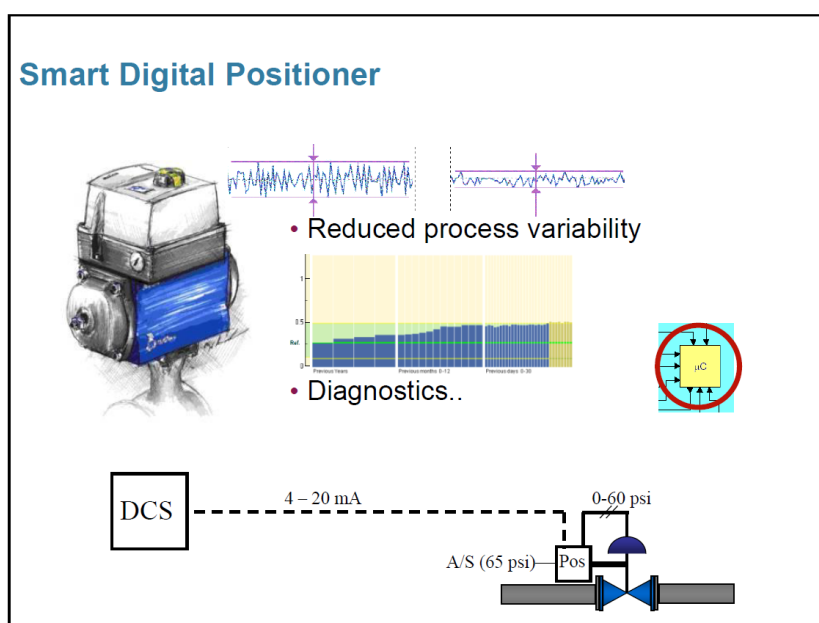


Fig. 3.4 – Posicionador Digital.

Fonte: [MONSEN \(2023\)](#).



Fig. 3.5 – Posicionadores digitais FY300 e FY500.

Fonte: Smar™.



Fig. 3.6 – Posicionador Digital Fisher® (Emerson™) DVC6010.
Fonte: Emerson™.

3.2 Características básicas

Tipicamente, um posicionador comercial possui os seguintes elementos:

- Saída de comando: é ligada ao atuador de abertura e fechamento da válvula. Por exemplo, no caso da válvula FV-11, seu atuador é do tipo pneumático; portanto, a saída de comando do posicionador permite o deslocamento do diafragma da válvula. É comum os posicionadores com saída pneumática possuírem um sistema de conversão eletropneumática. Além disso, possuem em geral ramais de entrada e de saída de ar comprimido, com medidores de pressão analógicos ou digitais;
- Sensor de posição: é o elemento de medição da posição da haste da válvula. Ou seja, é a medida efetiva do grau de abertura e fechamento. Pode ser do tipo LVDT, por efeito Hall etc.; como a válvula é um item mecânico, exige-se um certo grau de interferência na instalação do sensor de posição, pois há que se converter o movimento mecânico de deslocamento da haste em uma resposta sensora;
- Interface de *Set Point*: é o modo de interligação ao controlador primário da malha de controle na qual a válvula está inserida. Pode ser analógica (4-20 mA), *HART*®, *Foundation Fieldbus*® etc. É por essa interface que o posicionador recebe o *set point* desejado de posição. Esse *set point* é a saída de controle da malha externa (variável manipulada).

Esses elementos descritos acima podem ser vistos através de uma diagramação interna de um posicionador comercial, como mostra a Fig. 3.7, e, com mais detalhamento, nas Figuras 3.8 e 3.9, da fabricante brasileira Smar™.

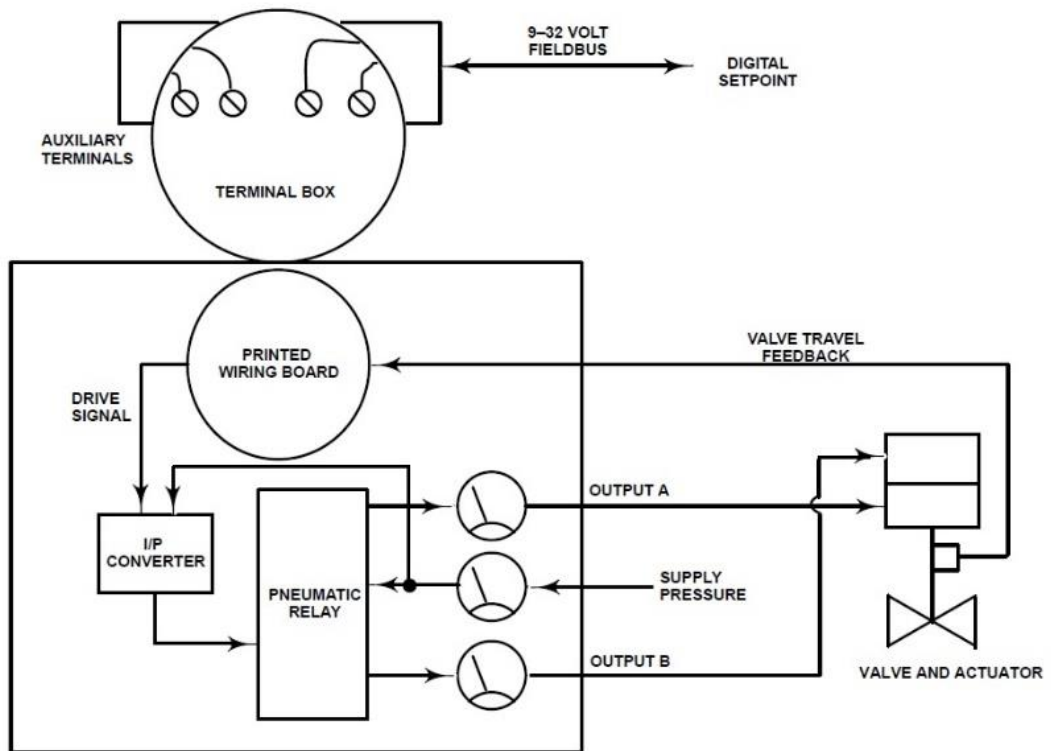


Fig. 3.7 - Diagrama interno do posicionador DVC6000F.
Fonte: Emerson™.

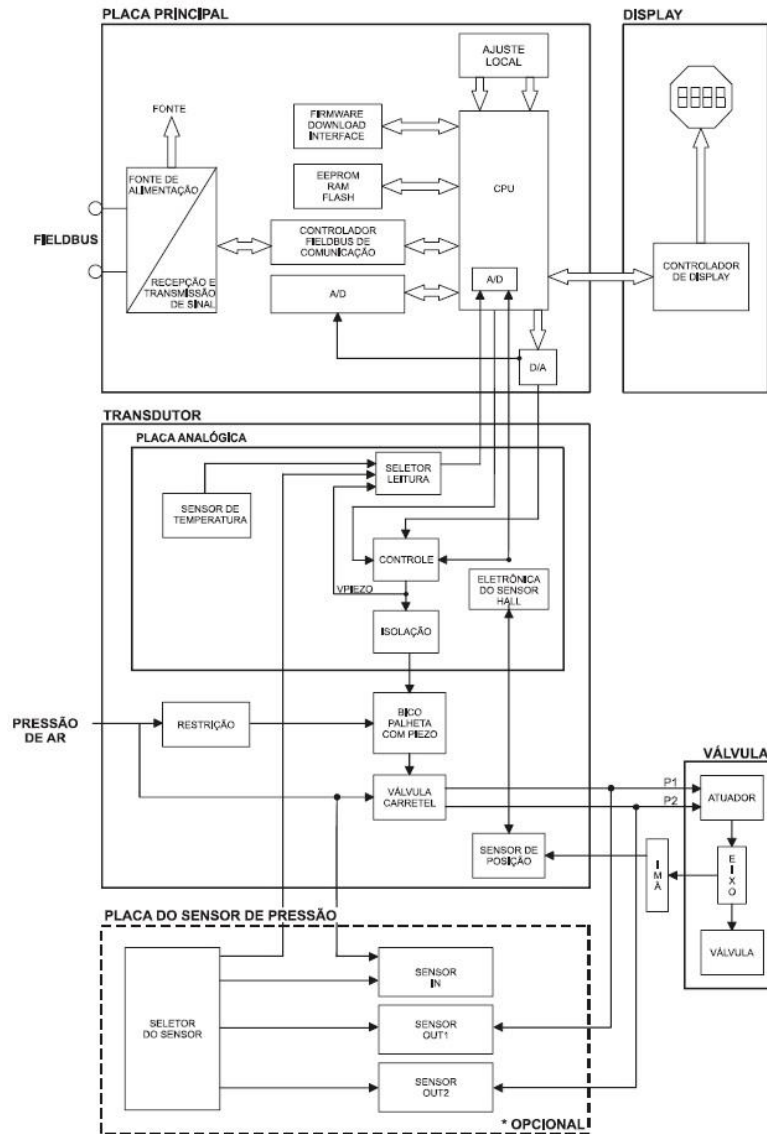


Fig. 3.8 - Diagrama interno do posicionador FY302.

Fonte: Smar™.

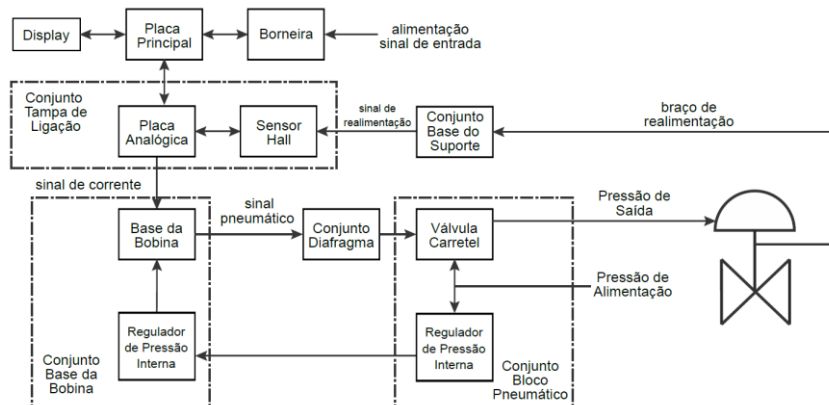


Fig. 3.9 - Diagrama interno do posicionador FY500.

Fonte: Smar™.

3.3 Evolução

É comum já há mais de uma década que os posicionadores possuam, além dos elementos essenciais discutidos, diversas outras funcionalidades, tais como controle PID

integrado, indicação local via LCD, interface *Foundation Fieldbus®/Profibus®*, serviços como assinatura de válvula, modos de diagnóstico, comunicação sem fio etc. No entanto, permanece para o mercado a principal demanda, que é a capacidade do posicionador de reduzir a variabilidade da malha devido ao envelhecimento da válvula (aumento de atrito). Prolongar a vida útil da válvula é o ponto de maior economia, evitando paradas precoces do processo.

A Figura 3.10 ilustra um posicionador atual de mercado, novamente da Smar™, e a Figura 3.11 um exemplo de sua instalação junto a uma válvula em uma planta real.



Fig. 3.10 - Exemplo de posicionador típico de mercado.

Fonte: Smar™.



Fig. 3.11 - Exemplo de instalação de um posicionador em campo.

Fonte: Smar™.

4 Proposta de projeto

4.1 Visão sistêmica

O foco deste trabalho foi criar um posicionador digital embarcado, com *hardware* & *firmware* próprios. O diagrama de blocos do sistema proposto é visto na Figura 4.1.

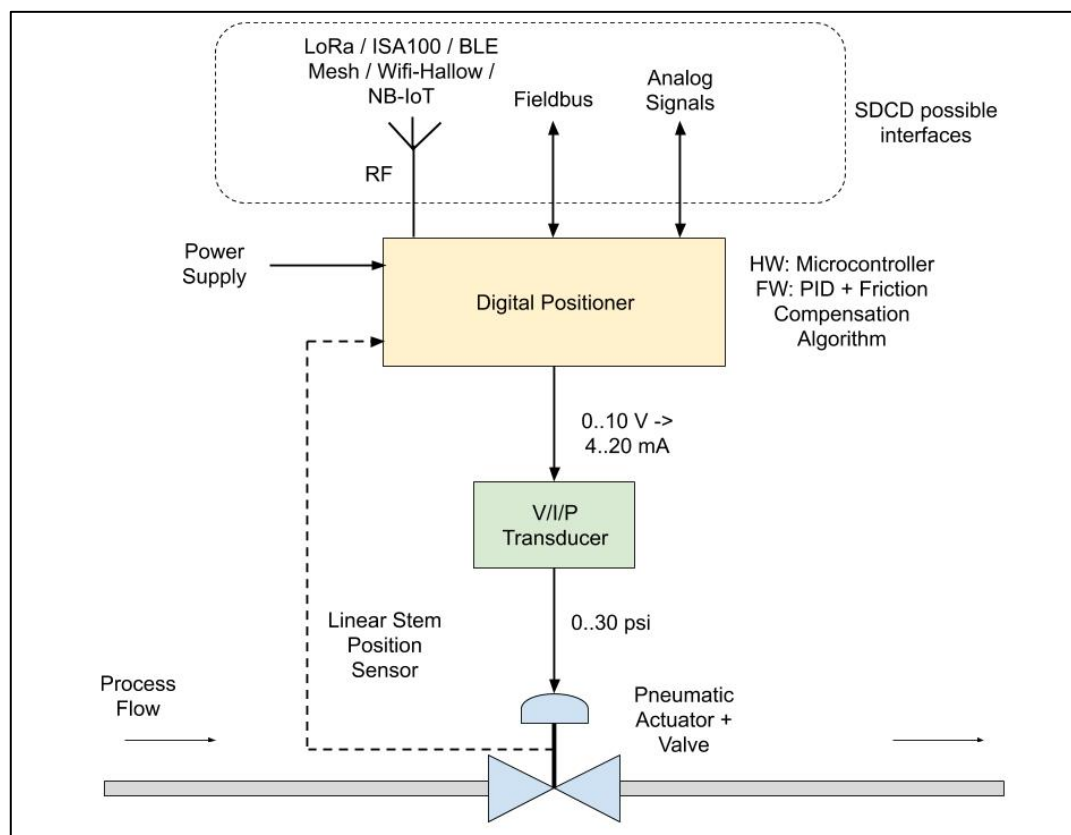


Fig. 4.1 - Diagrama de blocos do sistema proposto.

Fonte: Autor.

O bloco *Digital Positioner* da Figura 4.1 é o equipamento desenvolvido. Se compararmos com os posicionadores típicos de mercado, deve-se destacar algumas particularidades:

- O projeto é focado na parte eletrônica e de *firmware*, não contendo elementos pneumáticos internamente ao equipamento. Foram utilizados os conversores V/I/P disponíveis na Planta Piloto de Vazão do LCPI (bloco *V/I/P Transducer* na Figura 4.1);
- A única interface com o controlador primário da planta é a analógica. Em futuras versões, poderiam ser acrescentadas interfaces *wireless* e/ou *Foundation Fieldbus®*, por exemplo.

Uma vez validado o equipamento desenvolvido, é plenamente viável adaptá-lo para a incorporação de outros recursos (pneumáticos etc.) que o tornem diretamente aplicável como instrumento autônomo, via possíveis parcerias comerciais.

É preciso separar bem os escopos: um deles é a aplicação na indústria: o posicionador deve permitir o uso em diversos modelos de válvulas, medir a assinatura da válvula, e fazer a parametrização dinâmica dos compensadores, além de ter o atuador V->I->P incorporado ao posicionador (veja que esse último recurso foi explicado acima). O segundo escopo é o acadêmico deste trabalho, em que os algoritmos e compensadores são parametrizados para uma válvula específica, a parametrização é de fábrica, ou seja, sem modificações *on the fly* (dinâmicas, pelo usuário), e o bloco atuador V->I->P é externo ao sistema embarcado.

O núcleo desenvolvido no escopo acadêmico atual permite a ampliação do projeto a ponto de se tornar um equipamento com aplicabilidade na indústria.

4.2 Diagrama de blocos – visão da planta com o posicionador inserido

A Figura 4.2 mostra como foi inserido o posicionador na Planta Piloto de Vazão.

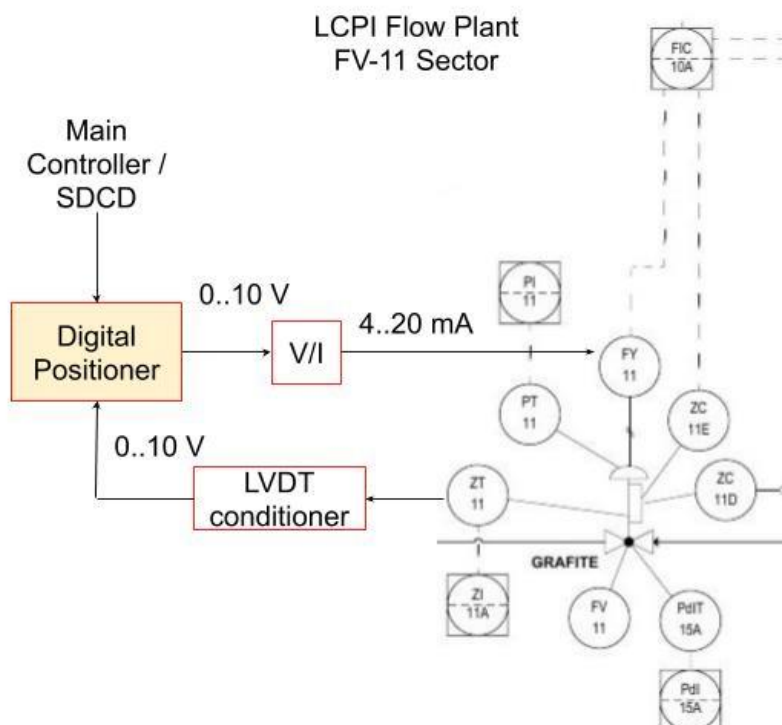


Fig. 4.2 - Setor de inserção do posicionador na Planta Piloto de Vazão.

Fonte: Autor.

O posicionador digital gera internamente os sinais analógicos necessários, entre eles, a saída para o atuador, e também condiciona todas as entradas analógicas necessárias,

como por exemplo, a medida de posição. A faixa padrão usada é de 0-10 V. Na Planta Piloto de Vazão já há conversores entre os padrões 0-10 V e 4-20 mA.

Alguns pontos importantes a ressaltar quanto ao diagrama anterior: o ambiente de trabalho para o *Main Controller* indicado é composto de um microcomputador com software Matlab/Simulink® e uma placa de aquisição de sinais da National Instruments™, modelo PCI-6229. Os sinais de interfaceamento entre a placa de aquisição e o posicionador (*set point* etc.) são no padrão 0-10 V; a atual conexão entre o conversor I/P (FY-11) e o controlador no SDCD (FIC-10A) foi desligada e substituída pela conexão ao posicionador.

A Figura 4.3 mostra a malha de controle de vazão sem o posicionador. Em todos os diagramas de malhas de controle deste texto, por simplicidade, são suprimidos o modelo de perturbação na variável de processo e o modelo de erro de medição nas variáveis medidas. Na Figura 4.4 veem-se as interfaces principais entre o controlador principal em Matlab/Simulink® e a planta de vazão, controlando essa grandeza sem posicionador.

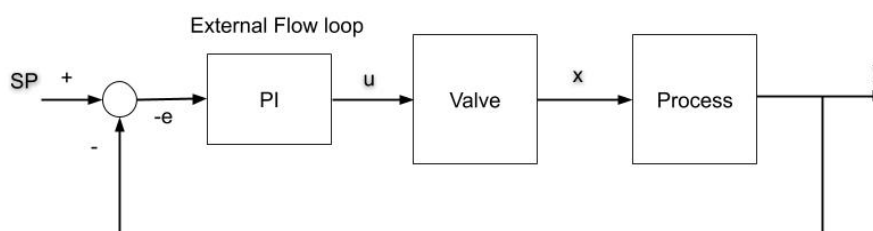


Fig. 4.3 - Controle de vazão sem posicionador.

Fonte: Autor.

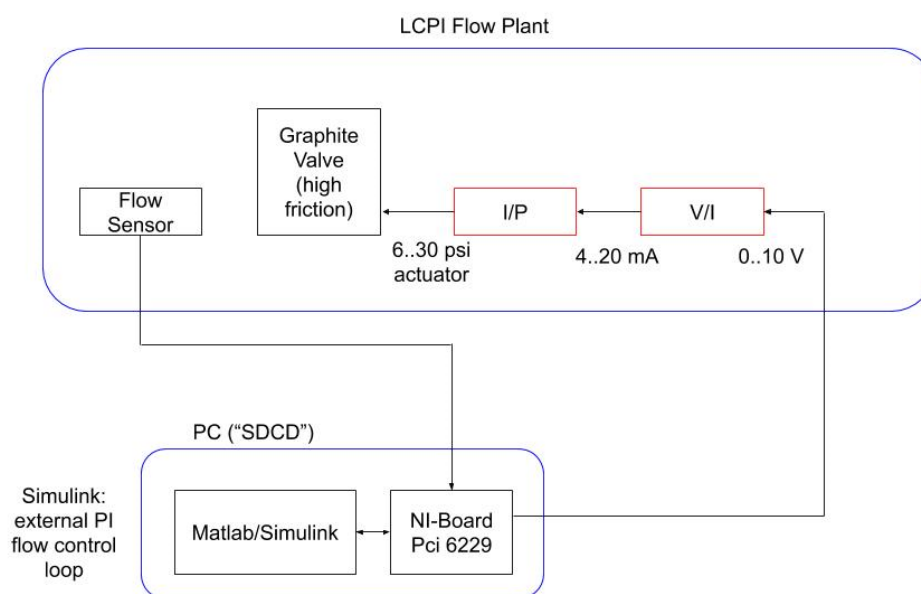


Fig. 4.4 - Controle de vazão pelo ambiente Simulink®, sem posicionador.

Fonte: Autor.

Já a Figura 4.5 ilustra a malha de controle de vazão com um posicionador inserido. Nota-se que o sistema de controle passa a ser do tipo cascata, uma vez que a malha de controle de vazão é a malha externa e a malha de controle de posição é a malha interna.

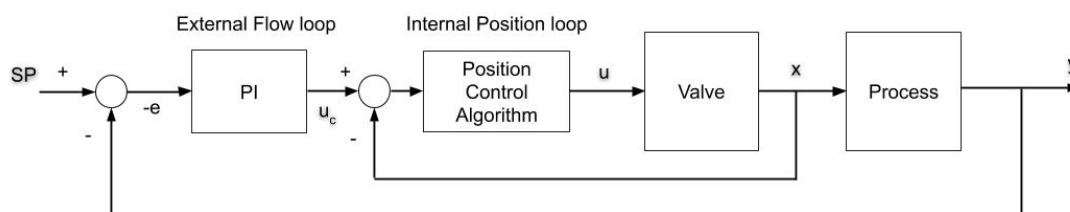


Fig. 4.5 - Controle de vazão com posicionador.

Fonte: Autor.

4.3 Características principais do projeto

Este trabalho usou como ambiente supervisor o mesmo computador com Matlab/Simulink®. Para um projeto em maior conformidade com a indústria (SDCD etc.), o posicionador poderia prever, em trabalhos futuros, uma interface típica de interligação a sistemas supervisórios, como por exemplo: *Hart*®, *Foundation Fieldbus*® (FF) ou *Profibus*®/*Profinet*®.

Os trabalhos de [HIDALGO \(2015\)](#) e [HIDALGO et al. \(2019\)](#) são a base conceitual para o projeto. Em [HIDALGO \(2015\)](#), o autor fez uma análise detalhada e comparativa entre os algoritmos de compensação de atrito existentes. E, como extensão dos trabalhos de [SILVA \(2013\)](#) e [BAEZA \(2013\)](#), demonstrou experimentalmente um desempenho médio superior para dois algoritmos: CR2 e ISMC, sendo o último não linear.

[SILVA \(2013\)](#), [BAEZA \(2013\)](#) e [HIDALGO \(2015\)](#) sugeriram implantar um *hardware* (programável) como posicionador digital para válvulas industriais, contendo internamente algoritmos de compensação de atrito. Já em [HIDALGO et al. \(2019\)](#), os autores implementaram o algoritmo ISMC embarcado em um *hardware* do tipo Arduino (*open source*). Nesse caso, foi usado um modelo da Planta Piloto de Vazão, criado em [ALVARADO MORA \(2014\)](#). A placa Arduino recebe do PC (controlador principal da malha de vazão) o *set point* de posição (que é, de fato, a saída de controle da malha de vazão, externa) e a medida de posição da haste, ambos via porta serial COM. A saída de atuação (0-100 %) é gerada pela placa embarcada e enviada, via serial, ao PC, que faz o repasse para a entrada do modelo equivalente ao atuador da válvula FV-11. A Figura 4.6 exibe como seria essa implantação usando a planta real de vazão.

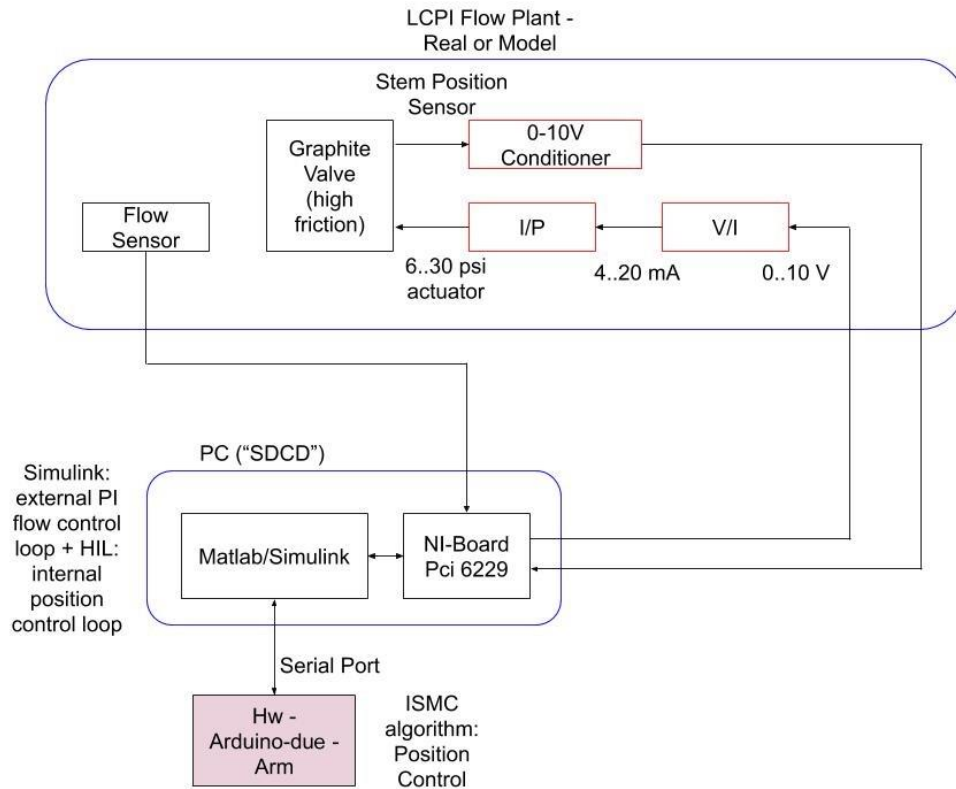


Fig. 4.6 - Algoritmo ISMC embarcado por [HIDALGO et al. \(2019\)](#).

Fonte: Autor.

Assim, a proposição de projeto para este trabalho pode ser dividida nas seguintes etapas (todas utilizaram a Planta Piloto de Vazão do LCPI):

- Implantação e validação dos algoritmos CR2 e ISMC em ambiente Matlab/Simulink®; um algoritmo PID clássico também foi testado;
- Concepção do *hardware* embarcado;
- Tradução dos modelos Matlab/Simulink® dos algoritmos de controle para código C/C++;
- Concepção e implementação de *firmware* embarcado, importando os códigos dos algoritmos de controle; e
- Implantação do protótipo e testes na Planta Piloto de Vazão. Os ensaios visam avaliar o desempenho do posicionador digital embarcado, através dos seguintes experimentos (todos usando a malha de vazão):
 - Desempenho do controle de vazão usando apenas a malha externa com controlador PI, sem posicionador inserido (apenas como referência);
 - Desempenho usando o posicionador digital embarcado, com PID convencional, sem algoritmo específico de compensação de atrito;
 - Desempenho usando o compensador digital embarcado CR2;

- Desempenho utilizando o posicionador digital embarcado, com PID, junto ao compensador digital embarcado CR2 (PID + CR2 em cascata, ver Capítulo 5);
- Desempenho usando o posicionador digital embarcado, com algoritmo não linear ISMC;
- Desempenho utilizando o posicionador digital embarcado, com ISMC, junto ao compensador digital embarcado CR2 (ISMC + CR2 em cascata, ver Capítulo 5);
- Comparação entre o melhor resultado acima e o equivalente com os posicionadores comerciais: eletropneumático e digital DVC-6010F, ambos da Fisher® (Emerson™), o último com PID de 6 parâmetros. Aqui também foram feitos ensaios sem a malha de vazão, ou seja, apenas a malha de posição.

4.4 Índices de desempenho

Os índices de avaliação de desempenho utilizados na coleta experimental de dados, para avaliação comparativa de desempenho, foram:

- Análise estacionária
 - ISE – *Integrated Squared Error*

$$ISE = \int_{T_0}^T (y - y_{sp})^2 dt. \quad (4.1)$$

O índice ISE penaliza o sistema com grandes picos de distúrbio, uma vez que computa os sucessivos erros quadráticos.

- Variabilidade da malha de controle

$$Var = \frac{2\sigma_y}{\mu_y} 100 \%, \quad (4.2)$$

sendo σ_y o desvio padrão e μ_y o valor médio.

- Tempo de subida (*rise time*) para entrada em degrau. Aqui foi considerado o intervalo de tempo entre o degrau no *set point* e o instante em que a saída o atinge pela primeira vez.
- Tempo de acomodação (*settling time*) para entrada em degrau. Foi usado o critério de $\pm 5\%$ do set point.
- Máximo sobressinal relativo, para entrada em degrau

$$M_p(\%) = \frac{|y_{Mp} - y_{SS}|}{[\Delta y_{SP}]} \times 100 \% \quad (4.3)$$

- Acúmulo da variação da posição da haste da válvula

$$ModVar = \sum_{i=2}^n |x(i) - x(i-1)| \quad (4.4)$$

- Rejeição de distúrbio
 - ITAE – *Integrated Time-weighted Absolute Error*

$$ITAE = \int_{T_0}^T t |y - y_{sp}| dt. \quad (4.5)$$

O índice ITAE penaliza o sistema que leva mais tempo para rejeitar distúrbios.

O apêndice A ilustra os scripts Matlab® que calculam os índices de desempenho acima descritos.

4.5 Ensaios de modelagem da válvula e de sintonia do PID

A Figura 4.7 ilustra o diagrama para ensaios, em malha aberta, de obtenção dos parâmetros atualizados da válvula FV-11 (que são usados nos algoritmos ISMC e CR2), bem como da curva de reação do processo, a fim de se obter uma sintonia adequada para o PID do posicionador.

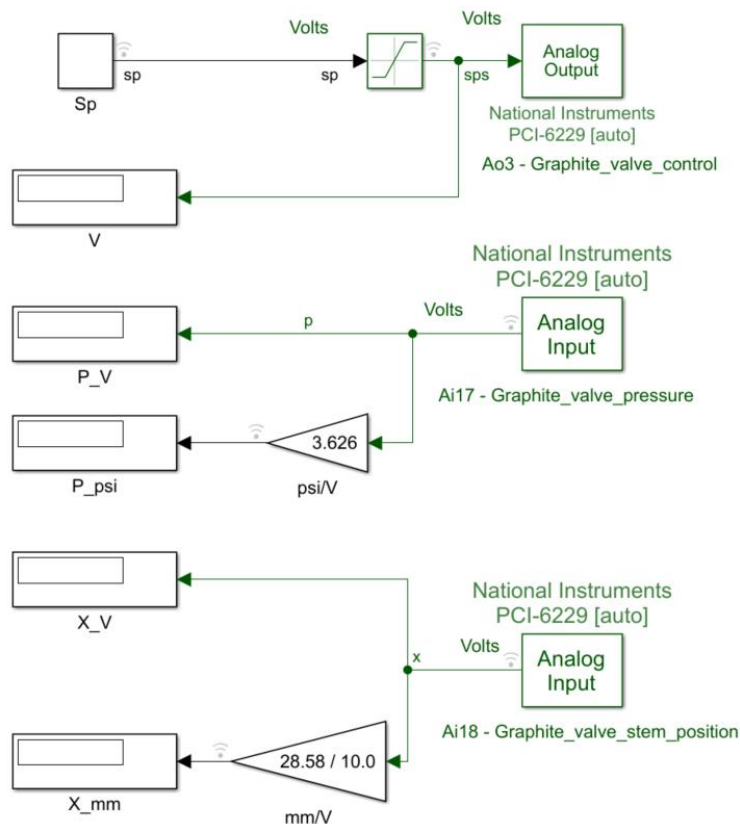


Fig. 4.7 – Diagrama de ensaios em malha aberta.

Fonte: Autor.

Para a sintonia do PID, estima-se um modelo aproximado do conjunto atuador $V \rightarrow I \rightarrow P$ e válvula FV-11, inicialmente como dois modelos de 1ª ordem em série, o que poderia gerar um modelo de 2ª ordem superamortecido com tempo morto.

$$G_a = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \quad (4.6)$$

$$G_v = \frac{k_2 e^{-\theta s}}{\tau_2 s + 1} \quad (4.7)$$

$$G_a G_v = \frac{k_1 k_2 e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (4.8)$$

Sendo G_a o ganho do atuador, e G_v o ganho da válvula. Assim, o objetivo seria obter k_1 , k_2 , τ_1 , τ_2 e θ .

Porém, o ensaio revelou um modelo muito aproximado a um sistema de 1ª ordem com tempo morto:

$$G_a G_v = \frac{k e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (4.9)$$

Como o PID irá operar com a medida de posição em Volts e não em mm, a seguinte curva de reação foi obtida e usada na obtenção dos parâmetros k , τ e θ (Fig. 4.8).

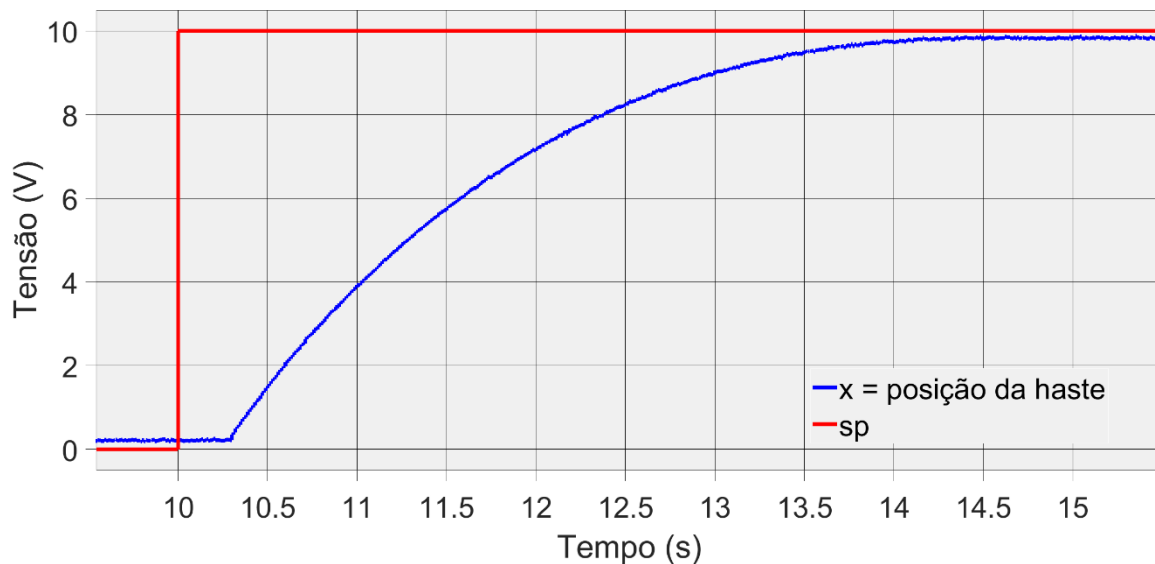


Fig. 4.8 – Curva de reação – conjunto Atuador V//P + Válvula FV-11.

Fonte: Autor.

Observa-se:

$$k \cong 0,983$$

$$\tau \cong 1,38 \text{ seg}$$

$$\theta \cong 0,3 \text{ seg}$$

Logo:

$$G_a G_v = \frac{0,983 e^{-0,3s}}{1,38s + 1} \quad (4.10)$$

Foram usados três métodos de sintonia, o da curva de reação de Ziegler Nichols, Síntese Direta e SIMC – *Simple Internal Model Control*, descritos em [GARCIA \(2017\)](#).

Adicionalmente, para efeito de comparação, foi obtida a sintonia para o método das Oscilações Contínuas de Ziegler Nichols, que, por ser um método com ensaio em malha fechada (que não é o caso), usou um recurso de estimação analítica de K_{cu} e P_u (ganho e período críticos).

Os resultados das sintonias são mostrados a seguir. Os parâmetros do controlador PID são: K_c = ganho proporcional; T_i = tempo integral; T_d = tempo derivativo.

- Curva de reação de Ziegler Nichols

$K_c = 5,62$; $T_i = 0,6$ seg; $T_d = 0,15$ seg.

- Síntese direta e SIMC

$K_c = 2,34$; $T_i = 1,38$ seg; $T_d = 0$ seg.

- Oscilações contínuas de Ziegler Nichols (apenas para comparação)

$K_c = 6,22$; $T_i = 0,427$ seg; $T_d = 0,107$ seg.

O segundo ensaio preliminar consistiu, novamente, na excitação da válvula FV-11 em malha aberta, porém, com o intuito de se evidenciar pontos de inflexão que permitam a extração de dados para o cálculo dos parâmetros S e J atuais. A ideia é comparar os novos valores aos de referência de [HIDALGO \(2015\)](#), justificando-se eventuais diferenças, a principal por provável envelhecimento da válvula. Com os valores atualizados de S e J , foi feito também o cálculo da constante elástica K teórica da válvula. Os compensadores CR2 e ISMC têm a sua parametrização baseada nesses índices. O diagrama Simulink é basicamente o mesmo do ensaio de sintonia do PID, somente o sinal de *set point* (excitação) é construído de maneira diferente, colocado na Figura 4.9.

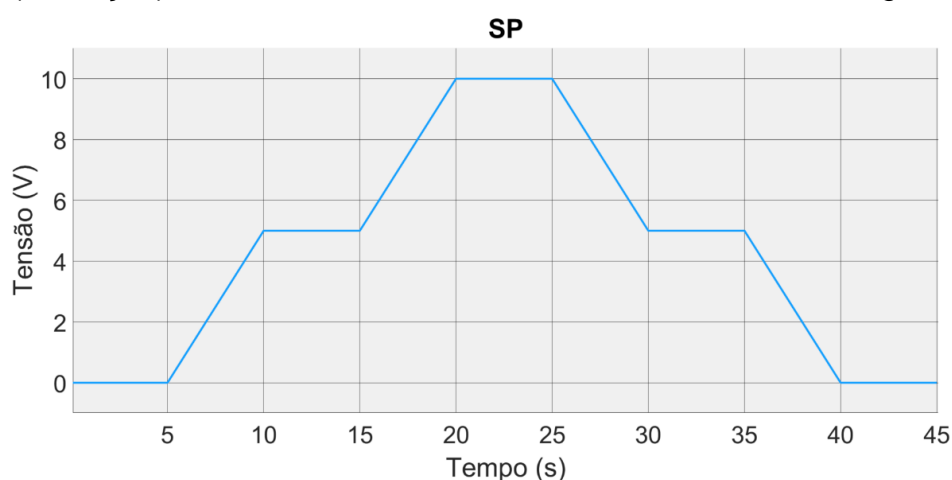


Fig. 4.9 – Set point para obtenção dos parâmetros S e J da Válvula FV-11.

Fonte: Autor.

O resultado para as curvas de pressão (entrada pós conversor V/I/P) e posição da haste (saída) são mostradas na Fig. 4.10. A correspondente curva de assinatura da válvula é exibida na Fig. 4.11.

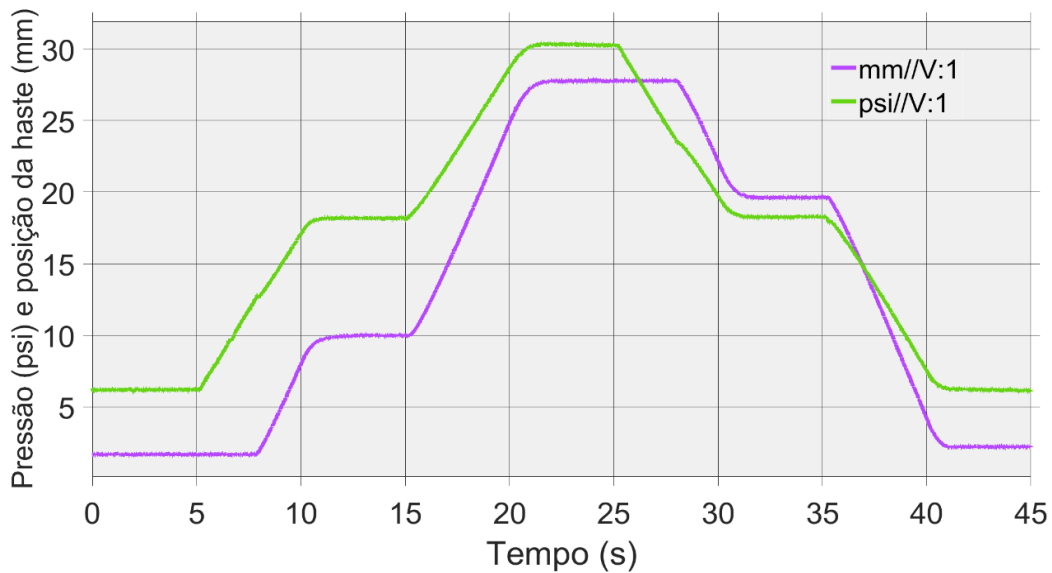


Fig. 4.10 – Excitação em malha aberta - Válvula FV-11 – Obtenção de S e J.

Fonte: Autor.

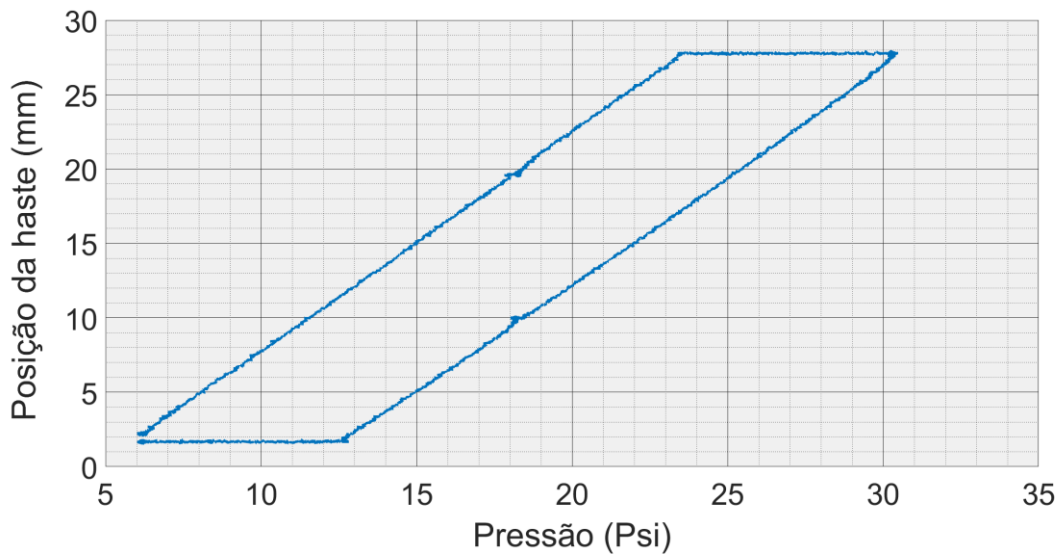


Fig. 4.11 – Curva de assinatura da válvula FV-11.

Fonte: Autor.

Para J , observam-se as janelas de variação de pressão antes do início do movimento da válvula, no mesmo sentido anterior. Para S , observam-se as janelas de variação de pressão antes do início do movimento da válvula, mas no sentido contrário ao anterior. Assim, definem-se:

$$\Delta P_{total} \cong 24 \text{ psi}$$

ΔP_1 = variação de pressão sem movimento da haste, para mudança de sentido de movimento. Observar intervalo entre 25 e 28 segundos na Fig. 4.10.

ΔP_2 = variação de pressão sem movimento da haste, sem mudança de sentido de movimento. Sentido de fechamento da válvula. Observar intervalo entre 15 e 16 segundos

na Fig. 4.10. Pressão aproximada de 18 psi (ascendente) e posição da haste aproximada de 10 mm na Fig. 4.11.

ΔP_3 = variação de pressão sem movimento da haste, sem mudança de sentido de movimento. Sentido de abertura da válvula. Observar intervalo entre 35 e 36 segundos na Fig. 4.10. Pressão aproximada de 18 psi (descendente) e posição da haste aproximada de 20 mm na Fig. 4.11.

Dessa forma, tem-se:

$$J \cong \frac{\Delta P_2}{\Delta P_{total}} = \frac{(18.5-18.2)}{(30.3-6.2)} = 1,24\% \quad (4.11)$$

$$J \cong \frac{\Delta P_3}{\Delta P_{total}} = \frac{(18.3-18.0)}{(30.3-6.2)} = 1,24\% \quad (4.12)$$

$$S \cong \frac{\Delta P_1}{\Delta P_{total}} = \frac{(30.3-23.5)}{(30.3-6.2)} = 28,22\% \quad (4.13)$$

Como a variação total de pressão é 24 psi, e com base nos dados gráficos das Figuras 4.10 e 4.11, tem-se que $J = 1,24\%$, ante $1,6\%$ em [HIDALGO \(2015\)](#) e $S = 28,22\%$, ante $18,01\%$ em [HIDALGO \(2015\)](#). A atualização dos demais parâmetros decorrentes de S e J é mostrada no capítulo seguinte, dos algoritmos CR2 e ISMC.

5 Algoritmos de compensação de atrito na válvula

5.1 Algoritmo CR2 – *Constant Reinforcement 2*

O algoritmo CR2 foi apresentado por [IVAN e LAKSHMINARAYANAN \(2009\)](#), derivado do algoritmo CR proposto em [HÄGGLUND \(2002\)](#). Os trabalhos de [SILVA \(2013\)](#) e [HIDALGO \(2015\)](#) fizeram uma ampla avaliação desse algoritmo, que pode ser considerado de fácil implementação. A ideia central do CR2 é gerar uma contribuição adicional do esforço de controle, atuando em paralelo com o controlador principal e, assim, reduzir os efeitos gerados pelo atrito na válvula, como visto na Figura 5.1.

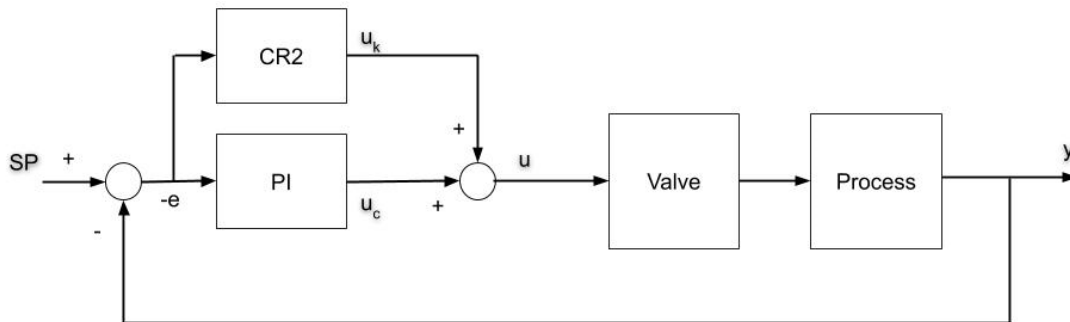


Fig. 5.1 - Malha com compensador CR2 inserido.

Fonte: Autor.

O algoritmo CR2 é definido pela equação a seguir:

$$u_k(t) = \frac{S}{2} \operatorname{sgn}(e(t)), \quad (5.1)$$

onde:

$$e = y - SP, \quad (5.2)$$

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & \text{se } x < 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ 1, & \text{se } x > 0 \end{cases}, \quad (5.3)$$

sendo $S = 28,22\%$, para a válvula de grafite FV-11, segundo o modelo de Kano ([KANO et al., 2004](#)) e avalizado por [GARCIA \(2008\)](#) e [SILVA \(2013\)](#). Além disso, há um complemento, que é a lógica de desabilitação do compensador (CF – comentado adiante). Para um certo limite do sinal de erro, a saída do compensador é congelada, evitando oscilações no esforço de controle, que tendem a gerar acionamentos desnecessários na válvula. Como já comentado, originalmente essa lógica foi aplicada tanto ao compensador CR2 como ao controlador principal da malha. Para evitar intervenções na malha principal, a lógica de desabilitação será aplicada apenas ao compensador CR2.

A respeito do algoritmo CR2, é importante explicar o seguinte: é um compensador que se encontra na malha externa, auxiliando o controle principal dessa malha. Ele não

tem relação com um posicionador, o qual se encontra na malha interna. Salienta-se, ainda, que existe uma dificuldade, na prática, de acesso aos sinais necessários para a operação do CR2, a saber: o erro de vazão (ou o erro da variável controlada externa que seja) e uma entrada para receber a saída do compensador CR2. Essa dificuldade fica mais evidente quando os sinais mencionados, no posicionador, são analógicos e dependem de fiação específica.

Outro ponto a comentar é o fato de que o complemento do algoritmo CR2, chamado de *Control Freezing* (CF), ou congelamento do controle, é originalmente também aplicado ao controlador principal da malha externa. Isso exigiria uma intervenção direta na malha principal, o que, definitivamente, não é o papel de um posicionador de válvula. Nesse trabalho, a funcionalidade *Control Freezing* foi implementada apenas no âmbito do compensador CR2. Apesar dos pontos mencionados, e pela relevância dos resultados obtidos com o CR2 em trabalhos anteriores, este foi incluído como algoritmo a ser testado e embarcado, sempre garantindo-se as ressalvas mencionadas.

Define-se um erro máximo aceitável δ (por exemplo: 3 % da vazão máxima), bem como os tempos de observação para decisão de congelamento e descongelamento (T_i e T_o , respectivamente). A partir daí, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } |e| \leq \delta \text{ por } T_i \text{ segundos} \rightarrow u_k(t) = cte \\ \text{Se } |e| > \delta \text{ por } T_o \text{ segundos} \rightarrow u_k(t) = \text{algoritmo CR2} \end{array} \right\} \quad (5.4)$$

Valores típicos para os tempos de observação são $T_i = 2$ s e $T_o = 5$ s ([HIDALGO, 2015](#)). Esses valores dependem da dinâmica da malha de controle, e foram definidos especificamente para a malha de vazão do LCPI.

Na Fig. 5.2 é mostrado o fluxograma do algoritmo CR2. A flag f_{cong} é um marcador de estado de congelamento (*Control Freezing* – CF).

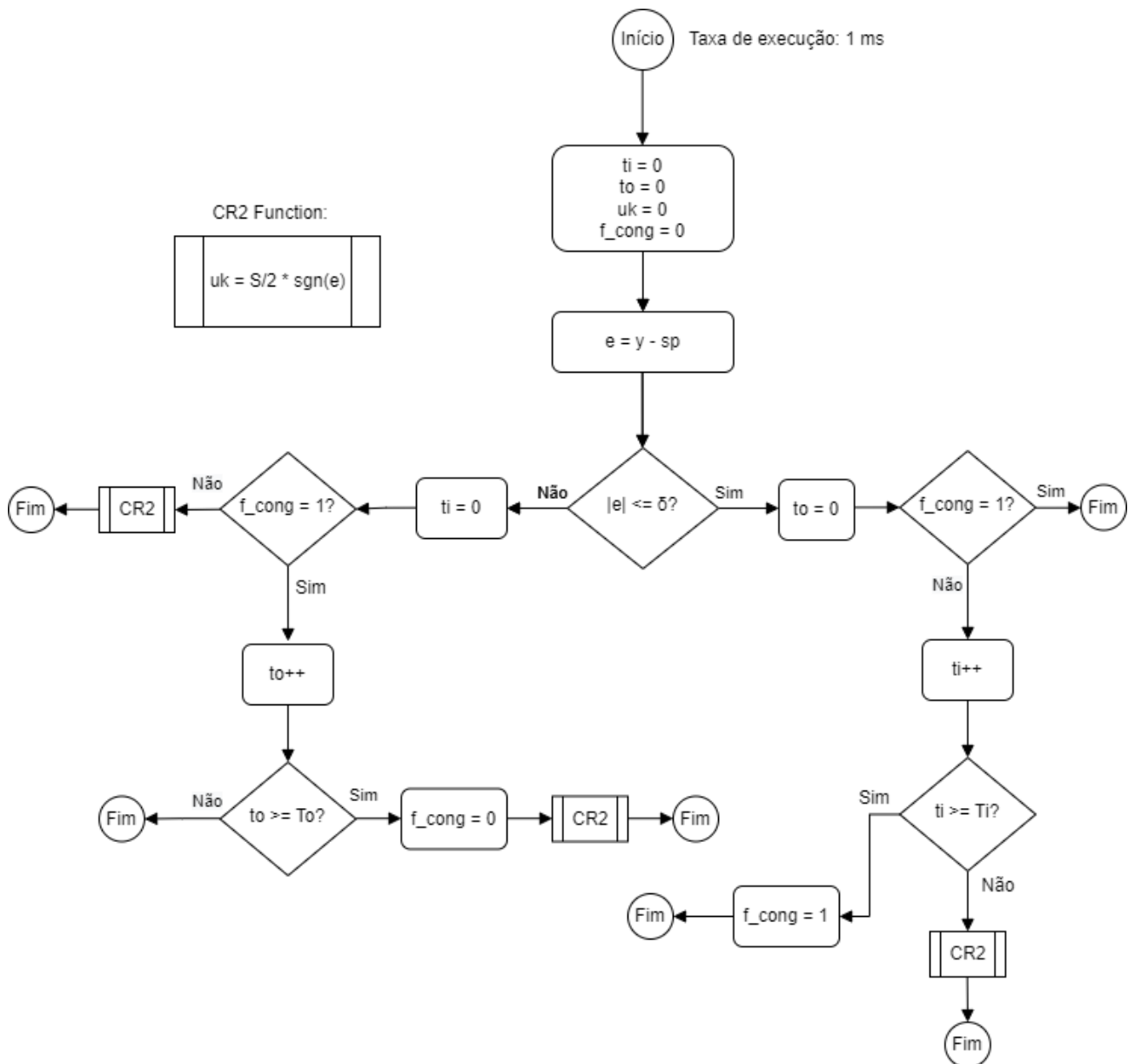


Fig. 5.2 – Fluxograma do Algoritmo CR2.

Fonte: Autor.

Na Figura 5.3 é mostrado um diagrama de blocos ilustrando o “posicionador” CR2, que, na verdade, é um compensador que atua na malha externa.

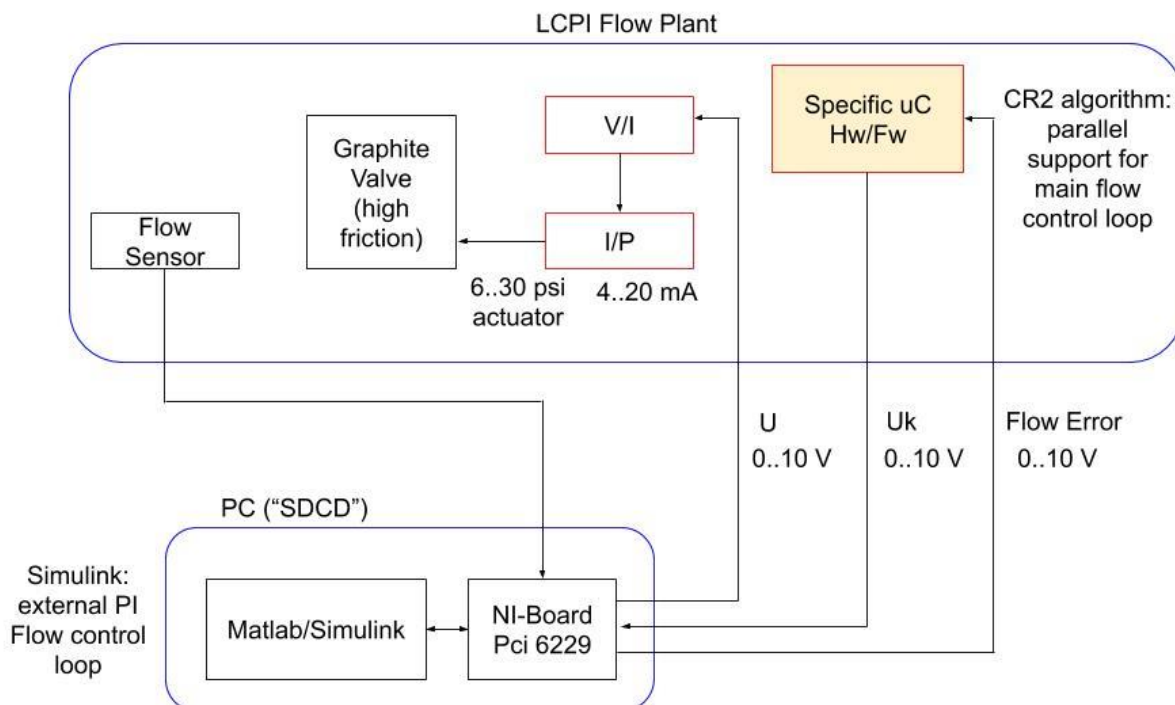


Fig. 5.3 - Diagrama de interligações - Compensador CR2.

Fonte: Autor.

Note que na Fig. 5.3 o compensador CR2 não tem nada a ver com um posicionador, pois nem recebe o sinal de saída do controlador de vazão. Para uma topologia autônoma de posicionador, ele deverá acessar duas informações oriundas da malha externa de controle: o erro de vazão e a saída do controlador primário de vazão. O sinal (u_c), somado ao esforço paralelo gerado pelo posicionador (u_k) já é o *set point* da malha interna do posicionador. Isso é o que poderia ser considerado um *Algoritmo PID + CR2 em cascata*, como ilustram as Figuras 5.4 e 5.5.

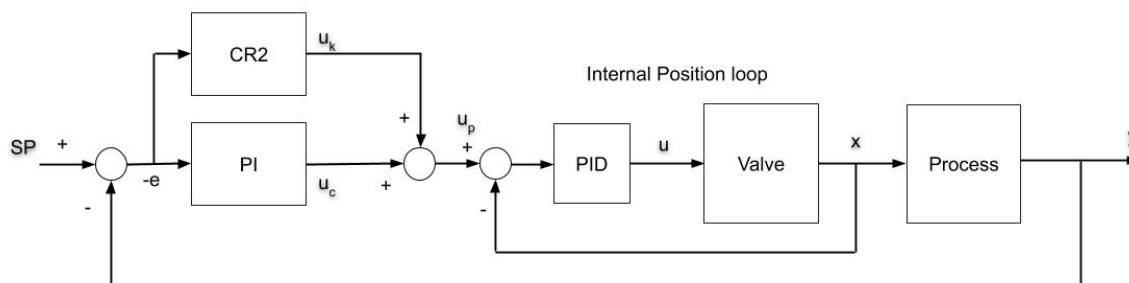


Fig. 5.4 - Controle com algoritmo PID + CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

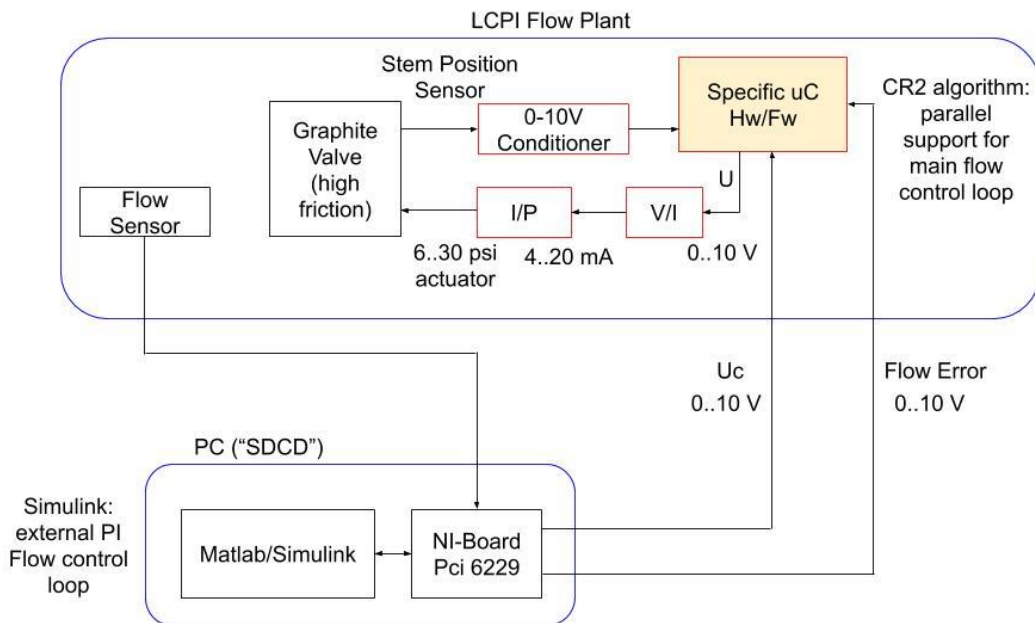


Fig. 5.5 - Diagrama de interligações – Posicionador + Compensador CR2 em cascata.
Fonte: Autor.

Não é demais ressaltar novamente que o uso do CR2, escolhido a partir dos melhores desempenhos em trabalhos anteriores, apresenta certa dificuldade em se ter disponível o sinal de erro da malha externa de vazão, para casos reais na indústria, especialmente para interfaces analógicas com cabeamento individual por sinal. No caso do CR2 puro, há ainda a dificuldade adicional de se ter uma entrada no controlador principal para a injeção do esforço paralelo u_k . Ou seja, o CR2 é um algoritmo que atua junto à malha externa de controle, não fazendo parte de um posicionador (malha interna).

Além disso, o algoritmo *Control Freezing* (CF) atua, originalmente, no corte da ação integral do controlador da malha externa, e não apenas no corte do esforço de controle u_k . Isso é importante para o aumento da margem de estabilidade da malha. No caso da configuração cascata, com PID na malha interna, haveria uma possibilidade de se aplicar o CF também à ação integral do PID, pelo mesmo motivo anterior.

Uma outra possibilidade, também não realizada nesse trabalho, é a implementação do algoritmo CR2 + CF diretamente na malha interna, sem a dependência de sinais da malha externa.

5.2 Algoritmo ISMC – *Integrative Sliding Mode Controller*

5.2.1 Descrição

O algoritmo ISMC – *Integrative Sliding Mode Controller* (Modos Deslizantes com Integrador) foi detalhado em [BAEZA \(2013\)](#), baseado nos fundamentos originalmente defini-

dos em [SLOTINE e LI \(1991\)](#). É uma técnica de controle não linear, que visa essencialmente fazer com que a lei de controle consiga atingir uma região de estabilidade e rastreamento chamada superfície de escorregamento e ali se manter com mínima oscilação (*chattering*) possível. Ele deve ser projetado em modo contínuo e depois discretizado. Não se pode usar o modelo de estimação de atrito de [KANO et al. \(2004\)](#), pois no ISMC é preciso derivar a saída m vezes até obter a entrada e o modelo de Kano é descontínuo. Segue o diagrama de blocos da malha de controle com o compensador ISMC. Note que a topologia é do tipo controle em cascata, conforme a Figura 5.6.

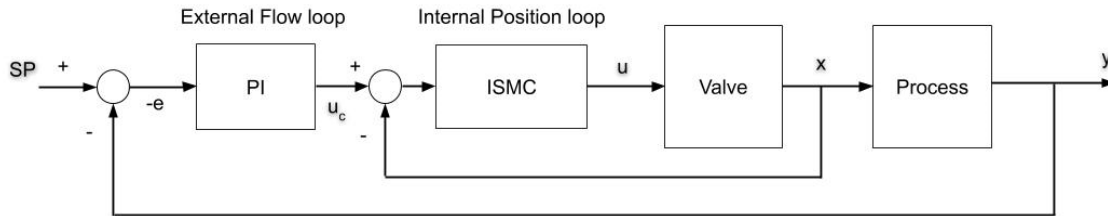


Fig. 5.6 - Malha com compensador ISMC inserido.

Fonte: Autor.

Sendo $u(t)$ a saída do controlador aplicada ao conjunto atuador (válvula) + processo, o conceito de modos deslizantes é dado por:

$$u(t) = -sgn[s(y, t)], \quad (5.5)$$

onde:

$$sgn(x) = \begin{cases} -1, & \text{se } x < 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ 1, & \text{se } x > 0 \end{cases}, \quad (5.6)$$

sendo $s(y, t)$ a superfície de escorregamento, dada pela expressão:

$$s(y, t) = my(t) + \dot{y}(t). \quad (5.7)$$

O erro é dado por:

$$\tilde{y} = y - y_{SP}. \quad (5.8)$$

Propõe-se como superfície de escorregamento ([SLOTINE; LI, 1991](#)):

$$s(y, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{y}, \quad (5.9)$$

sendo:

λ = parâmetro de projeto, positivo;

n = ordem do sistema.

Percebe-se que a superfície de escorregamento é uma equação dinâmica do erro de rastreamento ([BAEZA, 2013](#)).

A lei de controle é resolvida para:

$$\dot{s} = 0, \quad (5.10)$$

obtendo-se $u_{eq} \triangleq$ controle equivalente.

Porém, por imprecisões, tem-se \hat{u} apenas, que é a parcela contínua da lei de controle de melhor aproximação ([BAEZA, 2013](#)). Adicionando-se a parcela descontínua, obtém-se:

$$u = \hat{u} - k_c \text{sgn}(s), \quad (5.11)$$

sendo $k_c \triangleq$ ganho de projeto, positivo.

Como a frequência de chaveamento não é infinita, ocorre o *chattering*. Alterando-se a lei de controle para reduzir o *chattering*, tem-se:

$$u = \hat{u} - k_c \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right), \quad (5.12)$$

onde:

sat é a função saturação:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\phi}, & \text{se } \left|\frac{s}{\phi}\right| < 1 \\ 1, & \text{se } \frac{s}{\phi} \geq 1 \\ -1, & \text{se } \frac{s}{\phi} \leq -1 \end{cases}; \quad (5.13)$$

ϕ = camada limite, sempre positiva.

Devido a erros em regime permanente, propôs-se ([SLOTINE; LI, 1991](#)):

$$s(y, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int_0^t \tilde{y} dt, \quad (5.14)$$

a qual é a equação base de modos deslizantes com integrador. Os parâmetros de projeto do controlador ISMC são:

λ = parâmetro de sintonia do controlador \rightarrow [adimensional];

k_c = ganho do controlador \rightarrow [%];

ϕ = parâmetro de redução do *chattering* \rightarrow [%].

As seguintes restrições devem ser observadas para o parâmetro λ :

$$\lambda \leq \lambda_R \simeq \frac{2\pi}{3} f_R, \quad (5.15)$$

$$\lambda \leq \lambda_N \simeq \frac{1}{3t_N}, \quad (5.16)$$

$$\lambda \leq \lambda_A \simeq \frac{f_A}{5}, \quad (5.17)$$

$$\lambda \leq \min(\lambda_R, \lambda_N, \lambda_A), \quad (5.18)$$

sendo:

f_R = frequência do menor modo ressonante não modelado;

t_N = maior tempo morto não modelado;

f_A = frequência de amostragem do sistema.

k_c representa um ganho de correção dos erros de modelagem do sistema. Quanto maior o seu valor, mais rápido esses erros são corrigidos. Já ϕ está relacionado aos chaveamentos da lei de controle. Quanto maior o valor de ϕ , menos chaveamentos ocorre-

rão, ou seja, mais suave é a trajetória. Entretanto, se muito alto, pode-se descaracterizar o modo deslizante. Quanto mais baixo ϕ , maior o chaveamento (*chattering*).

5.2.2 Projeto do controlador ISMC

A dinâmica do conjunto de conversão da saída do controlador para o atuador ($\% \rightarrow V \rightarrow I \rightarrow P$) é dada por [HIDALGO et al. \(2019\)](#):

$$G_{\%P}(s) = \frac{(K_{\%i}K_{ip})(0,25s+1)}{(0,7692s+1)(0,0833s+1)^2}, \quad (5.19)$$

sendo:

$$k_p = K_{\%i}K_{ip} = 1378,95 \text{ Pa}/\%.$$

Deve-se explicar a questão da modelagem do atuador. O projeto atual do ISMC foi baseado na escolha do modelo de ganho estático do atuador, desprezando a sua dinâmica. Em ensaio realizado, foi obtido um modelo aproximado de 1ª ordem sem tempo morto.

$$G_{\%P}(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} \quad (5.20)$$

sendo $\tau = 1,25$ seg.

Se levássemos em conta esse modelo ensaiado, seria preciso reprojeter o controlador ISMC. Como esse não é o enfoque deste trabalho, foi mantido o modelo estático do atuador. Além disso, o valor de k_p usado em [HIDALGO et al. \(2019\)](#) baseia-se em $\Delta_p máx = 20$ psi ou 2 psi/V ou $0,2 \text{ psi} \div 0,1 \text{ V} = 0,2 \text{ psi}/\%$. Como o valor $\Delta_p máx = 24$ psi, equivalente a 2,4 psi/V foi confirmado por ensaios, optamos por atualizar o valor de k_p para:

$$k_p = K_{\%i}K_{ip} = 1654,74 \text{ Pa}/\%.$$

Já o modelo de atrito da válvula de grafite FV-11 é definido por [HIDALGO \(2015\)](#):

$$F_{at} = \left[F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{x}}{v_s}\right)^2} \right] \tanh(\sigma \dot{x}), \quad (5.21)$$

sendo:

σ = parâmetro de projeto, = 10000 (adim.);

\dot{x} = velocidade da haste da válvula;

F_c = coeficiente de atrito de Coulomb = 993,35 N;

F_s = coeficiente de atrito estático = 1084,66 N;

v_s = velocidade de Stribeck = $2,54 \times 10^{-4}$ m/s.

O modelo de linearização do processo é dado por:

$$m\ddot{x} = k_p S_a u - Kx - F_{at}. \quad (5.22)$$

Logo:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{k_p S_a}{m} u - \frac{F_{at}}{m} - \frac{Kx_1}{m}, \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5.23)$$

onde:

x_2 = velocidade da haste;

$y = x_1$ = posição da haste;

K = constante elástica da mola do atuador = 176643,91 N/m;

m = massa das partes móveis da válvula = 1,6 kg;

$k_p = K_{\%i} \cdot K_{ip}$ = ganho da tradução % \rightarrow V \rightarrow I \rightarrow P, estático, = 1654,74 Pa/%;

u = sinal de controle, de 0 a 100 %;

S_a = área da seção transversal do atuador = 445 cm².

Conforme já visto, os ensaios de modelagem da válvula FV-11 permitiram obter os parâmetros S e J . É possível obter-se F_s e F_c através das expressões ([UEHARA, 2009](#)):

$$F_s = \frac{(S+J)S_a\Delta_p máx}{2} \quad (5.24)$$

$$F_c = \frac{(S-J)S_a\Delta_p máx}{2} \quad (5.25)$$

Sendo $\Delta_p máx = 24$ psi, visto que a faixa útil de atuação da válvula (6 ~ 30 psi). Assim, para os valores oriundos de [HIDALGO \(2015\)](#) de $S = 18,01$ % e $J = 1,6$ %, tem-se que:

$$F_s = 722 \text{ N}$$

$$F_c = 604,18 \text{ N}$$

Para os novos ensaios realizados obteve-se $S = 28,22$ % e $J = 1,24$ %, gerando-se:

$$F_s = 1084,66 \text{ N}$$

$$F_c = 993,35 \text{ N}$$

Considerando-se a pressão de fechamento total da válvula como $P_{closed} = 30$ psi e a excursão total da haste $x_{máx} = 28,58$ mm, a constante elástica da mola fica $K = 176643,91$ N/m, conforme [HIDALGO \(2015\)](#). O valor anterior era $K = 210490$ N/m. Observar que, nesse caso, o grau = ordem do sistema = $n = 2$.

A lei de controle linearizante é dada por:

$$u = \frac{1}{k_p S_a} (Kx_1 + F_{at}). \quad (5.26)$$

Sendo a superfície de escorregamento definida por (da Equação 5.13):

$$s(y, t) = \frac{d\tilde{y}}{dt} + 2\lambda\tilde{y} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{y} dt. \quad (5.27)$$

Tem-se a lei de controle equivalente:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= 0, \\ \hat{u} &= \frac{1}{k_p S_a} (Kx_1 + F_{at}) + \frac{m}{k_p S_a} \left(\frac{d^2 y_{sp}}{dt^2} - 2\lambda \frac{d\tilde{y}}{dt} - \lambda^2 \tilde{y} \right), \end{aligned} \quad (5.28)$$

onde:

y_{sp} = set point de posicionamento;

$\tilde{y} = y - y_{sp}$ = erro de posicionamento.

Recordando-se, pela Equação (5.12), da lei de controle final ([SLOTINE; LI, 1991](#)):

$$u = \hat{u} - k_c \text{sat} \left(\frac{s}{\phi} \right).$$

Tem-se como sugestão preliminar de sintonia do controlador ([HIDALGO et al., 2019](#)):

$\lambda \rightarrow [\text{adimensional}] = 1,0$;

$k_c \rightarrow [\%] = 36,12 \%$;

$\phi \rightarrow [\%] = 3,5 \%$.

Reescrevendo-se a lei de controle equivalente tem-se:

$$\hat{u}(t) = \frac{1}{k_p s_a} (Ky + F_{at}) + \frac{m}{k_p s_a} (y_{sp}^{\cdot\cdot} - 2\lambda\dot{\tilde{y}} - \lambda^2\tilde{y}). \quad (5.29)$$

Por clareza notacional, adota-se:

$$\hat{u}(t) = \hat{u}_1(t) + \hat{u}_2(t). \quad (5.30)$$

Sendo, portanto:

$$\hat{u}_1(t) = \frac{1}{k_p s_a} (Ky + F_{at}), \quad (5.31)$$

$$\hat{u}_2(t) = \frac{m}{k_p s_a} (y_{sp}^{\cdot\cdot} - 2\lambda\dot{\tilde{y}} - \lambda^2\tilde{y}). \quad (5.32)$$

A sintonia do controlador, dada por k_c , é feita a partir da regra ([SLOTINE; LI, 1991](#)):

$$k_c \geq F + \eta, \quad (5.33)$$

sendo:

F = módulo do erro de modelagem na linearização da planta;

η = parâmetro associado ao instante em que a superfície de escorregamento torna-se nula, para uma condição inicial.

Baseado em [HIDALGO e GARCIA \(2017\)](#), adota-se $F = 32,12 \%$. Esse valor é suposto constante para o cálculo computacional, sendo 32,12% o pior caso. O termo η é dado por:

$$t_r \leq \frac{s(0)}{\eta}. \quad (5.34)$$

Adotando-se um *set point* fixo e erro inicial de 50 %, com derivada inicial do erro nula, vemos, para $\lambda = 1$, que $s(0) = 1$. Com um tempo t_r , para zerar o escorregamento, de 25 s, obtido experimentalmente, tem-se $\eta = 4 \%$. Logo, $k_c \geq 36,12 \%$.

A regra do *Sliding Mode Controller* (SMC) para o termo ϕ é:

$$\tilde{y} \leq \frac{\phi}{\lambda}. \quad (5.35)$$

O termo integral (ISMC) vai zerar o erro estacionário, mas sabendo que a excursão total da haste da válvula é de 28,58 mm e adotando-se como erro máximo:

$$\tilde{y}_{max} = \frac{1 \text{ mm}}{28.58 \text{ mm}} = 3,5 \%,$$

Obtém-se, para $\lambda = 1$, $\phi = 3,5 \%$.

Feita a atualização dos parâmetros do conjunto atuador + válvula, é prudente usar esses parâmetros atualizados para rever a sintonia do controlador ISMC. Assim, a partir de [HIDALGO et al. \(2019\)](#) e mantendo-se $\lambda = 1$ e $\phi = 3,5 \%$, obtém-se $k_c \geq 50,17 \%$. Adotou-se $k_c = 50,17 \%$, pois essa sintonia se mostrou mais eficiente, nos ensaios, em relação à original, de $k_c = 36,12 \%$.

Para o processo de discretização do controlador, o intervalo de amostragem deve ser, naturalmente, menor que a menor constante de tempo do sistema. No caso, essa menor constante de tempo é 83,3 ms para o conversor $V \rightarrow I \rightarrow P$. São propostos dois intervalos de amostragem, um mais conservador, $T_s = 10$ ms, e outro mais agressivo, $T_s = 1$ ms. Na prática, a execução do algoritmo de controle deve ser feita, no máximo, em T_s segundos.

O termo integral discretizado por Tustin é obtido a partir de [ANGÉLICO \(2016\)](#):

$$s = \frac{2(z-1)}{T_s(z+1)}. \quad (5.36)$$

Logo, para $T_s = 10$ ms,

$$I(s) = \frac{1}{s} = \frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} \Rightarrow I(z) = 0.005 \frac{(z+1)}{(z-1)} = 0.005 \frac{(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})}. \quad (5.37)$$

A obtenção do termo derivativo, com polo limitador, via Tustin, é dada por:

$$D(s) = \frac{s}{0.08s+1} \Rightarrow D(z) = \frac{11.76(z-1)}{z-0.8824} = \frac{11.76(1-z^{-1})}{1-0.8824z^{-1}}. \quad (5.38)$$

Já para $T_s = 1$ ms,

$$I(s) = \frac{1}{s} = \frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} \Rightarrow I(z) = 0.0005 \frac{(z+1)}{(z-1)} = 0.0005 \frac{(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})}. \quad (5.39)$$

$$D(s) = \frac{s}{0.08s+1} \Rightarrow D(z) = \frac{12.42(z-1)}{z-0.9876} = \frac{12.42(1-z^{-1})}{1-0.9876z^{-1}}. \quad (5.40)$$

Conforme as equações 5.37 à 5.40, observa-se na Tabela 5.1 a parametrização p_1 , p_2 , p_3 , em função de T_s . Os termos $p_1 \cdot p_3$ são usados na descrição genérica das equações de diferença a seguir.

Tabela 5.1 - Parametrização da discretização do controlador ISMC em função de T_s .

Parâmetro	$T_s = 10$ ms	$T_s = 1$ ms
p_1	0.005	0.0005
p_2	11.76	12.42
p_3	0.8824	0.9876

Fonte: Autor.

Assim, é possível definir-se as equações de diferença. Sendo as entradas: $y[n]$, $y_{SP}[n]$, o erro é dado por:

$$\tilde{y}[n] = y[n] - y_{SP}[n]. \quad (5.41)$$

A partir de $D(z)$, tem-se:

$$\tilde{y}_{der}[n] = p_3 \tilde{y}_{der}[n-1] + p_2 (\tilde{y}[n] - \tilde{y}[n-1]). \quad (5.42)$$

$$y_{der}[n] = p_3 y_{der}[n-1] + p_2 (y[n] - y[n-1]). \quad (5.43)$$

$$y_{SPder}[n] = y_{der}[n] - \tilde{y}_{der}[n]. \quad (5.44)$$

$$y_{SPder^2}[n] = p_3 y_{SPder^2}[n-1] + p_2 (y_{SPder}[n] - y_{SPder}[n-1]). \quad (5.45)$$

A partir de $I(z)$, tem-se:

$$\tilde{y}_{int}[n] = \tilde{y}_{int}[n-1] + p_1 (\tilde{y}[n] + \tilde{y}[n-1]). \quad (5.46)$$

Portanto, a superfície de escorregamento pode ser discretizada por:

$$s[n] = \tilde{y}_{der}[n] + 2\lambda \tilde{y}[n] + \lambda^2 \tilde{y}_{int}[n]. \quad (5.47)$$

Como a lei de controle é dada por:

$$\hat{u}[n] = \hat{u}_1[n] + \hat{u}_2[n], \quad (5.48)$$

Tem-se:

$$\hat{u}_1[n] = \frac{1}{k_p S_a} \left\{ K y[n] + \left[F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{y_{der}[n]}{v_s}\right)^2} \right] \tanh(\sigma y_{der}[n]) \right\}, \quad (5.49)$$

$$\hat{u}_2[n] = \frac{m}{k_p S_a} (y_{SPder^2}[n] - 2\lambda \tilde{y}_{der}[n] - \lambda^2 \tilde{y}[n]), \quad (5.50)$$

$$u[n] = \hat{u}[n] - k_c \text{sat} \left(\frac{s[n]}{\phi} \right). \quad (5.51)$$

É desejável que a taxa de execução do algoritmo completo possa estar entre 1 ms e 10 ms, sendo o primeiro valor o ponto de partida do projeto.

A Figura 5.7 ilustra as interligações na malha para o uso do compensador ISMC.

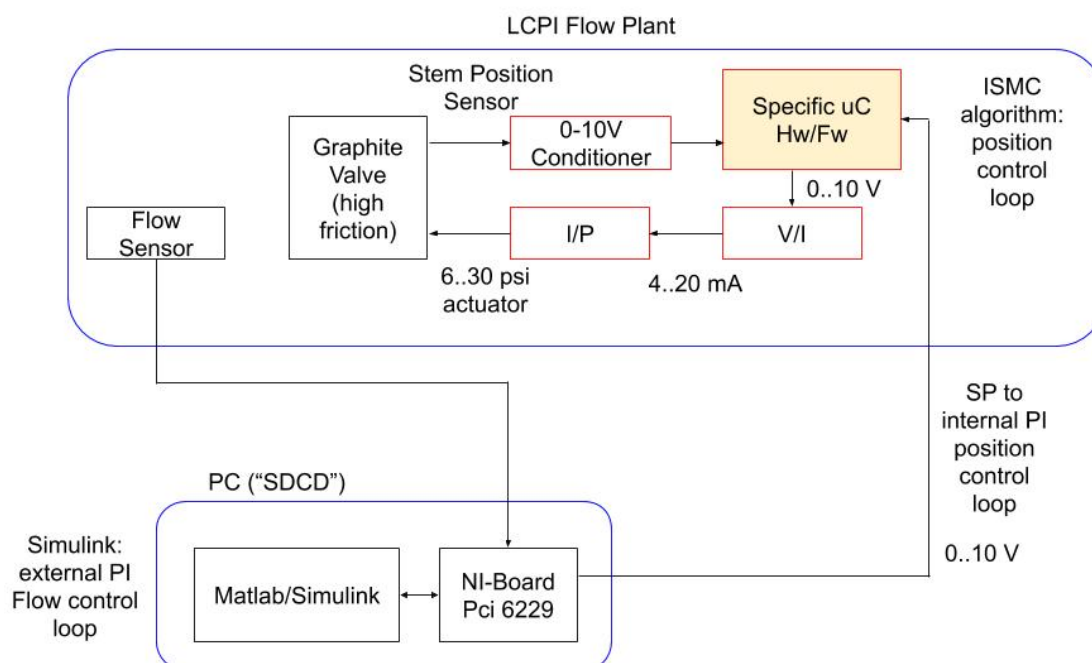


Fig. 5.7 - Diagrama de interligações - Compensador ISMC.

Fonte: Autor.

Como opção adicional de arquitetura, seria possível tentar juntar os algoritmos CR2 e ISMC. Se observarmos o diagrama do algoritmo PID + CR2 em cascata, a malha interna do PID tem a mesma estrutura base da malha interna do ISMC. Assim, o algoritmo extra ISMC + CR2 em cascata poderia ser testado, baseado na fusão conceitual dos diagramas dados pelas Figuras 5.4 e 5.6. É uma arquitetura que é implantada nesta tese, com uma expectativa de bom resultado, uma vez que promove a junção de esforços dos dois algoritmos com melhor desempenho ([HIDALGO, 2015](#)), ainda que não haja nenhuma garantia prévia de sucesso.

6 Estrutura de *hardware & firmware* para a implementação do posicionador digital

6.1 Placa de aquisição de dados NI PCI-6229 - descrição geral

A Planta Piloto de Vazão do LCPI tem duas interfaces de supervisão e controle. Uma é um SDCD, modelo 800xA da ABB™, a outra é um computador com Matlab® e uma placa de aquisição de sinais, modelo PCI-6229 da National Instruments™ ([MESQUITA; DESVAGES, 2018](#)). O SDCD possui I/O's (*Inputs/Outputs*) do tipo *Foundation Fieldbus*®, analógicos e digitais. Uma das ideias iniciais do projeto era que o posicionador tivesse uma interface *Fieldbus*®, tornando-se aplicável em soluções industriais com SDCD. Essa interface deveria ser criada, como parte do projeto de *hardware & firmware* do posicionador. Porém, isso demandaria um desenvolvimento complexo e demorado, tirando o foco do projeto, que são os algoritmos de compensação de atrito embarcados em um *hardware* autônomo. Assim, optou-se por usar ambiente Matlab® ligado à placa de aquisição PCI-6229, cujos sinais de entrada e saída estão conectados aos dispositivos da planta de vazão, tanto quanto o SDCD. Na Figura 6.1 vê-se a placa de aquisição PCI-6229 ([INSTRUMENTS, 2020](#)).

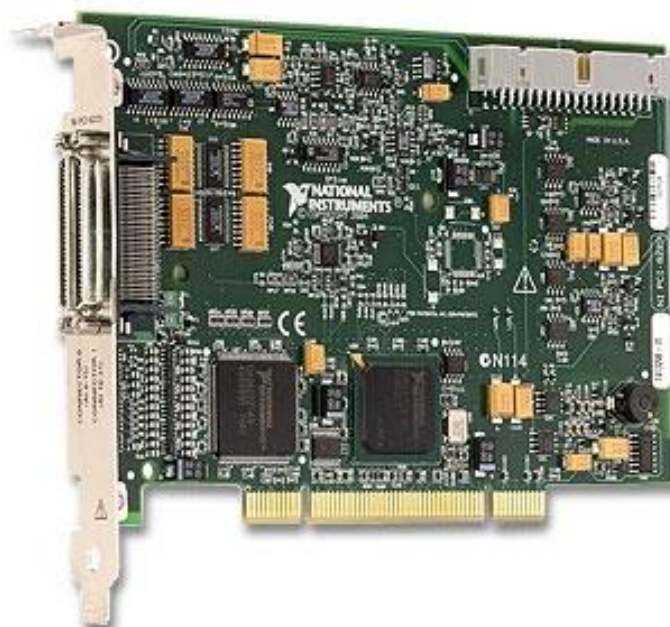


Fig. 6.1 – Placa de aquisição PCI-6229.

Fonte: National Instruments™.

A placa PCI-6229 está configurada para operar com sinais analógicos na faixa de -10 a +10 Vdc. Na prática, a faixa de uso foi de 0 a +10 Vdc, como explanado a seguir. A resolução é de 16 bits e a taxa máxima de amostragem das entradas é 250 k/s e das saídas

é 625 k/s (pior caso, que é o uso simultâneo das 4 saídas analógicas). No total, a placa PCI-6229 possui 32 entradas analógicas, Ai0 a Ai31 e 4 saídas analógicas, Ao0 a Ao3.

Para o projeto em questão, os sinais de interesse são:

- Ai18 – entrada que mede o sensor de posição da haste da válvula de grafite. Uma tensão de 0 V representa posição 0 % (válvula totalmente aberta) e 10 V representa posição 100 % (válvula totalmente fechada);
- Ai21 – entrada que mede o sensor de vazão da planta. Uma tensão de 0 V representa uma vazão de 0 m³/h e 10 V representa uma vazão de 18 m³/h;
- Ai23 – entrada que mede o sinal u_k vindo do posicionador, apenas no caso do compensador CR2 embarcado. Uma tensão de 0 V representa 0 % de esforço u_k e 10 V representa esforço de 100 %;
- Ao1 – saída que envia o erro de vazão (= vazão medida – SP), de 0 a 10 V, para o posicionador, apenas no caso dos compensadores CR2 e CR2 em cascata (com PID e ISMC) embarcados;
- Ao2 – saída para o atuador (V→I→P) da válvula de perturbação (FV-13). Uma tensão de 0 V representa 0 % de atuação, nesse caso válvula totalmente aberta. Uma tensão de 10 V representa 100 % de atuação, ou válvula totalmente fechada;
- Ao3 – saída para o atuador (V→I→P) da válvula de grafite (FV-11). Uma tensão de 0 V representa 0 % de atuação, nesse caso válvula totalmente aberta. Uma tensão de 10 V representa 100 % de atuação, ou válvula totalmente fechada.

6.2 Sistema supervisor – ambiente Matlab/Simulink®

No ambiente Matlab/Simulink®, a placa de aquisição PCI-6229 possui uma interface via *driver* Simulink®, que permite acessá-la via blocos de entrada e saída. Para exemplificar a facilidade de uso, a Figura 6.2 ilustra o acesso à algumas entradas e saídas da PCI-6229 e, portanto, aos periféricos correspondentes da Planta Piloto de Vazão do LCPI.

Uma vez definido o ambiente de desenvolvimento, com acesso aos elementos da planta de vazão, a ideia foi criar diagramas Simulink® para cada caso de interesse. No caso dos algoritmos de compensação de atrito, cada um foi escrito em linguagem Matlab®, dentro do bloco *Matlab Function* do Simulink® e validado sem usar nenhum *hardware* externo. Após uma validação plena em ambiente Matlab/Simulink® puro, os códigos de cada *Matlab Function*, contendo os algoritmos de interesse, foram exportados para código em linguagem C/C++ e importados para a composição do *firmware* do

posicionador embarcado propriamente dito. Finalmente, o *hardware* do posicionador foi inserido na planta de vazão, dentro do conceito *HIL – Hardware In the Loop*, substituindo o bloco *Matlab Function*, em cada diagrama Simulink® de teste.

O diagrama inicial de teste (Fig. 6.3) é composto apenas dos elementos de controle da malha externa de vazão, sem nenhum controle de posição da haste da válvula (malha interna). Para esse diagrama o controlador da malha externa de vazão é um PI digital. Os resultados dos ensaios desse diagrama estão no Cap. 8, apenas para servir de base de referência para avaliação do desempenho dos posicionadores e compensadores testados.

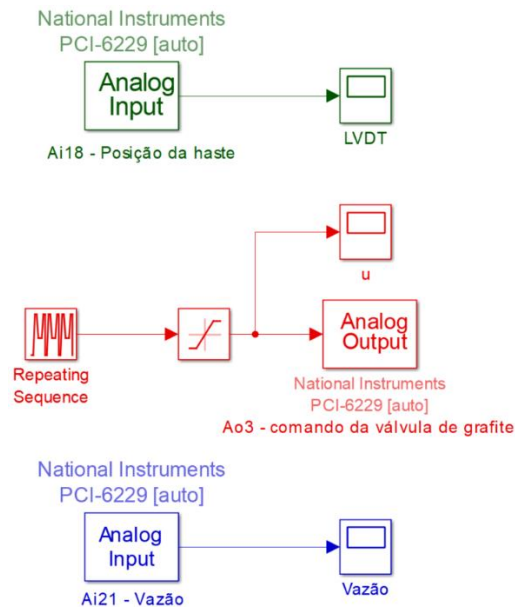


Fig. 6.2 – Diagrama Simulink® - teste da planta em malha aberta.

Fonte: Autor.

A taxa de amostragem foi parametrizada como uma variável ts , em todos os blocos pertinentes do diagrama, e tem valor igual a 10 ms, que foi a mínima taxa executável em computador PC do LCPI. Observar ainda, na Figura 6.3, que a saída do controlador é limitada por um saturador entre 0 e 10 V, que é a faixa útil enviada à saída de controle da válvula de grafite. Para maior segurança de operação da planta, o correto é o saturador permitir uma saída máxima inferior a 10 V, por exemplo, 8,5 V, evitando o estrangulamento completo da malha de vazão.

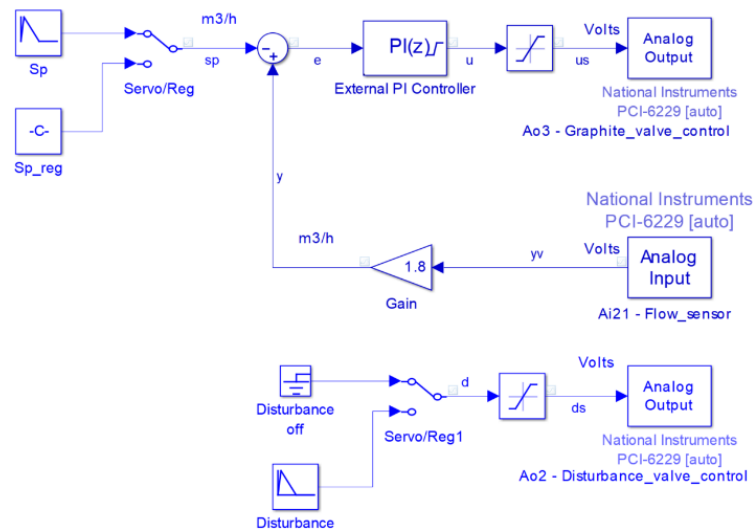


Fig. 6.3 – Diagrama Simulink® - Malha externa com controlador PI (sem posicionador).

Fonte: Autor.

O set point de vazão está entre 0 e 18 m³/h. Na prática, a Planta Piloto de Vazão do LCPI permite atingir vazão máxima em torno de 14 m³/h, mas todos os instrumentos estão calibrados para um fundo de escala de 18 m³/h. A sintonia do controlador PI foi mantida fixa para todos os ensaios, visando comparar o desempenho dos diversos algoritmos de compensação de atrito a serem testados. Sabe-se que a inserção de um 2º controlador (posicionador), em cascata, tende a alterar a dinâmica da malha. Logo, para cada tipo de controlador inserido na malha interna, o mais correto seria reavaliar eventuais alterações na sintonia do PI de vazão. Por simplicidade, não se alterou essa sintonia, cujos valores adotados foram (HIDALGO, 2015):

- $K_c = 0,367$ (adim);
- $T_i = 3,375$ seg.

O diagrama de blocos da Fig. 6.4 ilustra de forma didática a malha de controle de vazão, sem posicionador.

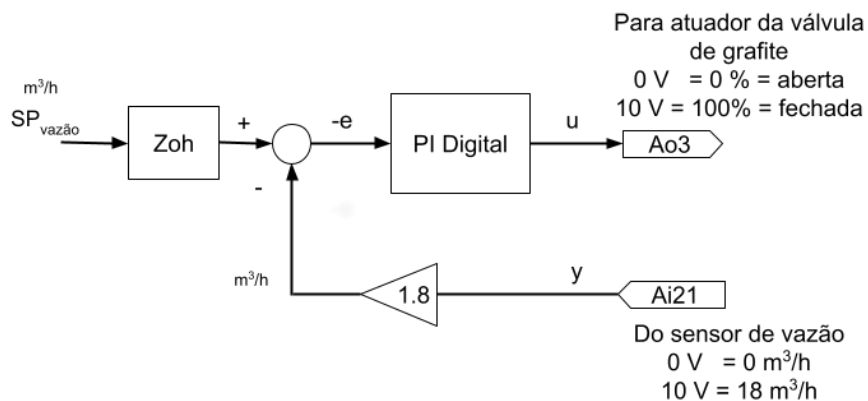


Fig. 6.4 – Diagrama de blocos - Malha externa com controlador PI (sem posicionador).

Fonte: Autor.

6.3 Visão global – Planta Piloto de Vazão + PCI6229 + Posicionador

Para ter clareza entre as interfaces da Planta Piloto de Vazão, o supervisor em Matlab® e o posicionador embarcado PD-CCB-01, recorre-se à Fig. 6.5. O bloco laranja refere-se às conexões da placa de aquisição do Matlab®. O bloco verde refere-se às conexões de instrumentação e atuadores da Planta Piloto de Vazão do LCPI, e o bloco azul refere-se ao posicionador embarcado em si. Observar que, nas posições indicadas pelos relés RL₁, RL₂, RL₃ e pela chave S₄, o posicionador PD-CCB-01 está completamente desconectado do conjunto Matlab® + Planta Piloto de Vazão.

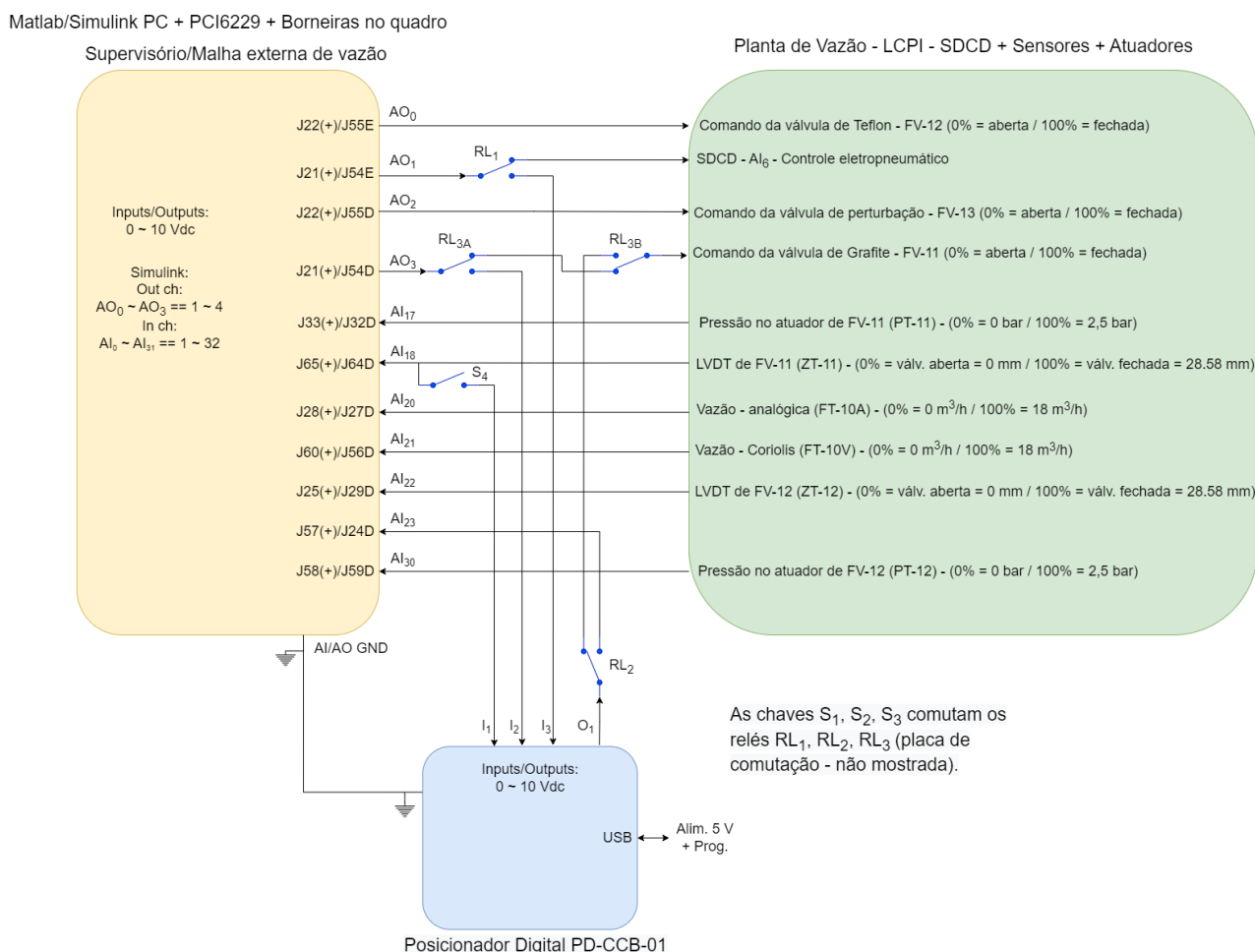


Fig. 6.5 – Interfaces – PCI-6229 + Planta de Vazão + Posicionador PD-CCB-01.

Fonte: Autor.

Observações acerca do diagrama de blocos da Fig. 6.5:

- Cada conexão de entrada ou saída analógica na borneira da placa de aquisição do Matlab® (bloco laranja) é composta por um par de fios, representando o sinal positivo (indicado por '+') e o sinal negativo (gnd). Os terminais de gnd não são comutados pelos relés e chaves, apenas os terminais positivos;

- Devido à natureza não diferencial dos sinais, a placa de relés e o posicionador PD-CCB-01 devem estar localizados o mais próximo possível das borneiras da placa de aquisição PCI-6229;
- Para os sinais “+” comutados, retornar ao trançamento junto ao respectivo sinal “-” com a menor distância possível (após a ligação à placa de relés), para se evitar acoplamento de campos magnéticos;
- As interligações de terra eletrônico entre a PCI-6229 (placa de borneiras), posicionador PD-CCB-01 e placa de relés deve ser a mais reforçada e curta possível;
- Para conexão do posicionador PD-CCB-01 ao PC de gravação + depuração + alimentação (USB), usar preferencialmente a estação OW01, onde está a PCI-6229. No caso de uso de notebook, mantê-lo à bateria, para evitar flutuações no *gnd* (terra eletrônico), em função de tensão de modo comum. Idealmente, fazer a gravação prévia do *firmware* do posicionador PD-CCB-01, e desconectar totalmente o PC/Notebook durante os ensaios, utilizando-se uma fonte DC de 5 V isolada.

Complementando a visão do diagrama de blocos da Fig. 6.5, exhibe-se na Fig. 6.6 um detalhamento com foco na placa de relés. Observar que, em verdade, a placa de relés é composta de duas partes: uma contendo os relés propriamente ditos, e outra contendo as chaves de comutação dos respectivos relés. As três primeiras chaves, S_1 a S_3 , servem para comutação dos relés. A chave S_4 serve para conectar ou desconectar a leitura da posição da haste da válvula FV-11 ao posicionador PD-CCB-01.

A Tabela 6.1 indica o mapa de comutação das chaves para cada opção de uso do posicionador PD-CCB-01. Ao desligarem-se todas as chaves, estabelece-se a operação “normal” da Planta Piloto de Vazão, como se o PD-CCB-01 não existisse. Para usar o posicionador embarcado, ligam-se as chaves indicadas na Tabela 6.1 conforme o algoritmo de controle e compensação de atrito desejado. Futuros novos algoritmos podem exigir uma combinação diferente de chaves ligadas.

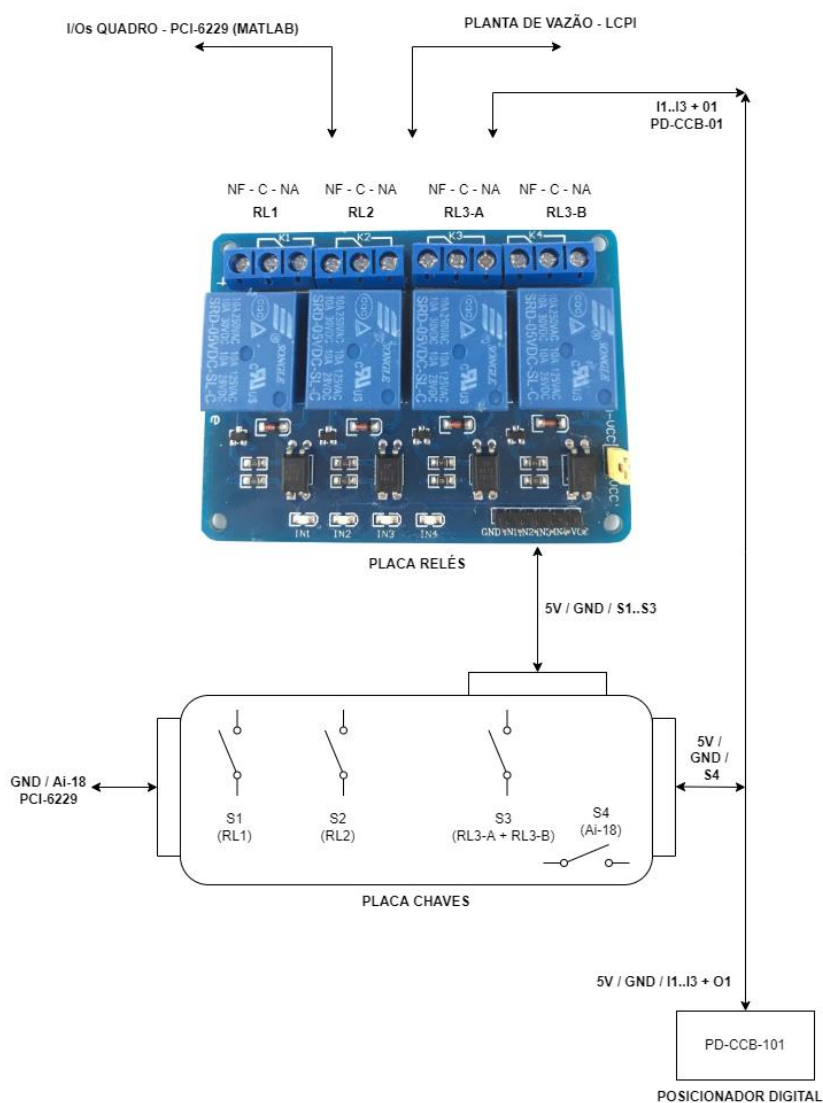


Fig. 6.6 – Interligações da placa Relés com a PCI-6229 + Planta de Vazão + Posicionador PD-CCB-01.
Fonte: Autor.

Tabela 6.1 – Mapa de chaves da placa Relés para aplicações distintas

	S1	S2	S3	S4
LCPI – uso normal	OFF	OFF	OFF	OFF
PID	OFF	OFF	ON	ON
CR2	ON	ON	OFF	OFF
PID + CR2 em cascata	ON	OFF	ON	ON
ISMC	OFF	OFF	ON	ON
ISMC + CR2 em cascata	ON	OFF	ON	ON

Fonte: Autor.

As Figuras 6.7 e 6.8 ilustram o rack onde as borneiras da placa de aquisição PCI-6229 estão instaladas. Percebem-se as conexões da fiação da Planta Piloto de Vazão (entre outras) ligadas a elas.

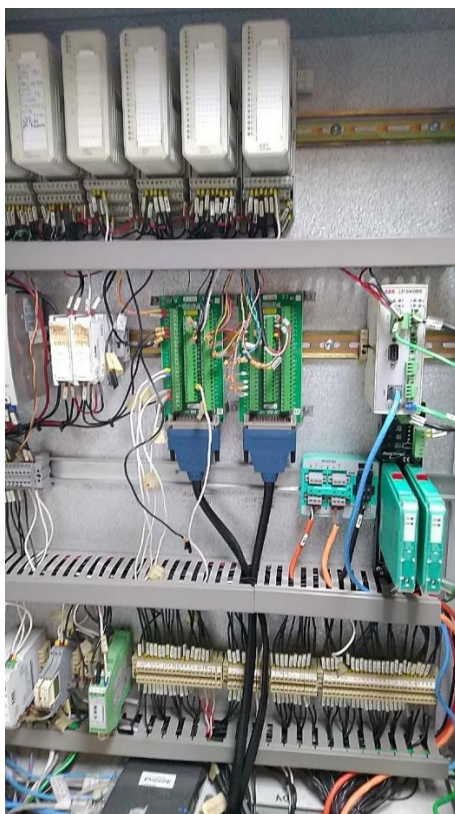


Fig. 6.7 – Visão do rack com as borneiras da PCI-6229.

Fonte: Autor.

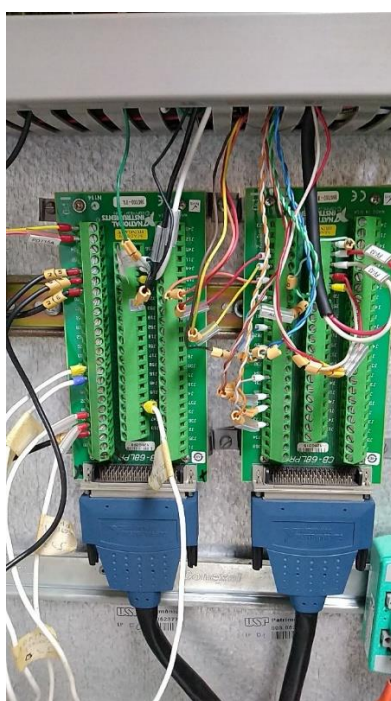


Fig. 6.8 – Detalhe das borneiras da PCI-6229.

Fonte: Autor.

Já a Fig. 6.9 apresenta a placa de relés instalada junto às borneiras da placa de aquisição PCI-6229. Essa instalação é a preparação necessária e suficiente para o uso correto do posicionador PD-CCB-01.

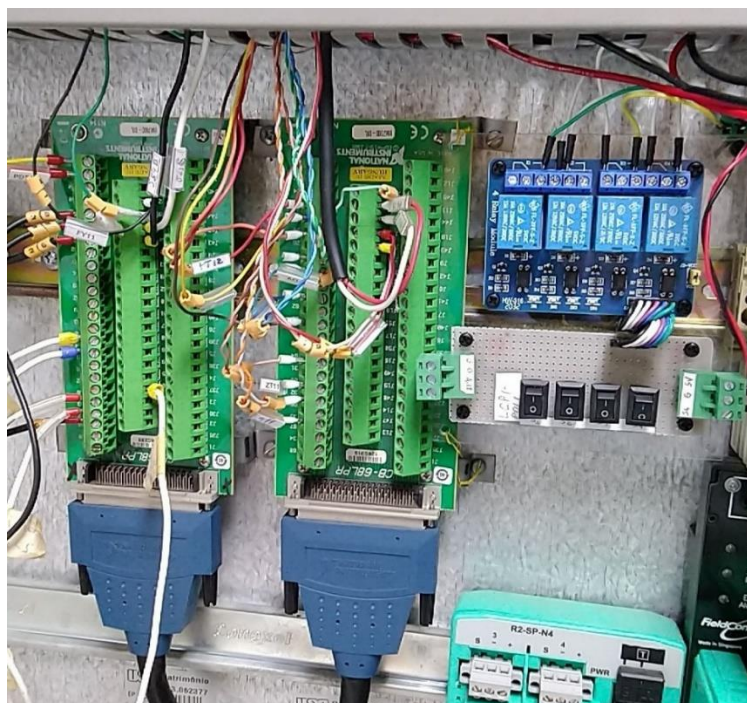


Fig. 6.9 – Conjunto das borneiras da PCI-6229 + Placa de Relés.

Fonte: Autor.

6.4 Algoritmos de controle – projeto e validação em ambiente Matlab/Simulink®

Para a validação e comparação dos algoritmos de controle é necessário definir-se um *setup* de testes. Em todos os ensaios envolvendo a malha de vazão, fixou-se o fluxo máximo livre (válvulas 100 % abertas) em 12 m³/h, através de um ajuste de *set point* do inversor da bomba. Procurou-se trabalhar com *set points* e perturbações em níveis tais, que a operação do conjunto Controle-Atuador-Válvula operasse em região a mais linear possível.

Foram feitos testes em três modos ([HIDALGO, 2015](#)): Regime permanente, Servo, e Regulatório. O modo Regime permanente avalia o grau de variabilidade da malha a partir de um *set point* constante em 50 % da vazão máxima (ou algo próximo disso; no caso, usou-se 7,5 m³/h) e sem perturbações intencionais. Os índices de desempenho medidos para esse primeiro modo são: ISE da vazão, variabilidade da vazão e o acúmulo de variação da posição da haste da válvula FV-11. O tempo de ensaio foi fixado em 150 segundos.

O segundo modo, Servo, caracteriza-se pelo uso subsequente de dois degraus no *set point* de vazão, o primeiro de aproximadamente +30 % (6 m³/h para 9 m³/h) a 50 segundos do ensaio, e o segundo de aproximadamente -30 % (9 m³/h para 6 m³/h) a 100 segundos do ensaio. Não há uso de perturbações intencionais na malha. Os índices de

desempenho medidos são: Tempo de subida da variável vazão, % de máximo sobressinal de vazão e Tempo de acomodação da vazão (para uma faixa de ± 5 % do *set point* de regime). O tempo total de ensaio foi de 150 segundos.

O terceiro modo, Regulatório, fixa o *set point* de vazão a 50 % da vazão máxima (ou algo próximo disso; no caso, usou-se 7,5 m³/h), e injeta perturbações pela válvula FV-13 na malha externa. O sinal de perturbação foi composto de dois degraus subsequentes, o primeiro de aproximadamente +30 % a 50 segundos de ensaio, e o segundo de aproximadamente -30 % a 100 segundos de ensaio. O tempo total de ensaio é de 150 segundos. Os índices de desempenho nesse caso são: ISE e ITAE de vazão.

Lembrando que a taxa de amostragem para todas as validações de algoritmos em Matlab® foi $T_s = 10$ ms.

Aqui no Cap. 6 são apresentados os resultados gráficos para os ensaios de validação. Já o Cap. 8 contém também os resultados analíticos tabulares (índices de desempenho compilados), para efeitos de comparação entre os posicionadores PD-CCB-01, eletropneumático e digital, esse dois últimos, comerciais. Optou-se, ainda, pela apresentação dos resultados do ensaio da malha de vazão pura, sem compensadores de atrito ou posicionador, apenas no Cap. 8.

6.4.1 PID

Como já citado, cada algoritmo testado foi implantado via código Matlab®, inserido em um bloco *Matlab Function* do Simulink®. Vide essa estrutura para o PID na Figura 6.10. A parte relativa ao controle PI da malha externa de vazão (em azul nos diagramas) é sempre igual.

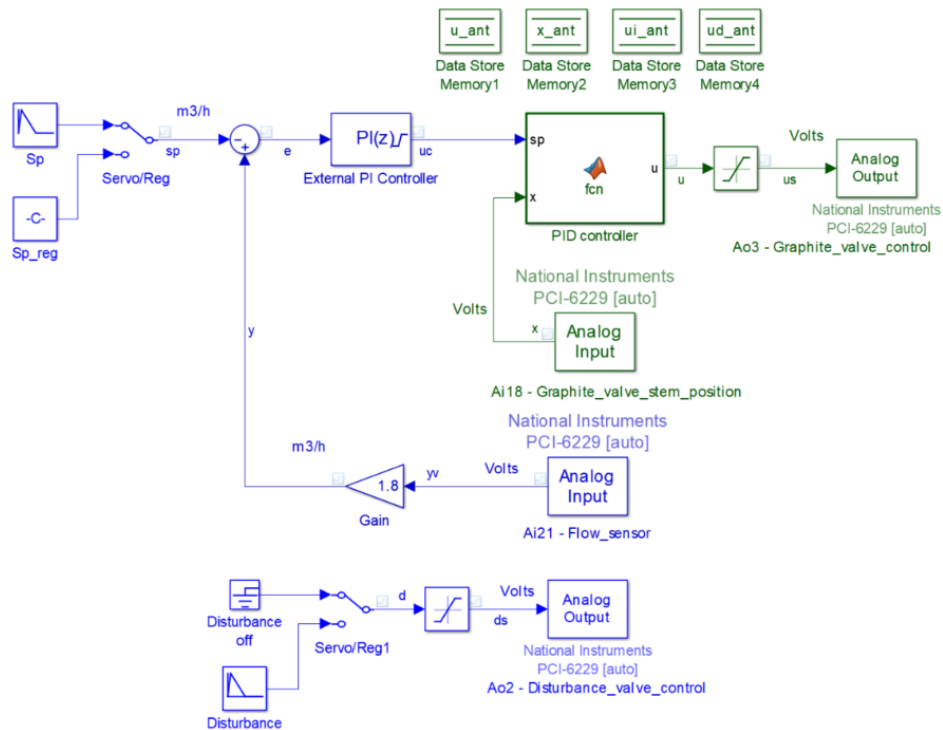


Fig. 6.10 – Diagrama Simulink® - Posicionador com controlador PID.

Fonte: Autor.

As entradas do bloco PID são o *set point* de posição da haste, $s_p = u_c$, sendo u_c a saída do controlador PI, e x a medida de posição atual da haste da válvula. A saída do PID é u , que passa pelo saturador (0 a 8,5 V) antes de ir para o comando da válvula de grafite. Nota-se ainda a presença de elementos *Data Store Memory* no diagrama; eles são necessários para armazenar os regressores do algoritmo na *Matlab Function* (ANGÉLICO, 2016). O código de implementação do PID é dado a seguir.

Algoritmo 6.1 – PID em código Matlab®

```
function u = fcn( sp, x, param )
%#codegen

% Regressores
global u_ant;
global x_ant;
global ui_ant;
global ud_ant;

% Carga de parâmetros recebidos do matlab
kp = param( 1 );
ti = param( 2 );
td = param( 3 );
N = param( 4 );
ts = param( 5 );
sat= param( 6 );
tt = param( 7 );

% PID posicional, backward em I e D, com anti-windup v.2 em I,
% sem kick derivativo, com pólo adicional em D

% Erro
ep = sp - x;
```

```

% Anti-windup
a = ts/tt;
if ( u_ant >= sat )
    eu = u_ant - sat;
elseif ( u_ant <= -sat )
    eu = u_ant + sat;
else
    eu = 0;
end

% Pid kernel
up = kp * ep;
ui = ui_ant + ( ( kp * ts / ti ) * ep ) - ( a * eu );
ud = ( ( td / ( td + ( N * ts ) ) ) * ud_ant ) - ( ( kp * N * td ) / ( td +
( N * ts ) ) ) * ( x - x_ant );

% Atualiza saída
u = up + ui + ud;

% Atualiza regressores
u_ant = u;
x_ant = x;
ui_ant = ui;
ud_ant = ud;
end

```

Fonte: Adaptado de [ANGÉLICO \(2016\)](#).

O código Matlab® que gera a parametrização para o diagrama Simulink da Fig. 6.10 acima é exibido a seguir.

```

% Inicializa ambiente
clear all; close all; clc;

% Setar ts em todos os blocos do diagrama Simulink
ts = 0.01;

% Sintonia por Ziegler-Nichols - curva de reação
kp_z = 5.62;
ti_z = 0.6;
td_z = 0.15;
% Sintonia por Síntese Direta / SIMC
kp_s = 2.34;
ti_s = 1.38;
td_s = 0.0;

% Vetor de parâmetros a ser passado ao Simulink
kp = kp_s;
ti = ti_s;
td = td_s;
N = 20;
sat = 10;
tt = 10;
param = [kp, ti, td, N, ts, sat, tt];

% Colocar no simulation stop time do Simulink
t_run = 150;

% Colocar nos parâmetros dos blocos de sp e perturbação no Simulink
% Modo servo
% Instantes de tempo dos degraus de subida e descida do sp
% de vazão, em seg. E valores correspondentes de sp [m3/h].

```

```

t_sp_up = 50;
t_sp_dw = 100;
sp_1 = 6; % t = 0, t = t_sp_dw
sp_2 = 9; % t = t_sp_up
% Modo regulatório - sp de vazão [m3/h]
sp_reg = 7.5;
% Modo regulatório - instantes de tempo dos degraus de subida e descida
% da perturbação na malha de vazão, em seg. E valores correspondentes do
% distúrbio.
t_dist_up = 50;
t_dist_dw = 100;
dist_1 = 2; % t = 0, t = t_dist_dw
dist_2 = 5; % t = t_dist_up

% Saturações para as saídas analógicas (atuadores das válvulas)
u_max = 8.5;
d_max = 8.5;

% Executa o arquivo do Simulink
%set_param('pid_only', 'SimulationCommand', 'start')

```

Como explicado no Capítulo 4, as sintonias do PID foram obtidas pelos métodos da Síntese Direta e SIMC (ambos resultaram nos mesmos valores) e da Curva de Reação de Ziegler-Nichols. Os parâmetros de sintonia são passados para o bloco PID (*Matlab Function*) via array *param*. O melhor desempenho ficou com a Síntese Direta, cujos resultados gráficos são apresentados a seguir. A Fig. 6.11 ilustra a resposta exclusiva da malha de posição, para os modos servo e regulatório/permanente (nesse último caso não há perturbação inserida). Já a Fig. 6.12 apresenta a resposta da malha em cascata (vazão, externa, e posição, interna), para os três modos de validação. Ressalta-se que, para todas as figuras de ensaios no modo regulatório, o sinal de perturbação não é exibido. Lembrando: os degraus de perturbação são inseridos em $t_1 = 50$ s e $t_2 = 100$ s.

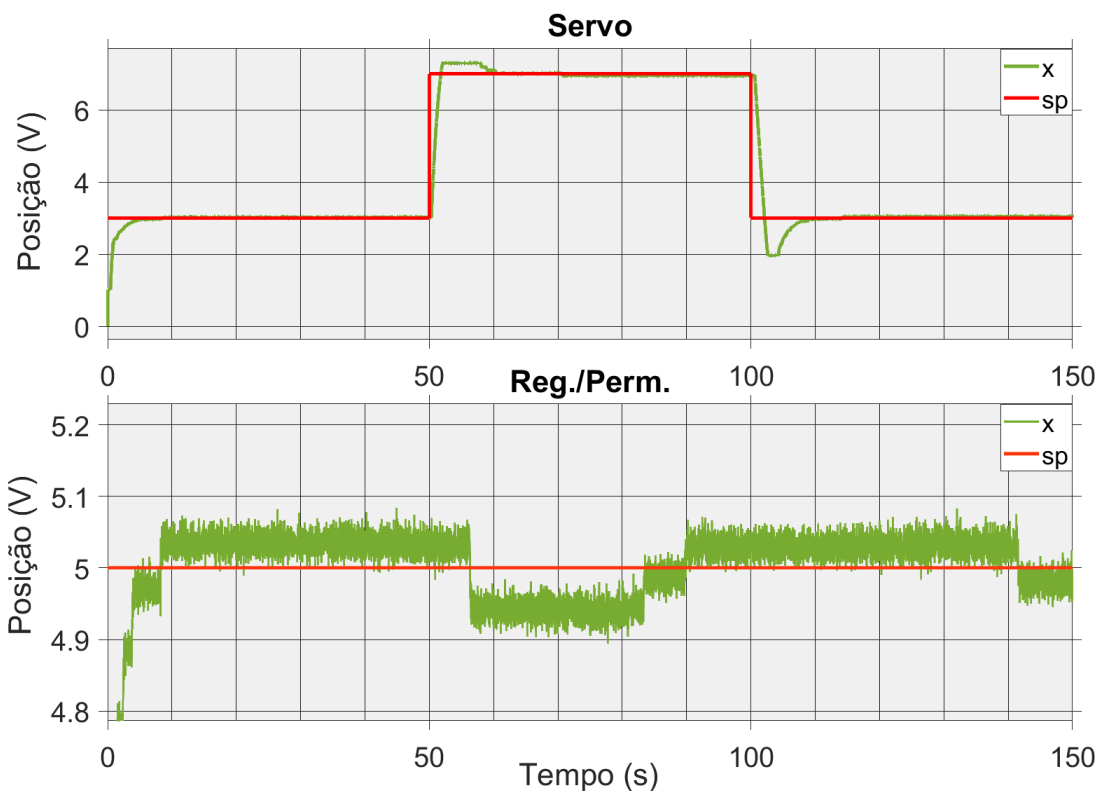


Fig. 6.11 – Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente - posicionador PID.

Fonte: Autor.

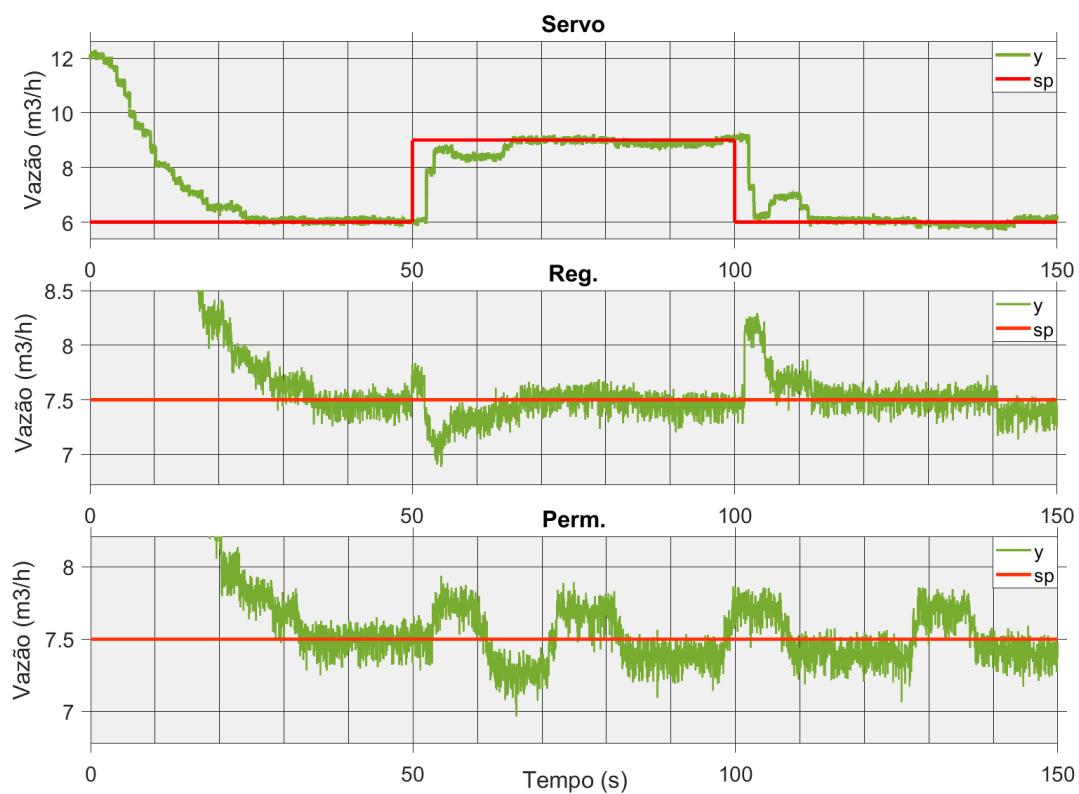


Fig. 6.12 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador PID.

Fonte: Autor.

6.4.2 CR2

O algoritmo CR2 representa um compensador paralelo ao controlador PI da malha externa de vazão, como visto no Capítulo 5. O diagrama em Simulink® pode ser visto na Figura 6.13, onde o setor vermelho é a parte referente ao CR2. O projeto do código Matlab® do algoritmo CR2 é apresentado a seguir.

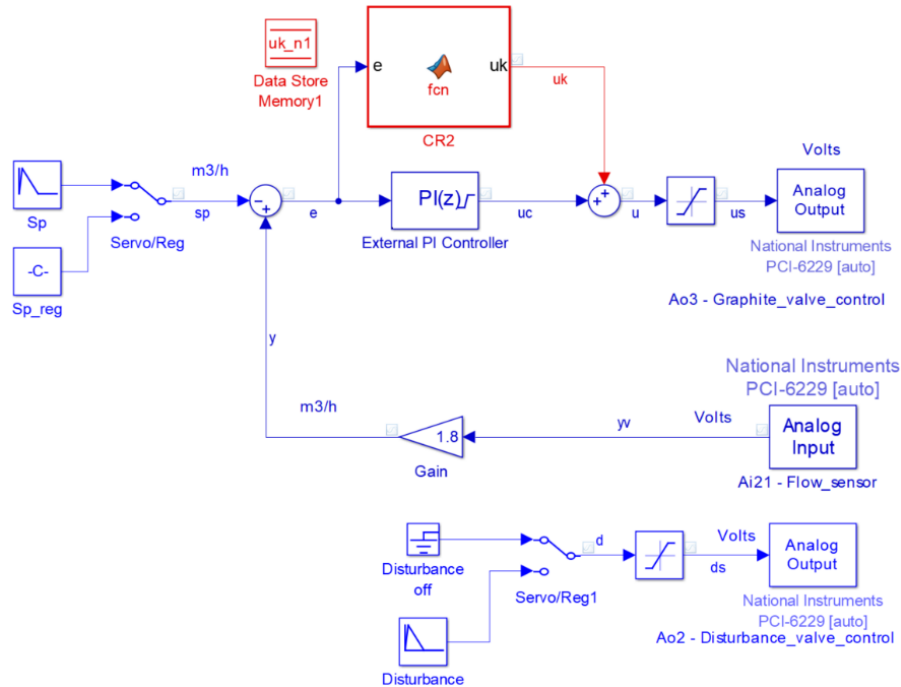


Fig. 6.13 – Diagrama Simulink® - Compensador com algoritmo CR2.

Fonte: Autor.

Algoritmo 6.2 – CR2 em código Matlab®

```
function uk = fcn( e, param_cr2 )
%#codegen

% Regressor
global uk_n1;

% Variáveis locais estáticas
% Contadores para congelamento e descongelamento do algoritmo cr2,
% e flag marcadora de estados de congelamento/descongelamento.
% Caso a inicialização não seja garantida em zero, usar global.
persistent cnt_ti;
persistent cnt_to;
persistent f_cong;

% Parâmetros
s = param_cr2( 1 );
ti = param_cr2( 2 );
to = param_cr2( 3 );
dt = param_cr2( 4 );
ts = param_cr2( 5 );

% Inicialização de variáveis locais
if isempty(cnt_ti)
    cnt_ti = 0;
    cnt_to = 0;
```

```

    f_cong = 0;
end

% Checagem de congelamento e descongelamento
% |erro| é menor que um delta?
if ( abs( e ) <= dt )
    % Sim, reseta timer de descongelamento
    cnt_to = 0;
    % Em congelamento?
    if ( f_cong == 1 )
        % Sim, mantém uk anterior
        uk = uk_n1;
    else
        % Não, conta tempo para congelamento
        cnt_ti = cnt_ti + 1;
        % Checa se já atingiu tempo de congelamento
        if ( cnt_ti > ( ti/ts ) )
            % Sim, marca estado
            f_cong = 1;
            % Mantém uk anterior
            uk = uk_n1;
        else
            % Não, faz Cr2
            uk = cr2( e, s );
        end;
    end;
end;
% Não, |erro| > delta
else
    % Reseta timer de congelamento
    cnt_ti = 0;
    % Em descongelamento?
    if ( f_cong == 0 )
        % Sim, faz Cr2
        uk = cr2( e, s );
    else
        % Não, conta tempo para descongelamento
        cnt_to = cnt_to + 1;
        % Checa se já atingiu tempo de descongelamento
        if ( cnt_to > ( to/ts ) )
            % Sim, marca estado
            f_cong = 0;
            % Faz Cr2
            uk = cr2( e, s );
        else
            % Não, mantém uk anterior
            uk = uk_n1;
        end;
    end;
end;

end;

% Atualiza regressor
uk_n1 = uk;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Função local - alg. Cr2
function out = cr2( error, s1 )
    % Cr2
    if ( error < 0 )
        out = -s1/2;
    elseif ( error > 0 )
        out = s1/2;
    else

```

```

        out = 0;
    end;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Fonte: Autor.

A seguir são apresentados os resultados gráficos para o ensaio do compensador CR2 em Matlab®. Os parâmetros de sintonia são passados para o bloco CR2 (*Matlab Function*) via array *param_cr2*. São eles: S (28,22 %, da curva de assinatura da válvula FV-11), $T_i = 2$ s, $T_o = 5$ s e $dt = 3$ % (do mecanismo de *Control Freezing*). Por ser um compensador de malha externa, obviamente não há ensaio de malha de posição nesse caso, já que nem há posicionador. A Fig. 6.14 apresenta a resposta da malha de vazão para os três modos de validação.

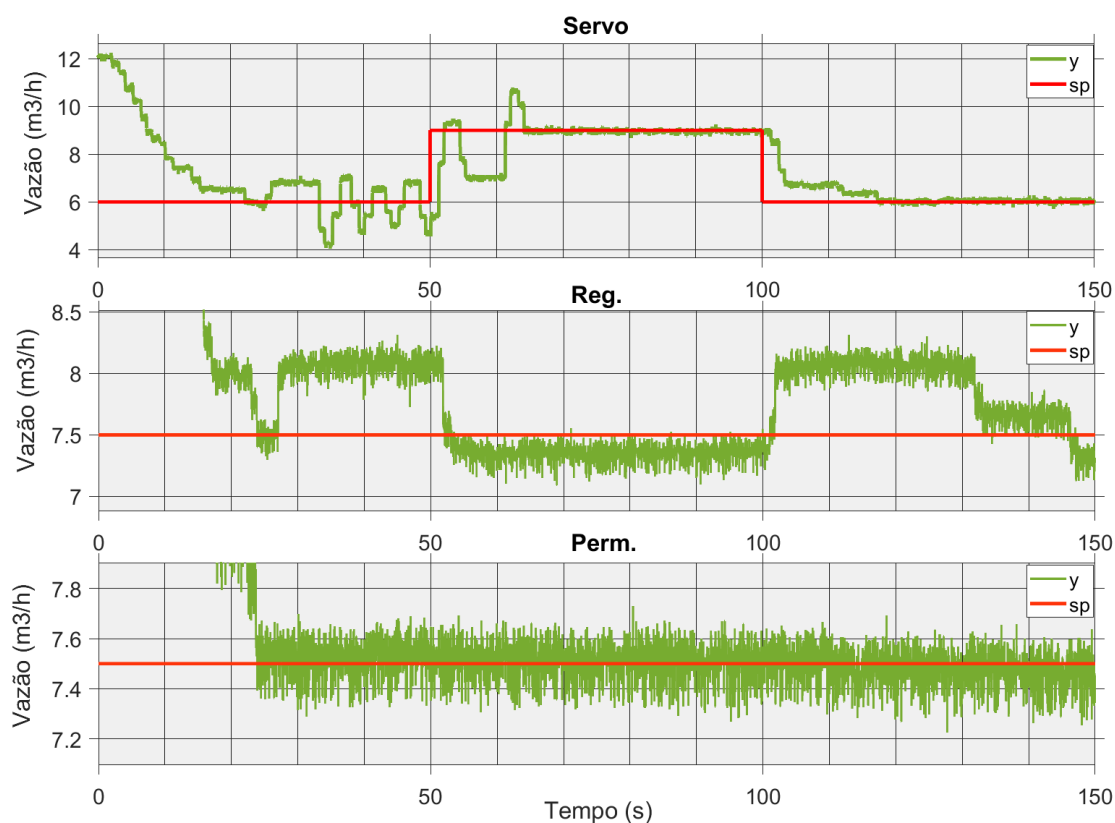


Fig. 6.14 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Compensador CR2.

Fonte: Autor.

Em relação ao ensaio PID, é possível notar para o CR2 uma tendência mais oscilatória no modo servo, bem como um erro estacionário relativamente alto no modo regulatório. A tendência oscilatória pode ter como origem o fato do *Control Freezing* (CF) não atuar no corte da ação integral do controlador da malha externa.

Oportuno ainda comentar que, apesar da simplicidade do algoritmo, a sintonia do setor *Control Freezing* do CR2 não é trivial, especialmente quanto ao parâmetro dt , que é a porcentagem de erro absoluto máximo admissível, para efeito de congelamento e

descongelamento do algoritmo. Um parâmetro dt muito baixo faz com que o CR2 atue quase sem congelamento, e um dt muito alto praticamente tende a remover a atuação do CR2. Após diversos ensaios de teste, chegou-se a um valor médio de $dt = 3\%$.

6.4.3 PID + CR2 em cascata

A fusão do PID na malha do posicionador com o compensador CR2 tradicional leva ao diagrama representado na Figura 6.15, batizado de algoritmo PID + CR2 em cascata. É possível notar a separação das funções pelas cores (malha externa de vazão: azul; CR2: vermelho; PID: verde).

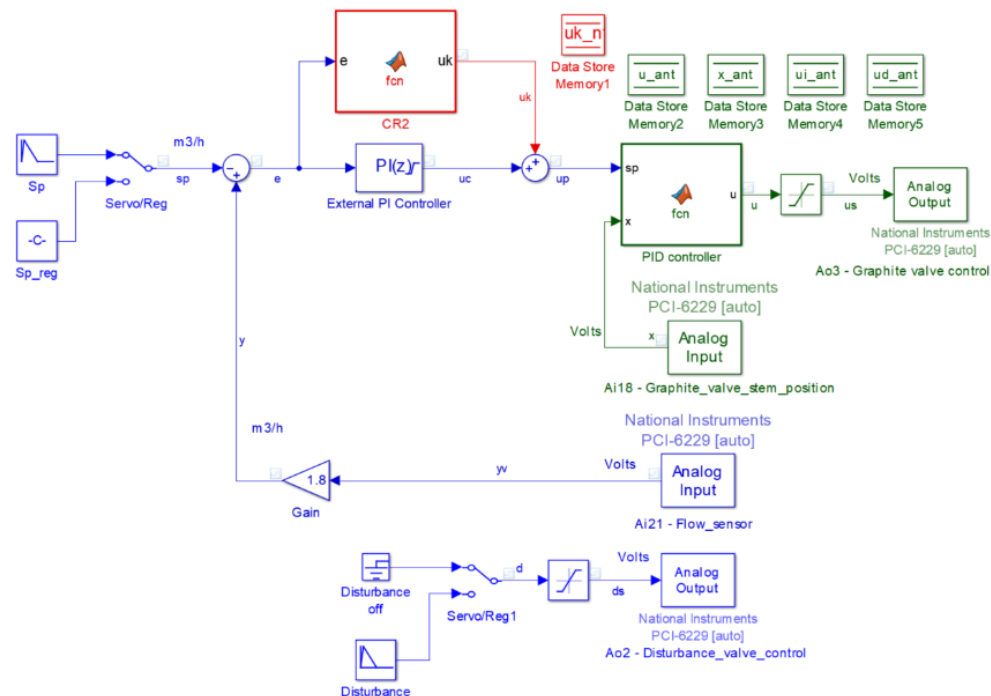


Fig. 6.15 – Diagrama Simulink® - Posicionador PID + Compensador CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

A Fig. 6.16 apresenta os ensaios de validação. É possível notar, avaliando-se de forma comparativa, o PID + CR2, e o PID e CR2 isolados, uma tendência à maior oscilação no sistema em cascata. A aposta teórica de alto desempenho da junção PID + CR2 não se concretizou, pelo menos para o sistema em Matlab®. Um ponto chave que pode explicar o processo de tendência oscilatória para a cascata é o fato do *set point* do PID ser formado, agora, pelo somatório do esforço de controle do controlador PI de vazão e da saída do CR2. Essa saída, u_k , quando não congelada, tem a forma de uma onda quadrada (depende do sinal do erro de vazão) de amplitude $-S/2 \sim +S/2$. Como $S = 28,22\%$, cada degrau de saída do CR2 atinge uma mudança de nível de $28,22\%$ da excursão máxima do atuador da malha de vazão (10 V), ou seja, 2,822 V. Lembrando que a frequência dessa onda quadrada pode atingir um valor máximo de $1/T_s$. Tudo isso é

somado ao esforço de controle original do PI, para formar o *set point* da malha de posição. Assim, dependendo da sintonia do CR2, o posicionador pode vir a receber *set points* com mudanças relativamente bruscas de valor no tempo, o que leva a uma dificuldade no controle de posição e, conseqüentemente, no controle de vazão.

Além dos pontos acima, vale lembrar que a sintonia do PID de posição é bem mais agressiva que a do PI da malha de vazão. Existem agora duas ações integrais em atuação, sendo que o algoritmo CF não corta nenhuma delas.

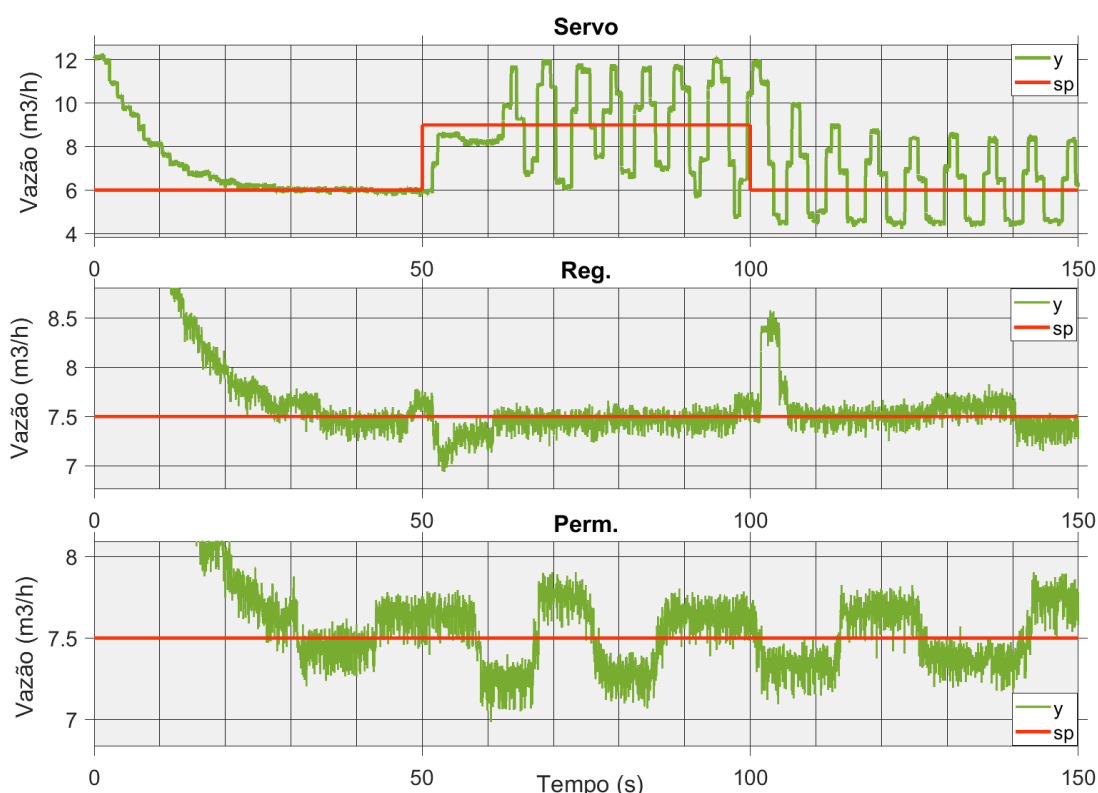


Fig. 6.16 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PID + CR2.

Fonte: Autor.

6.4.4 ISMC

O diagrama Simulink® das malhas externa e interna, essa última com o algoritmo ISMC, tem uma topologia similar à do PID, como mostra a Figura 6.17. Note que o algoritmo ISMC (setor verde) necessita de bem mais elementos do tipo *Data Store Memory* do que os demais algoritmos vistos, conforme detalhado no Capítulo 5. O algoritmo ISMC em código Matlab® é exibido a seguir. Observe que os parâmetros passados via *param* se dividem em dois blocos principais: um contendo os parâmetros do conjunto válvula FV-11 + atuador, e outro contendo os parâmetros do controlador ISMC em si.

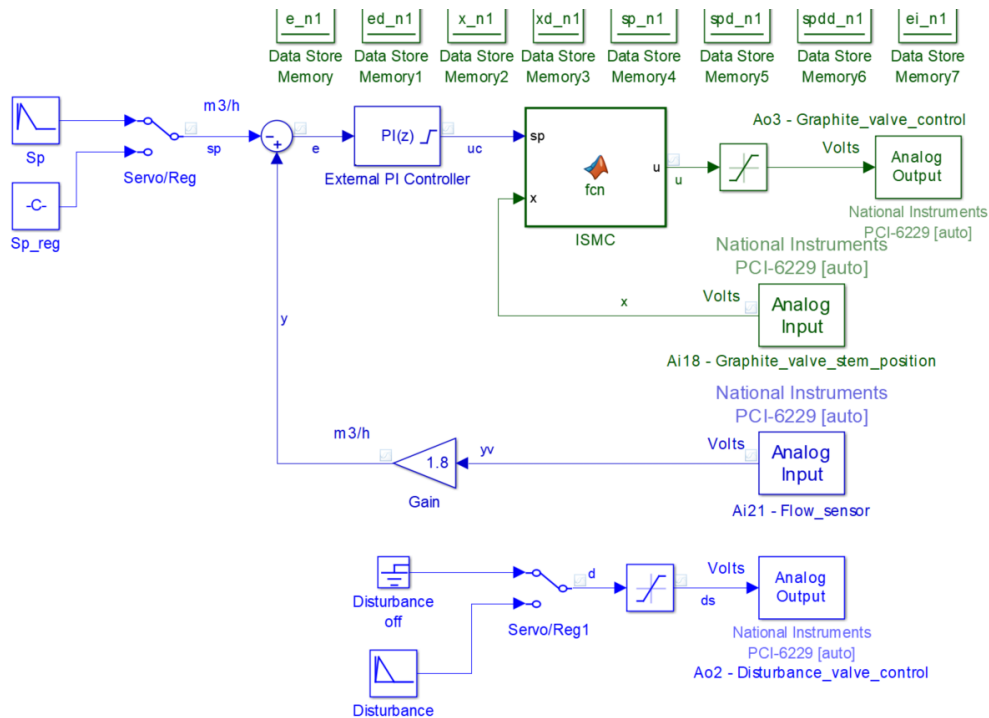


Fig. 6.17 – Diagrama Simulink® - Posicionador com algoritmo ISMC.

Fonte: Autor.

Algoritmo 6.3 – ISMC em código Matlab®

```
function u = fcn( sp, x, param)
%#codegen

% Variáveis globais
global e_n1;
global ed_n1;
global x_n1;
global xd_n1;
global sp_n1;
global spd_n1;
global spdd_n1;
global ei_n1;

% Parâmetros de modelamento
kp    = param( 1 ); % [Pa/V]
sa    = param( 2 ); % [m2]
k     = param( 3 ); % [N/m]
fc    = param( 4 ); % [N]
fs    = param( 5 ); % [N]
vs    = param( 6 ); % [m/s]
sigma = param( 7 ); % (adim)
m     = param( 8 ); % [kg]

% Parâmetros do controlador
lambda = param( 9 ); % [adim]
phi    = param( 10 ); % [%]
kc     = param( 11 ); % [%]

% Intervalo de amostragem
ts     = param( 12 ); % [s]

% Saturação de sp e da saída u
sat    = param( 13 ); % [V]

% Parâmetros da derivada D(Z) e da integral I(z)
```

```

if ( ts == 0.01 )
    ad = 0.8824;
    bd = 11.76;
    ai = 0.005;
elseif ( ts == 0.001 )
    ad = 0.9876;
    bd = 12.42;
    ai = 0.0005;
else
    ad = 0;
    bd = 0;
    ai = 0;
end

% Código do algoritmo
% Garante sp dentro da faixa
if ( sp > sat )
    sp = sat;
elseif ( sp < 0 )
    sp = 0;
end

% Converte sp e pos. atual em metros
% Faixa total do conversor V/I/P: 0 ~ 10.0 V ==>
% 6 ~ 30 psi ==> 0 ~ 28.58 mm
sp = (0.02858 / 10.0) * sp;
x = (0.02858 / 10.0) * x;

% Erro atual
e = x - sp;

% Derivada do erro
ed = ( ad * ed_n1 ) + ( bd * ( e - e_n1 ) );

% Derivada da saída
xd = ( ad * xd_n1 ) + ( bd * ( x - x_n1 ) );

% Derivada do set point
spd = ( ad * spd_n1 ) + ( bd * ( sp - sp_n1 ) );

% Derivada de 2a ordem do set point
spdd = ( ad * spdd_n1 ) + ( bd * ( spd - spd_n1 ) );

% Integral do erro
ei = ei_n1 + ( ai * ( e + e_n1 ) );

% Superfície de escorregamento
s = ed + ( 2 * lambda * e ) + ( lambda^2 * ei );

% Parcela u1 da lei de controle linearizante
u1 = ( 1 / ( kp * sa ) ) * ( ( k * x ) + ( fc + ( fs - fc ) * exp( -( xd /
vs )^2 ) ) * tanh( sigma * xd ) );

% Parcela u2 da lei de controle linearizante
u2 = ( m / ( kp * sa ) ) * ( spdd - ( 2 * lambda * ed ) - ( lambda^2 * e )
);

% Termo u da lei de controle linearizante
ut = u1 + u2;

% Limitação do chattering na superfície de escorregamento
sc = s / phi;

% Saturação da superfície de escorregamento limitada

```



```

if ( sc >= 1 )
    scs = 1;
elseif ( sc <= -1 )
    scs = -1;
else
    scs = sc;
end

% Lei de controle final
u = ut - ( kc * scs );

% Garante saída com saturação
if ( u > sat )
    u = sat;
elseif ( u < 0 )
    u = 0;
end

% Atualização de regressores
e_n1    = e;
ed_n1   = ed;
x_n1    = x;
xd_n1   = xd;
sp_n1   = sp;
spd_n1  = spd;
spdd_n1 = spdd;
ei_n1   = ei;
end

```

Fonte: Autor.

Os resultados gráficos da validação, exibidos nas Figuras 6.18 e 6.19, permitem observar um bom tempo da resposta ao degrau, um razoável comportamento de regime, com boa rejeição aos distúrbios. Por outro lado, nota-se uma tendência de maior sobressinal. No geral, o controlador ISMC comporta-se de forma mais arisca, com capacidade de resposta rápida aos estímulos de entrada.

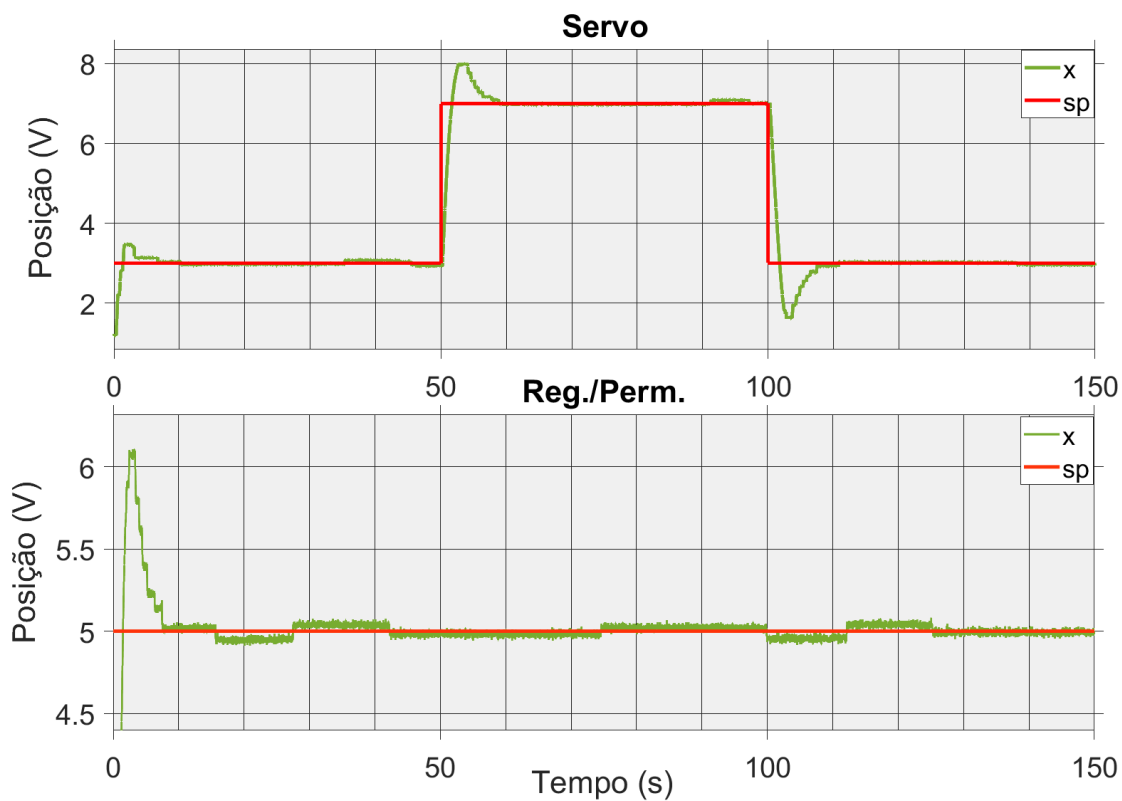


Fig. 6.18 – Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo e Regulatório/Regime Permanente - posicionador ISMC.

Fonte: Autor.

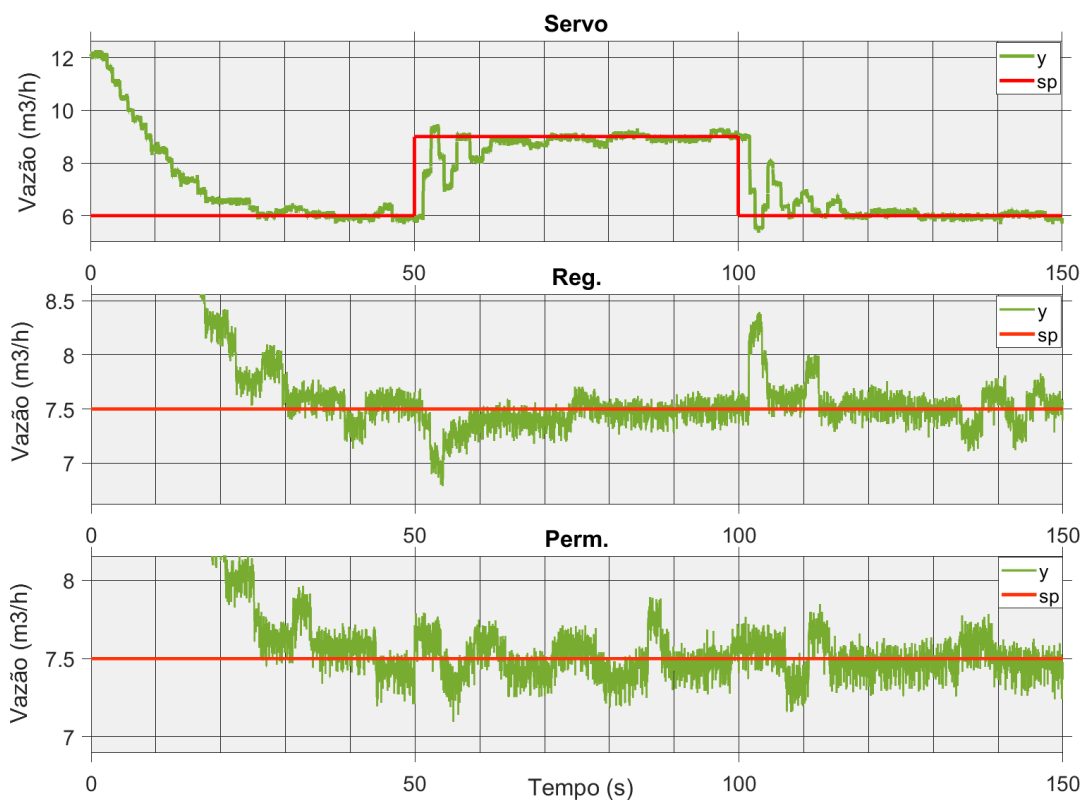


Fig. 6.19 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador ISMC.

Fonte: Autor.

6.4.5 ISMC + CR2 em cascata

Aproveitando-se do conceito do algoritmo PID + CR2 em cascata, e substituindo o controlador PID na malha interna pelo ISMC, tem-se o chamado algoritmo ISMC + CR2 em cascata, ilustrado na figura 6.20.

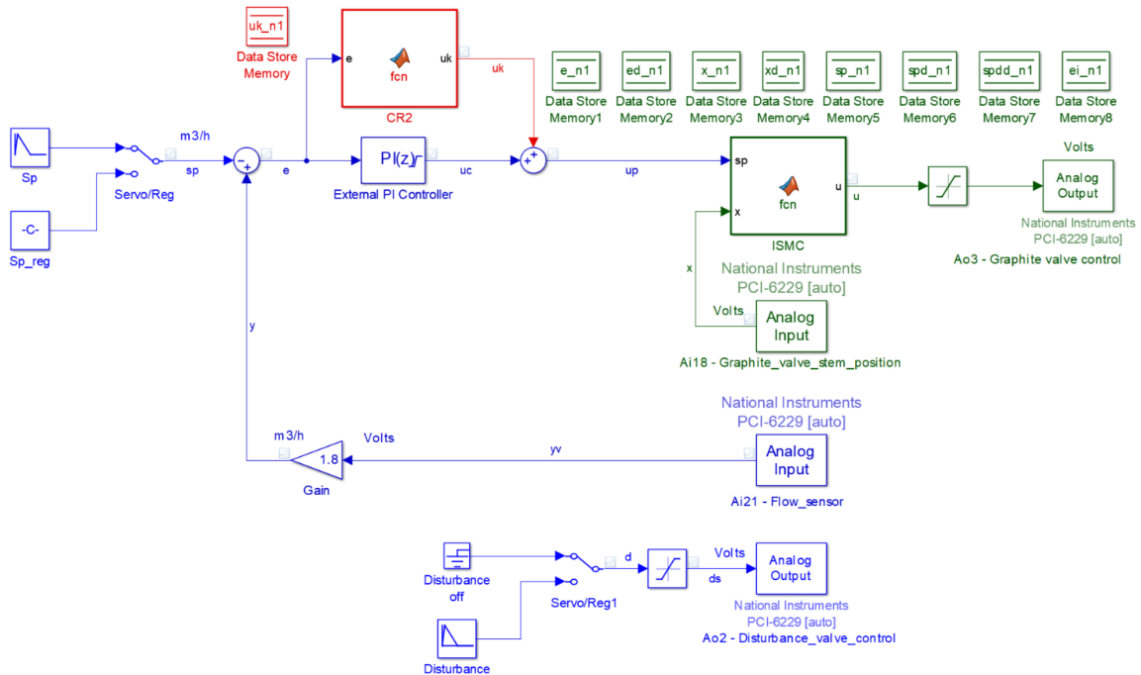


Fig. 6.20 – Diagrama Simulink® - Posicionador ISMC + Compensador CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

A Fig. 6.21 apresenta os ensaios de validação. Curiosamente, avaliando-se de forma comparativa, o ISMC + CR2, e o ISMC e CR2 isolados, e ainda, trazendo à luz a comparação similar no caso PID + CR2, não houve tendência à maior oscilação no sistema em cascata. Nesse caso, pelo menos do ponto de vista gráfico, a aposta teórica de alto desempenho da junção ISMC + CR2 tem ainda chance de se concretizar, pois não é possível detectar nem uma piora e nem uma melhora, visualmente falando. Uma possível explicação para esse resultado reside no fato do ISMC ter capacidade de reação mais rápida do que o PID (com a sintonia atual). Assim, mesmo recebendo um *set point* de posição contendo o efeito da sintonia do CR2, o posicionador ISMC consegue reagir melhor, compensando esse efeito. Obviamente, espera-se que o posicionador nunca fique compensando efeitos negativos do compensador CR2, e sim que trabalhem juntos para uma otimização da malha de vazão como um todo.

Os resultados analíticos no Cap. 8 permitirão concretizar essa análise: a inserção do compensador CR2 em cascata com o posicionador é ou não benéfica para a Planta Piloto de Vazão?

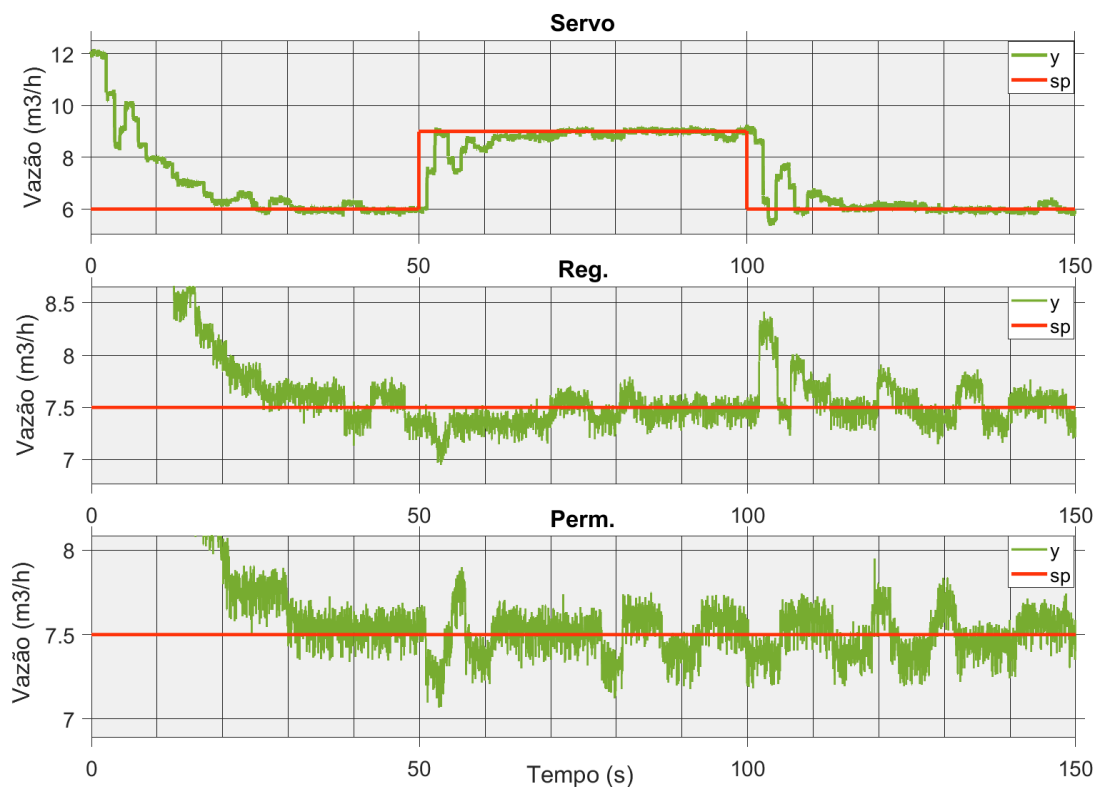


Fig. 6.21 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – ISMC + CR2.
Fonte: Autor.

6.5 Escolha da ferramenta embarcada de *hardware & firmware* – critérios

A escolha de uma plataforma embarcada para servir de base ao projeto do posicionador embarcado é uma tarefa razoavelmente complexa, se observarmos os requisitos típicos necessários à concepção de um produto viável, como:

- Custo;
- Funcionalidades que preencham reais necessidades de um mercado específico;
- Design;
- Logística de atualização de *firmware* e/ou de manutenção; etc.

Esses requisitos devem levar em conta as soluções equivalentes já disponíveis no mercado em que se deseja inserir o produto novo.

Não está no escopo deste trabalho uma análise técnica e comercial do projeto do posicionador. No entanto, foi feita uma avaliação de equipamentos similares, de grande aceitação nos mercados nacional e internacional da empresa brasileira Smar™, já citada. Essa análise visa avaliar algumas opções de microcontroladores, reduzindo-se um leque atualmente muito extenso. A Tabela 6.2 exhibe algumas opções de *MCU (Microcontroller Unit)*.

Tabela 6.2 - Microcontroladores possíveis candidatos à CPU do posicionador.

Modelo	Fabricante	CPU	Clock	ADC	DAC	FPU	IDE
SAML21	Microchip TM	M0+	48 MHz	12-bit	12-bit	Não	Mplabx® / Atmel Studio®
SAM4S	Microchip TM	M4	120 MHz	12-bit	12-bit	Não	Mplabx® / Atmel Studio®
LPC1768	Nxp TM	M3	120 MHz	12-bit	10-bit	Não	Mbed Studio®
STM32H753	ST TM	M7	480 MHz	16-bit	12-bit	Sim	STMCubeIDE®

Fonte: Autor.

Os códigos de CPU da Tabela 6.2 referem-se a núcleos ARM® de desempenho crescente conforme a numeração (M0+ = menor desempenho / M7 = maior desempenho). As colunas ADC e DAC se referem à resolução, em bits, dos conversores A/D e D/A internos ao microcontrolador, respectivamente. A coluna FPU refere-se à presença ou não de uma unidade de ponto flutuante em *hardware*, o que auxilia muito a execução de cálculos e operações. Por fim, a coluna IDE (*Integrated Development Environment*) refere-se ao *software* de alto nível usado como plataforma de desenvolvimento do *firmware* embarcado.

Qualquer uma das opções seria aplicável, mas em função do objetivo de se atingir tempos de processamento da ordem de 1 ms para os algoritmos, adotou-se como plataforma o microcontrolador STM32H753. Além da presença da unidade de ponto flutuante em *hardware*, a velocidade de processamento chega a ser 10 vezes maior que o SAML21 e a resolução do conversor A/D é a única que se equipara à da placa de aquisição PCI-6229.

Obviamente, o custo dessa MCU tende a superar as demais, mas nada de modo exorbitante, que pudesse tornar seu uso proibitivo para a aplicação em questão (US\$14.96 FOB @ 100 peças, contra cerca de US\$5.51 do SAML21 – <https://www.mouser.com> – acesso em 30/07/2023).

7 Projeto detalhado do *hardware & firmware*

7.1 Descrição geral e diagrama em blocos do sistema

Os requisitos principais do posicionador se concentram nos canais de entrada e saída analógica. Por todos os diagramas já vistos de simulação dos algoritmos de controle, o posicionador embarcado deve ter, no mínimo, três entradas analógicas e uma saída analógica. Como a *MCU* apresenta conversores A/D e D/A integrados, o *hardware* do posicionador deve focar nos circuitos de condicionamento dessas entradas e saídas. Esse condicionamento tem algumas funções, como atenuação ou amplificação de sinal, proteção de entrada e saída, casamento de impedâncias etc. Além disso, diversos outros periféricos de *hardware* podem ser previstos, como leds, botões, *display*, conexão Ethernet e USB etc., mas não são a essência mínima necessária para a implementação embarcada do posicionador. A Figura 7.1 ilustra o diagrama de blocos do projeto de *hardware*.

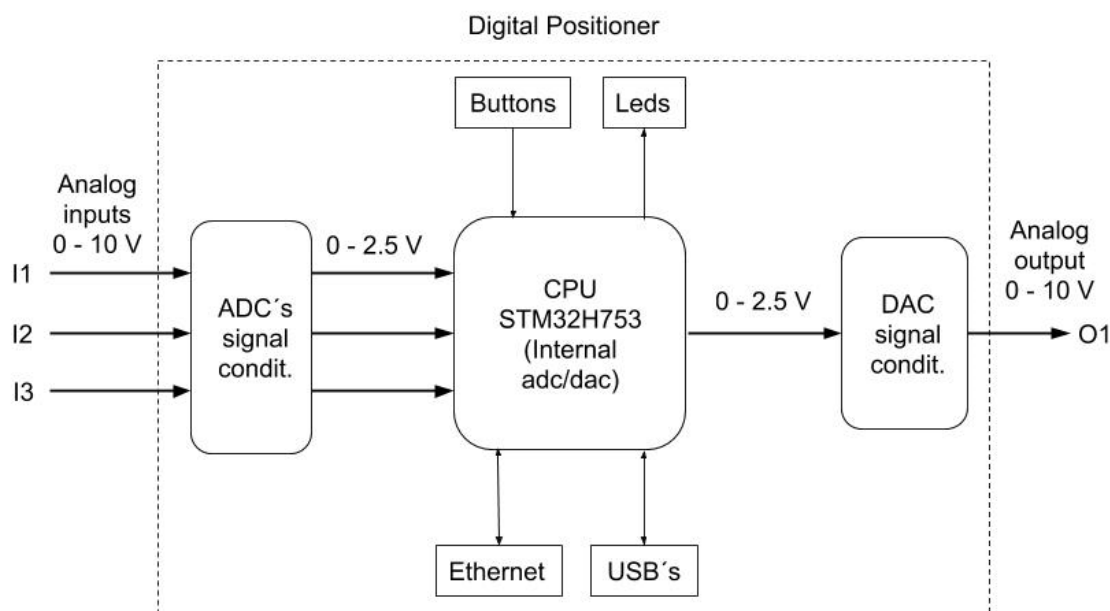


Fig. 7.1 - Diagrama de blocos - *hardware* do posicionador.

Fonte: Autor.

Conforme a Figura 7.1, as entradas analógicas foram batizadas de I_1 , I_2 e I_3 , e a saída de O_1 . Externamente, a faixa de trabalho desses sinais é de 0 a 10 Vdc, compatível com a placa de aquisição PCI-6229. Internamente, todos os sinais analógicos são tratados pela *MCU* na faixa de 0 a 2,5 Vdc.

A Tabela 7.1 apresenta um mapeamento de uso de cada entrada e saída do posicionador em função do algoritmo que estará rodando no *hardware*.

Tabela 7.1 - Sinais analógicos (0 a +10 Vdc) necessários para cada algoritmo.

PID	CR2	PID + CR2 em cascata	ISMC	ISMC + CR2 em cascata
$I_1 =$ Posição da haste $I_2 = u_c$	$I_3 =$ Erro de vazão	$I_1 =$ Posição da haste $I_2 = u_c$ $I_3 =$ Erro de vazão	$I_1 =$ Posição da haste $I_2 = u_c$	$I_1 =$ Posição da haste $I_2 = u_c$ $I_3 =$ Erro de vazão
$O_1 = u$ (atuador da válvula)	$O_1 = u_k$	$O_1 = u$ (atuador da válvula)	$O_1 = u$ (atuador da válvula)	$O_1 = u$ (atuador da válvula)

Fonte: Autor.

Os algoritmos que mais consomem recursos analógicos são o PID + CR2 em cascata e o ISMC + CR2 em cascata, que utilizam as três entradas. Todos os algoritmos utilizam apenas uma saída (O_1).

Como já se viram os diagramas Simulink de cada algoritmo a ser validado ainda sem o posicionador físico inserido, define-se agora como interfacear o posicionador instalado na Planta Piloto de Vazão. Isto é, após a validação dos algoritmos em ambiente Matlab/Simulink®, os seus códigos-fontes foram inseridos no *firmware* do posicionador embarcado e assim, a interface Simulink ↔ *hardware* foi definida para cada algoritmo. Segue uma descrição das entradas e saídas do posicionador e seu uso para cada algoritmo:

I_1 – *Stem Position* – LVDT grafite – A medição real do sensor de posição da haste chega à placa PCI-6229 pelo canal 19 (Ai18). Deve ser feita uma ligação paralela desse sinal (Ai18) para a entrada I_1 do posicionador. Conexão necessária para os algoritmos PID, PID + CR2 em cascata, ISMC e ISMC + CR2 em cascata;

I_2 – u_c – *Set point* de posição – vindo da saída do controle de vazão (malha externa). O sinal de comando da válvula de grafite é ligado à placa PCI-6229 pelo canal 4 (Ao3). Para os algoritmos PID, PID + CR2 em cascata, ISMC e ISMC + CR2 em cascata, a entrada de comando da válvula de grafite deve ser desconectada da saída Ao3 da PCI-6229. Essa saída Ao3 deve ser ligada à entrada I_2 do posicionador. Como consequência, a saída O_1 do posicionador deve ser conectada à entrada de comando (0 a 10 V) da válvula de grafite (atuador U);

I_3 – *Flow error* – Erro de vazão. Para os algoritmos CR2, PID + CR2 em cascata e ISMC + CR2 em cascata, a placa PCI-6229 deve gerar esse sinal em uma saída livre para uso geral que, no caso, é a saída 2 (Ao1). Essa saída deve ser levada à entrada I_3 do posicionador;

$O_1 - u$ ou u_k – Essa saída do posicionador é usada nos algoritmos PID, PID + CR2 em cascata, ISMC, e ISMC + CR2 em cascata, para o comando do atuador (0 a 10 V) da válvula de grafite. Apenas para o algoritmo CR2, a saída O_1 do posicionador deve ser ligada a uma entrada vaga da placa PCI-6229 (no caso, Ai23, que se refere ao sinal u_k no respectivo diagrama Simulink®).

7.2 Projeto do *hardware*

7.2.1 Interfaces analógicas

O circuito de condicionamento das entradas I_1 , I_2 e I_3 é composto de um *clamp* de proteção contra sobretensões, um *buffer* com amplificador operacional, um atenuador de tensão, além do filtro passa-baixas *anti-aliasing*. O *clamp* limita a tensão de entrada a uma faixa de -0,6 V a +12,6 V. O *buffer* possui altíssima impedância de entrada (M Ω), evitando o carregamento das saídas da placa de aquisição PCI-6229. Como o ganho desse estágio é unitário, insere-se na sequência um atenuador resistivo, que torna a faixa de tensão de saída 0 a 2,5 V, compatível com o A/D da *MCU*. Fechando o circuito de entrada, há um filtro passa-baixas com a função de *anti-aliasing* para o conversor A/D. A frequência de corte está em 65 Hz, suficiente para o caso da taxa de amostragem do sistema operar em 1 ms, o que exigiria uma banda de passagem máxima de 500 Hz.

O circuito de condicionamento da saída O_1 é composto de um amplificador com ganho de 4x, um filtro passa-baixas *anti-imaging* e uma proteção contra curto-circuito. O ganho é necessário para compatibilizar a saída D/A da *MCU* (0 a 2,5 V) com a faixa de uso, de 0 a 10 Vdc. O filtro passa-baixas de reconstrução está com corte em 69 Hz. A proteção contra curto-circuito na saída é composta apenas de um resistor limitador série.

O circuito de alimentação tem uma entrada de 5 Vdc, disponível na placa base da *MCU* e é usado um conversor integrado *boost*, modelo MT3608, que eleva a tensão de saída para 12 V, necessária para os circuitos de entrada e saída operarem na faixa de 0 a 10 V.

O esquema elétrico das interfaces analógicas descritas é mostrado na Figura 7.2. Para efeito de testes de validação em bancada, foi desenvolvida uma giga, esquematizada na Figura 7.3. A giga, basicamente, gera os sinais I_1 , I_2 , I_3 , de 0 a 10 Vdc, via potenciômetros, e permite a medição do sinal O_1 . Ela deve ser alimentada (5 V) pelo próprio PD-CCB-01.

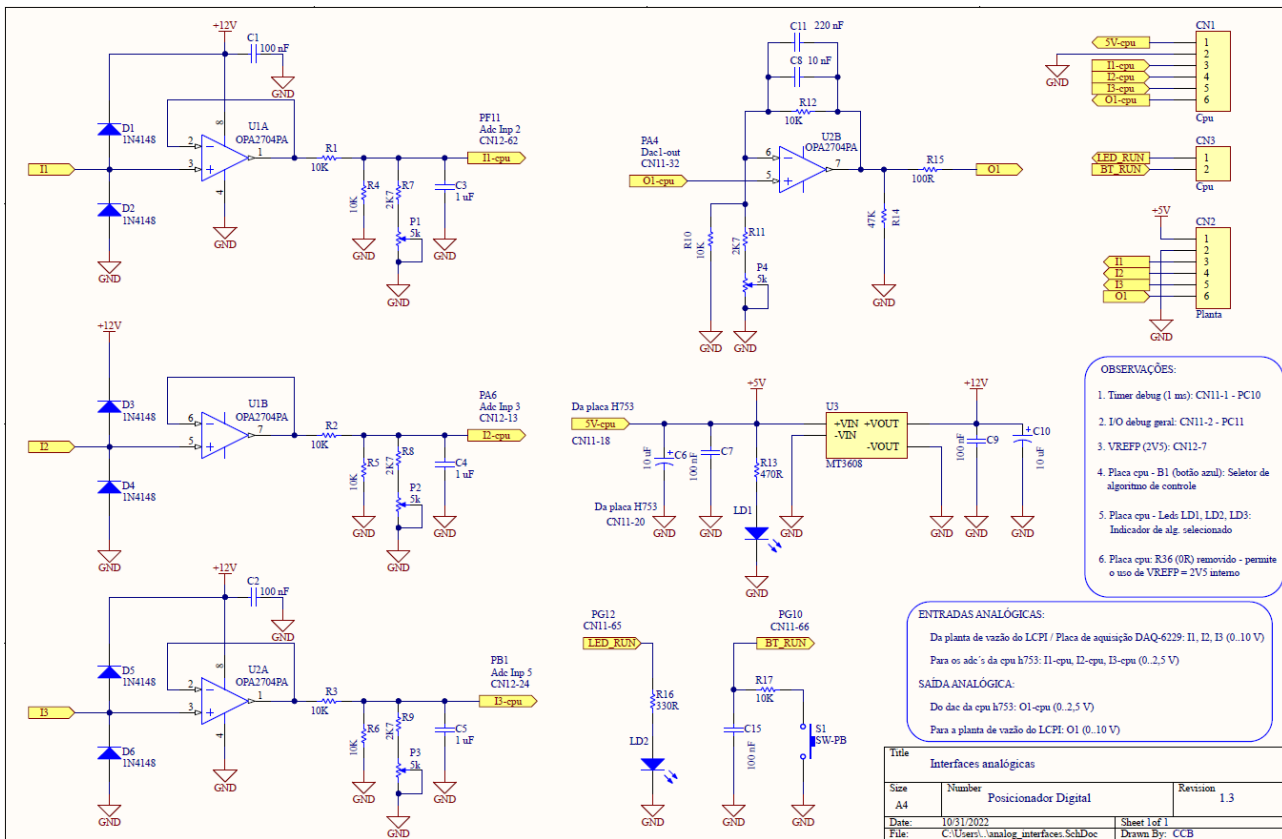


Fig. 7.2 – Esquema Eletrônico das interfaces analógicas.

Fonte: Autor.

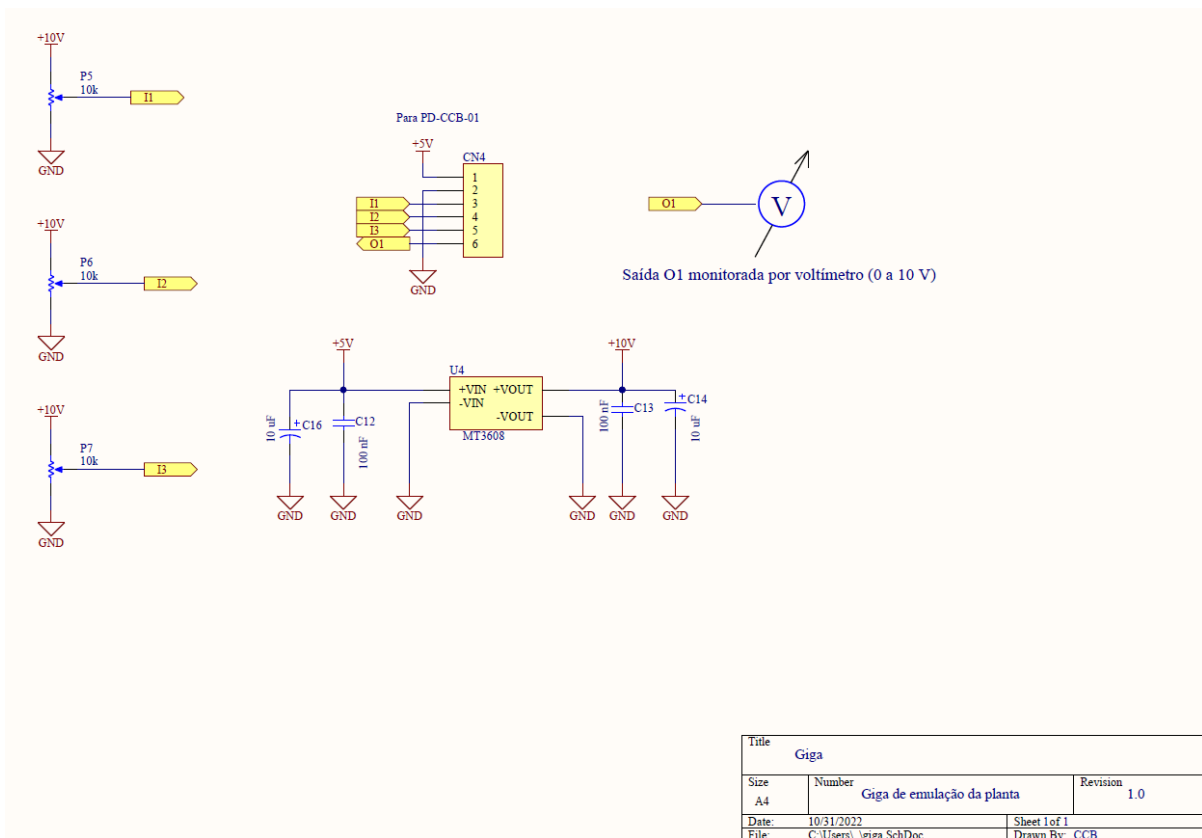


Fig. 7.3 – Esquema Eletrônico da giga de testes.

Fonte: Autor.

7.2.2 Interfaces digitais

A placa de desenvolvimento escolhida com base no microcontrolador STM32H753 é a Nucleo-H753ZI® da ST Microelectronics™ ([MICROELECTRONICS, 2020](#)) (vide Figura 7.4).

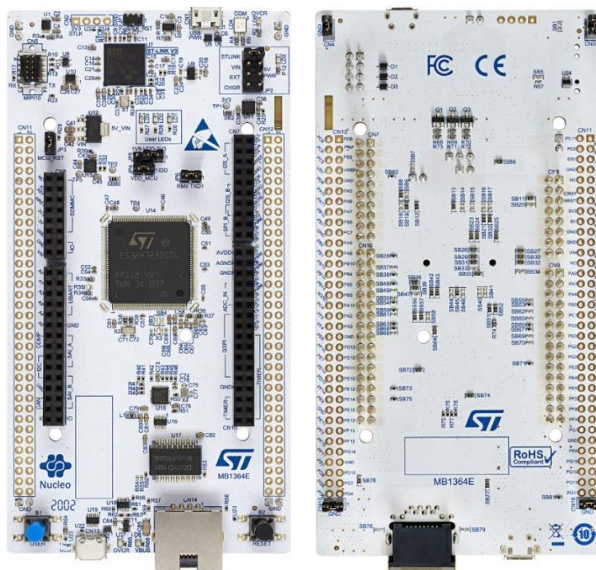


Fig. 7.4 – Placa da *cpu* microcontrolada STM32H753.

Fonte: ST Microelectronics™.

A placa tem recursos como botões e *leds*, interface Ethernet 10/100 Mbps, porta USB OTG (*On The Go*), além de interface completa de gravação e depuração do *firmware*. O botão da placa ST™ tem a função de selecionar o algoritmo de controle e compensação de atrito. Já o botão da placa prototipada tem a função de chavear o modo de operação: *stop X run*. A troca de algoritmo só pode ser feita em modo *stop*, ou seja, com o posicionador em *stand-by*. Os três *leds* da placa ST™ indicam o código do algoritmo atual selecionado. O *led* da placa prototipada indica o modo atual de operação: *stop* (apagado) e *run* (aceso).

O protótipo completo do posicionador PD-CCB-01 está ilustrado na Fig. 7.5 e o protótipo da giga de testes é mostrado na Fig. 7.6.

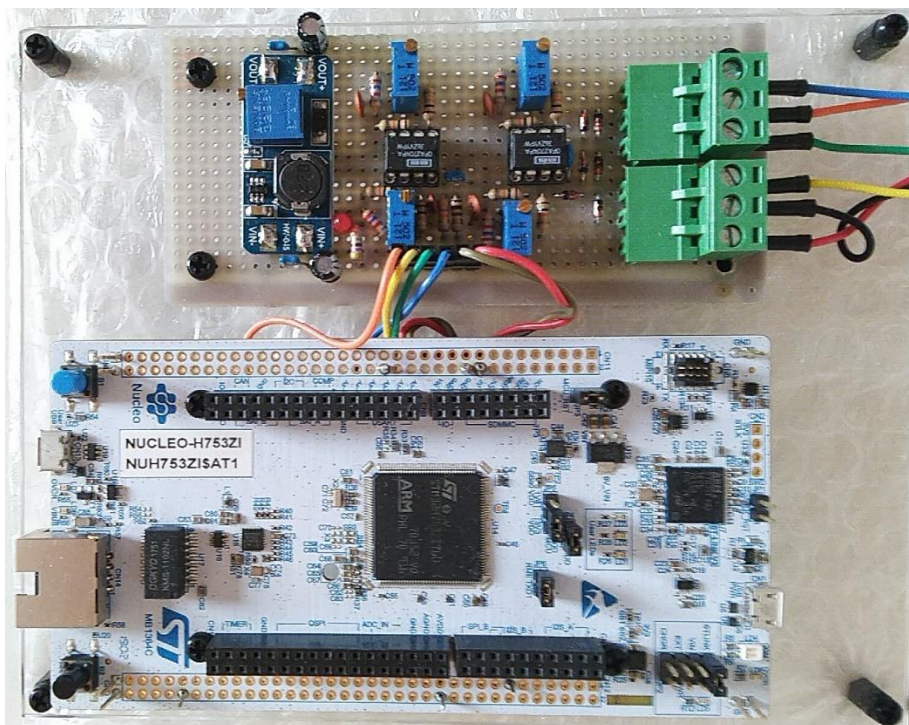


Fig. 7.5 – Protótipo do posicionador PD-CCB-01.

Fonte: Autor.

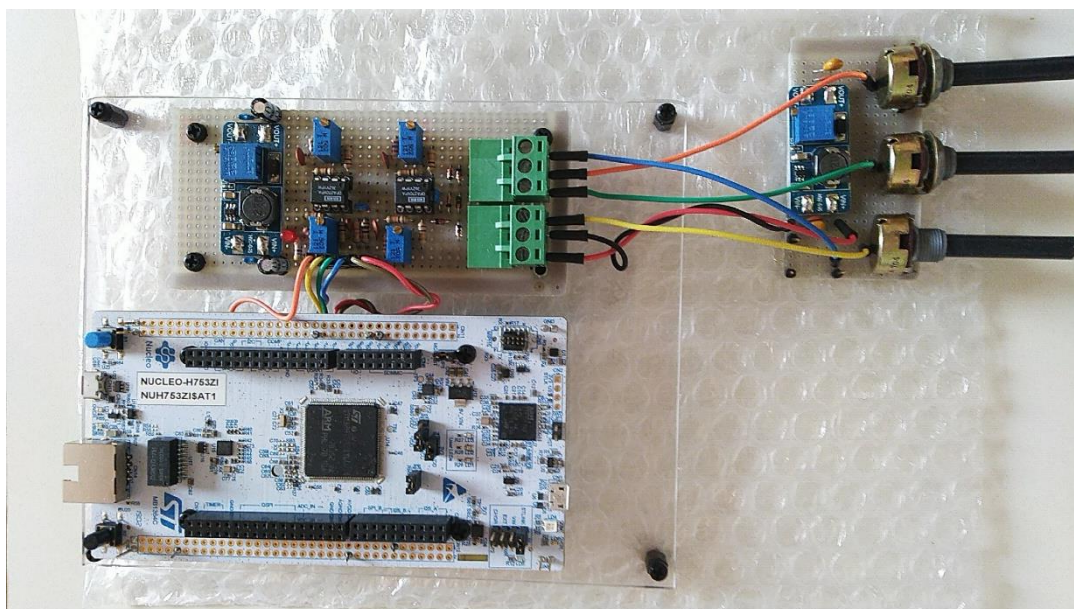


Fig. 7.6 – Protótipo do conjunto PD-CCB-01 + Giga de testes (à direita).

Fonte: Autor.

7.3 Projeto do *firmware*

O desenvolvimento do *firmware* embarcado foi feito com base nas seguintes premissas de projeto:

- Taxa de amostragem: 1 ms. Todas as tarefas necessárias à execução de qualquer dos algoritmos de controle selecionados devem ser feitas em menos de 1 ms; isso

não significa que os processos industriais nos quais o posicionador estiver inserido necessitem de mesma taxa. Geralmente as taxas dos processos são bem mais lentas, entre 20 ms e 500 ms, tipicamente. Não é raro taxas de *scan* de 1 s. O posicionador embarcado está preparado para ser inserido em malhas de 1 ms, se necessário;

- Aplicação *Bare Metal* (sem uso de RTOS, o qual é excelente opção para o caso de aplicação comercial, contendo diversas outras funcionalidades no *firmware*);
- Linguagem C;
- Códigos dos algoritmos de controle exportados pelo Matlab Coder®. Ou seja, todos os códigos escritos em Matlab® não foram reescritos em C, foram exportados pela ferramenta do Matlab® e importados pelo projeto de *firmware* embarcado.

A fase inicial de projeto definiu a arquitetura e o fluxograma principal de tarefas, tais como:

- Leitura dos sensores, com processamento de filtragem, média etc.;
- Seleção do algoritmo a ser executado;
- Execução do algoritmo de compensação de atrito escolhido;
- Atualização das saídas;
- Console serial para recebimento de comandos e/ou envio de status; etc.

O passo seguinte foi a definição das interfaces para encapsulamento dos algoritmos de controle, ou seja, cada código de algoritmo é encarado como um bloco caixa preta, com entradas e saídas bem definidas. Por fim, foi criada a metodologia de conversão dos códigos dos algoritmos em Matlab® para C/C++, a serem embarcados na plataforma ST™. Para tal, foi usada a ferramenta *Matlab Coder*®, no ambiente Matlab®. Há ainda duas outras ferramentas similares, *Simulink Coder*® e *Embedded Coder*®, essas duas no ambiente Simulink®. Não foi necessária a sua utilização, pois todos os algoritmos foram escritos em código Matlab®, dentro de blocos *Matlab Function*. Para sistemas desenvolvidos exclusivamente em ambiente Simulink® puro, as ferramentas *Simulink Coder*® e *Embedded Coder*® tornam-se excelentes opções para geração de código embarcado.

A logística de inserção dos algoritmos no posicionador embarcado previu a gravação de todos aqueles de uma vez, com um mecanismo simples de seleção dinâmica em *runtime* (em tempo de execução). Na versão atual, os pressionamentos consecutivos de um botão alternam o acendimento de *leds* que identificam o algoritmo ativo no momento.

Uma vez embarcados os algoritmos no *hardware*, eles foram novamente validados, via ambiente Matlab/Simulink®, porém sem os blocos *Matlab Function*. No lugar desses, o posicionador físico PD-CCB-01 foi inserido.

7.3.1 Arquitetura e fluxograma principal de tarefas

A arquitetura de *firmware* conta com os seguintes periféricos principais:

- *Timer*, com interrupção de 1 ms;
- Conversor A/D: 03 canais de 12 bits = 4096 pontos, $V_{ref} = 2,50$ V, resolução de 610,35 μ V;
- Conversor D/A: 01 canal de 12 bits, características similares ao A/D.

Já os periféricos secundários, com funções não vitais, são:

- Botões: 02. Um para seleção de algoritmo de controle e outro para seleção de modo (*Stop/Run*);
- *Leds*: 04. Três para indicação de algoritmo de controle selecionado e um para indicação de modo (*Stop/Run*).

Por fim, têm-se como periféricos opcionais:

- Ethernet e USB device: Possibilidade de interface de comando & supervisão, bem como de log. Atualmente não usados.

O *timer* de 1 ms é responsável por disparar as conversões A/D nessa taxa. A cada 1 ms, um *trigger* é dado pelo *timer* para o A/D e uma sequência de 03 conversões é iniciada. A cada término de conversão de um canal é gerada uma interrupção de A/D, para que o valor seja salvo na variável correspondente (i_1 , i_2 , i_3). Uma conversão leva 293,33 μ s e já traz em si uma média de 08 leituras, através de uma técnica de *hardware oversampling* do próprio A/D, evitando o uso de acumuladores e cálculo de médias externas ao processo de conversão.

Assim, o conjunto de três conversões leva 880 μ s, sendo inferior à taxa desejada de 1 ms. Ainda que o tempo de sobra de 120 μ s possa ser suficiente para as execuções das demais tarefas de *firmware* (execução de algoritmo de controle, tratamento de botões, *leds*, console etc.), optou-se pela utilização das amostras ($n-1$), ou seja, o *loop* de processamento principal de tarefas possui exatos 1 ms para execução de tarefas e não 120 μ s.

O fluxograma de *firmware* mostrado na Fig. 7.7 detalha as explanações feitas acima.

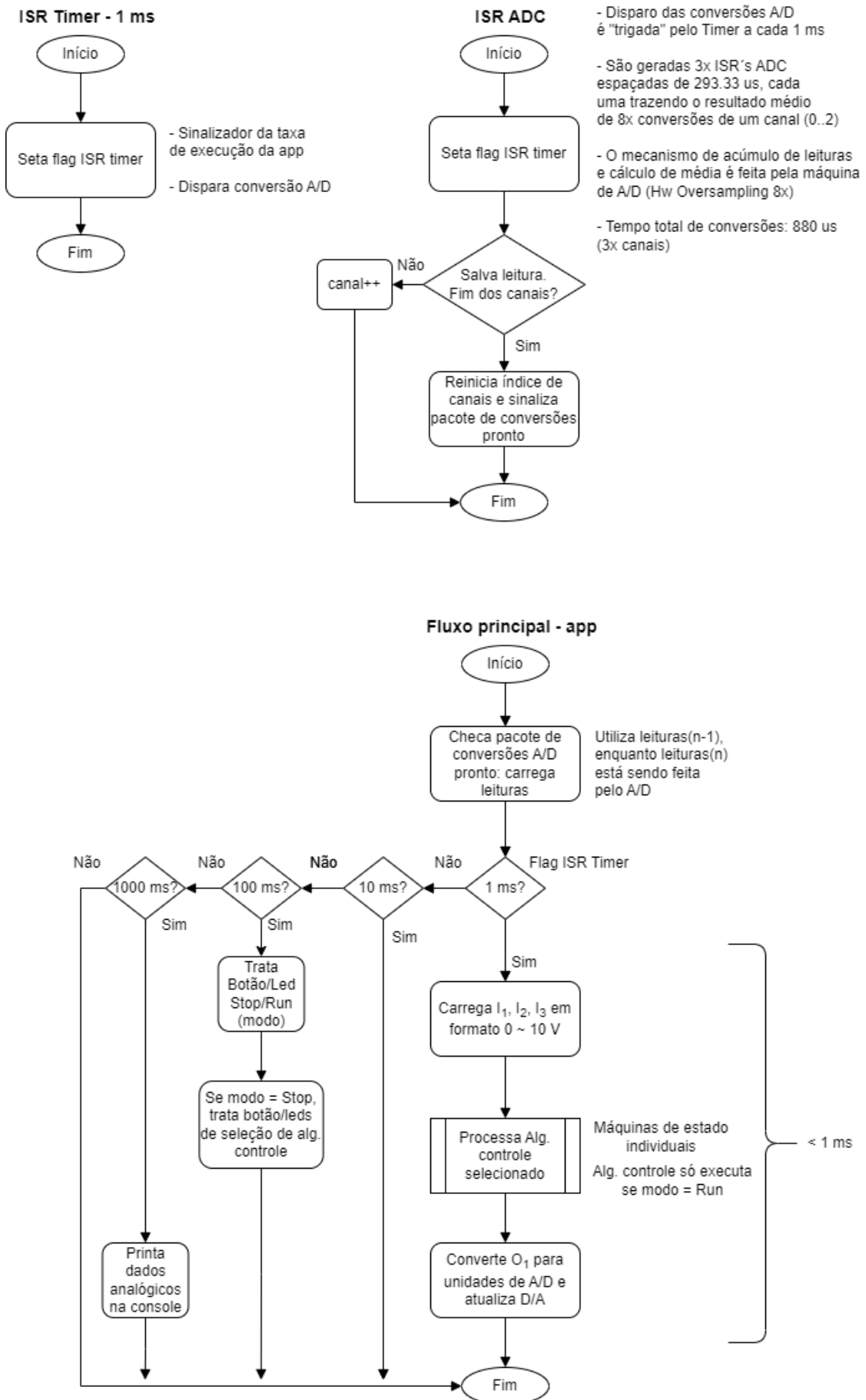


Fig. 7.7 – Fluxogramas – *Firmware* do posicionador PD-CCB-01.

Fonte: Autor.

7.4 Posicionador embarcado inserido na Planta Piloto de Vazão do LCPI

O *setup* de testes (modo regulatório e modo servo: tipos de *set point*, perturbações) é exatamente o mesmo usado nas validações dos algoritmos de controle não embarcados (apenas ambiente Matlab®). Vide Seção 6.4.

7.4.1 PID

Os diagramas Simulink® de validação dos algoritmos embarcados no posicionador em *hardware* são muito similares aos usados com blocos *Matlab Function*, vistos no capítulo anterior. Aqui, a fronteira entre ambiente Simulink® e o posicionador embarcado é dada apenas pela placa de aquisição PCI-6229. Observe que, no caso do PID a seguir, conforme a Figura 7.8, a saída saturada do PI da malha externa chega na entrada de *set point* do posicionador através da porta Ao3. A entrada Ai18 permite monitorar a posição da haste da válvula de grafite e esse mesmo sinal também está indo para uma entrada do posicionador. Na verdade, o sinal de posição da haste nem precisaria estar no Simulink®, ele permanece para efeito de monitoração e registro.

Nos diagramas de interligação do posicionador à Planta Piloto de Vazão, vistos nos Capítulos 4 e 5, nota-se que há ainda uma ligação da saída O_1 do posicionador à entrada de comando (atuador 0 a 10 V) da válvula de grafite. Essa ligação não consta no diagrama da Figura 7.8, o que ocorre também para os demais algoritmos pertinentes.

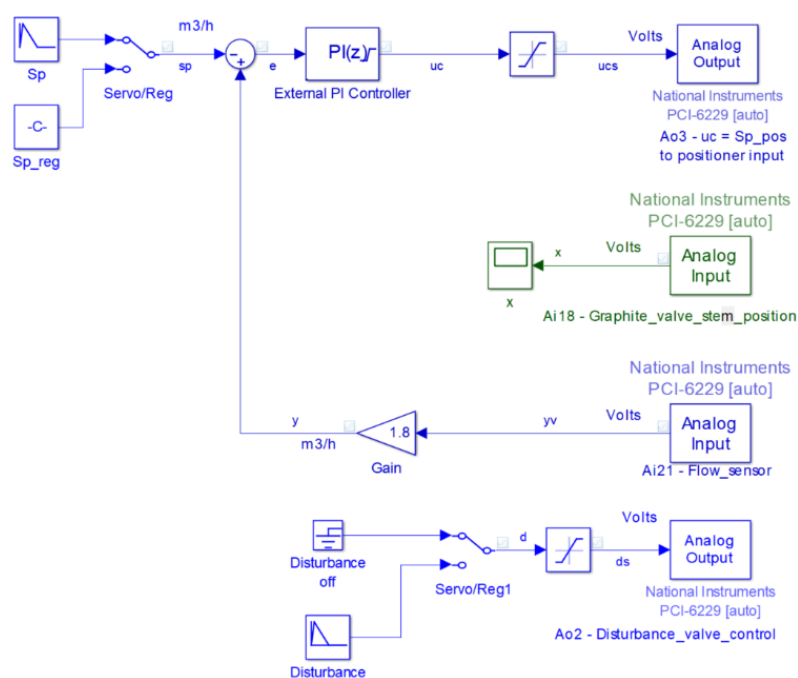


Fig. 7.8 – Diagrama Simulink® - Validação do posicionador *embedded* com algoritmo PID.

Fonte: Autor.

Visando facilitar o entendimento das versões não embarcada e embarcada do posicionador, a Fig. 7.9 mostra, em cor preta, o diagrama de blocos tradicional, não embarcado, e os destaques em cor verde ilustram as interfaces do posicionador embarcado.

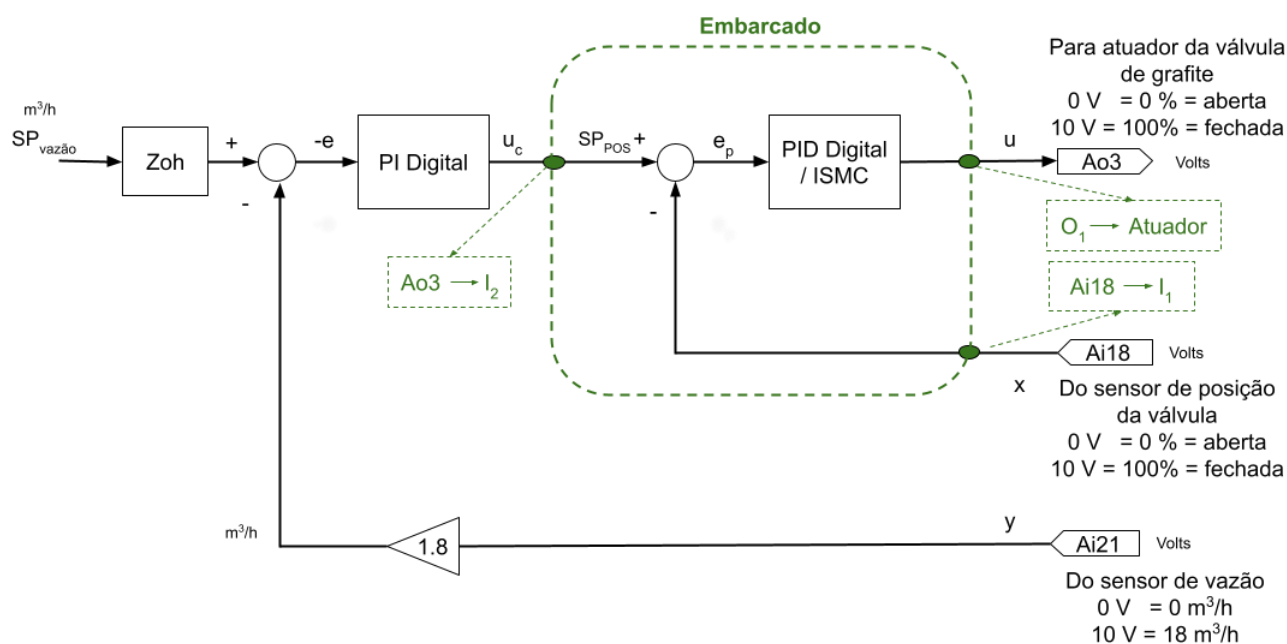


Fig. 7.9 – Diagrama de Blocos – Interfaces dos posicionadores não embarcado e PD-CCB-01 – PID e ISMC.

Fonte: Autor.

O tempo de execução do algoritmo PID embarcado foi de 3,75 μ s.

7.4.2 CR2

O sistema de controle utilizando o compensador CR2 em modo embarcado pode ser visto na Figura 7.10. Aqui, como esperado, há algumas particularidades. A saída do controlador PI da malha externa volta a ser ligada diretamente ao atuador da válvula de grafite, via porta Ao3 da placa PCI-6229. Como o papel do compensador, nesse caso, é fornecer um esforço paralelo ao do controlador PI, aquele recebe a informação de erro de vazão, via porta Ao1 e devolve o esforço complementar u_k via entrada Ai23 da placa PCI-6229 (ligada à saída O_1 do compensador).

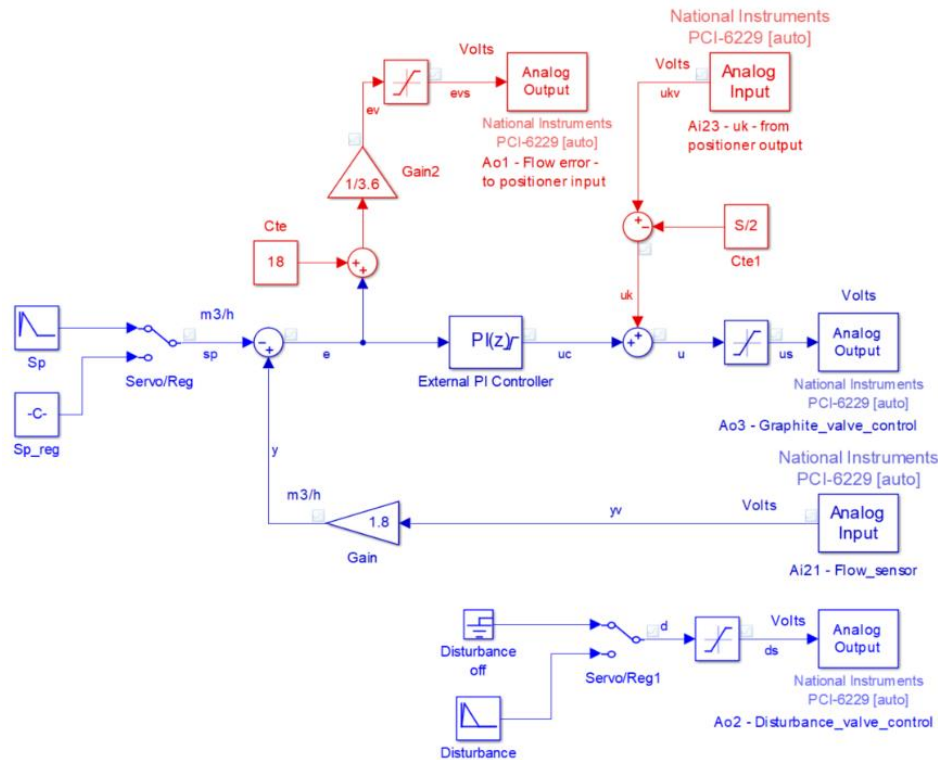


Fig. 7.10 – Diagrama Simulink® - Compensador *embedded* com algoritmo CR2.

Fonte: Autor.

Algumas particularidades devem ser observadas em relação ao condicionamento de sinais na interface da malha de vazão com o posicionador. A primeira delas é quanto ao sinal de erro de vazão. Como a calibração do sensor de vazão está feita para um fundo de escala de $18 \text{ m}^3/\text{h}$ (10 V), o erro de vazão adquire uma faixa de $-18 \text{ m}^3/\text{h} \sim +18 \text{ m}^3/\text{h}$. Porém, a faixa útil possível para os sinais analógicos é de $0 \sim 10\text{V}$. Assim, percebe-se no setor vermelho da Figura 7.10 o seguinte condicionamento: o sinal de erro é somado a 18, e a seguir dividido por 3,6, colocando-o na faixa de $0 \sim 10\text{V}$. O compensador, ao receber esse sinal, faz a operação inversa: multiplica por 3,6 e subtrai 18, retornando o erro para a faixa original da Planta Piloto de Vazão. Esse condicionamento é feito também para os algoritmos PID + CR2 em cascata e ISMC + CR2 em cascata, ambos embarcados.

A segunda particularidade diz respeito ao sinal u_k vindo do posicionador. Como no algoritmo CR2 a amplitude do sinal u_k varia de $-S/2 \sim +S/2$, o compensador soma $S/2$ ao sinal u_k antes de transferi-lo à saída O_1 . Assim, a saída O_1 torna-se apenas positiva, com excursão de $0 \sim 2*(S/2) = 0 \sim S$. O controle de vazão, por sua vez, faz a operação inversa, subtraindo $S/2$ do sinal recebido em Ai23. Observar ainda que o valor típico de S é de 28,22 % (porcentagem do esforço de controle), o que representa 2,822 V para um fundo de escala de 10 V. Portanto, a excursão de $0 \sim S$ está totalmente dentro da faixa útil analógica. Essa particularidade é exclusiva do compensador CR2 embarcado.

A Fig. 7.11 exibe os pontos de interface do posicionador PD-CCB-01, em relação à versão não embarcada.

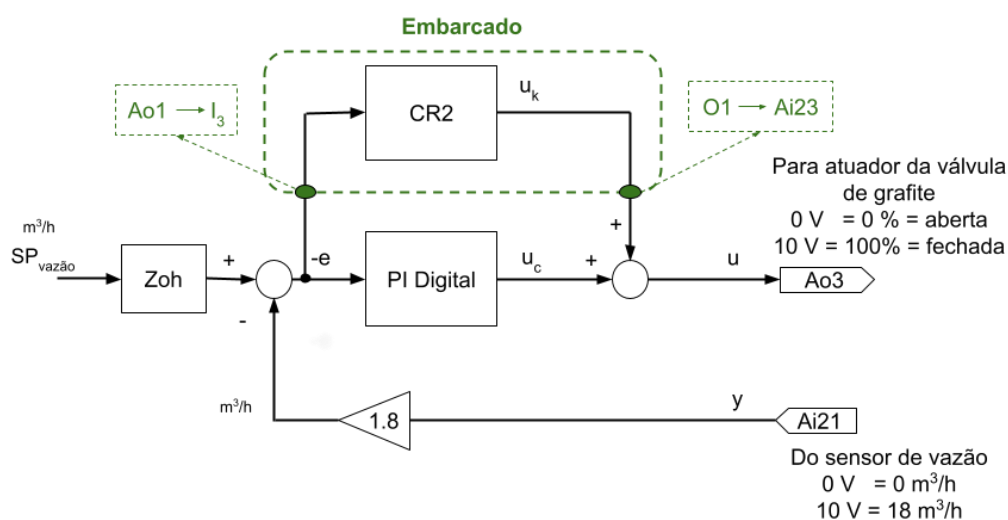


Fig. 7.11 – Diagrama de Blocos – Interfaces dos posicionadores não embarcado e PD-CCB-01 – CR2.
Fonte: Autor.

O tempo de execução do algoritmo CR2 embarcado foi de 1,5 μ s.

7.4.3 PID + CR2 em cascata

O diagrama de controle usando o algoritmo PID + CR2 em cascata, ou seja, com o controlador PID na malha interna de posição, é ainda mais simples, conforme mostra a Figura 7.12. Isso porque o posicionador recebe tanto a informação de erro de vazão, via porta Ao1, como o set point u_c vindo da saída do controlador PI, além de uma tomada do sensor de posição da haste (ligado à porta Ai18 da PCI-6229). Todo o tratamento do algoritmo CR2 (geração de u_k) como do PID é feita de maneira embarcada. Obviamente, a saída O_1 do posicionador é ligada ao comando (atuador 0 a 10 V) da válvula de grafite, o que não é mostrado na Figura 7.12. Note-se, ainda, que esse diagrama é o mesmo para o algoritmo ISMC + CR2 em cascata, uma vez que o PID é substituído pelo ISMC na estrutura interna do posicionador, mas as interfaces permanecem as mesmas.

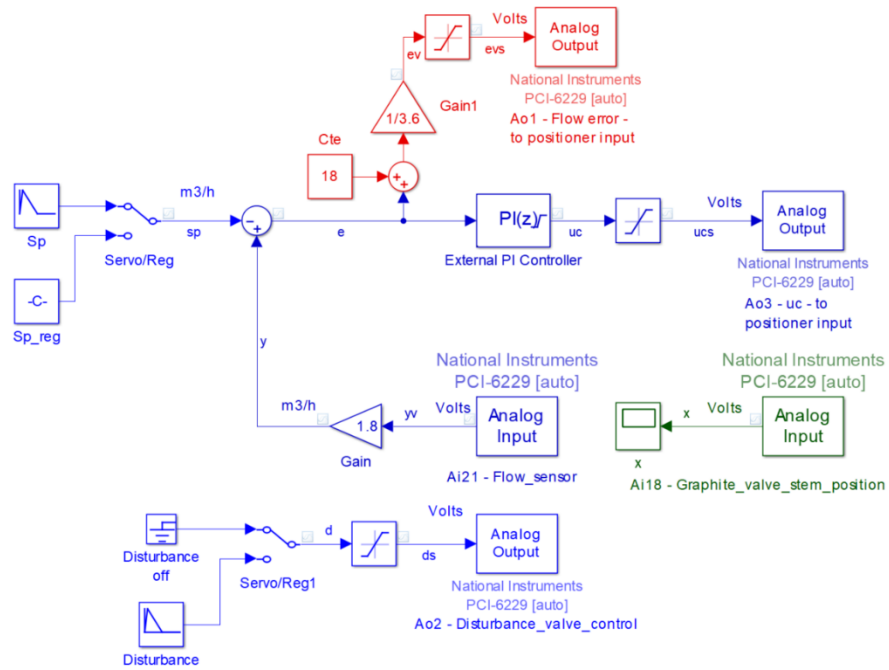


Fig. 7.12 – Diagrama Simulink® - Posicionador *embedded* com algoritmo PID ou ISMC + CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

Observe na Fig. 7.13 os pontos de interface do posicionador embarcado, em relação à versão Matlab®. A malha de perturbação não é indicada nesse diagrama.

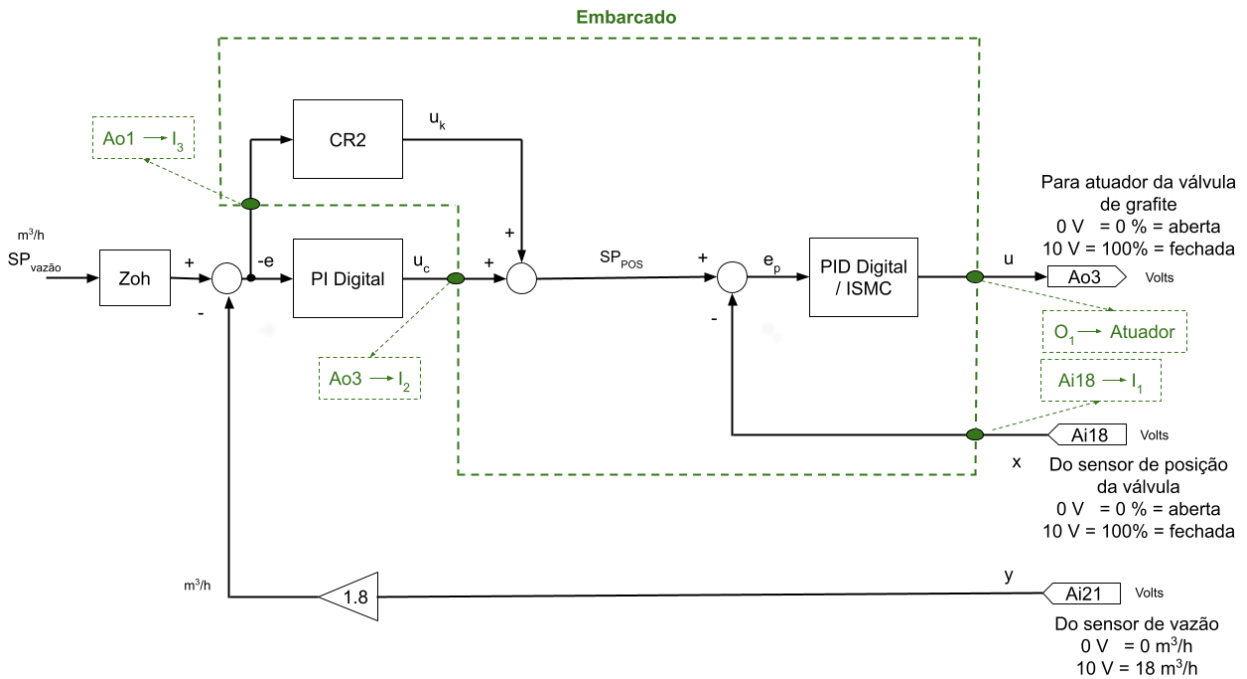


Fig. 7.13 – Diagrama de Blocos – Interfaces dos posicionadores não embarcado e PD-CCB-01 – PID ou ISMC + CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

O tempo de execução do algoritmo PID + CR2 em cascata embarcado foi de 5,1 μ s.

7.4.4 ISMC

Por fim, a validação do algoritmo ISMC em modo embarcado usa o mesmo diagrama de validação do controlador PID, uma vez que a estrutura das malhas externa e interna é a mesma (Figura 7.12). O tempo de execução do algoritmo ISMC embarcado foi de 9,5 μ s.

Durante os ensaios em bancada para validação do algoritmo ISMC (antes de instalar o posicionador embarcado na Planta Piloto de Vazão do LCPI), surgiu um resultado oscilatório na saída, registrado na Fig. 7.14.

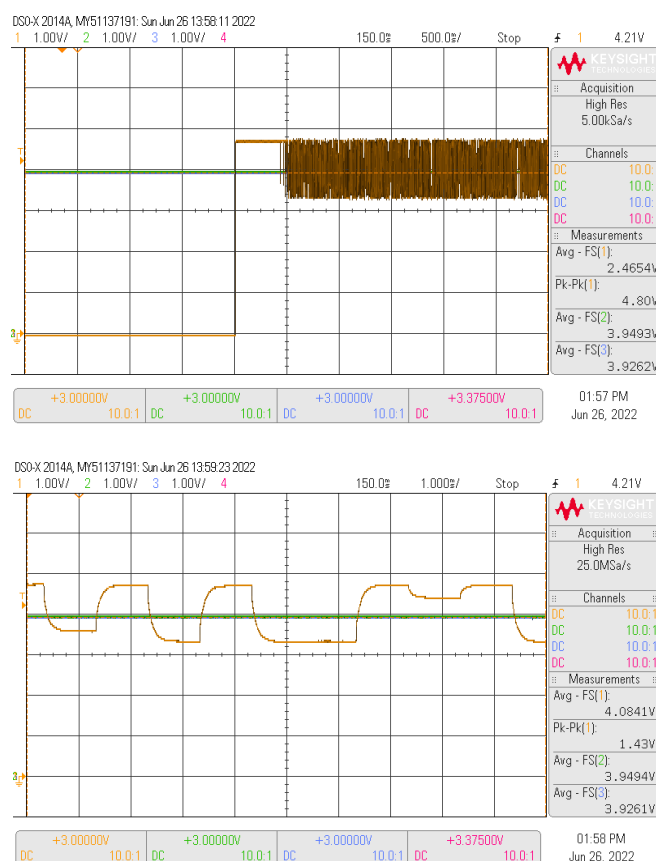


Fig. 7.14 – Ruído de saída do ISMC - Posicionador PD-CCB-01 (detalhe na imagem inferior).

Fonte: Autor.

Para as duas entradas I_1 (posição da haste x), I_2 (set point de posição sp) constantes e de valor = 4,0 V, a saída deveria, após a fase transitória inicial, estabilizar próximo dos 4,0 V, o que pode ser visto pelos resultados da simulação do ISMC em ambiente Matlab®, mostrados na Fig. 7.15.

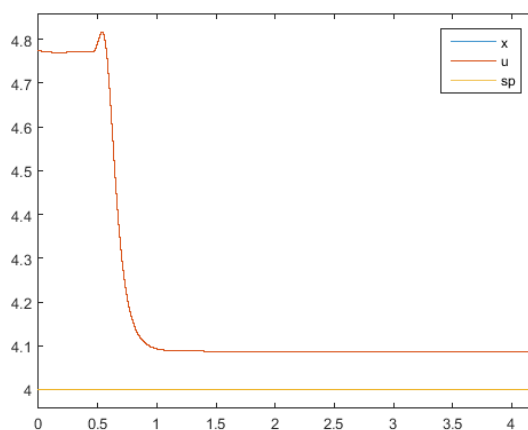


Fig. 7.15 – Teste de estabilidade – ISMC em Matlab®.

Fonte: Autor.

Foram realizadas tentativas de alteração nos parâmetros do ISMC, pois desconfiou-se de *chattering* excessivo. Não houve sucesso. Para isolar as entradas analógicas (circuitos eletrônicos + conversão A/D) do algoritmo, fixou-se internamente as entradas x e $sp = 4,0$. Nesse caso, a saída não apresentou nenhuma oscilação. Isso provou que a origem da oscilação de saída não estava no algoritmo em si, mas sim na captação de perturbações no *hardware* das entradas analógicas, bem como no processo de conversão A/D do microcontrolador.

Para simular em ambiente Matlab® a situação mais próxima da real embarcada, inseriu-se um sinal de perturbação, a fim de se observar o comportamento da saída. De fato, a oscilação ocorre de forma muito similar à embarcada, como mostrado na Fig. 7.16.

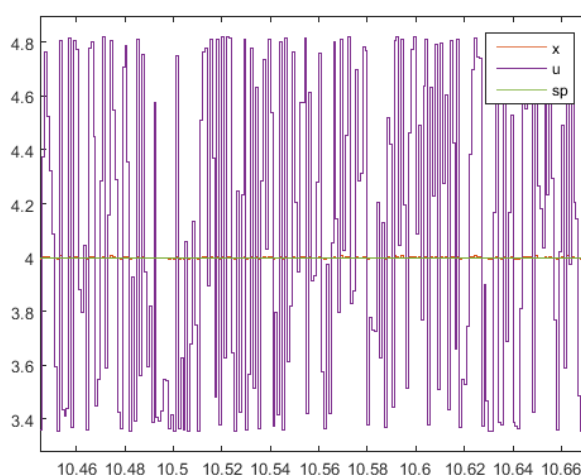


Fig. 7.16 – Reprodução de saída com ruído – ISMC em Matlab®.

Fonte: Autor.

Foram realizadas outras simulações com parametrização das entradas em valores diferentes, para comparação e validação do algoritmo em si. Para uma dessas parametrizações, fixou-se $x = 4,0$ e $sp = 3,0$. A Fig. 7.17 ilustra essa simulação em ambiente

Matlab®, sem perturbação. A Fig. 7.18 ilustra a mesma parametrização, para o posicionador embarcado, mas com entradas fixadas no *firmware*, desconsiderando as entradas analógicas (cores dos sinais: azul = x , verde = sp , laranja = u).

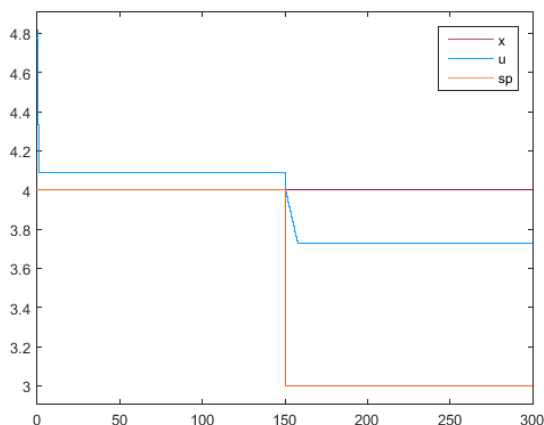


Fig. 7.17 – Validação de ISMC em Matlab® sem perturbações.

Fonte: Autor.

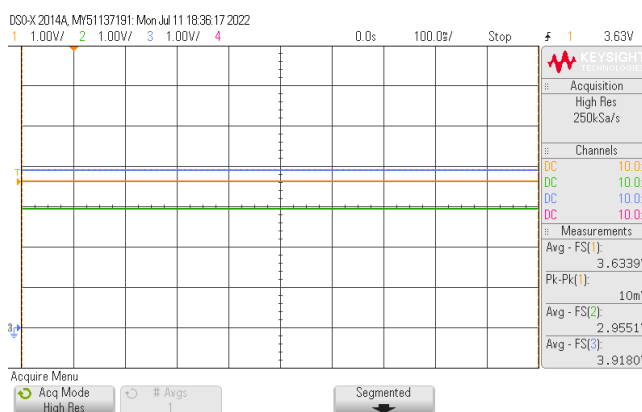


Fig. 7.18 – Validação de ISMC no PD-CCB-01 sem perturbações.

Fonte: Autor.

A respeito da oscilação no posicionador embarcado, foi detectada qual das entradas tinha maior peso na geração da oscilação, ou seja, qual das entradas, sp ou x , era mais sensível para o ISMC. Não é difícil notar que o algoritmo ISMC apresenta sensibilidade muito maior para variações da posição da haste x do que para variações do sp (*set point* de posição). De fato, isolando-se uma a uma essas entradas em testes, mantendo-se a outra constante, confirmou-se que a causa das oscilações vinha de ruídos na entrada x .

Uma solução encontrada para esse problema foi a inserção de um filtro *LPF* (*Low Pass Filter*) digital na saída, com corte em 5 Hz. Antes foram feitas diversas outras análises, como: avaliação do nível de ruído comparativo entre as entradas, para validação de *hardware*; uso de fonte de alimentação externa linear para a entrada x , em substituição à fonte chaveada interna da giga; normalização das entradas e saída para a faixa 0.0 ~ 1.0 (possíveis problemas numéricos no algoritmo, ainda que todas as operações

estivessem em ponto flutuante); tentativas de filtragem digital na entrada x , mas sem sucesso, inclusive com piora nos resultados. O ensaio com filtro de saída é mostrado na Fig. 7.19. Observar comparativamente os resultados das Figuras 7.14 e 7.19. A amplitude da oscilação de saída foi reduzida de cerca de 1,5 Vpp para 400 mVpp.

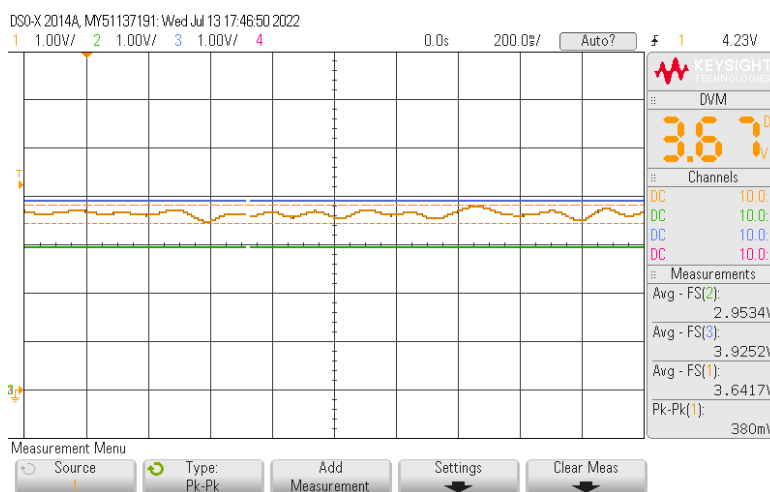


Fig. 7.19 – ISMC no PD-CCB-01 com filtro LPF de saída.

Fonte: Autor.

Com a adição do filtro digital LPF com $F_c = 5$ Hz na saída O_1 (DAC), o tempo de execução do algoritmo ISMC embarcado ficou em 285 μ s, ante 9,5 μ s sem o filtro.

Todavia, nos ensaios reais na Planta de Vazão do LCPI, o melhor desempenho para o ISMC se deu sem o filtro de saída. Isso poderia ser explicado pela relativa alta latência de resposta do algoritmo quando na presença do filtro, o que tende a descaracterizar o ISMC em si. E, por mais que haja oscilação de saída sem o filtro, a resposta do algoritmo é, sem dúvida, mais rápida do que com o filtro presente. E, por fim, a oscilação (1 kHz, mesma da taxa de amostragem e execução do algoritmo) é filtrada naturalmente pelo atuador da válvula.

7.4.5 ISMC + CR2 em cascata

Conforme comentado na Subseção 7.4.4, a similaridade entre os diagramas do posicionador com controlador PID e aquele com controlador ISMC permite que seja feita no posicionador com algoritmo PID + CR2 em cascata a troca do PID pelo ISMC, tornando-se ISMC + CR2 em cascata. O diagrama Simulink® é o mesmo da Subseção 7.4.3. O tempo de execução do algoritmo ISMC + CR2 em cascata embarcado foi de 10,5 μ s.

As Figuras 7.20 e 7.21 ilustram o posicionador PD-CCB-01 instalado na Planta Piloto de Vazão do LCPI, junto à placa de relés e às borneiras da placa de aquisição PCI-6229.

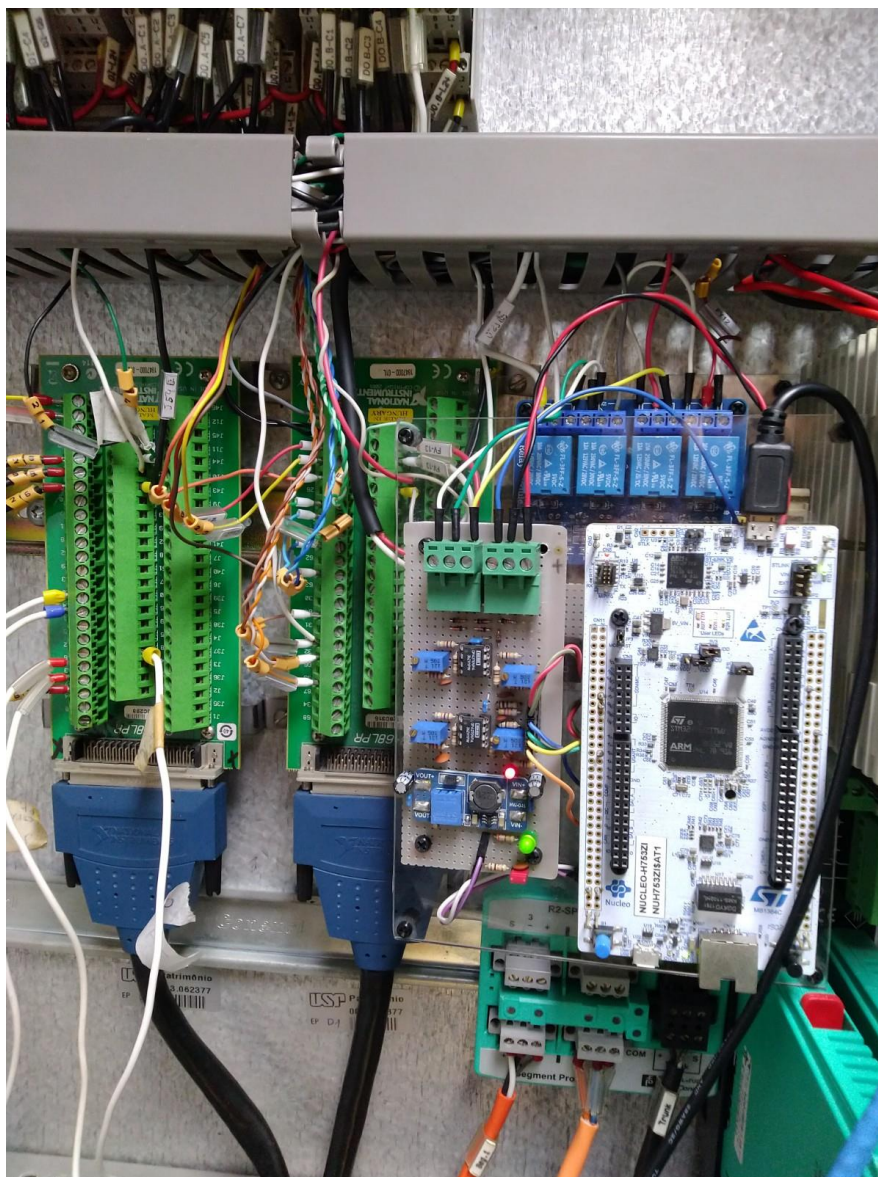


Fig. 7.20 – Posicionador PD-CCB-01 instalado no rack da Planta Piloto de Vazão.

Fonte: Autor.

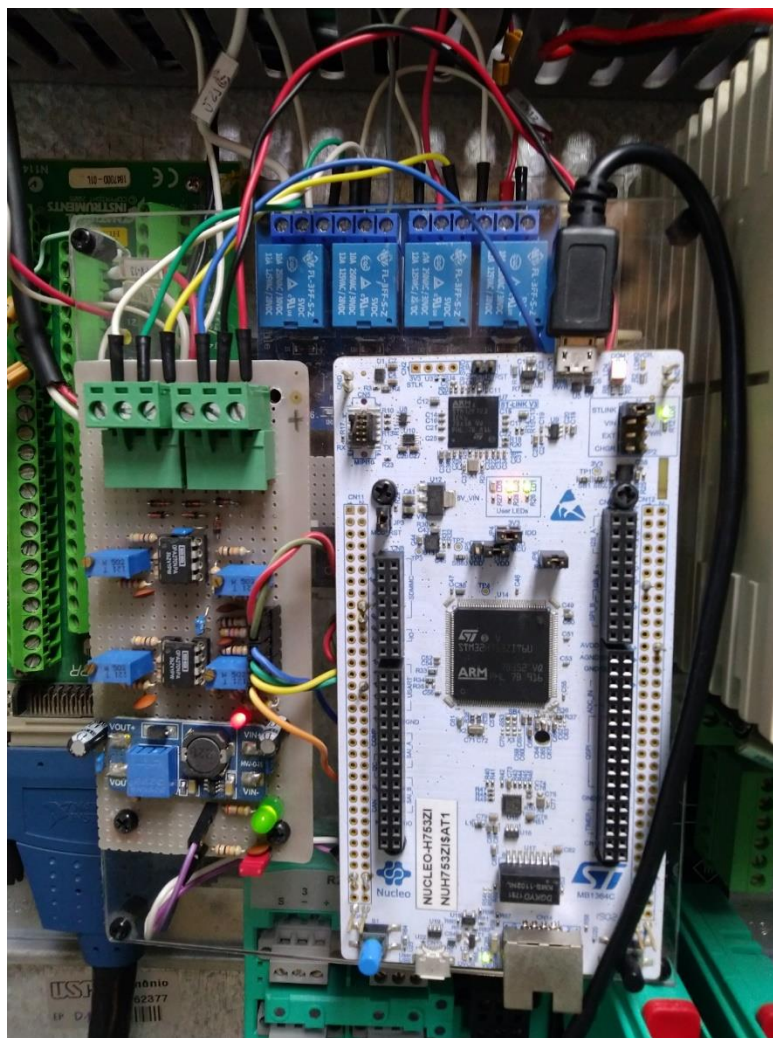


Fig. 7.21 – Destaque - Posicionador PD-CCB-01 instalado no rack da Planta Piloto de Vazão.

Fonte: Autor.

8 Resultados

8.1 Malha externa de controle de vazão com controlador PI sem posicionador

O primeiro ensaio realizado nessa etapa de validação do posicionador embarcado e dos posicionadores comerciais foi o registro do comportamento da malha de vazão sem posicionador algum inserido. A ideia foi observar um ponto de partida, ou seja, dado o desempenho da malha de controle sem posicionador, tem-se uma referência para análise do nível de otimização da Planta Piloto de Vazão quando da inserção de posicionadores diversos.

Para todos os ensaios, o elemento final de controle é a válvula FV-11, com gaxetas de grafite, considerada de alto atrito. Repetem-se aqui as mesmas condições de ensaio descritas na Seção 6.4 para os modos Servo, Regulatório e Regime Permanente.

A Fig. 8.1 ilustra o comportamento da malha de vazão sem posicionador, ou seja, todo o trabalho fica por conta do controlador PI da malha externa. No modo Servo, é possível notar a dificuldade de rastreamento do *set point*, ainda que haja ausência de sobressinal. Observa-se também limitação na capacidade de reação a distúrbios (modo Regulatório) e, ainda, um razoável desempenho no modo Regime Permanente.

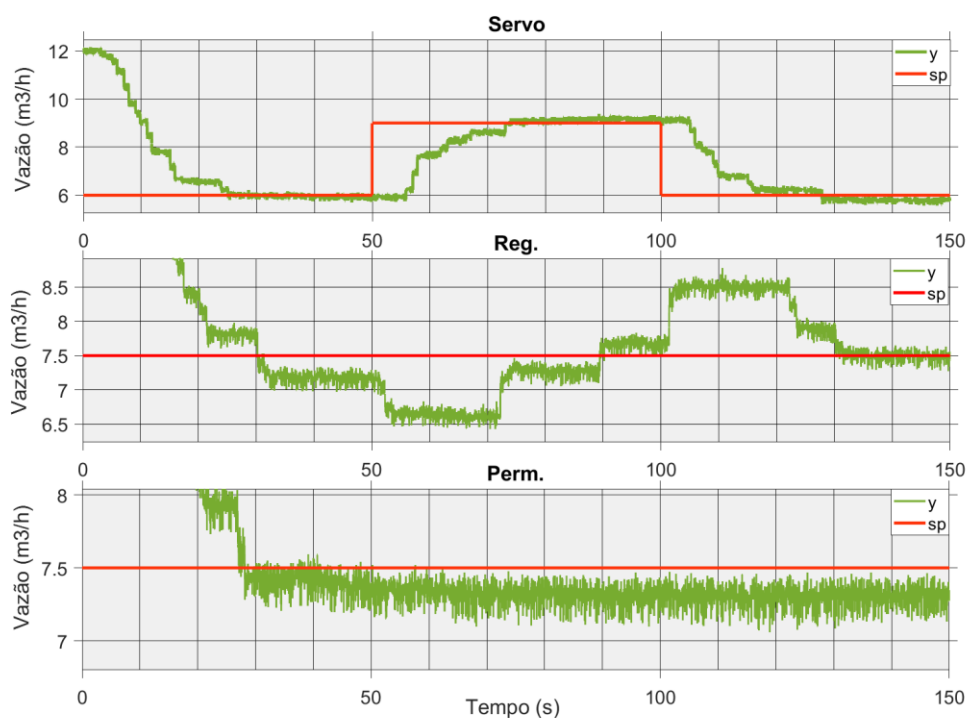


Fig. 8.1 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PI sem Posicionador.

Fonte: Autor.

8.2 Posicionador embarcado – PID

Para os algoritmos de controle e/ou compensação de atrito embarcados, foram realizados ensaios preliminares de validação, apenas da malha interna, de posição. Só então, com esse teste já feito, o posicionador é inserido na malha externa, de vazão. A Fig. 8.2 ilustra a validação preliminar do PID embarcado, apenas na malha de posição. O instante correto de inicialização do PID está por volta de 8 segundos. É possível observar-se boa resposta transitória, com erro estacionário médio nulo. O problema da sintonia adotada está na presença de certo nível de sobressinal.

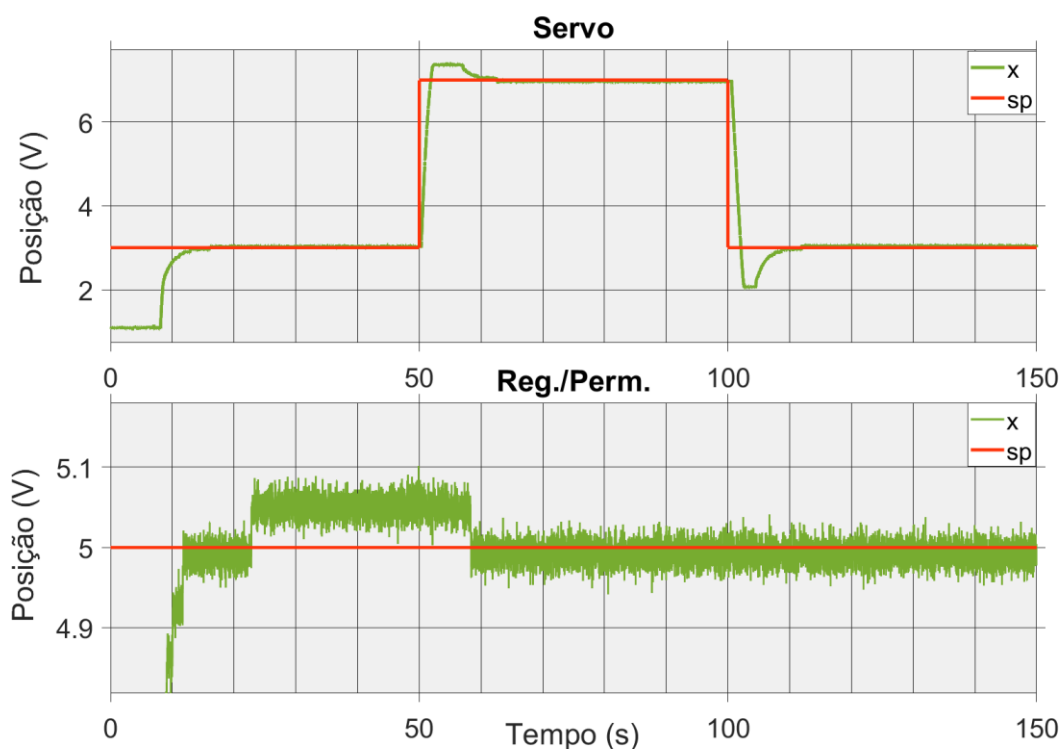


Fig. 8.2 – Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo, Regulatório e Regime Permanente - PID embarcado.

Fonte: Autor.

Já o ensaio na malha de vazão é apresentado na Fig. 8.3, onde se pode notar relativo aumento de desempenho em relação à ausência de posicionador. Evidencia-se, também, pelo Regime Permanente, uma tendência de controle mais arisco, ou seja, uma resposta mais rápida às mudanças na planta também tendem a gerar um Regime Permanente mais sensível e propenso a oscilações de baixa intensidade.

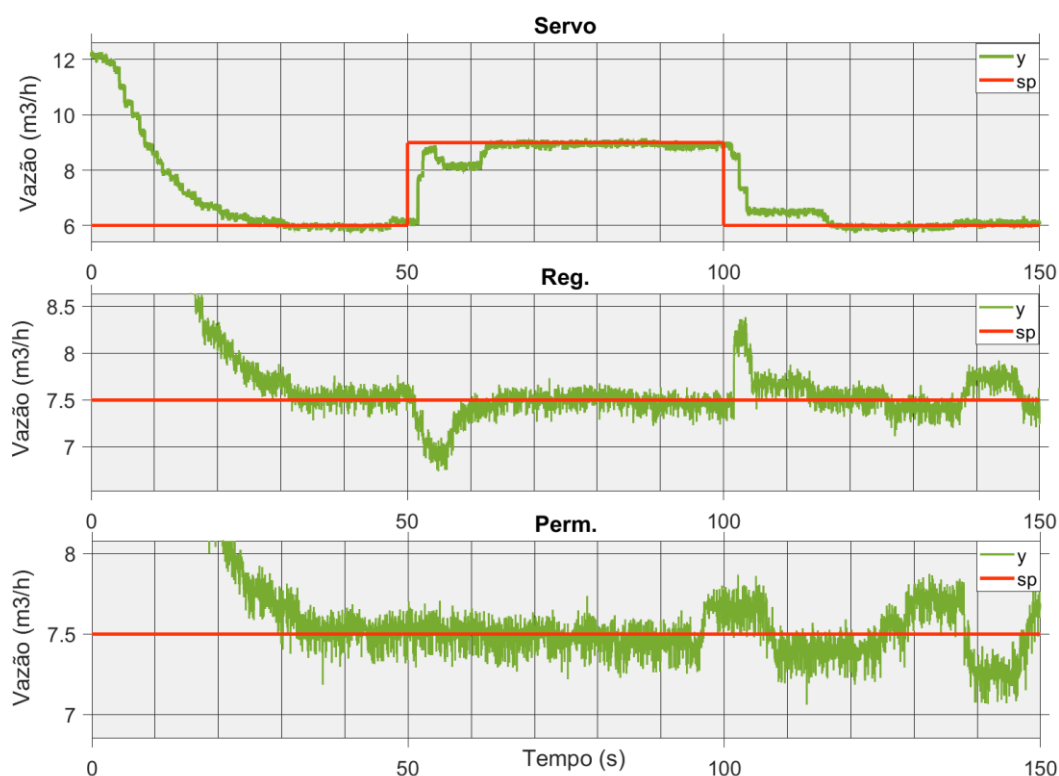


Fig. 8.3 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PID embarcado.
Fonte: Autor.

8.3 Compensador embarcado – CR2

Obviamente, o compensador CR2 está na malha de vazão, não sendo, como já explanado, um posicionador, pelo qual não há ensaios de malha interna nesse caso. A Fig. 8.4 evidencia o ensaio do compensador CR2. Apesar de um relativo bom resultado no modo Servo, ainda que com elevado sobressinal, notam-se as mesmas dificuldades do PI principal na capacidade de reação a distúrbios. No mais, a opção de usar o CF sem atuação no corte da ação integral do controlador PI de vazão também acabou comprometendo o desempenho.

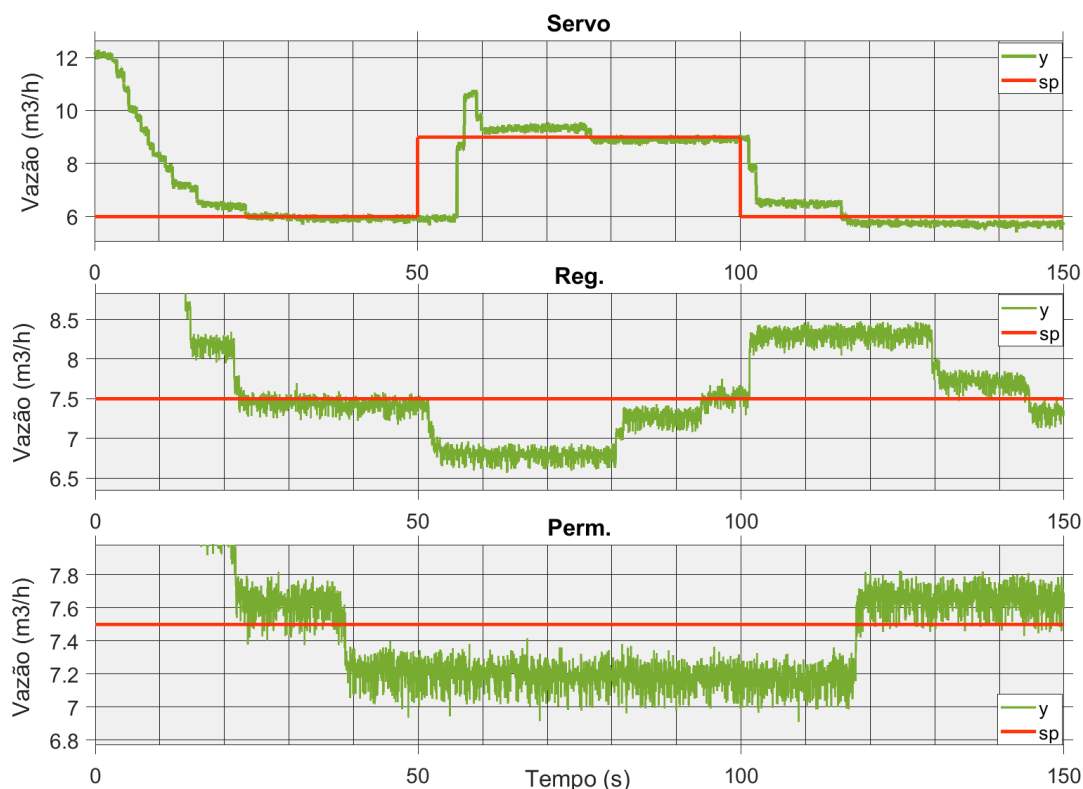


Fig. 8.4 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – CR2 embarcado.

Fonte: Autor.

8.4 Posicionador embarcado – PID + CR2 em cascata

Este é o primeiro ensaio da configuração em cascata, com o CR2 apoiando o PI na malha externa, e o posicionador embarcado com PID, na malha interna. Lembrando: o PID não é um algoritmo criado para a compensação de atrito em válvulas. Mas, por ser um dos algoritmos de controle mais usados na prática, foi incluído para efeitos comparativos. A expectativa de alto desempenho na junção dos dois algoritmos (malha externa e interna), de fato, não ocorreu. O que se evidenciou, na verdade, foi uma tendência à instabilidade, vista principalmente pós degrau positivo de *set point* no modo Servo. É o que ilustra a Fig. 8.5. A provável justificativa para esse comportamento reside na manutenção da sintonia do controlador PI da malha externa (mesmo que não agressiva), já que a inserção do posicionador na malha interna altera, via de regra, a dinâmica da malha como um todo. E vale também o comentário do item 8.3 sobre o CF.

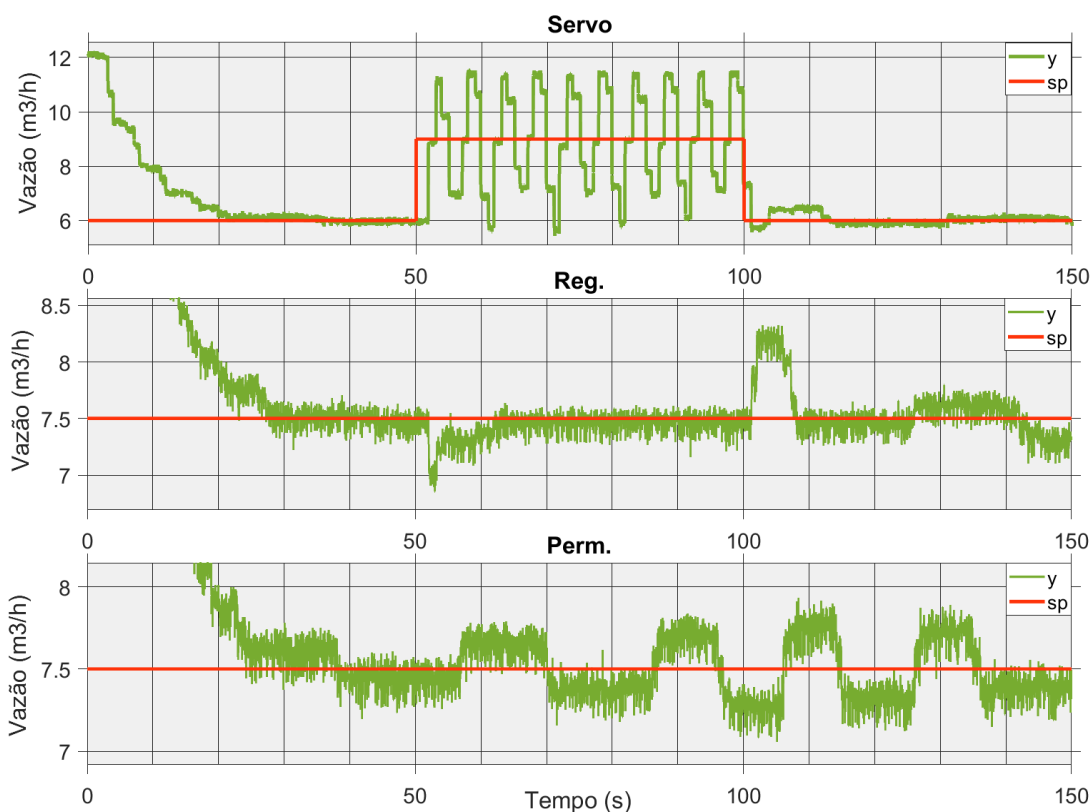


Fig. 8.5 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – PID + CR2 embarcado.

Fonte: Autor.

8.5 Posicionador embarcado – ISMC

O algoritmo ISMC, sem nenhum filtro adicional, embarcado no posicionador PD-CCB-01, foi inicialmente validado na malha de posição apenas (sem controle de vazão), conforme mostra a Fig. 8.6. Os instantes de inicialização do posicionador foram: cerca de 8 segundos para o modo servo, e 1,5 segundos para os modos Regulatório e Regime Permanente. Nota-se uma resposta similar ao PID, com pequena redução dos tempos de resposta em geral e um relativo aumento de sobressinal.

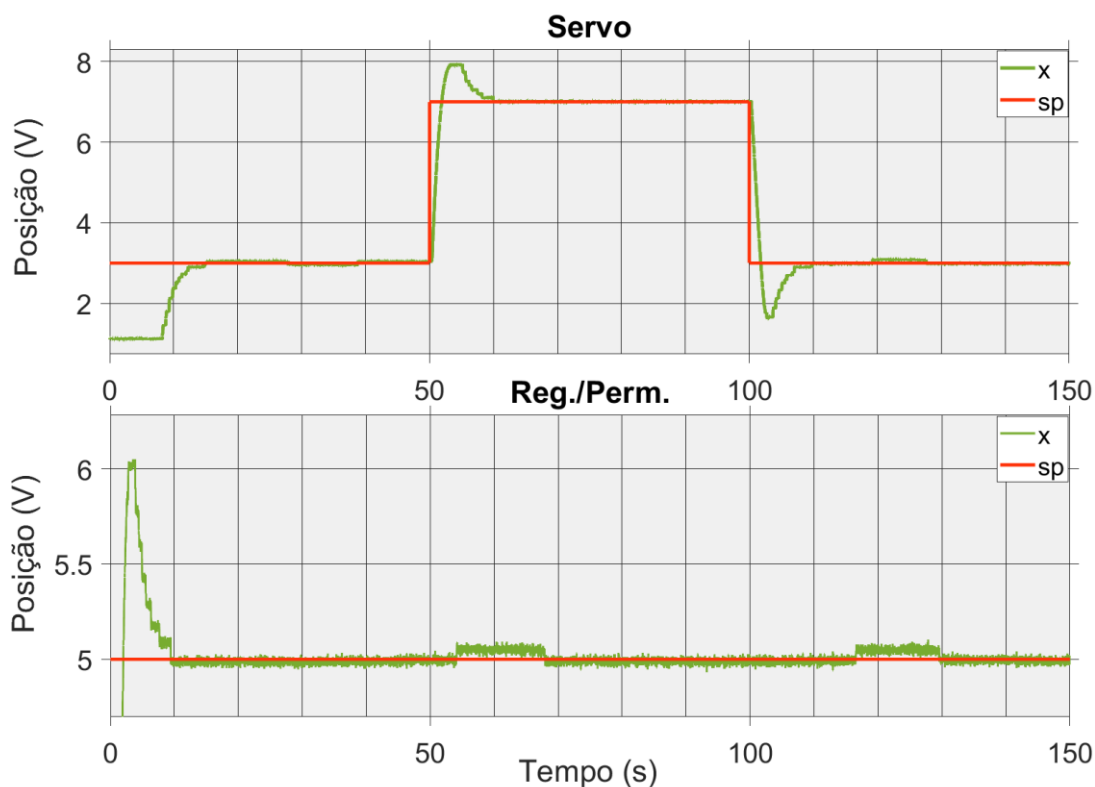


Fig. 8.6 – Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo, Regulatório e Regime Permanente - ISMC embarcado.

Fonte: Autor.

Já na malha de vazão, é possível observar bom desempenho em geral, destacando-se o comportamento de acomodação oscilatória da variável controlada (vazão), no modo servo, muito similar à curva de *chattering* da superfície de escorregamento, característica intrínseca do ISMC. O ensaio na malha de vazão é mostrado na Fig. 8.7.

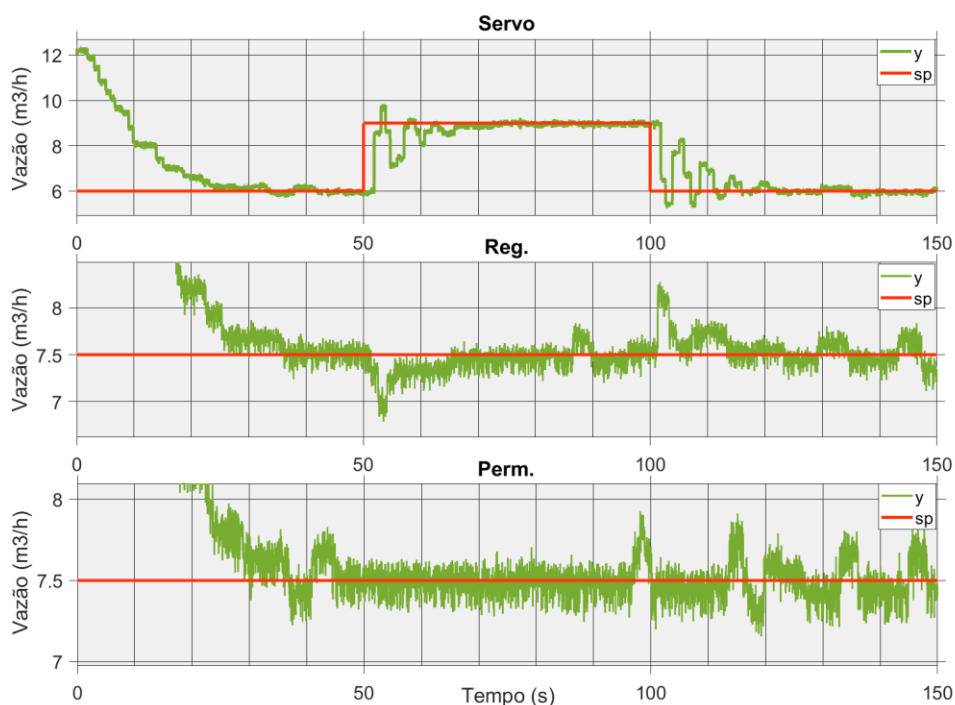


Fig. 8.7 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – ISMC embarcado.

Fonte: Autor.

8.6 Posicionador embarcado – ISMC + CR2 em cascata

Este é o segundo ensaio da configuração em cascata, com o CR2 apoiando o PI na malha externa e o posicionador embarcado com ISMC na malha interna.

Através da Fig. 8.8, se evidenciou, assim como no caso do PID + CR2, uma tendência à instabilidade, vista principalmente pós degrau positivo de *set point* no modo Servo. Porém, os modos Regulatório e Regime Permanente até que tiveram bons resultados. Essa avaliação é mais precisa através dos resultados analíticos, e não apenas gráficos. Os dados analíticos tabulares são apresentados na Seção 8.9.

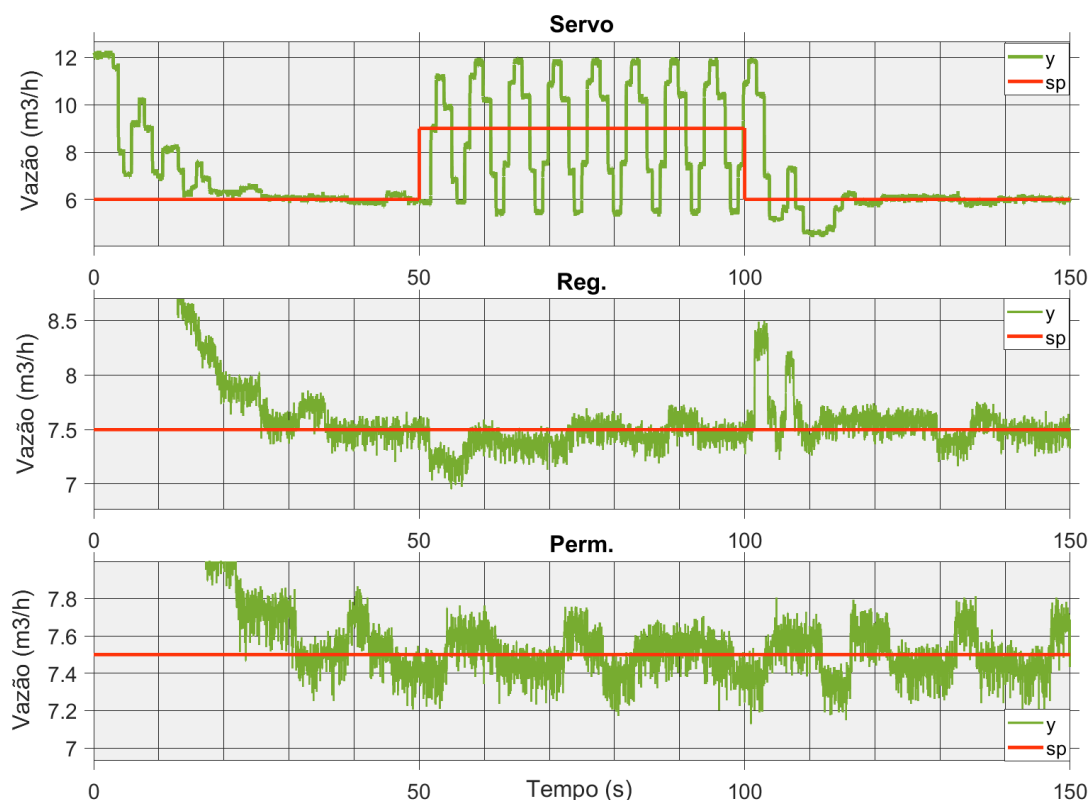


Fig. 8.8 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – ISMC + CR2 embarcado.

Fonte: Autor.

8.7 Posicionador comercial eletropneumático Fisher® (Emerson™)

O primeiro posicionador comercial ensaiado foi o eletropneumático, inicialmente apenas na malha de posição, cujo resultado é apresentado na Fig. 8.9. Os destaques positivos desse posicionador estão no tempo de subida e na ausência de sobressinal. Por outro lado, ele fica devendo quanto ao nível do erro estacionário, por ser um compensador proporcional puro.

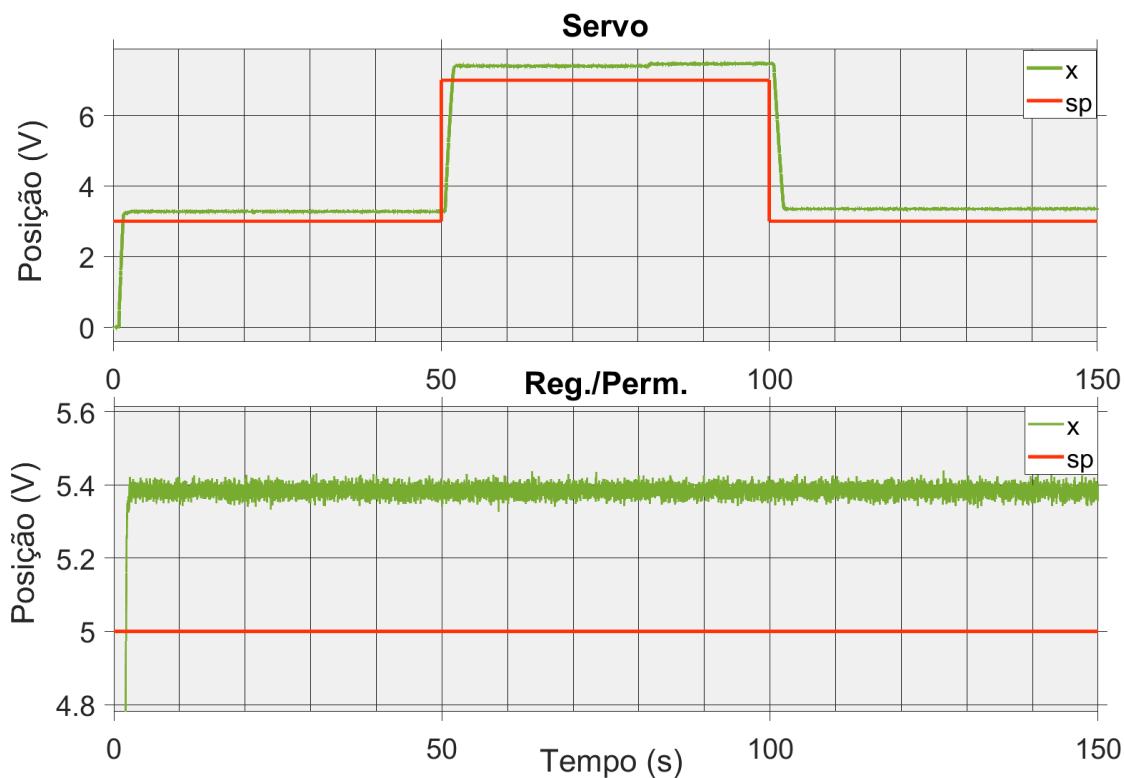


Fig. 8.9 – Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador Eletropneumático comercial.

Fonte: Autor.

Já no ensaio de vazão, o comportamento médio do posicionador eletropneumático apresenta relativa similaridade com o ISMC em geral (todos os modos), mas especialmente quanto às oscilações amortecidas da variável de vazão medida, no ensaio Servo. Nessa comparação ainda é possível notar que o ISMC apresenta amortecimento mais rápido que o eletropneumático. É o que evidencia a Fig. 8.10. É importante lembrar também que esse posicionador eletropneumático comercial não possui nenhum atributo interno específico para compensação de atrito em válvulas de controle.

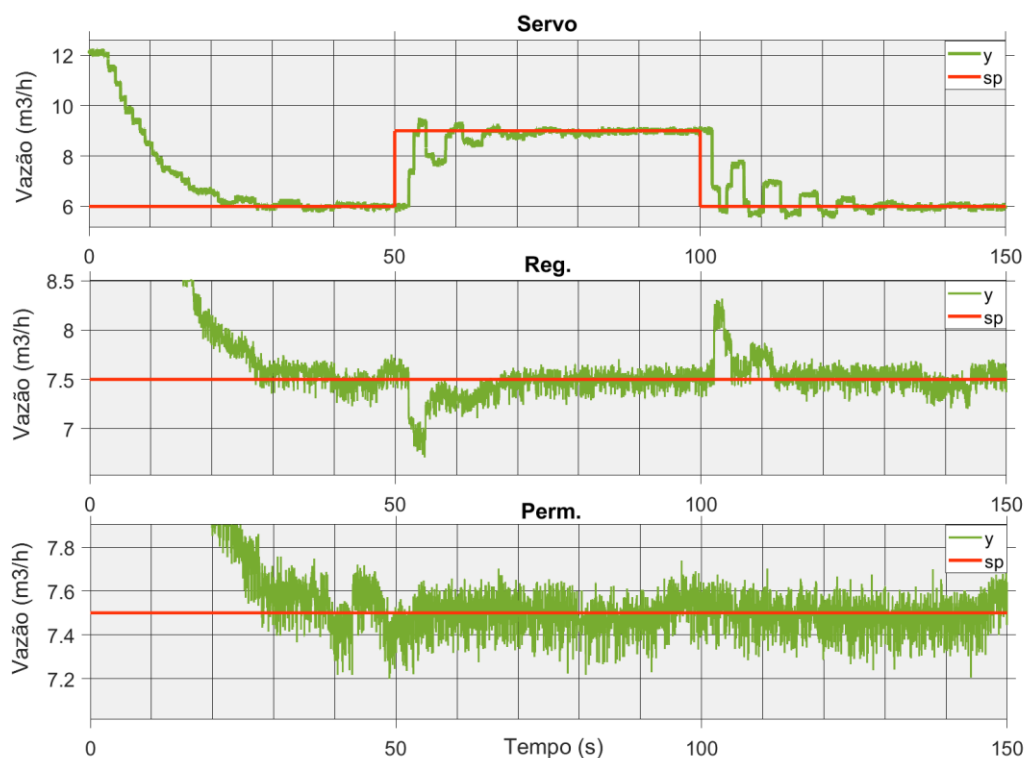


Fig. 8.10 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador eletropneumático comercial.

Fonte: Autor.

Complementando, a Fig. 8.11 apresenta o ensaio da configuração em cascata Eletropneumático + CR2. Graficamente, não é trivial notar diferenças entre este ensaio e o anterior, sem o CR2.

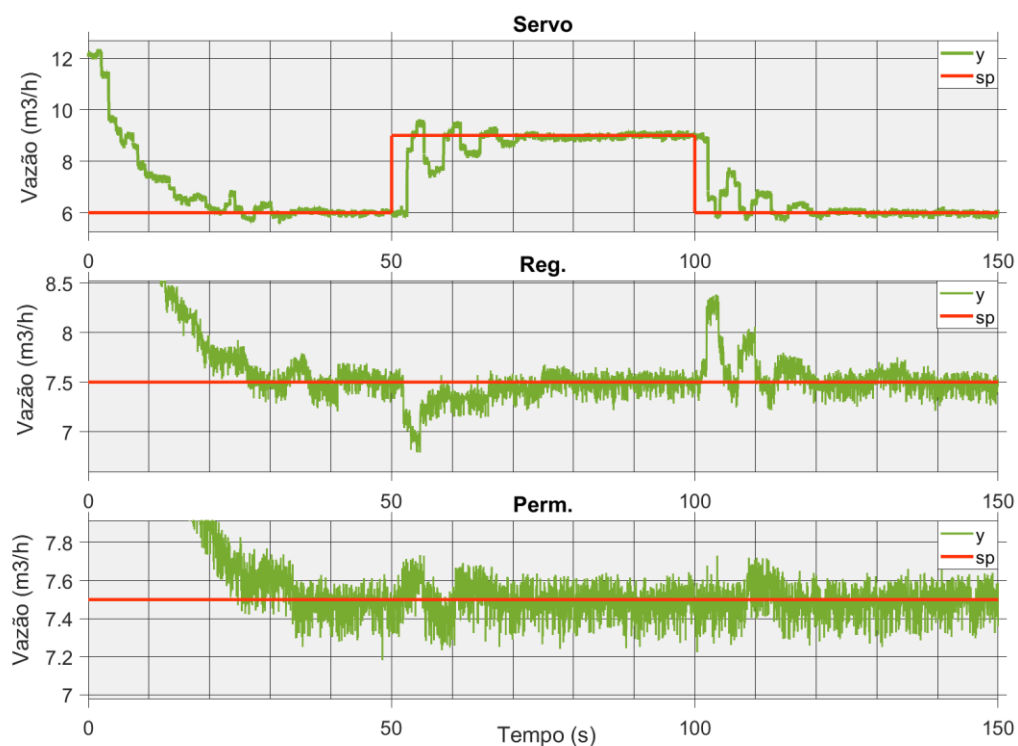


Fig. 8.11 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador eletropneumático comercial + CR2.

Fonte: Autor.

8.8 Posicionador comercial digital Fisher® (Emerson™) DVC6010F

O segundo posicionador comercial ensaiado é o DVC6010F, digital, que contém um PID de 6 parâmetros, mas não contém nada especificamente desenvolvido para a compensação de atrito em válvulas de controle. O ensaio na malha interna, de posição, é exibido na Fig. 8.12. Seguramente, em termos gráficos, esse é o melhor resultado médio entre os posicionadores ensaiados. O posicionador digital é rápido na resposta transitória e praticamente sem erro estacionário.

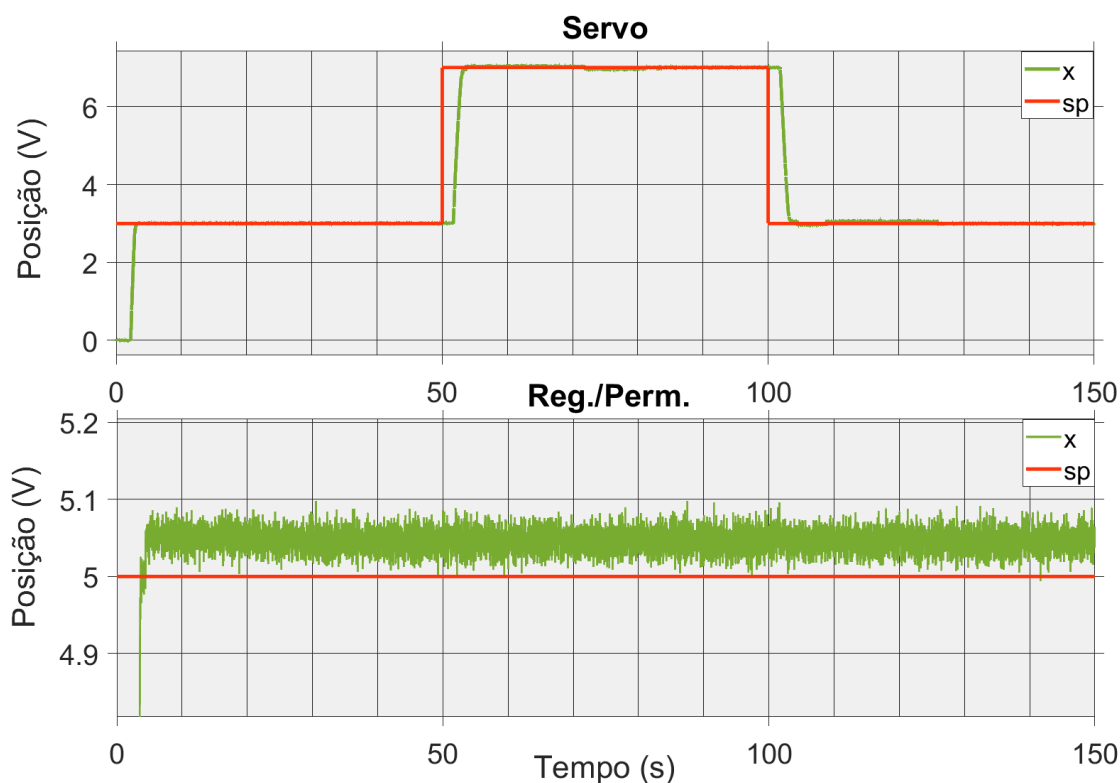


Fig. 8.12 – Curvas de ensaios da malha de posição - modos Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador Digital *Foundation Fieldbus*® comercial.

Fonte: Autor.

Para o ensaio na malha de vazão, notam-se respostas um pouco mais oscilatórias, com amortecimento lento, ainda que dentro da estabilidade. Isso se mostrou evidente não apenas nos momentos de transição de *set point* e/ou distúrbio, mas até mesmo no Regime Permanente, conforme a Fig. 8.13. Considera-se esse comportamento normal, já que a inserção do PID na malha interna aumenta a ordem do sistema.

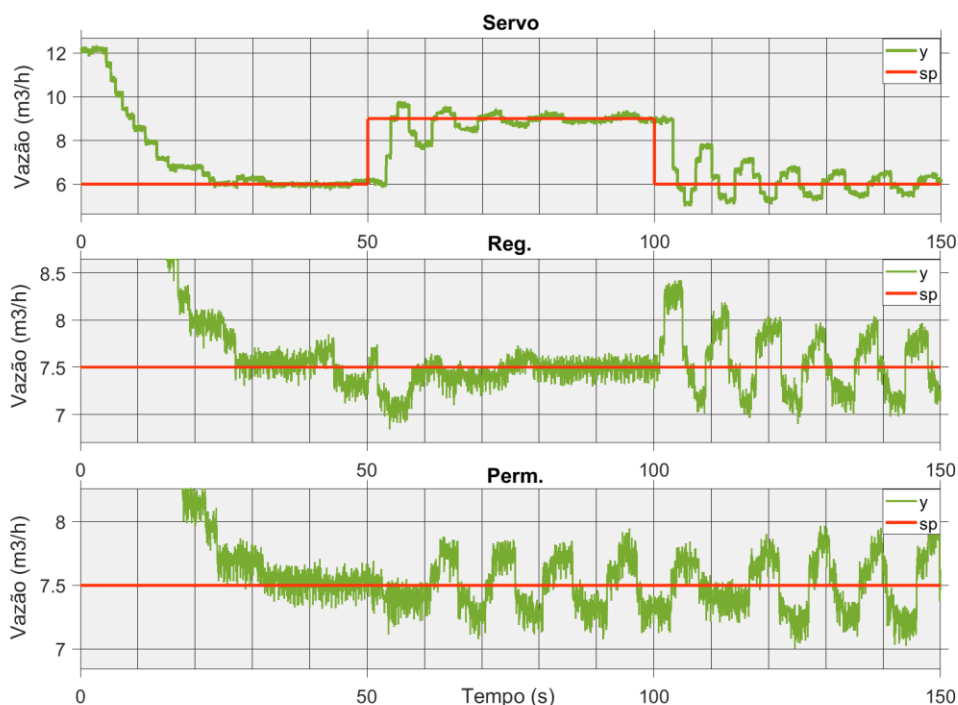


Fig. 8.13 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador Digital Foundation Fieldbus® comercial.

Fonte: Autor.

E, finalizando, tem-se o ensaio da configuração cascata DVC6010F + CR2, mostrado na Fig. 8.14. Assim como no caso do Posicionador Eletropneumático, a inserção do algoritmo CR2 não apresenta notáveis diferenças em relação ao ensaio apenas do posicionador digital. Talvez seja possível dizer que há leve aumento da tendência oscilatória em geral.

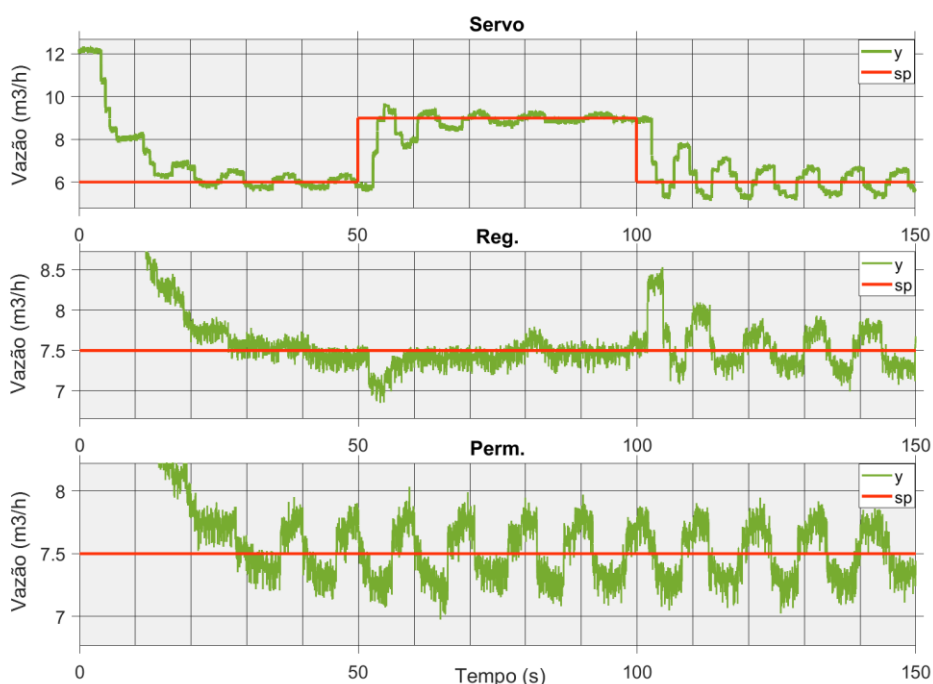


Fig. 8.14 – Curvas de ensaios em modo Servo, Regulatório e Regime Permanente – Posicionador Digital Foundation Fieldbus® comercial + CR2.

Fonte: Autor.

8.9 Comparação entre os posicionadores

O ponto chave deste trabalho consiste em avaliar se o desempenho de algum dos algoritmos de compensação de atrito inseridos no posicionador embarcado PD-CCB-01 provoca, de fato, a redução da variabilidade da malha, em comparação à mesma sem posicionador; e, em adição a isso, revele ou não melhoria de outros índices de desempenho, para os diversos modos de operação da planta (servo, regulatório e regime permanente).

Há uma outra vertente importante de análise comparativa: situar o sistema desenvolvido em comparação com posicionadores comerciais. Isso fornece uma medida de quão longe ou perto o posicionador embarcado está de se tornar, em algum momento, o núcleo de um produto competitivo e atrativo para a indústria de controle de processos em geral.

Uma primeira etapa dessa análise comparativa pode ser a verificação de desempenho dos algoritmos de compensação de atrito em ambiente Matlab®. A ideia é testar e validar os algoritmos antes de embarcá-los. A partir de agora, os resultados apresentados são não apenas gráficos, mas também analíticos e tabulares, para uma maior clareza de comparação. A Tabela 8.1 apresenta os índices de desempenho absolutos (não normalizados) para a malha externa de vazão sem posicionador (apenas como referência) e os algoritmos em Matlab®. Os destaques em amarelo evidenciam os melhores resultados.

Tabela 8.1 – PI sem posicionador e posicionadores em Matlab®

Posicionador	Servo			Regulatório		Regime Permanente		
	Tr (s)	Tss (s)	Mp (%)	ISE (m ³ /h) ²	ITAE (s * m ³ /h)	ISE (m ³ /h) ²	Var (%)	ModVar (mm)
Nenhum	23,6	23,6	0,00	27395,76	530937,31	23252,52	31,03	876,22
CR2	2,2	14,1	55	18770,84	391205,86	16754,67	25,45	881,27
PID	15,5	15,5	6,67	19105,38	147394,93	18977,19	26,75	878,05
ISMC	2,6	10,6	15,33	18535,04	161310,74	18330,36	26,20	906,00
PID + CR2	12,4	∞	100	13319,14	142482,66	13396,67	22,87	893,35
ISMC + CR2	2,5	10,8	6	12584,45	167719,66	12304,24	21,83	896,51

Fonte: Autor.

É possível notar que a inserção de qualquer algoritmo de compensação de atrito, seja compensador na malha externa (CR2) ou na malha interna (PID e ISMC), além das cascatas (PID + CR2 e ISMC + CR2), resulta em melhoria de desempenho em praticamente todos os índices, com duas exceções: o sobressinal M_p e a excursão total da haste da válvula ($ModVar$). Isso é razoavelmente previsível, uma vez que um compensador/controlador na malha interna tende a gerar respostas mais rápidas de

correção de vazão, causando certo nível de sobressinal; e, para conseguir tais respostas, tende a movimentar mais a haste da válvula.

As Figuras 8.15 a 8.17 apresentam um resumo gráfico dos ensaios dos compensadores de atrito em Matlab® (incluindo apenas o PI na malha externa), para os modos servo, regulatório e regime permanente, respectivamente.

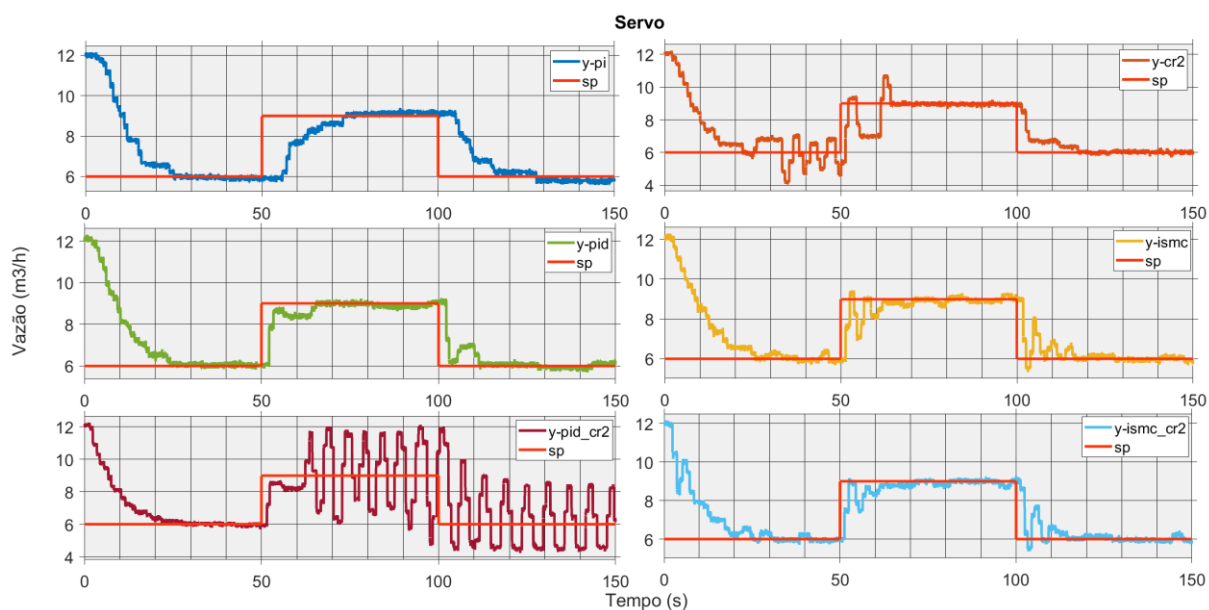


Fig. 8.15 – Curvas de ensaios em modo Servo – PI e compensadores em Matlab®.

Fonte: Autor.

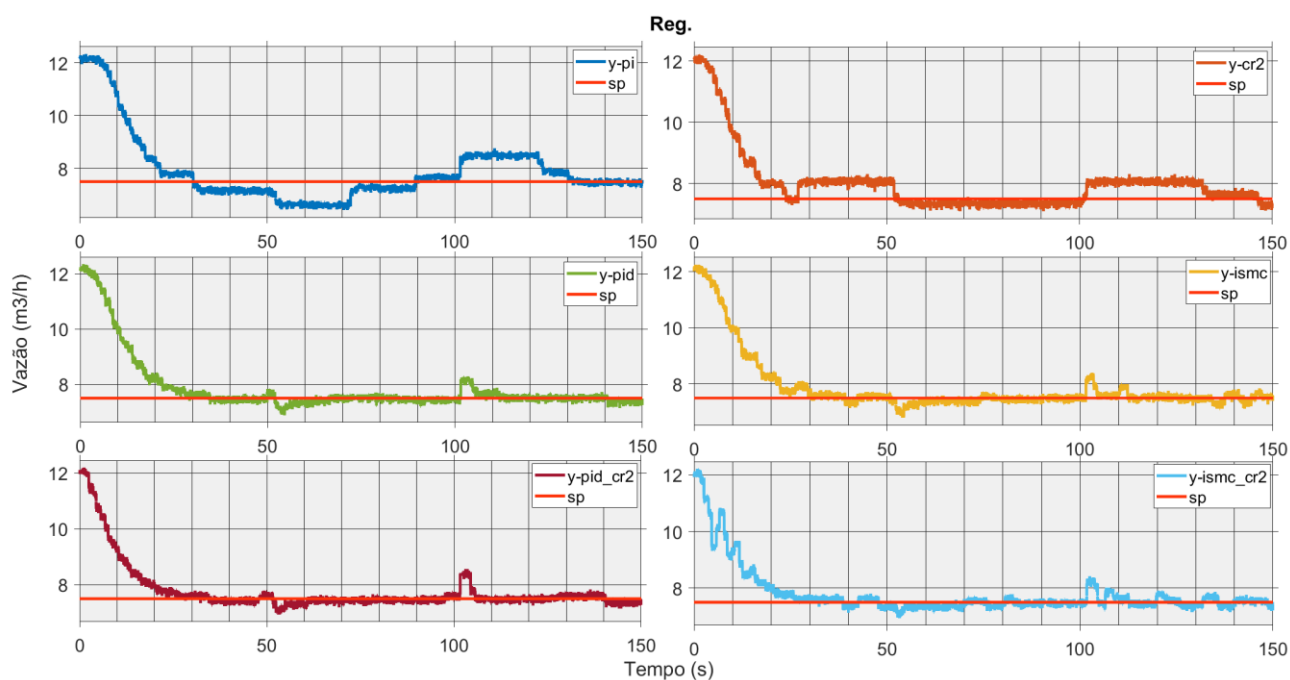


Fig. 8.16 – Curvas de ensaios em modo Regulatório – PI e compensadores em Matlab®.

Fonte: Autor.

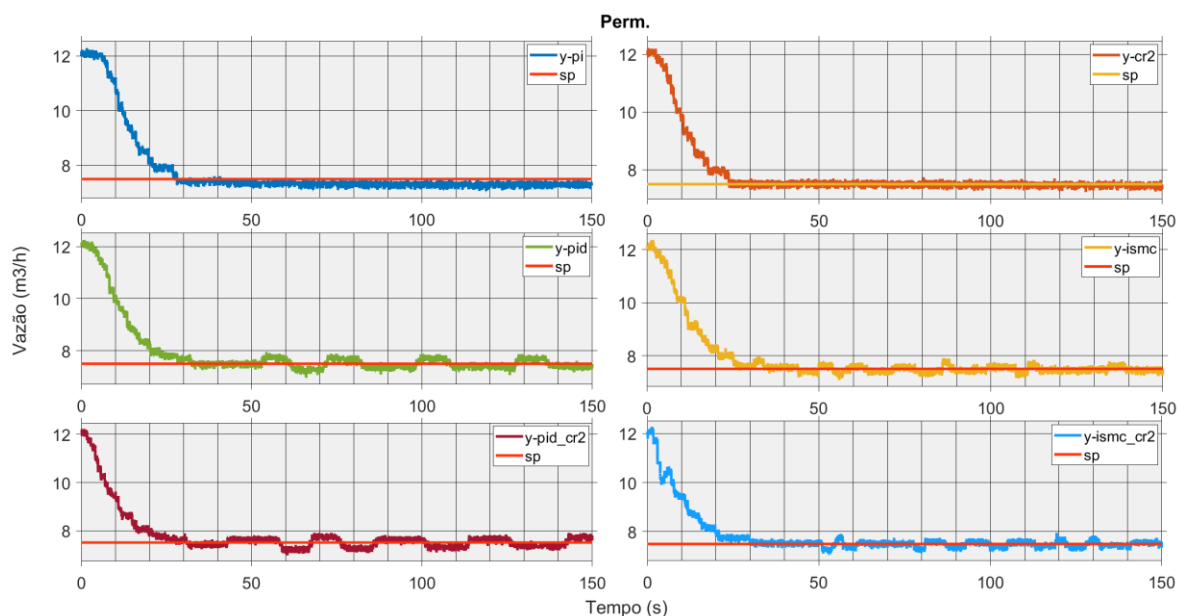


Fig. 8.17 – Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – PI e compensadores em Matlab®.

Fonte: Autor.

Como já mencionado, nota-se uma tendência mais oscilatória nas curvas dos algoritmos em cascata (PID + CR2 e ISMC + CR2).

A segunda etapa de avaliação comparativa se deu entre os algoritmos escritos em Matlab® e os respectivos algoritmos inseridos no posicionador PD-CCB-01. Lembrando: ainda que o CR2 (tanto isolado como nas versões em cascata) seja um compensador que atua na malha externa, ele também foi embarcado, para efeito de estudos comparativos. A Tabela 8.2 apresenta os resultados analíticos dessa segunda etapa.

Tabela 8.2 – Posicionadores em Matlab® x Equivalentes embarcados

Posicionador	Servo			Regulatório		Regime Permanente		
	Tr (s)	Tss (s)	Mp (%)	ISE (m ³ /h) ²	ITAE (s * m ³ /h)	ISE (m ³ /h) ²	Var (%)	ModVar (mm)
CR2	2,2	14,1	55	18770,84	391205,86	16754,67	25,45	881,27
CR2 Emb.	7,3	9,9	58	20788,83	532404,65	18237,57	27,90	881,40
PID	15,5	15,5	6,67	19105,38	147394,93	18977,19	26,75	878,05
PID Emb.	12,6	12,6	5,33	19109,42	172262,54	18896,91	26,74	887,23
ISMC	2,6	10,6	15,33	18535,04	161310,74	18330,36	26,20	906,00
ISMC Emb.	3,1	10,8	27,33	18344,18	166863,28	18214,51	26,11	888,86
PID + CR2	12,4	∞	100	13319,14	142482,66	13396,67	22,87	893,35
PID + CR2 Emb.	3	∞	83,33	13544,98	153354,84	13640,59	23,21	857,75
ISMC + CR2	2,5	10,8	6	12584,45	167719,66	12304,24	21,83	896,51
ISMC + CR2 Emb.	1,9	∞	98,67	12698,70	147569,17	12408,00	21,97	889,16

Fonte: Autor.

O CR2 embarcado foi o único compensador da Tabela 8.2 a ter um resultado médio bem inferior ao seu correspondente em Matlab®, especialmente nos modos regulatório e

regime permanente. Existe a possibilidade de isso ser um problema isolado, específico do ensaio em questão, pois os algoritmos em cascata, ainda que oscilatórios no modo servo, apresentaram melhoria, ou no mínimo equivalência, da versão embarcada em relação à não embarcada.

Aqui talvez seja um bom momento para destacar o seguinte: os resultados tabulares e gráficos apresentados estão baseados em ensaios únicos, ou, no máximo, com uma repetição. Uma forma mais correta de coleta de resultados deveria ter sido a análise de incertezas, a partir da repetição de N experimentos para cada ensaio. Assim, informações sobre média e desvio padrão poderiam gerar mais dados relevantes para comparações.

No ponto de maior interesse para o posicionador PD-CCB-01 em si, que é o uso do PID e, principalmente, do ISMC, por constituírem um elemento exclusivo da malha de posição, ou seja, sem dependência de instrumentação da malha de vazão, os resultados demonstram boa equivalência de desempenho em relação ao Matlab®. A menção do ISMC como destaque em relação ao PID pode residir no fato do primeiro ser um controlador cuja modelagem e sintonia baseiam-se em todo um conjunto de parâmetros construtivos e de assinatura da válvula. A sintonia do PID foi baseada em modelo caixa preta do processo. Ainda que os resultados do PID não tenham sido ruins em si, o ISMC apresentou superioridade relativa média para a aplicação em questão.

Finalmente, é importante notar que a inserção do CR2 como auxiliar dos algoritmos PID e ISMC causa significativa melhora no desempenho geral dos compensadores, em relação às respectivas versões não cascata. Ressalve-se novamente a tendência oscilatória no modo servo, que poderia vir a ser eliminada com otimização de sintonia do CR2, bem como o uso original do CF (com corte de ações integrais, seja da malha externa, da interna, ou de ambas).

Como ilustração de alguns resultados gráficos dessa segunda etapa, seguem as Figuras 8.18 a 8.20, que evidenciam as curvas em modo servo para o CR2, PID e ISMC, respectivamente, sobrepondo a versão Matlab® e a embarcada.

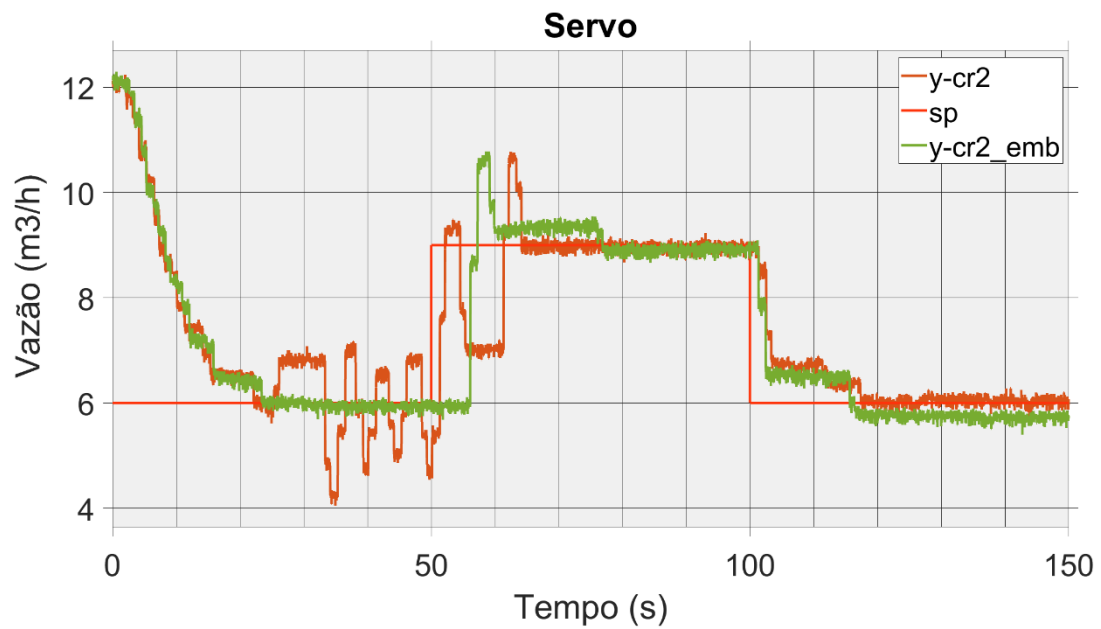


Fig. 8.18 – Curvas de ensaios em modo Servo – CR2 Matlab® x CR2 embarcado.

Fonte: Autor.

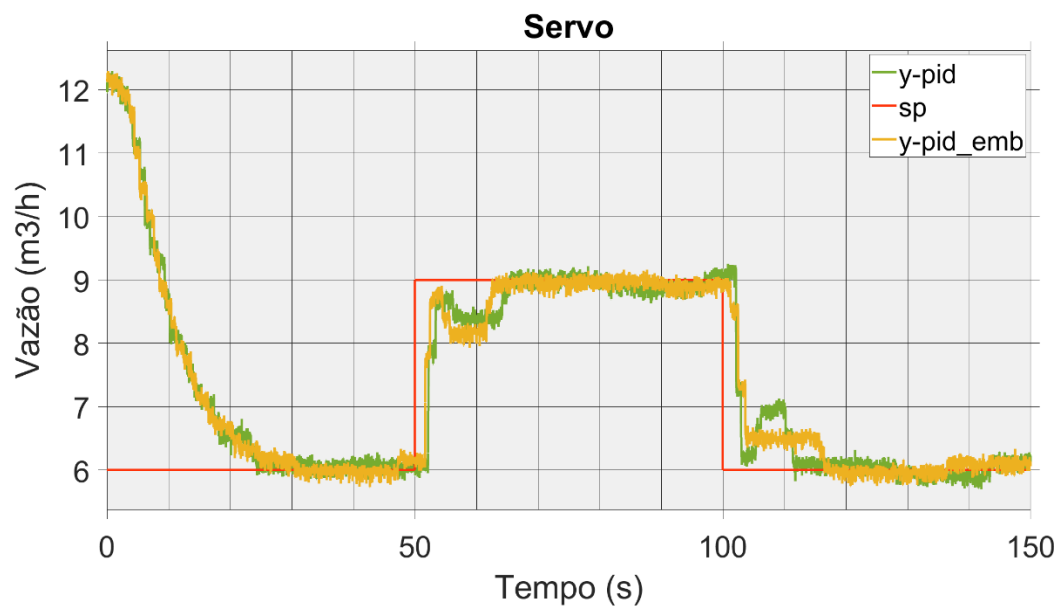


Fig. 8.19 – Curvas de ensaios em modo Servo – PID Matlab® x PID embarcado.

Fonte: Autor.

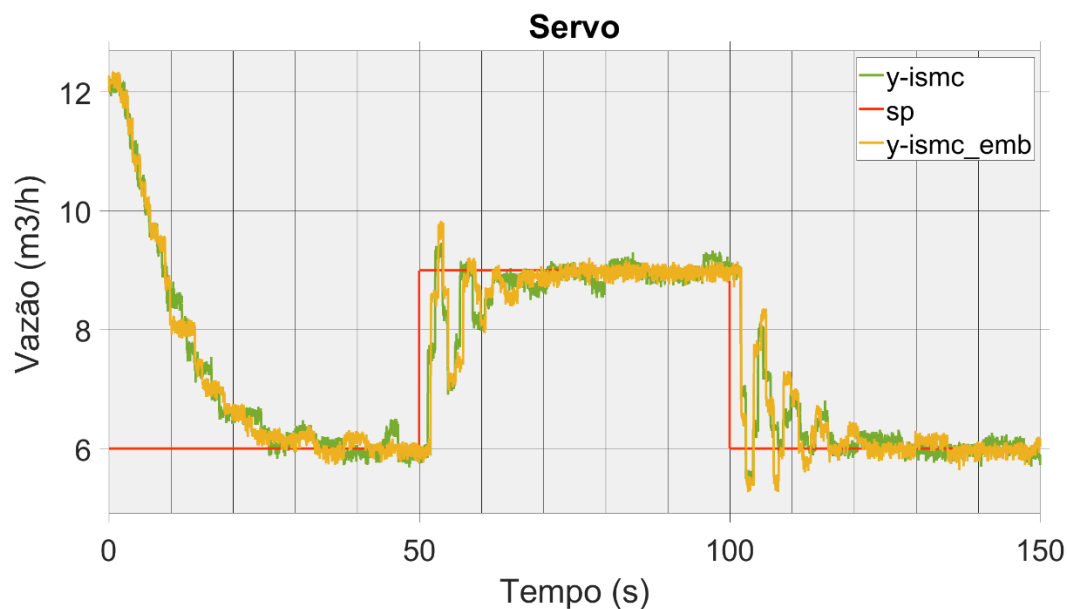


Fig. 8.20 – Curvas de ensaios em modo Servo – ISMC Matlab® x ISMC embarcado.

Fonte: Autor.

Para se ter uma visão gráfica comparativa entre os algoritmos embarcados, seguem as Figuras 8.21 a 8.23, para os modos servo, regulatório e regime permanente, respectivamente. As curvas do PI sem posicionador foram inseridas como referência apenas.

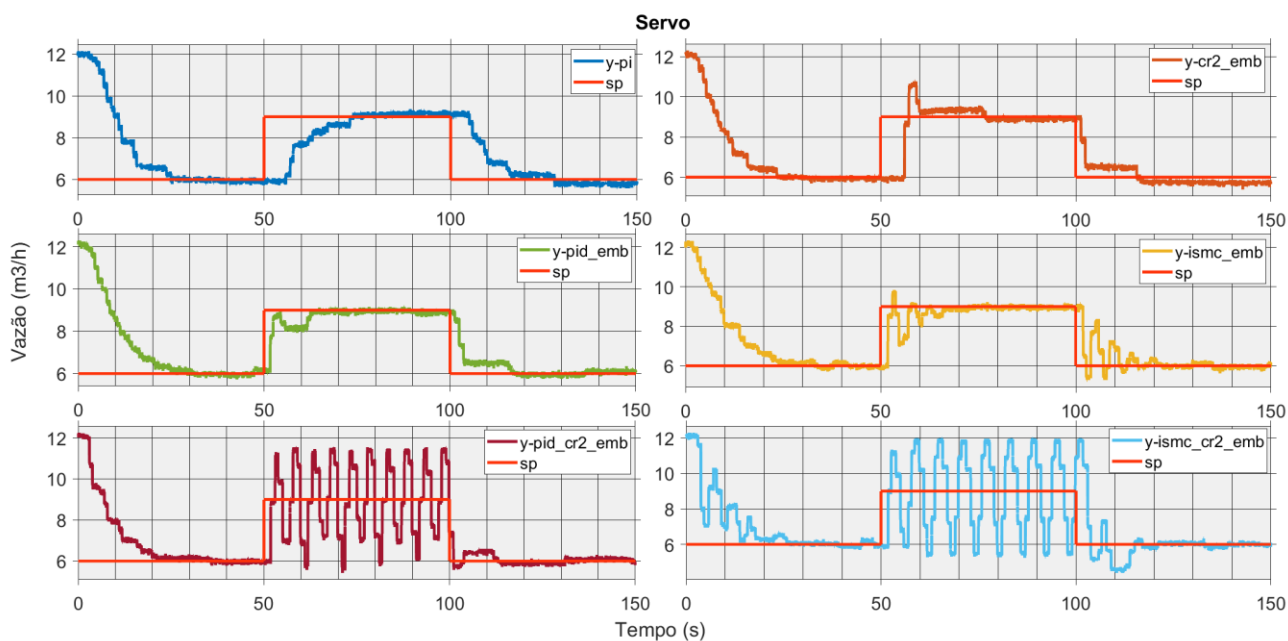


Fig. 8.21 – Curvas de ensaios em modo Servo – PI x Compensadores embarcados.

Fonte: Autor.

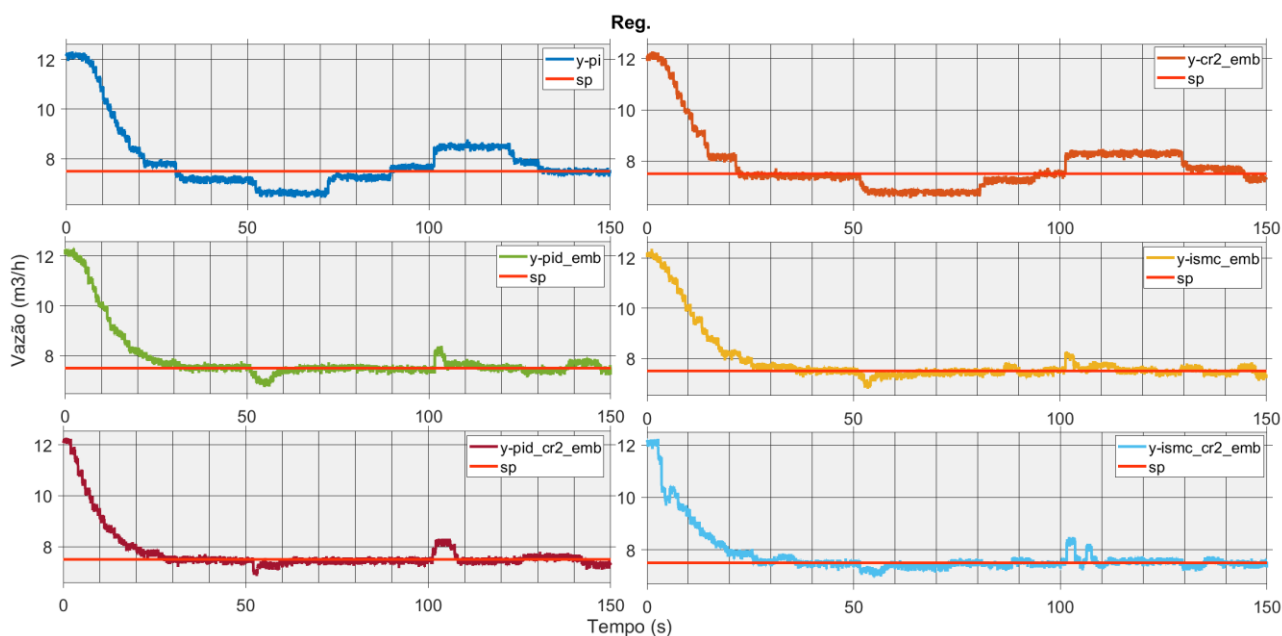


Fig. 8.22 – Curvas de ensaios em modo Regulatório – PI x Compensadores embarcados.

Fonte: Autor.

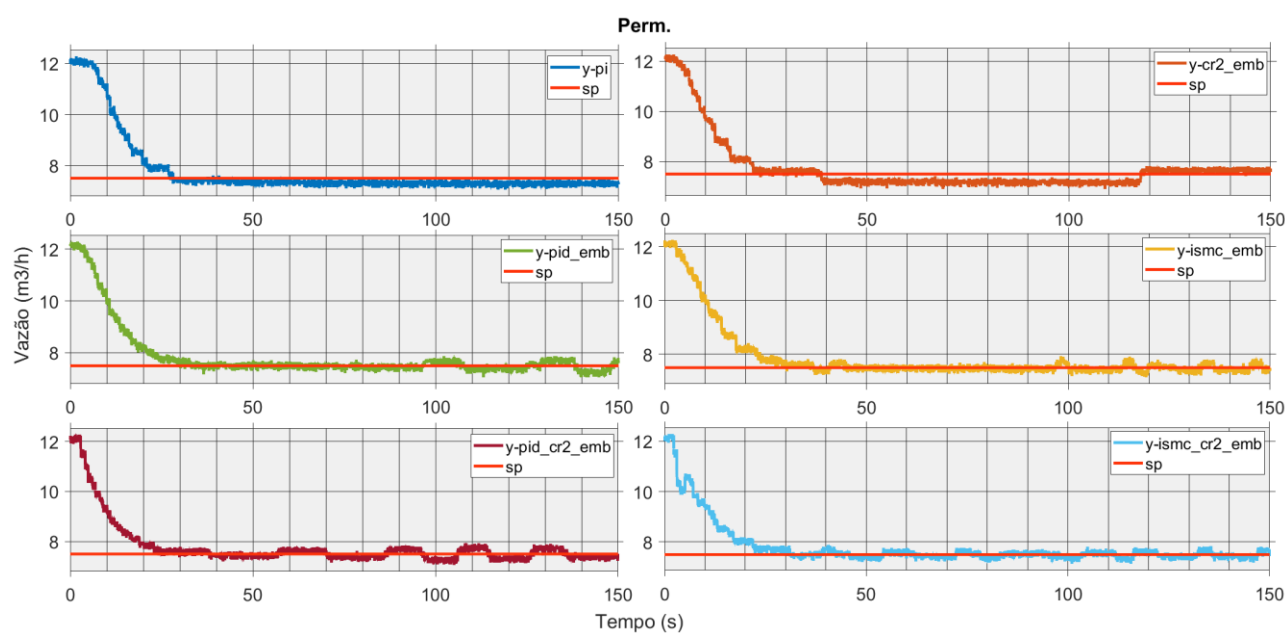


Fig. 8.23 – Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – PI x Compensadores embarcados.

Fonte: Autor.

Uma vez comprovado que a inserção de um posicionador com algoritmo de compensação de atrito melhora, de fato, o desempenho da malha de processo (etapa 1), e que a versão embarcada é equivalente à não embarcada (etapa 2), pode-se partir para a terceira etapa comparativa. Aqui o objetivo é verificar como está o desempenho do posicionador PD-CCB-01 em relação a equipamentos equivalentes comerciais. No caso, têm-se um posicionador comercial eletropneumático e um digital, ambos da Fisher® (Emerson™). Os resultados analíticos são mostrados na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Posicionadores embarcados x FF x Eletropneumático

Posicionador	Servo			Regulatório		Regime Permanente		
	Tr (s)	Tss (s)	Mp (%)	ISE (m ³ /h) ²	ITAE (s * m ³ /h)	ISE (m ³ /h) ²	Var (%)	ModVar (mm)
CR2 Emb.	7,3	9,9	58	20788,83	532404,65	18237,57	27,90	881,40
PID Emb.	12,6	12,6	5,33	19109,42	172262,54	18896,91	26,74	887,23
ISMC Emb.	3,1	10,8	27,33	18344,18	166863,28	18214,51	26,11	888,86
PID + CR2 Emb.	3	∞	83,33	13544,98	153354,84	13640,59	23,21	857,75
ISMC + CR2 Emb.	1,9	∞	98,67	12698,70	147569,17	12408	21,97	889,16
Eletropneumático	3,5	8,4	16,67	17809,34	136226,50	17658,41	25,99	888,33
Eletropneumático + CR2	3,4	14,6	21,33	12274,42	127989,37	12247,52	22,13	887,73
Dig. FF	4,1	18,9	25,67	20137,08	262899,18	19875,83	27,42	887,97
Dig. FF + CR2	3,6	18,3	22,67	14550,66	212153,98	14446,54	23,93	904,58

Fonte: Autor.

A primeira análise que pode ser feita é verificar o melhor desempenho médio entre os três algoritmos embarcados não em cascata (CR2, PID, ISMC), na qual se observa a “vitória” do ISMC, ressaltando-se novamente o relativo maior sobressinal. De forma similar, verifica-se o melhor desempenho médio entre os dois posicionadores comerciais; curiosamente, o posicionador eletropneumático saiu-se superior ao digital (DVC-6010F com PID de 6 parâmetros), pelo menos para as condições específicas de operação da planta de vazão ensaiada.

Em seguida, é possível comparar os resultados dos respectivos vencedores destacados acima. Nessa análise, o eletropneumático levou ligeira vantagem, porém, é forçoso comentar uma boa proximidade entre aquele e o ISMC embarcado no PD-CCB-01.

Os ensaios com configurações em cascata (com CR2 na malha externa) foram estendidos também aos posicionadores comerciais, para efeito de justa comparação. A diferença entre os posicionadores comerciais e os embarcados é que nesses últimos o CR2 também está embarcado, ao passo que nos primeiros o CR2 está em Matlab®.

No comparativo entre os posicionadores embarcados em cascata, novamente o ISMC teve resultado superior ao PID, resultado esse esperado, pela especificidade do ISMC para a aplicação atual. Já entre os posicionadores comerciais em cascata, houve pequena superioridade do eletropneumático em relação ao digital.

Finalmente, comparando-se o melhor posicionador cascata embarcado (ISMC + CR2) com o eletropneumático cascata, houve empate técnico nos modos regulatório e permanente, com índices de desempenho muito similares entre ambas as soluções. No modo servo, pelos motivos já mencionados, a instabilidade comprometeu o desempenho do ISMC + CR2 embarcado.

Os resultados gráficos conjuntos dos posicionadores PID e ISMC embarcados, bem como dos posicionadores comerciais, todos sem cascata, são apresentados nas Figuras 8.24 a 8.26, para os modos servo, regulatório e regime permanente, respectivamente. É possível corroborar a grande similaridade de desempenho entre o ISMC (no PD-CCB-01) e o posicionador comercial eletropneumático. Nota-se ainda uma tendência oscilatória (estável) na malha com posicionador comercial digital.

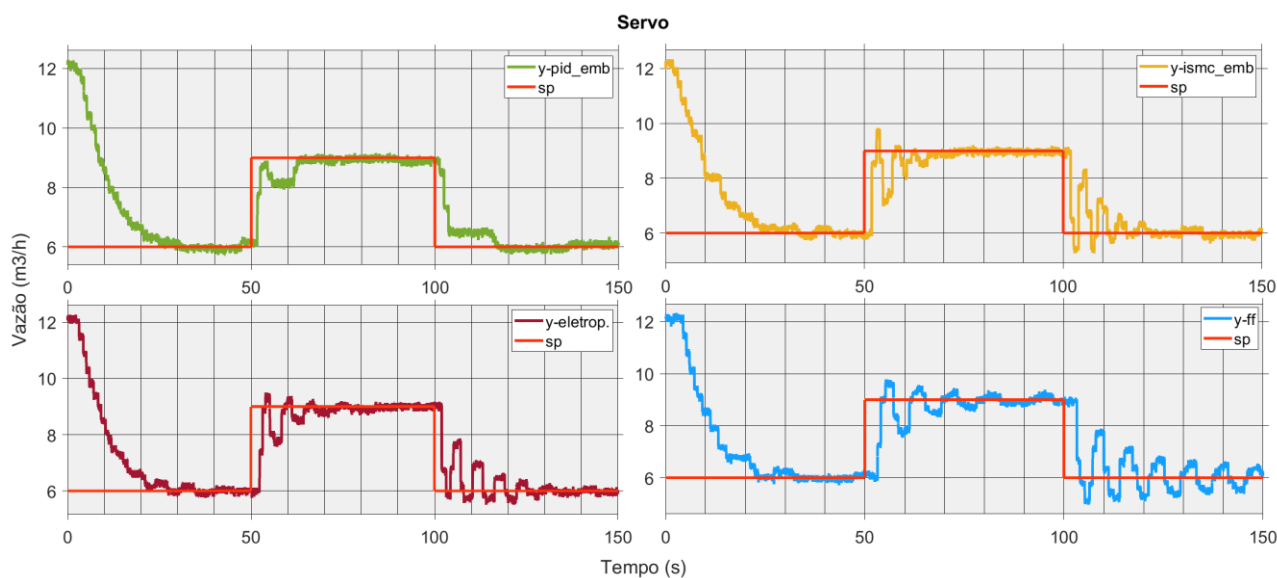


Fig. 8.24 – Curvas de ensaios em modo Servo – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais.

Fonte: Autor.

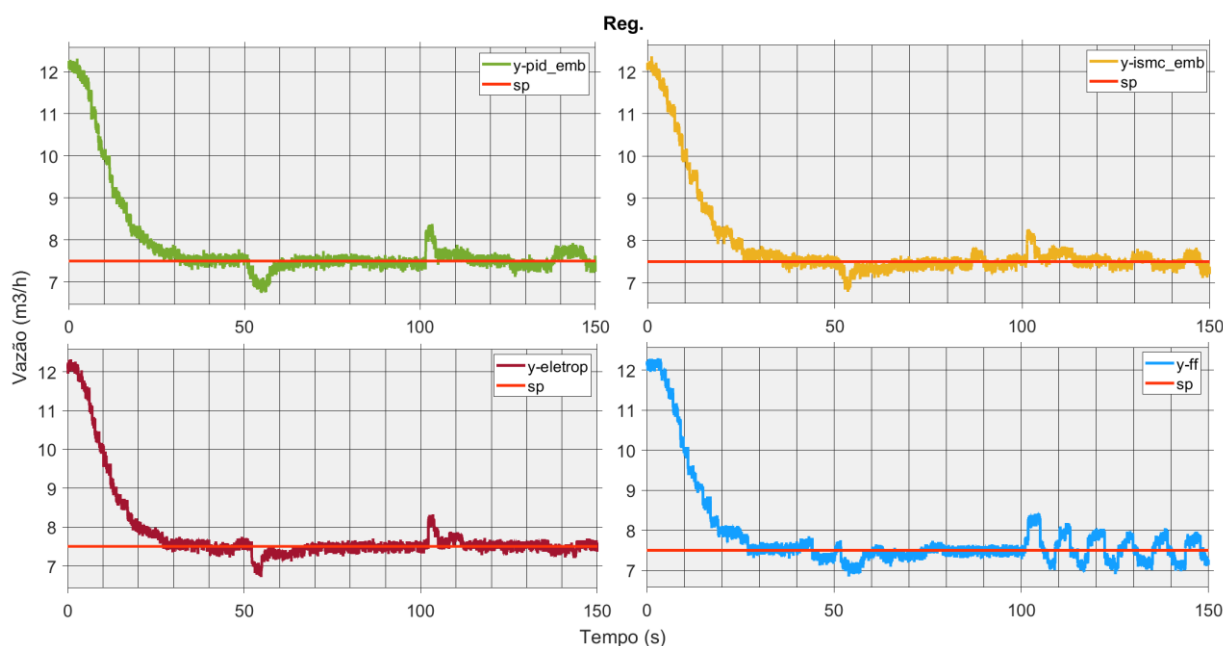


Fig. 8.25 – Curvas de ensaios em modo Regulatório – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais.

Fonte: Autor.

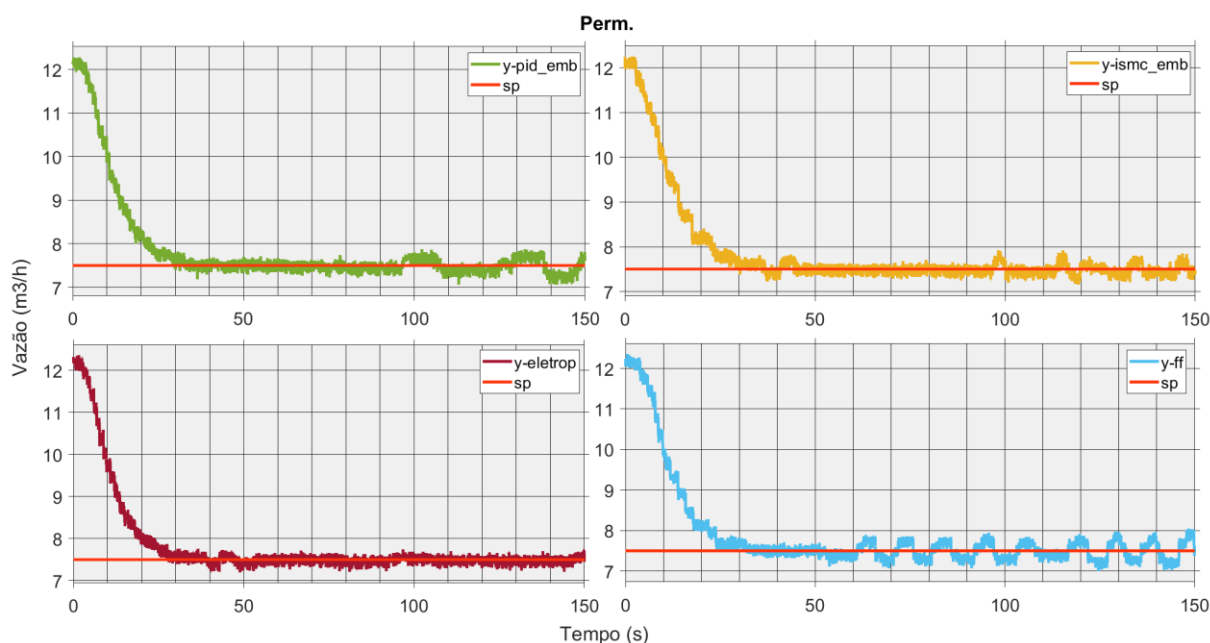


Fig. 8.26 – Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais.

Fonte: Autor.

Os resultados dos ensaios em cascata, com o CR2 inserido para os quatro posicionadores anteriores (PID, ISMC, eletropneumático e digital) são mostrados nas Figuras 8.27 a 8.29 (modos servo, regulatório e regime permanente).

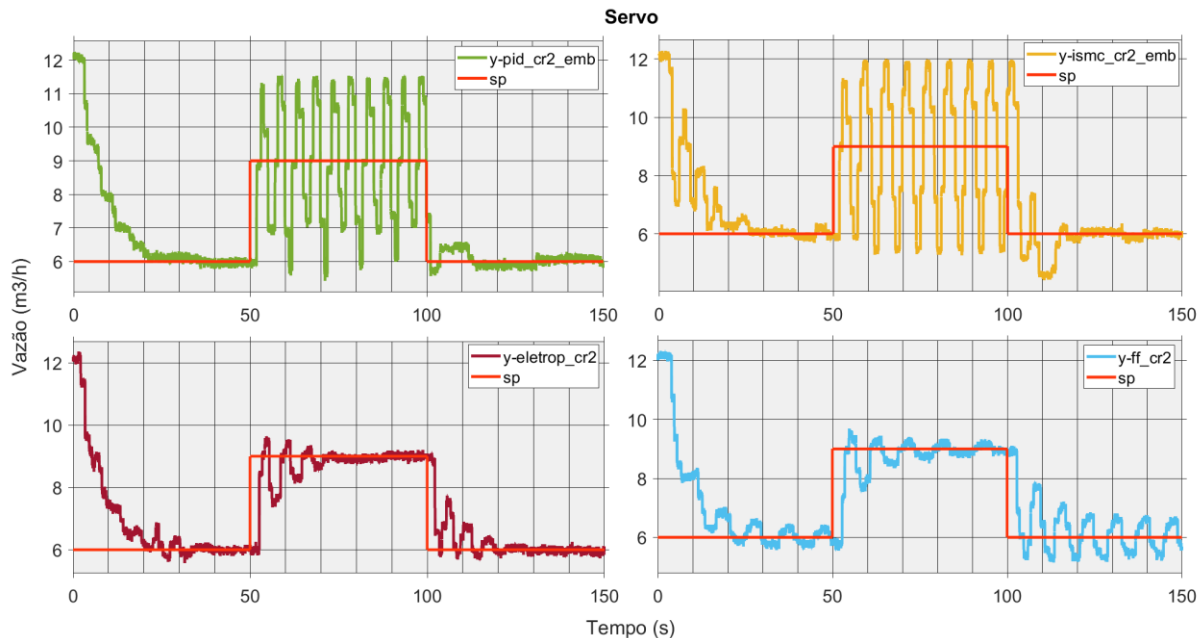


Fig. 8.27 – Curvas de ensaios em modo Servo – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais – com CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

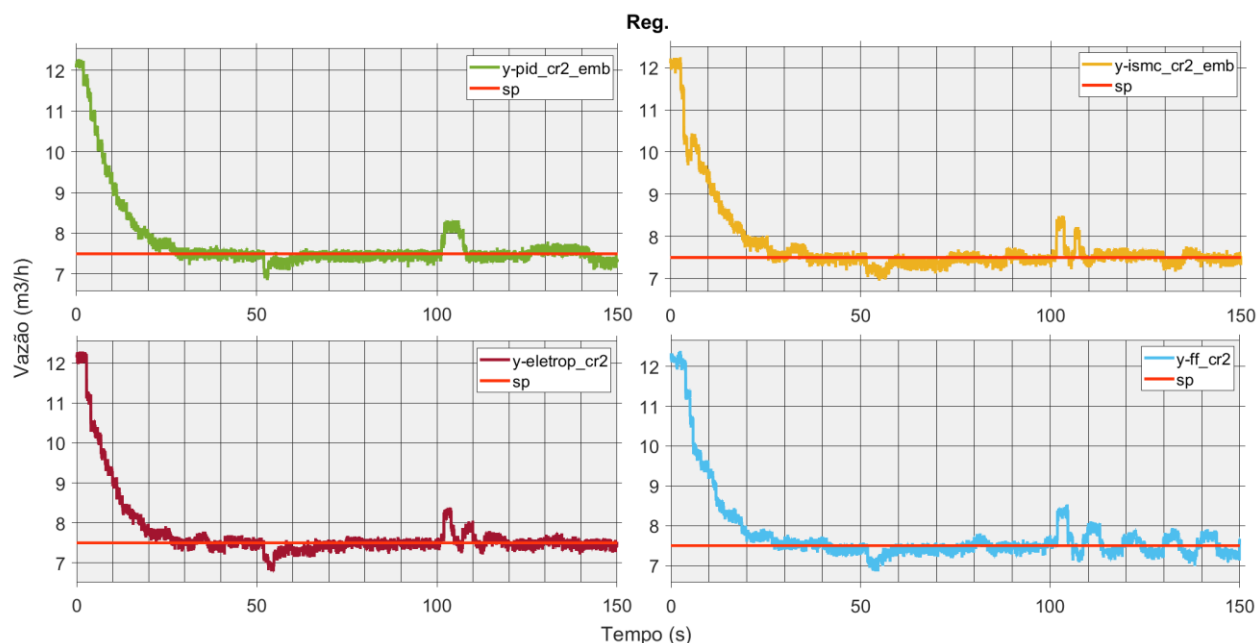


Fig. 8.28 – Curvas de ensaios em modo Regulatório – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais – com CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

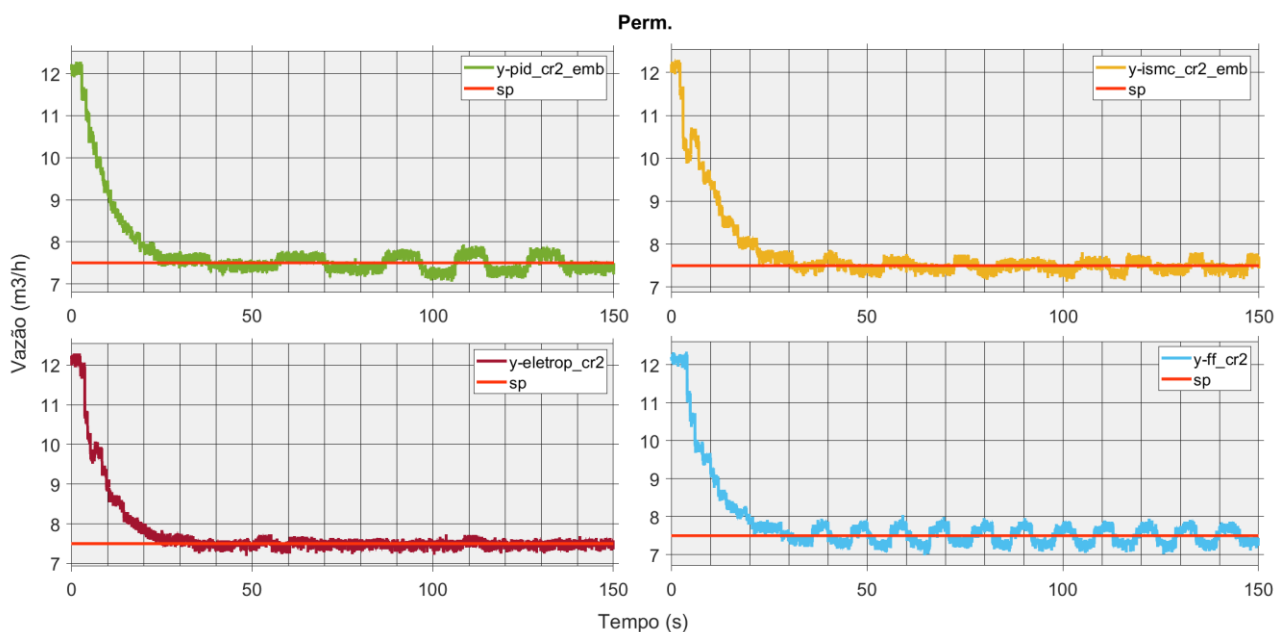


Fig. 8.29 – Curvas de ensaios em modo Regime Permanente – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais – com CR2 em cascata.

Fonte: Autor.

A quarta etapa de validação comparativa pode ser considerada complementar. Nela, os posicionadores são testados sem a malha de vazão, ou seja, apenas na malha interna, de posição. Para esse caso, dois modos são usados: servo, regulatório/regime permanente. No modo servo, são geradas variações positiva e negativa no *set point* de posição, assim como na malha de vazão, sem perturbações intencionais. Os índices de desempenho são os mesmos dos ensaios de vazão. No modo regulatório/regime permanente, o *set point* é mantido constante e também não são introduzidas perturbações

intencionais. Todos os índices de desempenho dos modos regulatório e regime permanente anteriores são calculados. Na malha de posição o *set point* tem unidade de Volts.

A Tabela 8.4 apresenta os resultados analíticos dos ensaios da malha de posição. Como referência, foram incluídos os algoritmos PID e ISMC em Matlab®.

Tabela 8.4 – Posicionadores x FF x Eletropneumático – Apenas malha de posição

Posicionador	Servo			Regulatório / Regime Permanente (sem distúrbio)			
	Tr (s)	Tss (s)	Mp (%)	ISE (V ²)	ITAE (s * V)	Var (%)	ModVar (mm)
PID Matlab®	1,9	1,9	8	957,45	38302,77	10,12	591,05
ISMC Matlab®	1,7	5,8	25	1177,09	28338,17	11,21	546,67
PID Emb.	2	7,1	9,25	11367,28	30229,63	35,31	586,08
ISMC Emb.	2	6,7	24	2231,26	24387,39	15,46	599,48
Eletropneumático	1,8	∞ (*)	0,75	4815,96	433698,01	17,01	628,51
Dig. FF	3,7	3,7	2	6793,81	54775,12	27,12	602,45

Fonte: Autor.

(*) – Erro estacionário fora do limite de $\pm 5\%$ do *set point*.

Na comparação entre os posicionadores embarcados, ainda que o PID tenha bom desempenho no modo servo, com sobressinal bem inferior ao ISMC, no geral o ISMC tem desempenho melhor, com destaque para o modo regulatório/regime permanente.

Já entre os posicionadores comerciais, nota-se que o eletropneumático tem resposta um pouco mais rápida que o digital, com menor sobressinal. Porém, o seu erro estacionário é muito maior que os demais (praticamente nulos), o que faz “explodir” seu ITAE; nada crítico, uma vez que o objetivo final é o controle de vazão, e não de posição. Por essa análise, é possível dizer que os posicionadores comerciais avaliados estão em mesmo nível de desempenho.

No modo servo, o melhor desempenho médio ficou com o posicionador comercial digital, devido a um tempo de acomodação e sobressinal maiores do ISMC embarcado. Já no modo regulatório/regime permanente, o ISMC embarcado superou todos os demais posicionadores. Isso é percebido também pelos resultados gráficos mostrados nas Figuras 8.30 e 8.31. Destacam-se o elevado erro estacionário do posicionador eletropneumático e um elevado sobressinal do ISMC embarcado. Para esclarecimento: na Fig. 8.30, o tempo de início de execução dos algoritmos PID e ISMC foi em torno de $t = 8$ segundos; na Fig. 8.31, o tempo de início de execução do algoritmo PID foi em torno de $t = 7$ segundos. Em ambas as figuras, os demais posicionadores iniciaram em $t = 0$ segundos.

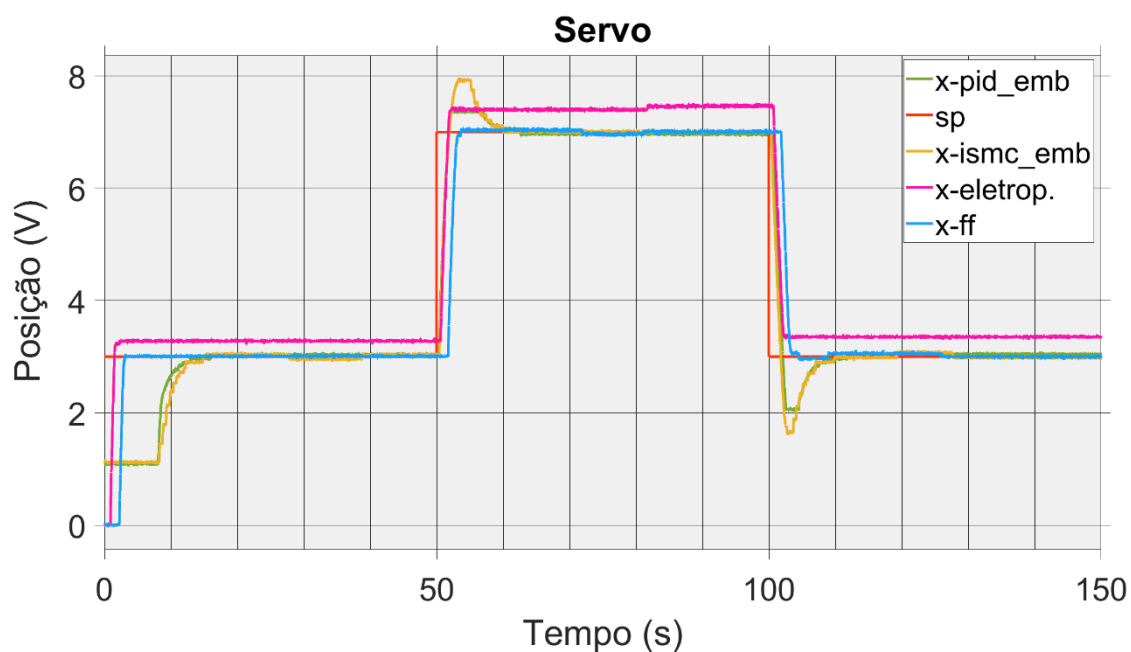


Fig. 8.30 – Curvas de ensaios em modo Servo – Malha de posição – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais.

Fonte: Autor.

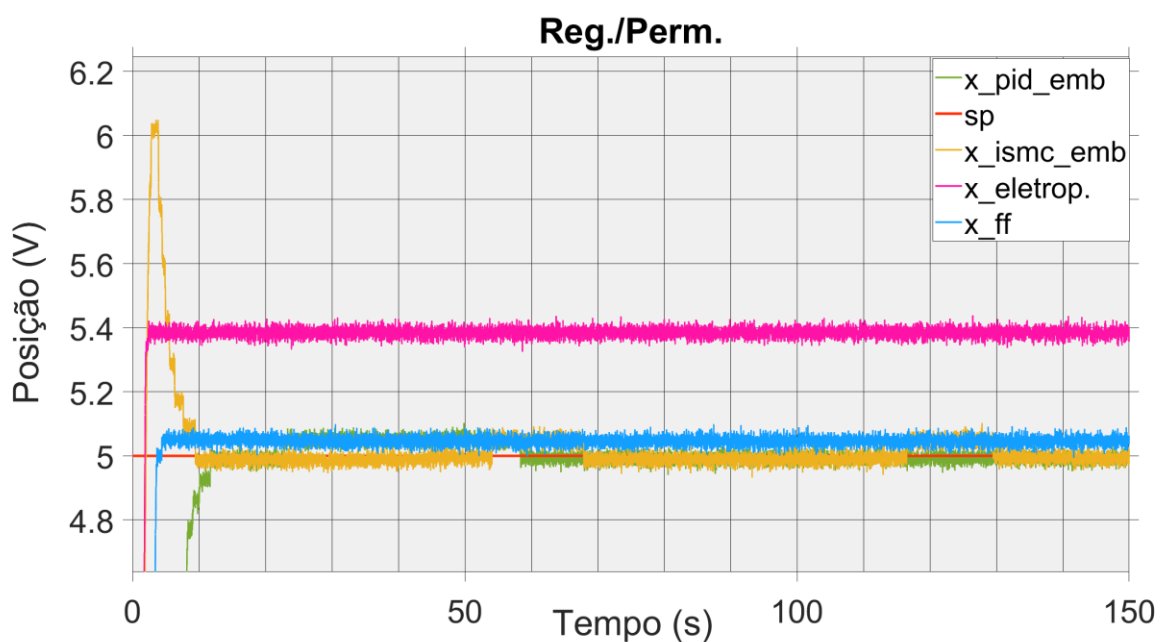


Fig. 8.31 – Curvas de ensaios em modo Regulatório/Regime Permanente – Malha de posição – Compensadores embarcados x Posicionadores comerciais.

Fonte: Autor.

9 Considerações finais

9.1 Conclusões

Diante da proposição deste trabalho, consideram-se os resultados obtidos como satisfatórios. Os algoritmos de compensação de atrito selecionados e estudados, advindos de pesquisas anteriores de inúmeros autores, puderam ser embarcados e testados em uma planta física de controle de processos, com resultados expressivos, até mesmo quando comparados a posicionadores comerciais.

O algoritmo a ser destacado é o ISMC – *Integrative Slide Mode Controller*. Para fazer contraponto a ele, o PID foi usado, pela sua importância histórica e ainda atual. O ISMC fez jus aos resultados obtidos por colegas em seus trabalhos. O custo pago na sua escolha foi a convivência com um sobressinal indesejado. No mais, ele provou ser uma escolha bastante conveniente para um posicionador com compensação de atrito em válvula de controle, com bom desempenho na redução da variabilidade da malha.

Esse trabalho propôs um sistema de coexistência do compensador CR2, que obteve ótimos resultados em pesquisas anteriores, junto ao posicionador em si. Foi aqui chamada de configuração em cascata, por utilizar um compensador de atrito na malha externa (CR2) juntamente com outro na malha interna (ISMC ou PID). Três observações importantes podem ser destacadas quanto a essa proposta. A primeira, a de que havia uma expectativa grande deste autor quanto à junção de dois excelentes algoritmos de compensação de atrito, pois não haviam ainda trabalhado juntos. Os resultados geraram duas situações divergentes: uma apontou para uma otimização dos índices de desempenho (modos regulatório e regime permanente); a outra sinalizou um aumento da tendência oscilatória (modo servo). A explicação mais plausível é que essa tendência oscilatória se deu pela arquitetura escolhida para o CR2 nesse trabalho, a qual difere da implementação original nas pesquisas anteriores. Ou seja, aqui, o recurso *Control Freezing* (CF) não atuou nas ações integrais, tanto do controlador da malha externa, como da malha interna. Pode-se concluir que a cascata CR2 + ISMC/PID/etc. é válida e eficaz, mas carece de cuidados em sua implementação.

A segunda observação está voltada para uma visão sistêmica do projeto. O compensador CR2, já dito no texto, não faz parte de um posicionador de válvulas de controle. Ele é um compensador instalado na malha externa do processo. A configuração em cascata deve ser encarada pelo projetista como um sistema a ser desenvolvido, e não um posicionador isolado.

Como terceira observação, cita-se a possibilidade de aplicação do CR2, na mesma configuração dos trabalhos anteriores, exclusivamente à malha interna, ou seja, confinado ao posicionador. Assim, haveria a colaboração paralela de dois compensadores de atrito, não mais em configuração cascata, e sem a dependência de sinais da malha externa.

Por fim, ressalva-se o fato de que o posicionador PD-CCB-01 não é, de fato, um posicionador completo. Ele é o núcleo central de um posicionador e, como tal, cumpriu seu papel nessa pesquisa. É desejo deste autor que ele fique de legado como parte da infraestrutura do LCPI.

9.2 Propostas de trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos, as seguintes linhas de pesquisa podem ser propostas como continuidade deste trabalho:

- Aprimoramento da configuração em cascata, melhorando-se o desempenho e estabilidade do CR2 + ISMC, por exemplo; isso pode ser feito tanto pela resintonização do PI de vazão, como também pelo congelamento da sua ação integral (retorno ao CF – *Control Freezing* – original dos trabalhos de referência);
- Implementação do compensador CR2 internamente ao posicionador, tanto para os casos do PID como do ISMC. Evitaria-se, assim, qualquer interferência ou dependência da malha externa de vazão; no caso do PID, poderia ser aplicado o *Control Freezing* à ação integral daquele;
- Desenvolvimento de novos algoritmos embarcados de compensação de atrito em válvulas de controle, como por exemplo, o PID fracionário ([MOREIRA, 2022](#)), ou o ISMC fracionário ([REN et al., 2019](#)), ([NASSIRI; LABBADI; CHERKAOUI, 2023](#)); ou, ainda, um LQR ([CONTE; MARQUES; GARCIA, 2021](#));
- Projeto de solução de *firmware* para *auto-tuning* e análise dinâmica da assinatura da válvula, evitando o uso de parâmetros fixos e dedicados a uma válvula específica. Isso também reduziria o número de parâmetros que o operador precisaria inserir no comissionamento de um posicionador com algoritmo ISMC, por exemplo;
- Desenvolvimento do subsistema eletropneumático e/ou da conectividade ao sistema supervisório (SDCD etc.), em nível de *hardware* e *firmware*, para o PD-CCB-01, tornando-o mais próximo de um posicionador comercial, de fato;
- Projeto de interfaces *wireless* para o PD-CCB-01 (posicionador – supervisório);

- Desenvolvimento de soluções de predição de falhas no conjunto atuador + válvula de controle.

10 Referências bibliográficas

ALMEIDA, T. A. d. **Uma técnica de linearização por realimentação para compensação de agarramento em válvulas de controle pneumáticas**. 2015. - Eng. Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ALVARADO MORA, J. A. **Modelagem e simulação de planta-piloto de vazão**. 2014. (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

AMIGUES, L.; POMMIER-BUDINGER, V.; BORDENEUVE-GUIBÈ, J., 2021, **Reference Model Sliding Mode Control for Industrial Valves Exhibiting Large Hysteresis and Uncertainty in System Parameters**. IEEE. 7-12.

ANGÉLICO, B. A. **Controle Digital de Sistemas Dinâmicos - Notas de aula - PTC5611**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p.202. 2016.

ARIFIN, B.; MUNARO, C.; ANGARITA, O.; CYPRIANO, M. *et al.* Actuator stiction compensation via variable amplitude pulses. **ISA transactions**, 73, p. 239-248, 2018.

ARUMUGAM, S.; PANDA, R. C.; VELAPPAN, V. A simple method for compensating stiction nonlinearity in oscillating control loops. **Int. Jr. of Eng. & Tech**, 6, n. 4, p. 1846-1855, 2014.

BAEZA, J. R. **Controle não linear aplicado a malhas de controle com válvulas de alto atrito**. 2013. (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BLIMAN, P.-A.; SORINE, M., 1993, **A system-theoretic approach of systems with hysteresis. application to friction modelling and compensation**. Groningen, The Netherlands. 1844-1849.

CONTE, G. Y. C.; MARQUES, F. G.; GARCIA, C., 2021, **LQR and PID Control Design for a Pneumatic Diaphragm Valve**. IEEE. 1-7.

CUADROS, M. **Quantificação e compensação de atrito em válvulas de controle pneumáticas**. 2011. - Eng. Elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo.

DI CAPACI, R. B.; SCALI, C. An augmented PID control structure to compensate for valve stiction. **IFAC-PapersOnLine**, 51, n. 4, p. 799-804, 2018/01/01/ 2018a.

DI CAPACI, R. B.; SCALI, C. Review and comparison of techniques of analysis of valve stiction: From modeling to smart diagnosis. **Chemical Engineering Research and Design**, 130, p. 230-265, 2018b.

DI CAPACI, R. B.; SCALI, C.; PESTONESI, D.; BARTALONI, E. Advanced diagnosis of control loops: Experimentation on pilot plant and validation on industrial scale. **IFAC Proceedings Volumes**, 46, n. 32, p. 589-594, 2013.

FRANCO NETO, F. F.; GARCIA, C. **Desenvolvimento de um posicionador digital em FPGA para a compensação do atrito em válvulas de controle pneumáticas**. 2023.

- (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GARCIA, C. FRICTION MODEL PARAMETER ESTIMATION FOR CONTROL VALVES. **IFAC Proceedings Volumes**, 40, n. 5, p. 273-278, 2007/01/01/ 2007.
- GARCIA, C. Comparison of friction models applied to a control valve. **Control Engineering Practice**, 16, n. 10, p. 1231-1243, 2008/10/01/ 2008.
- GARCIA, C. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. Editora Blucher, 2017. 8521211864.
- GARCIA, C. **Controle de processos industriais: estratégias modernas**. Editora Blucher, 2019. 8521214175.
- HÄGGLUND, T. A friction compensator for pneumatic control valves. **Journal of process control**, 12, n. 8, p. 897-904, 2002.
- HIDALGO, M. C. **Compensação de atrito em válvulas de controle: técnicas usuais e inovações**. 2015. (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HIDALGO, M. C.; GARCIA, C. Friction compensation in control valves: Nonlinear control and usual approaches. **Control Engineering Practice**, 58, p. 42-53, 2017/01/01/ 2017.
- HIDALGO, M. C.; GARCIA, C.; ANGÉLICO, B. A.; TANNURI, E. A. Embedded Sliding Mode Controller Applied to Control Valves with High Friction. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, 30, n. 5, p. 677-687, 2019/10/01 2019.
- INSTRUMENTS, N. **PCI-6229 manual**. p. NATIONAL INSTRUMENTS™, 2020. Disponível em: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375204c.pdf>. Acesso em: Agosto/2020.
- IVAN, L. Z. X.; LAKSHMINARAYANAN, S. A new unified approach to valve stiction quantification and compensation. **Industrial Engineering Chemistry Research**, 48, n. 7, p. 3474-3483, 2009.
- KANO, M.; MARUTA, H.; KUGEMOTO, H.; SHIMIZU, K., 2004, **Practical model and detection algorithm for valve stiction**. 5-7.
- KAYIHAN, A.; DOYLE III, F. J. Friction compensation for a process control valve. **Control engineering practice**, 8, n. 7, p. 799-812, 2000.
- MARQUES, F. G. **Modeling and automatic friction compensation of pneumatic diaphragm valves with digital positioners**. 2020. (Tese de Doutorado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MARQUES, F. G.; GARCIA, C. Parameter estimation and performance comparison of friction models for pneumatic valves. **Control Engineering Practice**, 104, p. 104629, 2020.
- MESQUITA, M. S.; DESVAGES, H. **Manual de Operação da Planta Piloto de Vazão - LCPI - revisão 3**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p.100. 2018.

MICROELECTRONICS, S. **STM32H7 mcu series**. 2020. Disponível em: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32h7-series.html. Acesso em: Agosto/2020.

MISHRA, P.; KUMAR, V.; RANA, K. An online tuned novel nonlinear PI controller for stiction compensation in pneumatic control valves. **ISA transactions**, 58, p. 434-445, 2015.

MISHRA, P.; KUMAR, V.; RANA, K. A nonlinear framework for stiction compensation in ratio control loop. **ISA transactions**, 2020.

MOHAMMAD, M. A.; HUANG, B. Frequency analysis and experimental validation for stiction phenomenon in multi-loop processes. **Journal of Process Control**, 21, n. 4, p. 437-447, 2011.

MOHAMMAD, M. A.; HUANG, B. Compensation of control valve stiction through controller tuning. **Journal of Process control**, 22, n. 9, p. 1800-1819, 2012.

MONSEN, J. **Professional Development Workshop - Final Control Elements**. Personal Website, p. 320, 2023. Disponível em: <https://www.control-valve-application-tools.com/app/download/12446464957/%21+Final+Elements+Workshop+091421+%281%29.pdf?t=1660674725>.

MOREIRA, W. E. M. **Comparação de desempenho entre controladores IOPI e FOPI em uma planta piloto de vazão industrial**. 2022. (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NAHID, A.; IFTAKHER, A.; CHOUDHURY, M. S. Control Valve Stiction Compensation-Part I: A New Method for Compensating Control Valve Stiction. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 58, n. 26, p. 11316-11325, 2019.

NASSIRI, S.; LABBADI, M.; CHERKAOUI, M., 2023, **Improving High Efficiency and Reliability of Pump Systems using Optimal Fractional-order Integral Sliding-Mode Control Strategy**. IEEE. 3971-3976.

NING, S.; BONE, G. M., 2002, **High steady-state accuracy pneumatic servo positioning system with PVA/PV control and friction compensation**. IEEE. 2824-2829.

OLSSON, H.; ÅSTRÖM, K. J.; DE WIT, C. C.; GÄFVERT, M. *et al.* Friction models and friction compensation. 4, n. 3, p. 176-195, 1998.

PEREZ, J. **Entrevista para obtenção de dados de Planta da Petrobras**. 2023.

REN, H.-P.; WANG, X.; FAN, J.-T.; KAYNAK, O. Fractional order sliding mode control of a pneumatic position servo system. **Journal of the Franklin Institute**, 356, n. 12, p. 6160-6174, 2019.

SILVA, B. C. **Avaliação da eficiência de compensadores de atrito aplicados a válvulas de controle**. 2013. (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SKOUSEN, P. L. **Valve handbook**. McGraw-Hill Education, 2011. 0071743898.

SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. **Applied nonlinear control**. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991. v. 1).

UEHARA, D. **Detecção e quantificação de atrito em válvulas de controle**. 2009. (Dissertação de Mestrado) - Eng. Elétrica, Universidade de São Paulo.

VRC. **Valve Related Controls**. p. Pneumatic & electro-pneumatic valve positioners manufacturer, 2023. Disponível em: <https://www.vrc-usa.com/control-valve-positioners/>.

11. Apêndice A – Scripts de cálculo dos índices de desempenho

```

% Batch para cálculos dos índices de desempenho
% Ensaios - LCPI - Doutorado - Cassio Berni
% Posicionador digital embarcado
% v1.00 - 12/06/2023

% Inicializa ambiente
clear; close all; clc;

% Inicializa variáveis

% Constantes
% Intervalo de amostragem, em seg
ts = 10e-3;
% Tempo de ensaio, em seg
te = 150;
% N. de amostras
n = ( te / ts ) + 1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Lê entrada - arquivo .mat de ensaio
% Um arquivo para cada ensaio
[filename, pathname] = uigetfile({'*.mat;', 'All Data
Files';...
    '*.*', 'All Files'}, 'Selecione um arquivo de ensaio');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Faz o load do arquivo no workspace
str = append(pathname, filename);
load(str);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula os índices de desempenho
% Vetor de tempos pode ser data{1}.Values.Time
t = data{1}.Values.Time;
% Busca as variáveis de vazão y e sp, e a variável de posição
da haste x
y = 0;
sp = 0;
x = 0;
f_x_found = false;
f_y_found = false;

```



```

disp( 'Exibição dos resultados numéricos' );
fprintf( '\n\n' );
pause
fprintf( 'ISE = %5.2f\n', ise );
fprintf( 'Var = %5.2f %%\n', var );
fprintf( 'ITAE = %5.2f\n', itae );
if (f_x_found == true)
    modvar = modvar * ( 28.58 / 10.0 );
    fprintf( 'ModVar = %5.2f\n', modvar );
end

function [ ise ] = calcula_ise( n, y, sp )
%calcula_ise
% Integrated Square Error
ise = 0.0;
for i = 1 : n
    ise = ise + ( y.Values.Data(i) - sp.Values.Data(i) )^2;
end
end

function [ itae ] = calcula_itae( n, t, y, sp )
% calcula_itae
% Integrated Time Absolute Error
itae = 0.0;
for i = 1 : n
    itae = itae + ( t(i) * abs( y.Values.Data(i) -
sp.Values.Data(i) ) );
end
end

function [ var ] = calcula_var( y )
%calcula_var
% Variabilidade da malha
mean = mean2( y.Values.Data );
std = std2( y.Values.Data );
var = ( ( 2 * std ) / mean ) * 100;
end

function [ modvar ] = calcula_modvar( n, x )
% calcula_modvar
% Acúmulo de variação da posição da haste da válvula
modvar = 0.0;
for i = 2 : n
    modvar = modvar + abs( x.Values.Data(i) -
x.Values.Data(i-1) );
end
end

```