



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Caracterização estática e dinâmica de
válvulas pneumáticas industriais.

Gabriel Miki Portela

João Monlevade, MG
2025

Gabriel Miki Portela

Caracterização estática e dinâmica de válvulas pneumáticas industriais.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago

Coorientadora: Prof. Dra. Wendy Yadira Eras Herrera

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P843c Portela, Gabriel Miki.

Caracterização estática e dinâmica de válvulas pneumáticas industriais. [manuscrito] / Gabriel Miki Portela. - 2025.
62 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Coorientadora: Profa. Dra. Wendy Yadira Eras Herrera.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Automação industrial - Treinamento. 2. Controle pneumático. 3. Dinâmica. 4. Estática. 5. Medidores de fluxo. 6. Válvulas de controle pneumático. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Herrera, Wendy Yadira Eras. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Miki Portela

Caracterização estática e dinâmica de válvulas pneumáticas industriais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de novembro de 2025.

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago — Orientador — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr.^a Wendy Yadira Eras Herrera — Coorientadora — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Renan Fernandes Bastos — Coordenador do COEE — Universidade Federal de Ouro Preto

Conforme previsto no Art. 38 da Resolução COEE n.º 28/2022, a defesa da monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico.

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/11/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/11/2025, às 13:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1005621** e o código CRC **DBCE707F**.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a caracterização estática e dinâmica de uma válvula do tipo globo controlada por um posicionador pneumático, utilizando a planta didática SMAR PD3-F. O estudo foi motivado por variações observadas no controle de nível de um tanque industrial, decorrentes de instabilidades no atuador pneumático Posicionador de Válvula (FY, do inglês *Valve Positioner*) (FY)-31. A configuração experimental envolveu a integração de sistemas elétrico, pneumático e hidráulico, interligados por uma rede digital FOUNDATION Fieldbus, e o uso do *software System302* da SMAR em conjunto com o *MATLAB* e o toolbox OPC para aquisição e processamento dos dados. Nos ensaios estáticos, foram aplicados sinais do tipo degrau com amplitudes de 25%, 50%, 75% e 100% na entrada de controle do posicionador, a fim de avaliar o comportamento estacionário do sistema. Os resultados demonstraram variações médias de abertura da ordem de 0,3% em torno dos pontos de operação e diferenças de vazão de até 14 l/h entre os extremos analisados, indicando boa estabilidade e repetibilidade. Na análise dinâmica, foram empregados sinais senoidais e sinais *chirp*, com frequências variando de 5 mHz a 40 mHz. Verificou-se uma redução do valor percentual máximo de abertura da válvula com o aumento da frequência do sinal de referência, chegando a 7% para 40 mHz, além de um aumento da defasagem entre os sinais de controle e os valores reais de abertura, numa taxa média de 3,7°/mHz. Esses resultados evidenciam a influência da frequência de excitação no desempenho dinâmico da válvula e destacam a importância da caracterização experimental para o diagnóstico e aprimoramento do controle de atuadores pneumáticos em processos industriais.

Palavras-chave: posicionador pneumático, vazão, análise estática, análise dinâmica, planta didática SMAR.

Abstract

This work presents a study on the static and dynamic characterization of a globe valve controlled by a pneumatic positioner, using the SMAR PD3-F didactic plant. The study was motivated by variations observed in the level control of an industrial tank, caused by instabilities in the pneumatic actuator FY-31. The experimental setup involved the integration of electrical, pneumatic, and hydraulic systems interconnected through a FOUNDATION Fieldbus digital network, and the use of the SMAR System302 software in conjunction with MATLAB and the OPC toolbox for data acquisition and processing. In the static tests, step input signals with amplitudes of 25%, 50%, 75%, and 100% were applied to the positioner control input to evaluate the steady-state behavior of the system. The results showed mean opening variations of about 0.3% around the operating points and flow differences of up to 14 l/h between the analyzed extremes, indicating good stability and repeatability. In the dynamic analysis, sinusoidal and chirp signals were employed, with frequencies ranging from 5 mHz to 40 mHz. A reduction of up to 7% in the maximum valve opening was observed as the reference signal frequency increased, along with an average phase lag growth rate of $3.7^\circ/\text{mHz}$ between the control signals and the actual valve opening. These results highlight the influence of excitation frequency on the valve's dynamic performance and emphasize the importance of experimental characterization for diagnosing and improving the control of pneumatic actuators in industrial processes.

Keywords: pneumatic positioner, flow rate, static analysis, dynamic analysis, SMAR didactic plant.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Planta didática SMAR PD3-F.	18
Figura 2 – Esquema do transdutor pneumático.	19
Figura 3 – Posicionador de válvula.	20
Figura 4 – Válvula do tipo globo.	21
Figura 5 – Célula capacitiva do transmissor de pressão.	22
Figura 6 – Exemplo devido à histerese.	25
Figura 7 – Diagrama P&I da malha 31 da Planta didática SMAR. Com destaque em vermelho para as válvulas de <i>bypass</i> fechadas e em verde para as válvulas de <i>bypass</i> abertas.	32
Figura 8 – Diagrama do painel de controle elétrico da planta didática SMAR PD3-F, com indicações de estado de operação, alarmes e tipos de acionamento.	33
Figura 9 – Sistema de suprimento e condicionamento da qualidade do ar da planta SMAR.	34
Figura 10 – Configuração da rede e sua topologia.	35
Figura 11 – Integração de comunicação entre <i>MATLAB</i> , <i>System302</i> e planta SMAR.	36
Figura 12 – Estrutura de dados utilizada para armazenar as informações dos ensaios de análise dinâmica.	38
Figura 13 – Resultados dos ensaios de controle de nível por meio da válvula pneumática FY-31: (a) Valor real de abertura da válvula pneumática FY-31, (b) Nível medido pelo sensor Transmissor Indicador de Nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31 e (c) Vazão medida pelo sensor Transmissor Indicador de Vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Transmitter</i>) (FIT)-31. O traçado em azul indica o resultado do primeiro ensaio e o traçado em vermelho indica o resultado do segundo ensaio.	40
Figura 14 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.	41
Figura 15 – Análise dos dados de abertura da válvula pneumática FY-31 por meio da distribuição normal: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% e (d) 100%.	42
Figura 16 – Análise dos dados de vazão que está diretamente relacionada com a abertura da válvula pneumática FY-31 por meio da distribuição normal: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% e (d) 100%.	43
Figura 17 – Correlação dos dados de abertura da válvula pneumática e vazão em dispersão com contorno indicativo da região de maior densidade: (a) 25 %, (b) 50 %, (c) 75 % e (d) 100 %	45

Figura 18 – Relação entre abertura da válvula FY-31 e vazão do sensor FIT-31 para diferentes <i>setpoints</i>	46
Figura 19 – Resposta da válvula FY-32, em azul o sinal de entrada da válvula e em vermelho o desempenho real da válvula.	48
Figura 20 – Períodos de amostragem: (a) $dt = 0,1$ s e (b) $dt = 3$ s.	49
Figura 21 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.	51
Figura 22 – Correlação entre setpoint, abertura real da válvula e vazão (a) Setpoint vs abertura real, (b) Setpoint vs vazão e (c) Abertura real vs vazão.	52
Figura 23 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.	53
Figura 24 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.	55
Figura 25 – Comportamento da válvula FY-31 no domínio da frequência: (a) abertura, (b) magnitude e (c) fase instantânea obtida a partir do sinal chirp (azul) e dos sinais senoidais (vermelho).	56

Lista de tabelas

Tabela 1 – Distribuição normal medidos da válvula FY-31 e do sensor FIT-31 . . .	44
Tabela 2 – Distribuição normal medidos da defasagem válvula FY-31 e do sensor FIT-31	53

Lista de siglas e abreviaturas

FIT	Transmissor Indicador de Vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Transmitter</i>)
FY	Posicionador de Válvula (FY, do inglês <i>Valve Positioner</i>)
LIT	Transmissor Indicador de Nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>)
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
OPC	Comunicação de Plataforma Aberta (OPC, do inglês <i>Open Platform Communication</i>)
PID	Proporcional Integral e Derivativo

Lista de símbolos

μ	Desvio padrão da distribuição normal gaussiana
σ	Média da distribuição normal gaussiana
dt	Período de amostragem
np	Número total de amostras
t	Tempo contínuo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.2	Revisão bibliográfica	14
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO TEÓRICA	17
2.1	Planta Smar PD3-F	17
2.2	Sistemas posicionadores pneumáticos	18
2.2.1	Posicionador inteligente de válvulas FY-31	19
2.3	Válvulas	20
2.4	Medidores de vazão	21
2.5	Análise estática de instrumentos	22
2.5.1	Curva de calibração	22
2.5.2	Características estáticas de instrumentos	23
2.5.2.1	Sensibilidade	24
2.5.2.2	Resolução	24
2.5.2.3	Histerese	25
2.6	Análise dinâmica de instrumentos	25
2.6.1	Sinais de referência na análise dinâmica	26
2.7	Efeitos sistemáticos e aleatórios	27
2.7.1	Função de Densidade de Probabilidade	27
2.7.2	Desempenho de instrumentos e a função de densidade de probabilidade (FDP)	28
2.7.3	Estimativas amostrais	28
2.8	Transformada de Hilbert	29
2.8.1	Análise de Defasagem com a Transformada de Hilbert	29
2.9	Considerações parciais	30
3	CONFIGURAÇÃO E AQUISIÇÃO	31
3.1	Planta Smar PD3-F	31
3.1.1	<i>Hardware</i>	31
3.1.2	<i>Software</i>	35
3.2	Configuração do sistema de aquisição	36
3.3	Considerações parciais	38
4	ANÁLISE ESTÁTICA	39

4.1	Considerações parciais	46
5	ANÁLISE DINÂMICA	48
5.1	Sinais senoidais	49
5.2	Sinais chirp	54
5.3	Considerações parciais	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6.1	Propostas para trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	61

1 Introdução

A automação industrial desempenha um papel essencial no gerenciamento de processos produtivos, sendo amplamente aplicada em setores como petróleo, mineração, siderurgia e alimentos. Dentre as variáveis controladas mais relevantes, destacam-se a vazão e o nível, cujo controle adequado é indispensável para garantir segurança, eficiência e qualidade ao processo. Nesse contexto, atuadores pneumáticos e válvulas de controle são amplamente utilizados como elementos finais de controle, ajustando mecanicamente a passagem de fluido em resposta a sinais provenientes de controladores automáticos.

Os posicionadores pneumáticos inteligentes são dispositivos fundamentais nesse tipo de aplicação. Responsáveis por converter sinais elétricos ou digitais em pressões pneumáticas de atuação, eles ajustam o grau de abertura de válvulas de controle, assegurando que o valor real de abertura acompanhe o sinal de referência. Entretanto, esses dispositivos estão sujeitos a limitações e efeitos não lineares, como atrito, histerese, atraso na resposta e variações de sensibilidade, que podem comprometer o desempenho do sistema de controle, especialmente em malhas de processos contínuos.

A análise estática e a análise dinâmica são ferramentas complementares empregadas para compreender e avaliar o comportamento de atuadores e válvulas de controle. A análise estática permite identificar propriedades como sensibilidade, linearidade, histerese e repetibilidade, fundamentais para a calibração e a caracterização do sistema em regime permanente. Já a análise dinâmica busca compreender a resposta do sistema frente a variações temporais de sinal, identificando atrasos, defasagens e limitações na faixa de atuação em função da frequência de excitação.

A caracterização experimental de válvulas pneumáticas é de grande relevância, pois fornece subsídios para a identificação de falhas, otimização de parâmetros de controle e aprimoramento da manutenção preditiva em processos industriais. Estudos recentes, como os de Scali et al. (2011) e Ye e Chen (2009), destacam que a não linearidade e o desgaste mecânico são fatores determinantes na degradação do desempenho dinâmico desses sistemas. Dessa forma, compreender como esses efeitos influenciam o comportamento estático e dinâmico de válvulas controladas por posicionadores pneumáticos é essencial para garantir confiabilidade e estabilidade em aplicações industriais.

Este trabalho tem como objetivo caracterizar o comportamento estático e dinâmico de uma válvula do tipo globo controlada por um posicionador pneumático, utilizando a planta didática SMAR PD3-F. Para isso, são aplicadas técnicas experimentais de identificação e análise de resposta em frequência, com o intuito de avaliar as limitações do conjunto atuador-válvula e sua influência sobre a precisão e estabilidade do controle. Espera-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de metodologias de diagnóstico e avaliação de desempenho aplicáveis a sistemas de controle pneumático em ambiente in-

dustrial.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização estática e dinâmica de uma válvula do tipo globo controlada por um posicionador pneumático, instalada na planta didática SMAR PD3-F. A partir dessa análise, busca-se compreender o comportamento do conjunto atuador-válvula sob diferentes condições de operação, avaliando os efeitos de atraso, histerese e variações mecânicas sobre a precisão e a estabilidade do sistema.

O estudo visa, ainda, contribuir para o desenvolvimento de metodologias experimentais que auxiliem na avaliação de desempenho de atuadores pneumáticos em aplicações industriais, promovendo maior confiabilidade e eficiência nos processos de controle.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Implementar a comunicação e o controle da planta SMAR PD3-F por meio de um servidor cliente OPC, integrando o *software System302* e o ambiente *MATLAB*;
- Realizar a caracterização estática da válvula pneumática, identificando parâmetros como linearidade, sensibilidade, histerese e repetibilidade;
- Conduzir a análise dinâmica do atuador pneumático, aplicando sinais senoidais e sinais do tipo *chirp* para avaliar o comportamento em frequência, ganho e defasagem;
- Comparar os resultados obtidos nas análises estática e dinâmica, correlacionando-os com as limitações físicas e de resposta do sistema.

1.2 Revisão bibliográfica

No artigo de Sorli, Figliolini e Pastorelli (2001), é apresentado um modelo dinâmico de uma válvula proporcional pneumática de pressão, amplamente utilizado em sistemas de controle industrial. O estudo aborda a resposta das válvulas a diferentes entradas de controle, considerando efeitos não lineares como o comportamento dos fluxos de ar comprimido e o movimento mecânico dos componentes internos. O modelo proposto é validado experimentalmente, demonstrando soluções na previsão da resposta dinâmica da válvula em diversas condições operacionais. O trabalho contribui significativamente para a otimização de atuadores pneumáticos, sendo fundamental para melhorar a eficiência e a precisão em processos de controle de pressão.

O artigo de Sorli M. e Figliolini (2004), fornece uma análise abrangente da válvula pneumática de pressão proporcional, combinando modelagem teórica e validação experimental. Os autores desenvolvem um modelo dinâmico detalhado da válvula, baseado em

equações que descrevem seu comportamento em termos de pressão e fluxo. O diferencial deste trabalho em relação aos estudos anteriores é a integração de uma investigação experimental para validar o modelo proposto. Ao realizar experimentos práticos, os autores verificam a precisão do modelo teórico, oferecendo uma visão mais completa e confiável do desempenho das válvulas em condições reais. Essa abordagem combina a robustez teórica com a verificação prática, proporcionando uma compreensão mais sólida e aplicada do comportamento da válvula pneumática.

No estudo de Ye e Chen (2009), é realizada uma análise dinâmica detalhada de uma válvula-solenóide de dois estágios operada por piloto, amplamente utilizada em sistemas pneumáticos. O trabalho aborda as interações complexas entre o fluido e os componentes da válvula, além de desenvolver um modelo dinâmico considerando a compressibilidade do fluido e o movimento acoplado do êmbolo da válvula. A pesquisa explora o comportamento da válvula sob diferentes condições operacionais e identifica parâmetros estruturais críticos que influenciam a estabilidade e o desempenho dinâmico do sistema, proporcionando um melhor entendimento de sua dinâmica.

No trabalho de Novak Antonín e Simon (2010), é proposta uma metodologia inovadora para a identificação de sistemas não lineares com a utilização de sinais de varredura senoidal exponenciais. O estudo foca na eficiência desse tipo de sinal para separar componentes lineares e não lineares das respostas dos sistemas. A técnica apresentada permite uma análise mais precisa de sistemas com distorções harmônicas, sendo particularmente útil em processos industriais onde a identificação precisa de não linearidades é essencial para o ajuste de parâmetros e para a melhoria do desempenho dos sistemas.

O estudo de Scali et al. (2011) apresenta uma abordagem experimental para identificar e diagnosticar falhas em válvulas de controle industriais, como atrito, histerese, banda morta e desgaste mecânico. A pesquisa combina dados de variáveis típicas de malhas de controle, como ponto de ajuste e sinal de saída, para caracterizar essas anomalias e desenvolver técnicas de diagnóstico eficientes. Os resultados demonstram como esses problemas afetam o desempenho das válvulas e comprometem a precisão do sistema de controle, reforçando a importância de estratégias de manutenção preditiva para garantir a confiabilidade operacional de sistemas pneumáticos.

O artigo de Ali et al. (2009) apresenta uma revisão abrangente sobre atuadores pneumáticos, abordando desde sua modelagem matemática até estratégias de controle avançadas. O estudo destaca as principais não linearidades associadas a esses sistemas, como histerese, atrito e compressibilidade do ar, que afetam significativamente a precisão e o desempenho do controle. Além disso, são discutidas diferentes abordagens para a modelagem dinâmica, incluindo modelos físicos baseados em equações termodinâmicas e modelos baseados em identificação experimental.

O estudo de Assad, Neto e Meggiolaro (2014) investiga o impacto do atrito no desempenho de atuadores pneumáticos industriais. O artigo analisa como diferentes tipos

de atrito, incluindo atrito estático, dinâmico e histerese, afetam a precisão e a repetibilidade desses dispositivos. Além disso, o trabalho explora técnicas de modelagem e métodos de compensação para minimizar os efeitos indesejados da fricção, o que é essencial para otimizar o controle e a eficiência dos atuadores em aplicações industriais. A compreensão aprofundada desses fenômenos contribui para o desenvolvimento de estratégias de controle mais robustas e confiáveis para sistemas pneumáticos.

O estudo de Qian et al. (2016) investiga os efeitos da restrição de orifício na diferença de pressão em válvulas globo de controle operadas por piloto, utilizando métodos experimentais e simulações numéricas. A pesquisa analisa como a geometria do orifício influencia a distribuição de pressão e o desempenho da válvula, identificando fatores que podem comprometer sua eficiência e resposta dinâmica. Os resultados obtidos fornecem informações valiosas para otimizar o design dessas válvulas, reduzindo perdas de carga e melhorando o controle de fluxo em sistemas pneumáticos e hidráulicos industriais.

1.3 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1, são apresentados o contexto e a motivação do estudo, destacando a relevância da caracterização estática e dinâmica de atuadores pneumáticos em processos industriais. Também são definidos os objetivos geral e específicos, além da justificativa que fundamenta o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 2 aborda os conceitos teóricos essenciais para a compreensão do trabalho, incluindo os princípios de análise estática e dinâmica de instrumentos, as principais características estáticas — como sensibilidade e histerese — e a relação entre as incertezas sistemáticas e aleatórias.

No Capítulo 3, são descritas as configurações experimentais utilizadas para a obtenção dos dados, detalhando o sistema de medição, os instrumentos empregados e os procedimentos adotados para a aquisição dos sinais em regime estático e dinâmico.

O Capítulo 4 trata da análise dos dados obtidos em regime estacionário, apresentando a curva de calibração, a caracterização do comportamento estático do conjunto posicionador/válvula e a avaliação das incertezas associadas às medições.

No Capítulo 5, são analisadas as respostas do sistema submetido a sinais dinâmicos. São discutidos o comportamento do conjunto em diferentes frequências, as defasagens observadas entre os sinais e a validação dos resultados por meio do ensaio com sinal *chirp*.

Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições e limitações identificadas. Também são sugeridas perspectivas para trabalhos futuros, incluindo a implementação de estratégias de controle avançadas visando aprimorar o desempenho dinâmico do sistema.

2 Revisão teórica

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos fundamentais para a compreensão e o desenvolvimento das etapas metodológicas deste trabalho. Inicialmente, será descrita a planta didática SMAR PD3-F, destacando sua composição para realizar os ensaios experimentais. Em seguida, serão abordados os sistemas posicionadores pneumáticos, com foco no posicionador inteligente de válvulas FY-31, além de uma breve descrição das válvulas utilizadas e dos medidores de vazão presentes na planta.

Na sequência, serão discutidos os aspectos da análise estática de instrumentos, incluindo a obtenção da curva de calibração e as principais características estáticas, como sensibilidade, resolução e histerese. Em seguida, serão apresentados conceitos relacionados à análise dinâmica de instrumentos, fundamentais para avaliar o desempenho do sistema em condições variáveis.

Além disso, serão explorados os efeitos sistemáticos e aleatórios nos processos de medição, abordando conceitos como a função de densidade de probabilidade (FDP), desempenho de instrumentos e estimativas amostrais. Por fim, será introduzida a Transformada de Hilbert e sua aplicação na análise de defasagem, destacando sua relevância para a caracterização dinâmica dos sinais coletados.

2.1 Planta Smar PD3-F

A Planta Didática PD3-F da SMAR é uma ferramenta educacional projetada para o treinamento em tecnologias de automação de processos industriais. Esse sistema permite a demonstração prática de diversas configurações de malhas de controle, empregando instrumentos de campo e softwares especializados desenvolvidos para aplicações industriais. Entre as malhas disponíveis estão o controle antecipativo, controle por realimentação negativa e controle em cascata. Além dessas, o design modular da planta possibilita a configuração de novas malhas sem necessidade de alterações mecânicas na estrutura física, bastando realizar reconfigurações nos dispositivos.

A planta apresentada na Figura 1 é composta por um tanque principal de armazenamento, conectado a duas bombas hidráulicas que distribuem água para outros dois tanques: o tanque de aquecimento, equipado com resistências elétricas que aumentam a temperatura do fluido, e o tanque intermediário, também conhecido como tanque de mistura. O controle do nível e da vazão nos tanques é feito por válvulas pneumáticas, coordenadas por transmissores e outros dispositivos que garantem precisão e estabilidade no processo.

Um dos principais diferenciais tecnológicos da planta PD3-F é a integração baseada na tecnologia FOUNDATION *Fieldbus*. Essa é uma arquitetura de comunicação digital

Figura 1 – Planta didática SMAR PD3-F.



Fonte: retirado de SMAR (2012).

amplamente utilizada na automação industrial, que permite que dispositivos de campo (como transmissores, controladores e válvulas) compartilhem informações entre si sem depender exclusivamente de um controlador centralizado. Por ser um sistema digital, ele oferece vantagens significativas em relação a tecnologias analógicas, como maior precisão, confiabilidade e a possibilidade de diagnósticos em tempo real. Além disso, a estrutura do FOUNDATION *Fieldbus* é robusta, suportando redes complexas em ambientes industriais e possibilitando maior flexibilidade na configuração e operação dos sistemas.

2.2 Sistemas posicionadores pneumáticos

Os sistemas posicionadores pneumáticos são dispositivos essenciais para o controle preciso de válvulas em processos industriais. Eles ajustam a posição da válvula com base em sinais de referência, garantindo que o processo seja mantido dentro dos parâmetros desejados. De forma geral, esses sistemas combinam elementos mecânicos, pneumáticos e de controle, cuja interação define o comportamento dinâmico do sistema.

De acordo com Aguirre (2013), a análise de sistemas dinâmicos deve considerar as respostas transitória e em regime estacionário, bem como os efeitos de atraso e não linearidades. No caso dos posicionadores pneumáticos, características como histerese, saturação

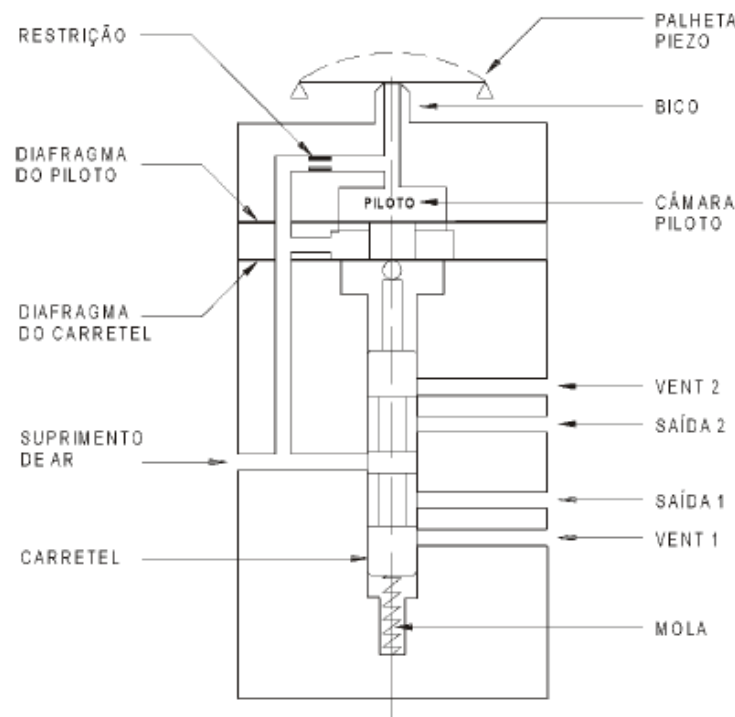
e atrito mecânico podem influenciar significativamente o desempenho. Esses efeitos são comumente avaliados por meio de ensaios estáticos e dinâmicos, utilizando sinais como degrau e senoidais para analisar a sensibilidade e o comportamento em diferentes frequências.

2.2.1 Posicionador inteligente de válvulas FY-31

Este dispositivo desempenha a função de ajustar a posição do atuador responsável pelo controle da abertura de válvulas de controle. Ele utiliza um controlador de posição que recebe, por meio da rede de comunicação *Fieldbus*, o comando correspondente ao percentual desejado de abertura da válvula. A partir disso, o posicionador age para alinhar a posição real da válvula ao valor especificado na entrada do sistema.

A Figura 2 apresenta o esquema do atuador pneumático FY-31, um disco piezoelétrico responde a um sinal elétrico aplicado pelo controlador, induzindo uma deflexão mecânica que interfere no fluxo de ar no bico de controle. Essa obstrução altera a pressão na câmara piloto, o que, por sua vez, aciona o diafragma piloto. A pressão resultante é transmitida ao diafragma do carretel, amplificando a força inicial do disco piezoelétrico. Esse mecanismo permite controlar o carretel, que regula a abertura da válvula globo utilizada na planta.

Figura 2 – Esquema do transdutor pneumático.



Fonte: retirado de SMAR. (2024)

Com este instrumento, permite-se gerenciar o fluxo de líquido que percorre a tubulação e atinge o tanque de aquecimento, garantindo maior precisão e controle do processo.

Além disso, a análise do desempenho do posicionador é crucial para assegurar sua confiabilidade em operações industriais. A Figura 3 mostra o dispositivo real.

Figura 3 – Posicionador de válvula.



Fonte: retirado de SMAR (2012)

2.3 Válvulas

As válvulas de controle desempenham um papel essencial em sistemas industriais, regulando o fluxo de fluídos para garantir o controle preciso de processos. Na planta didática SMAR PD3-F, a válvula utilizada é do tipo globo, modelo 88-21125, fabricada pela Masoneilan – Dresser apresentada na Figura 4. Esse tipo de válvula é amplamente reconhecido pela sua robustez e capacidade de regulação precisa, sendo ideal para processos que exigem ajustes finos no fluxo de fluídos como gases, líquidos ou vapor. Sua geometria interna permite um controle eficiente, mas também pode gerar quedas significativas de pressão devido às trajetórias sinuosas do fluido.

Embora a válvula globo seja versátil e eficiente, apresenta algumas limitações, como o custo elevado de manutenção e a possibilidade de desgaste ou corrosão em ambientes agressivos. O fluxo contínuo em altas velocidades pode causar danos em componentes internos, como assentos e obturadores, e o acúmulo de resíduos pode comprometer seu desempenho. Além disso, em sistemas pneumáticos como os da planta SMAR, o desgaste de diafragmas e falhas nos atuadores são problemas recorrentes, afetando a precisão da válvula.

A manutenção preventiva é fundamental para assegurar o desempenho ideal da válvula de controle. Inspeções regulares devem ser realizadas anualmente, com manutenções completas a cada dois anos ou de acordo com a criticidade do processo. Durante essas manutenções, são verificadas condições de assentos, vedantes, obturadores e conexões pneumáticas, além da calibração da válvula para garantir que ela responda adequadamente ao *setpoint*.

Figura 4 – Válvula do tipo globo.



Fonte: retirado de SMAR (2012)

Na planta SMAR, as válvulas de controle globo são integradas ao sistema de automação *System302*, sendo responsáveis por regular a vazão de água que abastece os tanques. Essa funcionalidade é crucial para manter o controle de parâmetros como nível e temperatura nos tanques, elementos essenciais para o estudo e operação da planta. Essa combinação de robustez mecânica, integração com tecnologia digital e manutenção preventiva garante que as válvulas de controle desempenhem seu papel com alta eficiência e confiabilidade nos processos industriais.

2.4 Medidores de vazão

Na planta didática SMAR, a medição de nível e vazão é realizada por meio de transmissores de pressão diferencial, tecnologia amplamente utilizada para garantir precisão e confiabilidade nos processos industriais. Para configurar esses transmissores, utiliza-se o sistema de automação industrial *System302*, que oferece ferramentas avançadas para ajuste, manutenção e comunicação entre os dispositivos da planta.

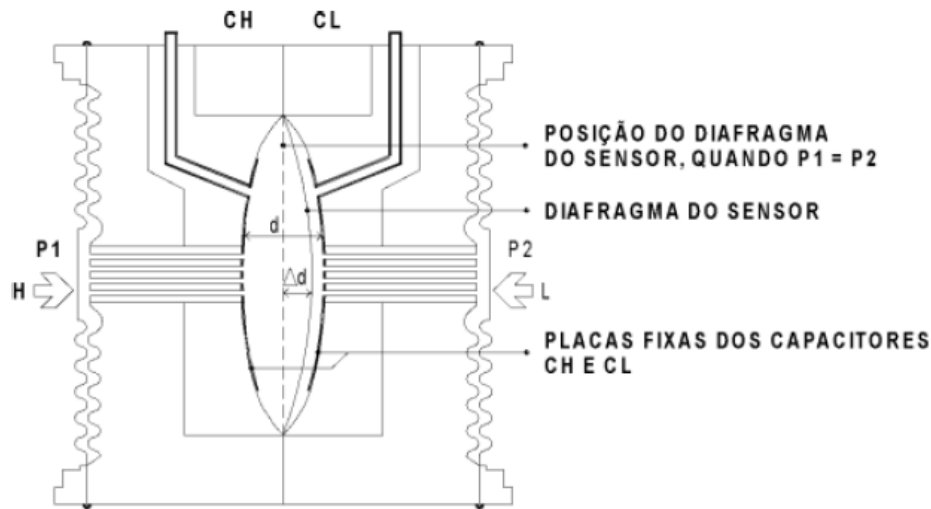
O transmissor LD302, um dos componentes fundamentais, é projetado para medições de pressão diferencial, absoluta e manométrica, além de nível e vazão. Ele utiliza um sensor capacitivo, que proporciona alta sensibilidade e segurança operacional. Esse sensor opera com base no princípio em que a capacitância varia conforme a amplitude do material medido. A célula capacitiva em que a capacitância (C) pode ser expressa pela relação matemática

$$C \approx \frac{\epsilon A}{d}, \quad (2.1)$$

em que ϵ é a permissividade do material, A é a área das placas paralelas, e d é a distância entre elas.

O design do transmissor inclui a possibilidade de selecionar diferentes tipos de funções de transferência e apresenta uma interface simplificada para a integração entre os dispositivos de campo e a sala de controle. O esquema funcional do LD302 apresentado na Figura 5 ilustra como as pressões P_1 e P_2 aplicadas nas câmaras H e L resultam na deflexão do diafragma sensor. Essa deflexão (Δd) altera as capacitâncias C_H e C_L , medidas entre as placas fixas e o diafragma, permitindo que a pressão diferencial $\Delta P = P_1 - P_2$ seja calculada de maneira precisa.

Figura 5 – Célula capacitiva do transmissor de pressão.



Fonte: retirado de SMAR (2024)

Com essa tecnologia, a planta SMAR garante não apenas alta precisão nas medições, mas também facilidade de operação e manutenção, características essenciais para um ambiente de treinamento e demonstração de processos industriais.

2.5 Análise estática de instrumentos

A análise estática de instrumentos é essencial para entender o desempenho de sensores em condições de estado estacionário. Essa análise permite estabelecer uma relação precisa entre a grandeza medida e o sinal de saída do instrumento, garantindo a precisão do processo de medição. Além disso, é importante considerar tanto a calibração estática quanto as incertezas associadas à medição, considerando erros sistemáticos e aleatórios, para garantir que o desempenho do sistema seja devidamente avaliado (AGUIRRE, 2013).

2.5.1 Curva de calibração

A calibração estática descreve a relação entre a grandeza física medida (entrada do instrumento) e o valor indicado na saída. Com a coleta dos dados de calibração, é possível determinar várias características importantes, como a linearidade, sensibilidade, precisão

e histerese do instrumento. Esses parâmetros são essenciais para avaliar o desempenho e a fidelidade da resposta do instrumento em diferentes condições operacionais.

Um instrumento ideal pode ser considerado um sistema de entrada $x(t)$, que representa a grandeza física a ser medida, e saída $y_d(t) = f_o[x(t)]$, a resposta desejada. No entanto, devido a limitações reais, a saída $y(t)$ geralmente difere da desejada, sendo influenciada por sinais indesejáveis de interferência $x_i(t)$ e modificantes $x_m(t)$. Assim, a equação geral que descreve o comportamento real do instrumento é

$$\begin{aligned} y(t) &= f[x(t), x_i(t), x_m(t)], \\ &= \tilde{f}_o[x(t)] + \tilde{g}[x_i(t)]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde $\tilde{f}_o$ e $\tilde{g}$ indicam os efeitos das entradas indesejáveis nas funções que descrevem o sistema. A função f_o , em seu aspecto dinâmico, tem uma relação estática representada por f_e , dada por

$$f_e = \lim_{t \rightarrow \infty} f_o[x(t)]. \quad (2.3)$$

A partir da curva de calibração, é possível estabelecer uma correspondência entre os valores de entrada e saída do instrumento. Essa curva é gerada a partir de vários pontos de medição, como $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ para as entradas e $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ para as saídas. Vale ressaltar que cada x_i representa o valor estacionário de $x(t)$ durante o ensaio i , ou seja

$$x_i = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t), \text{ durante o teste } i. \quad (2.4)$$

A curva de calibração é descrita pela função estática f_e , com a saída representada por

$$y_i = f_e[x_i] + \epsilon, \quad (2.5)$$

em que ϵ é uma variável aleatória que representa os ruídos e incertezas de medição. Para garantir a correlação entre x_i e y_i , é necessário que f_e seja invertível, ou seja,

$$x_i = f_e^{-1}[y_i] + \epsilon_c, \quad (2.6)$$

em que ϵ_c continua sendo uma variável puramente aleatória.

É fundamental realizar a calibração periódica dos instrumentos, pois as características físicas dos materiais que os compõem podem variar com o tempo, alterando suas respostas e, conseqüentemente, seu desempenho.

2.5.2 Características estáticas de instrumentos

Para avaliar se um instrumento é adequado a uma aplicação específica, é importante compreender suas propriedades fundamentais. No contexto deste trabalho, as características estáticas testadas incluem sensibilidade, resolução, histerese e linearidade estática.

Essas características serão discutidas de maneira geral, com foco na sua importância para a análise do comportamento do conjunto posicionado pneumático/válvula. Detalhes adicionais serão abordados conforme a especificidade dos instrumentos treinados no decorrer do trabalho.

2.5.2.1 Sensibilidade

A sensibilidade de um instrumento pode ser definida como a variação da saída em estado estacionário causada por uma pequena variação na entrada, também em estado estacionário. Matematicamente, a sensibilidade é expressa como a derivada parcial da função entrada-saída em relação à variável de entrada, ou seja, $K = \frac{\partial f_e}{\partial \bar{x}}$, onde o valor da entrada está em regime permanente.

A sensibilidade pode ser estimada pela razão entre a variação da saída e a variação da entrada, isto é, $K = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta \bar{x}}$. Para compreender isso melhor, considere a expansão de Taylor da função do instrumento em torno do ponto de operação $\bar{x}^*$ e das entradas espúrias $\bar{x}_{e_i}^*$, $i = 1, \dots, n$

$$\begin{aligned} \bar{y} &= f_e(\bar{x}^*, \bar{x}_{e_i}^*) + \left. \frac{\partial f_e}{\partial \bar{x}} \right|_{(\bar{x}^*, \bar{x}_{e_i}^*)} (\bar{x} - \bar{x}^*) + O^2, \\ \bar{y} - f_e(\bar{x}^*, \bar{x}_{e_i}^*) &\approx \left. \frac{\partial f_e}{\partial \bar{x}} \right|_{(\bar{x}^*, \bar{x}_{e_i}^*)} \Delta \bar{x}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Neste desenvolvimento, os termos de segunda ordem foram desprezados (O^2), e as variações das entradas espúrias são consideradas constantes $\Delta \bar{x}_{e_i} = 0$.

Para estimar a sensibilidade durante a calibração, basta derivar a curva de calibração $\hat{f}_e$, obtendo $\hat{K} = \frac{\partial \hat{f}_e}{\partial \bar{x}}$. No caso de sistemas não lineares, como o abordado neste trabalho, a sensibilidade varia conforme o ponto de operação.

2.5.2.2 Resolução

A resolução de um instrumento é a menor variação da entrada que pode ser detectada quando o valor inicial da entrada difere de zero. Suponha que um instrumento mede uma grandeza física cujo valor fixo é $x_0 \neq 0$. Se houver uma pequena alteração em x_0 , o instrumento não perceberá essa diferença, ou seja, ele não distingue x_0 de $x_0 + \delta x$, onde $|\delta x| \ll 1$. No entanto, ao aumentar gradualmente a variável de entrada x , haverá um ponto crítico $x_{er} = x_0 + \Delta x$, a partir do qual o instrumento indicará uma mudança na saída. Assim, o menor incremento detectável da entrada, Δx , define a resolução do instrumento.

Na prática, a resolução é expressa como o menor incremento perceptível na escala de leitura. Para instrumentos digitais, isso corresponde ao valor do menor *bit* significativo. Alguns autores consideram a resolução como metade do valor desse *bit*.

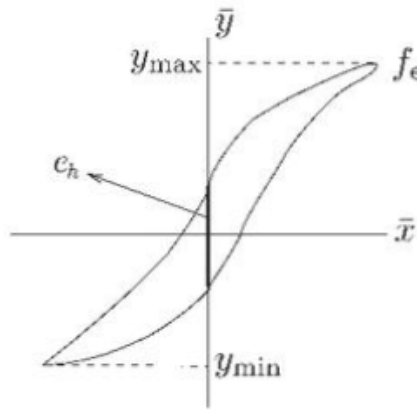
2.5.2.3 Histerese

Certos materiais exibem comportamentos diferentes quando são solicitados em direções opostas sucessivamente. Esse fenômeno também é observado em materiais magnéticos, quando inicialmente magnetizados em uma polaridade e, posteriormente, na polaridade oposta. Esse comportamento é conhecido como histerese. Em instrumentos que sofrem com histerese, uma curva de calibração f_e típica é ilustrada na Figura 6. A histerese pode ser quantificada pela diferença máxima de erro associada ao fenômeno, chamada de erro de histerese, que pode ser expressa como uma porcentagem do alcance do instrumento

$$\%e_h = \frac{e_h}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100, \quad (2.8)$$

em que $y_{\max} - y_{\min}$ representa o alcance total (*span*) do instrumento.

Figura 6 – Exemplo devido à histerese.



Fonte: retirado de Aguirre (2013)

2.6 Análise dinâmica de instrumentos

Um sistema é considerado estático quando responde de maneira imediata a qualquer variação de entrada, como, por exemplo, a tensão em um potenciômetro ajustado em corrente contínua. Já os sistemas dinâmicos, como termômetros de mercúrio, apresentam um atraso na resposta em relação à entrada, levando um tempo determinado para alcançar o estado final.

Sistemas estáticos podem ser representados por equações algébricas, enquanto sistemas dinâmicos são modelados por equações diferenciais em tempo contínuo, ou equações de diferença em tempo discreto.

Instrumentos com resposta rápida podem ser tratados como estáticos e modelados pela curva de calibração. Já os sistemas com resposta mais lenta exigem o uso de mo-

delos dinâmicos, que frequentemente envolvem equações diferenciais para representar seu comportamento.

A equação diferencial de um sistema dinâmico pode ser expressa como

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \quad (2.9)$$

em que $y(t)$ é a saída, $x(t)$ é a entrada e a_i , b_i são coeficientes que dependem das características do sistema. Os parâmetros físicos do instrumento, como massa e coeficientes de elasticidade, determinam as raízes da equação característica e, portanto, influenciam o comportamento dinâmico do sistema.

Ao aplicar a Transformada de Laplace na equação acima com condições iniciais nulas, temos

$$(a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0)Y(s) = (b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0)X(s) \quad (2.10)$$

em que $Y(s)$ e $X(s)$ são as transformadas de Laplace de $y(t)$ e $x(t)$, respectivamente. A função de transferência, que relaciona a entrada e a saída no domínio de Laplace, é dada por

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.11)$$

A localização das raízes do denominador da função de transferência define os polos do sistema, que determinam o comportamento da resposta natural.

Sistemas dinâmicos também podem ser analisados em termos de sua resposta em frequência. Substituindo s por $j\omega$ na função de transferência, obtemos a função de resposta em frequência $H(j\omega)$, que descreve como o sistema reage a diferentes frequências. Essa função fornece tanto a amplificação quanto a defasagem de cada componente de frequência no sinal de entrada.

A resposta em frequência de muitos instrumentos é geralmente dividida em três faixas: a banda de passagem, onde o ganho é aproximadamente constante; a banda de transição, onde o ganho começa a decair; e a banda de rejeição, onde o sinal é atenuado. Essas faixas são essenciais para a caracterização de sistemas de medição e filtros, já que uma resposta em frequência inadequada pode distorcer o sinal de entrada e comprometer a precisão das medições.

2.6.1 Sinais de referência na análise dinâmica

A análise dinâmica pode ser realizada com diferentes sinais de entrada, como degraus, senoidais, sinais de ruído pseudoaleatório (PRBS) e sinais do tipo *chirp*. Embora o PRBS seja comum para sistemas rápidos devido à sua capacidade de excitar uma ampla faixa de frequências simultaneamente, ele é inadequado para sistemas lentos como válvulas pneumáticas. Para sistemas desse tipo, sinais senoidais e *chirp* são mais apropriados, pois permitem uma análise detalhada da resposta em frequência.

Sinal senoidal: É usado para excitar o sistema em frequências específicas, fornecendo informações sobre ganho e defasagem em cada frequência. Sinal *chirp*: Varia a frequência continuamente ao longo do tempo, possibilitando a análise de uma faixa de frequências em um único ensaio. Isso o torna eficiente e ideal para sistemas com dinâmica lenta.

2.7 Efeitos sistemáticos e aleatórios

Erros sistemáticos e aleatórios são frequentemente confundidos, especialmente nos conceitos de exatidão e precisão. No entanto, eles representam diferentes tipos de erros. Erros sistemáticos ocorrem consistentemente, como um desvio fixo nas medições, enquanto erros aleatórios variam de maneira imprevisível entre as medições, afetando a precisão. Compreender essas distinções é crucial ao avaliar medições e a confiabilidade dos instrumentos. Além disso, uma noção básica de variáveis aleatórias pode ajudar a entender como esses erros se manifestam durante o processo de medição.

2.7.1 Função de Densidade de Probabilidade

Uma maneira bastante utilizada para representar um conjunto de dados com N elementos é por meio de um histograma. Esse gráfico apresenta no eixo horizontal os valores possíveis, divididos em intervalos específicos, e no eixo vertical a quantidade de ocorrências em cada intervalo. Esses intervalos são usualmente pequenos e não sobrepostos. Ao contar o número de ocorrências em cada subfaixa, o histograma resultante exibe a distribuição dos dados ao longo do intervalo.

Para obter uma visualização diferente, o número de ocorrências em cada subfaixa pode ser normalizado dividindo-o pelo número total de medições, N . Essa modificação não altera o formato do gráfico, mas agora o eixo vertical indicará a frequência relativa dos valores em vez de seu número absoluto, fornecendo uma interpretação probabilística da distribuição dos dados.

Ao reduzir a largura dos intervalos do histograma, podemos tornar a visualização mais detalhada. Entretanto, à medida que os intervalos ficam menores que a menor diferença entre os valores observados, o gráfico pode tornar-se difícil de interpretar. Para suavizar a distribuição, é necessário tomar o limite $\Delta \rightarrow 0$ e também $N \rightarrow \infty$, resultando na função de densidade de probabilidade (FDP), denotada por $f_p(y)$.

Assim, dada uma função de densidade de probabilidade $f_p(y)$, a probabilidade de uma variável assumir valores no intervalo $[a, b]$ pode ser obtida pela integral

$$P(a \leq y \leq b) = \int_a^b f_p(y) dy. \quad (2.12)$$

A função de densidade pode assumir diversas formas, mas uma das mais conhecidas é a gaussiana, dada por

$$f_p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(y - \mu)^2\right), \quad (2.13)$$

em que μ é a média e σ é o desvio padrão, que caracterizam completamente a distribuição.

2.7.2 Desempenho de instrumentos e a função de densidade de probabilidade (FDP)

O desempenho de um instrumento pode ser representado por uma função de densidade de probabilidade (FDP), $f_p(y)$. No caso de medições com um número significativo de leituras, o histograma dos dados pode ser aproximado por uma distribuição gaussiana.

Se o valor de referência é y_0 , a função $f_p(y)$ pode ser usada para avaliar o viés e a precisão do instrumento. Um instrumento não tendencioso tem sua FDP centrada em y_0 , enquanto a precisão depende da dispersão ao redor desse valor. Quanto menor a dispersão, maior a precisão. Um instrumento pode ser preciso, mas tendencioso, se a FDP for concentrada, mas deslocada de y_0 , ou impreciso, com grande dispersão.

A probabilidade de o instrumento indicar valores menores ou maiores que y_0 pode ser expressa matematicamente como

$$P(y < y_0) = P(y > y_0) = \int_{-\infty}^{y_0} f_p(y) dy. \quad (2.14)$$

2.7.3 Estimativas amostrais

Os erros sistemáticos e aleatórios podem ser associados à localização e dispersão de uma função de densidade de probabilidade (FDP), $f_p(y)$. Embora, na prática, a função exata $f_p(y)$ não seja conhecida, é possível estimá-la a partir de um conjunto de medições y_i , interpretado como amostras independentes. As estimativas da média μ e do desvio-padrão σ podem ser obtidas pelas expressões de média amostral $\bar{y}$ e desvio-padrão amostral $s(y)$, dadas por

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (2.15)$$

$$s(y) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}. \quad (2.16)$$

Aqui, o fator $N - 1$ é utilizado devido à correlação entre as amostras y_i e a média $\bar{y}$, refletindo os graus de liberdade disponíveis. Dessa forma, $\bar{y}$ e $s(y)$ são, respectivamente, estimativas de μ e σ , baseadas no conjunto amostral de tamanho N .

Ao se obter um conjunto de medições $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ para um mesmo valor de uma variável, uma boa estimativa do valor verdadeiro é a média dessas leituras, $\bar{y}$. Supondo

que essas medições sejam independentes, o desvio-padrão da média estimada, $s(\bar{y})$, pode ser relacionado ao desvio-padrão da amostra, $s(y)$, como

$$s(\bar{y}) = \frac{s(y)}{\sqrt{N}}. \quad (2.17)$$

2.8 Transformada de Hilbert

A Transformada de Hilbert é uma ferramenta matemática fundamental no processamento de sinais, especialmente utilizada para obter a representação analítica de sinais reais. Essa representação é essencial para a análise de características dinâmicas de sistemas, permitindo a extração de informações como a envoltória e a fase instantânea do sinal (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010).

De forma geral, qualquer sinal discreto $x[n]$ pode ser decomposto em uma parte par $x_e[n]$ e uma parte ímpar $x_o[n]$, definidas por

$$x[n] = x_e[n] + x_o[n], \quad (2.18)$$

sendo

$$x_e[n] = \frac{x[n] + x[-n]}{2}, \quad (2.19)$$

$$x_o[n] = \frac{x[n] - x[-n]}{2}, \quad (2.20)$$

A Transformada de Hilbert atua sobre a parte ímpar do sinal, introduzindo um deslocamento de fase de -90° para as componentes de frequência positiva e $+90^\circ$ para as negativas. Matematicamente, a transformada de Hilbert de um sinal $x[n]$ é definida por

$$H\{x[n]\} = x_h[n] = \frac{1}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{x[k]}{n - k}, \quad (2.21)$$

O resultado dessa transformação é um sinal complexo chamado de sinal analítico $x_a[n]$, expresso por

$$x_a[n] = x[n] + j \cdot Hx[n] = A[n]e^{j\phi[n]}, \quad (2.22)$$

em que $A[n]$ representa a envoltória instantânea e $\phi[n]$ é a fase instantânea do sinal.

2.8.1 Análise de Defasagem com a Transformada de Hilbert

Na análise dinâmica de sistemas, a Transformada de Hilbert será empregada para determinar a defasagem entre o setpoint da válvula, a abertura real da válvula e a vazão medida pelo sensor FIT-31. O processo inicia-se com a normalização dos sinais, ajustando-os para uma faixa padrão, facilitando a análise comparativa.

Após a normalização, aplica-se a Transformada de Hilbert para cada um dos sinais. O resultado é um sinal complexo, de onde a fase instantânea $\phi[n]$ é extraída utilizando a função de argumento de números complexos. A fase instantânea é calculada como

$$\phi[n] = \arctan \left(\frac{\text{Im}(x_a[n])}{\text{Re}(x_a[n])} \right), \quad (2.23)$$

Para obter a defasagem entre os sinais, calcula-se a diferença entre as fases instantâneas do setpoint ($\phi_{sp}[n]$) e da abertura da válvula ($\phi_{valvula}[n]$), bem como da vazão ($\phi_{vazao}[n]$)

$$\Delta\phi_{valvula}[n] = \phi_{valvula}[n] - \phi_{sp}[n], \quad (2.24)$$

$$\Delta\phi_{vazao}[n] = \phi_{vazao}[n] - \phi_{sp}[n], \quad (2.25)$$

O valor médio dessas defasagens será calculado para caracterizar a resposta dinâmica do sistema, identificando o atraso de fase entre os sinais de entrada e saída.

2.9 Considerações parciais

Neste capítulo, foram apresentados os conceitos fundamentais necessários para a compreensão da caracterização estática e dinâmica dos instrumentos utilizados na planta didática SMAR PD3-F. Inicialmente, foram descritas a configuração da planta e as principais características dos sistemas posicionadores pneumáticos, válvulas e medidores de vazão, fornecendo um panorama dos componentes envolvidos nos ensaios experimentais.

A análise estática abordou a obtenção da curva de calibração e a avaliação das principais características dos instrumentos, como sensibilidade, resolução e histerese, aspectos fundamentais para interpretar o comportamento dos atuadores em regime estacionário. Já a análise dinâmica complementou essa abordagem ao investigar a resposta dos instrumentos a variações temporais e frequenciais, permitindo uma avaliação mais precisa do desempenho do sistema.

Além disso, foram discutidos os efeitos sistemáticos e aleatórios nos processos de medição, com ênfase na função de densidade de probabilidade (FDP) e na importância das estimativas amostrais para a quantificação das incertezas experimentais. Por fim, foi introduzida a Transformada de Hilbert como uma ferramenta essencial para a análise de defasagem, possibilitando uma caracterização mais detalhada da resposta dinâmica do sistema.

Os conceitos e técnicas apresentados servirão como base para as etapas experimentais e para a interpretação dos resultados nos próximos capítulos, garantindo uma análise criteriosa da válvula pneumática e dos demais elementos do sistema de controle estudado.

3 Configuração e aquisição

Neste capítulo, será apresentada a planta didática SMAR PD3-F, que foi utilizada para a realização dos ensaios experimentais do trabalho. A planta é composta por um circuito hidráulico, um circuito elétrico, um sistema pneumático e uma rede de comunicação digital, permitindo a simulação de diversos processos industriais em um ambiente controlado (SMAR, 2012).

Inicialmente, será detalhada a configuração da planta, que inclui os procedimentos para a preparação dos circuitos hidráulico e elétrico, além dos ajustes necessários para a operação da válvula pneumática. Em seguida, serão discutidos os principais componentes de hardware da planta, incluindo as válvulas, bombas, sensores, e a configuração da rede de comunicação que integra todos esses elementos.

Também será abordada a configuração do *software* utilizado, que inclui o *System302* da SMAR para controle e supervisão da planta, bem como a utilização do *MATLAB* para a aquisição e análise de dados. A integração entre esses *softwares* e o sistema de controle da planta será discutida em detalhes, destacando os procedimentos necessários para garantir uma comunicação eficiente e a correta execução dos ensaios.

Finalmente, será descrito o sistema de aquisição de dados implementado, incluindo os diferentes tipos de sinais de entrada utilizados (degrau, senoidal e *chirp*) para a análise do comportamento dinâmico da válvula pneumática. Cada um desses sinais permite uma avaliação específica do desempenho da válvula, proporcionando uma caracterização abrangente do sistema.

Este capítulo, portanto, estabelece as bases experimentais para os ensaios realizados e serve como referência para a compreensão dos resultados que serão apresentados nos capítulos subsequentes.

3.1 Planta Smar PD3-F

Para a realização dos ensaios, é essencial ajustar adequadamente a planta SMAR. A configuração foi dividida em duas etapas: o circuito hidráulico e o circuito elétrico. Inicialmente, o circuito hidráulico foi reduzido apenas à malha 31, que foi utilizada nos ensaios.

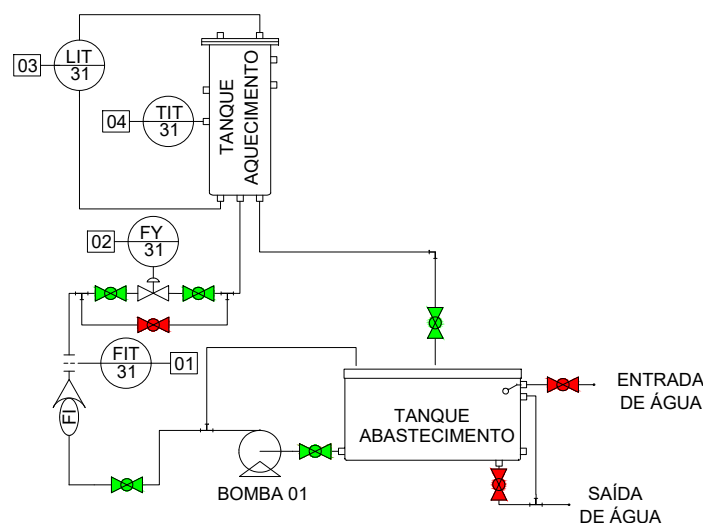
3.1.1 *Hardware*

Para o circuito hidráulico, foi realizado o enchimento do tanque de abastecimento com água. Para isso, é necessário fechar a válvula de *bypass* de saída de água e abrir a válvula de *bypass* de entrada de água até que o tanque esteja completamente cheio,

como mostrado na Figura 7. Uma observação importante é que a válvula de entrada de água deve ser fechada quando a boia for acionada. Isso ocorre porque, durante os ensaios, quando a bomba monofásica estiver em funcionamento, o tanque de abastecimento se esvaziaria e a boia permitiria a entrada de mais água. Assim, ao final dos ensaios, o tanque de abastecimento pode não ter capacidade para armazenar toda a água, resultando no transbordo pelo “ladrão” e no consequente desperdício de água.

Em seguida, foram ajustadas as válvulas que compõem a malha 31. As válvulas abertas estão destacadas em verde, e as válvulas fechadas estão destacadas em vermelho na Figura 7. Primeiramente, foi aberto o caminho para a água fluir do tanque de abastecimento para a bomba monofásica. Após a bomba monofásica, a configuração seguiu até o sensor de vazão. Foram então abertas as duas válvulas que permitem que a água passe pela válvula pneumática, enquanto o caminho alternativo foi fechado. Para completar o percurso hidráulico da malha 31, foi aberta a válvula que conecta o tanque de aquecimento ao tanque de abastecimento. Além disso, para garantir que a malha 31 estivesse totalmente isolada, foram fechadas as válvulas que direcionam a água para a malha 32, evitando qualquer interferência entre as malhas. As válvulas que conectam à bomba trifásica controlada pelo inversor de frequência foram fechadas, assegurando que apenas a bomba monofásica fosse utilizada durante os ensaios. Finalmente, a válvula que controla o fornecimento de ar comprimido foi aberta, essencial para o funcionamento da válvula pneumática.

Figura 7 – Diagrama P&I da malha 31 da Planta didática SMAR. Com destaque em vermelho para as válvulas de *bypass* fechadas e em verde para as válvulas de *bypass* abertas.



Fonte: adaptado SMAR (2012).

Na Figura 7, é apresentado o diagrama PID da malha 31. As válvulas hidráulicas

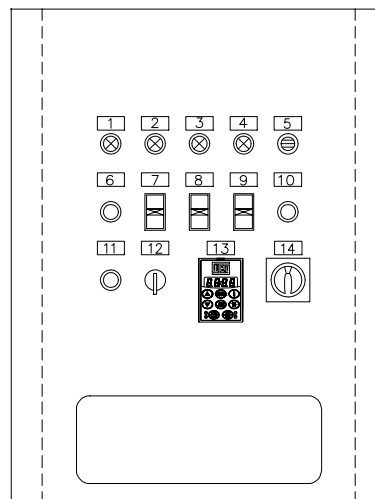
abertas estão destacadas em verde e as válvulas fechadas em vermelho, facilitando a visualização das configurações descritas. É importante notar que a válvula de entrada de água do tanque de abastecimento já está fechada nesta configuração, indicando que o tanque de abastecimento já foi preenchido.

Para a configuração do circuito elétrico, a planta didática SMAR possui um painel de controle com três botoeiras que indicam o estado de operação, alarmes e o tipo de acionamento (local ou remoto), como mostrado na Figura 8. Para acionar a planta, é necessário deslocar o botão de energia para a terceira posição, pois há três opções: aterramento dos dispositivos, chave aberta (planta desligada) e chave fechada (planta ligada).

Quando o botão de energia é acionado, a planta ativa um alarme que pode indicar que o tanque de aquecimento está com um nível baixo ou que ocorreu algum erro, como válvulas de passagem fechadas durante o ensaio. A sirene do alarme pode ser interrompida por meio de uma botoeira indicada no painel.

Através do painel, é possível acionar a bomba monofásica responsável por levar a água do reservatório até o tanque de aquecimento. Essa bomba podem ser controlada manualmente (com o botão em modo local).

Figura 8 – Diagrama do painel de controle elétrico da planta didática SMAR PD3-F, com indicações de estado de operação, alarmes e tipos de acionamento.



Fonte: adaptado de SMAR (2012).

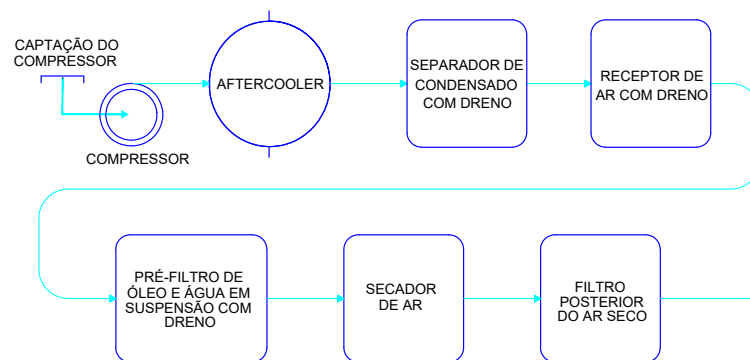
O circuito pneumático é essencial para o funcionamento adequado das válvulas pneumáticas na planta SMAR. A pressão de alimentação deve estar entre 4 e 7 bar (60 a 100 psi). Pressões abaixo de 4 bar comprometem a eficiência operacional das válvulas, enquanto pressões acima de 7 bar podem danificar os instrumentos. A planta SMAR está equipada com um manômetro para monitoramento visual da pressão, embora suas leituras

sejam qualitativas, oferecendo menos precisão.

Para garantir o desempenho ideal e prolongar a vida útil das válvulas, a SMAR recomenda o uso de “ar com qualidade para instrumentação”, ou seja, ar seco, limpo e não corrosivo. A presença de umidade, partículas em suspensão e óleo pode comprometer o funcionamento das válvulas, levando a falhas temporárias ou danos permanentes devido ao desgaste das peças internas.

O sistema de suprimento e tratamento do ar comprimido na planta SMAR é composto pelos seguintes componentes: compressor, aftercooler, separador de condensado, receptor de ar, pré-filtro de óleo e água, secador de ar e filtro posterior do ar seco. A Figura 9 ilustra o sistema de ar comprimido utilizado na planta, destacando cada componente e sua função no processo de tratamento do ar.

Figura 9 – Sistema de suprimento e condicionamento da qualidade do ar da planta SMAR.

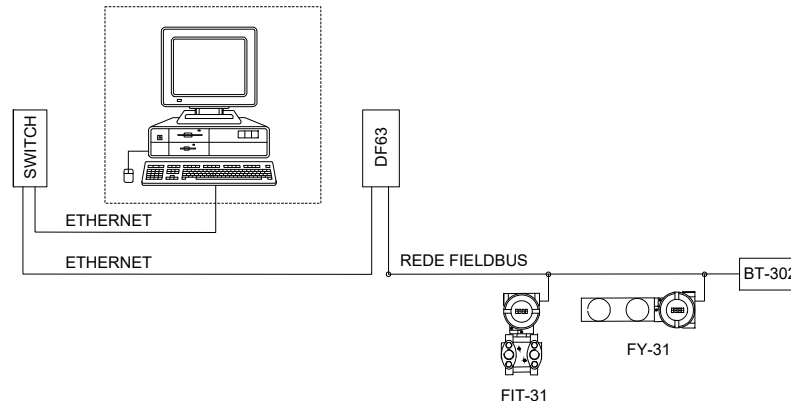


Fonte: adaptado de SMAR (2012).

A rede de comunicação desempenha um papel essencial na integração e no funcionamento eficaz de todos os componentes da planta SMAR. Composta por vários elementos interligados, essa rede forma um sistema robusto e eficiente. Os principais componentes incluem a estação de operação, o *switch*, o controlador DF63, o sensor de pressão, a válvula pneumática, e o terminador de barramento BT-302.

A Figura 10 ilustra a topologia da rede de comunicação. A conexão entre o computador e o *switch* é realizada por meio de uma rede local Ethernet, que proporciona um meio rápido e confiável para a transmissão de dados. O *switch* distribui a comunicação para o controlador DF63, que atua como o elemento central na integração entre as redes H1 e HSE. O DF63 possui funções de *gateway*, permitindo a interligação entre a rede H1, que conecta dispositivos de campo como o sensor de pressão e a válvula pneumática, e a rede HSE, que se comunica com sistemas de controle de alto nível. A rede H1 conecta diretamente o sensor de pressão, a válvula pneumática e o terminador de barramento BT-302, garantindo uma comunicação eficaz e eficiente entre esses dispositivos e o controlador.

Figura 10 – Configuração da rede e sua topologia.



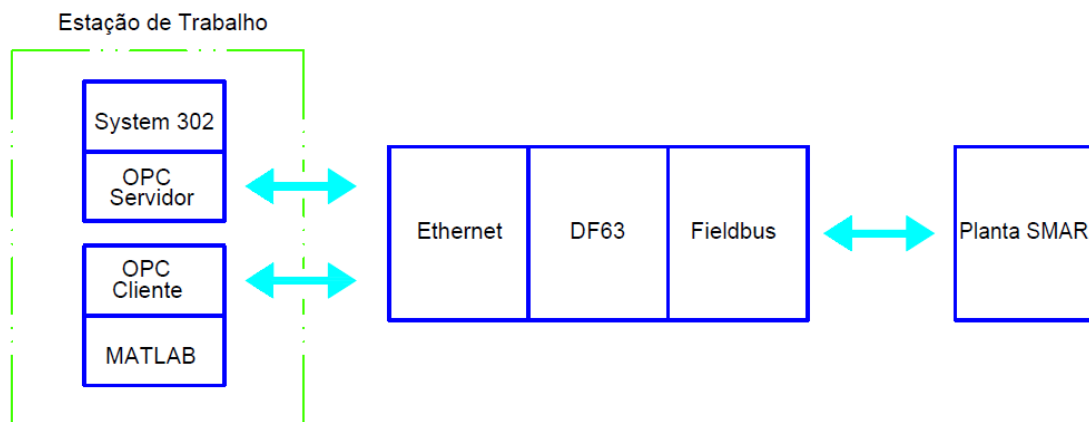
Fonte: adaptado de SMAR (2012).

3.1.2 Software

A operação e supervisão da planta didática SMAR PD3-F foram realizadas utilizando o sistema *System302*, desenvolvido pela empresa SMAR. Esse ambiente integra funções de configuração, monitoração e controle de dispositivos de campo conectados à rede digital FOUNDATION *Fieldbus*, permitindo a execução de malhas de controle em tempo real e o acesso a variáveis de processo por meio do servidor OPC (*OLE for Process Control*). O *System302* foi executado em uma estação de trabalho com sistema operacional *Windows 7*, licenciada por meio de *Hardkeys* fornecidas pela SMAR.

Para a aquisição e processamento dos dados experimentais, foi utilizado o *MATLAB*, com o pacote adicional *OPC Toolbox*. Essa configuração permitiu estabelecer a comunicação entre o ambiente de controle (*System302*) e o ambiente de análise (*MATLAB*), viabilizando o envio de sinais de referência e a leitura de variáveis de processo, como a posição da válvula e a vazão medida. O uso do *MATLAB* justifica-se pela sua flexibilidade na manipulação de dados e pela ampla disponibilidade de recursos para análise de sistemas dinâmicos.

A integração entre os *softwares* foi implementada de modo que o *System302* atuasse como servidor OPC, responsável por disponibilizar as variáveis dos instrumentos da planta, enquanto o *MATLAB* operou como cliente, requisitando e armazenando as informações para posterior tratamento e análise. A Figura 11 apresenta o diagrama esquemático da comunicação entre os ambientes, ilustrando a troca de dados entre o servidor e o cliente OPC e os dispositivos de campo conectados à rede digital FOUNDATION *Fieldbus*.

Figura 11 – Integração de comunicação entre *MATLAB*, *System302* e planta SMAR.

Fonte: do autor.

3.2 Configuração do sistema de aquisição

A análise do desempenho da válvula pneumática FY-31 foi realizada utilizando três tipos de sinais de entrada como referência: degrau, senoidal e *chirp*. Cada tipo de sinal foi escolhido para avaliar diferentes aspectos do comportamento dinâmico da válvula, permitindo uma caracterização abrangente do sistema.

O algoritmo 1 apresenta um pseudocódigo que descreve o procedimento utilizado para adquirir os dados experimentais utilizados para caracterizar a válvula de forma estática e dinâmica.

Durante os ensaios, o vetor *instr.ref.sigref* foi utilizado para armazenar os sinais de entrada de referência. Os sinais utilizados foram gerados em *MATLAB*, e enviados à planta por meio do *OPC Toolbox*.

Para caracterizar a válvula de forma estática, foram definidos inicialmente valores percentuais de abertura para a válvula FY-31. Em seguida, foram definidos *dt*, o período de atualização do sinal de referência da válvula (em s) e *np*, o número total de pontos do ensaio. O tempo necessário para realizar cada ensaio pode ser calculado multiplicando *dt* por *np*.

Nesta etapa, a válvula FY-32 foi utilizada para gerar uma perturbação no sistema pneumático utilizado pela planta. Para isso, utilizou-se uma forma de onda quadrada como referência para abrir/fechar totalmente a válvula em intervalos de 30 s.

Posteriormente, foram inicializados vetores para armazenar os valores dos sinais de referência e de saída das válvulas FY-31 e FY-32, bem como a vazão medida pelo sensor FIT-31.

Ao longo de cada iteração, os dados dos sensores são adquiridos e armazenados nos vetores correspondentes. Gráficos em tempo real são atualizados para monitorar o

Algoritmo 1 Algoritmo usado para controlar o processo de aquisição de dados

Inicialização dos Vetores:instr.fy31 $\leftarrow$ zeros(ny,1);instr.fit31 $\leftarrow$ zeros(ny,1);**Laço Principal - Aquisição de Dados:** $k \leftarrow 1$ $t \leftarrow 0$

tic

while $k \leq np$ **do** $t \leftarrow toc$ **if** $t \geq dt$ **then**

tic

instr.fy31(k,1) $\leftarrow t$;instr.fit31(k,1) $\leftarrow$ smar_query(opc, 'fit31');**if** $k \leq 2$ **then**instr.tempo(k,1) $\leftarrow$ smar_query(opc, 'fy31');**else**instr.tempo(k,1) $\leftarrow$ instr.tempo(k-1,1) + t ;**end if**

smar_cmd(opc, 'fy31', instr.ref.sigref(k,1));

Incrementar k **end if****end while****Armazenamento dos dados:**

Definir do nome do arquivo;

Salvar dados adquiridos usando arquivo.mat

progresso do experimento.

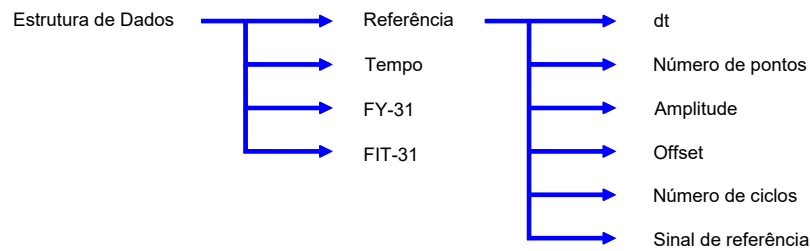
A análise dinâmica da válvula FY-31 foi realizada usando tanto sinais senoidais quanto chirp. Os dois métodos compartilham o mesmo procedimento de configuração descrito anteriormente.

Para aplicar um sinal de referência senoidal, é necessário definir a frequência, amplitude e *offset* para gerar a forma de onda de referência. Para utilizar os sinais chirp, cuja frequência varia em função do tempo, deve-se definir os valores iniciais e finais de frequência, além do tempo de duração do ensaio, amplitude e *offset*.

O *software MATLAB* foi utilizado para exibir os gráficos dos sinais adquiridos em tempo real e para armazenar os sinais adquiridos num arquivo “.mat”.

A Figura 12 apresenta a estrutura de dados empregada para organizar os sinais adquiridos. Essa estrutura foi projetada para incluir informações detalhadas sobre o tempo, os sinais de referência, e as medições das variáveis de interesse, como a vazão e a posição das válvulas. Essa organização facilita a posterior análise e interpretação dos resultados, garantindo que todos os parâmetros relevantes estejam disponíveis de forma estruturada e acessível.

Figura 12 – Estrutura de dados utilizada para armazenar as informações dos ensaios de análise dinâmica.



Fonte: do autor.

3.3 Considerações parciais

A caracterização da planta didática SMAR PD3-F revelou a complexidade e a robustez do sistema, destacando-se como uma ferramenta essencial para o estudo e a simulação de processos industriais. Durante a descrição dos componentes de hardware e *software*, foi possível observar que a integração entre os diferentes subsistemas, como o circuito hidráulico, o circuito elétrico, o sistema pneumático e a rede de comunicação digital, é fundamental para a operação eficiente da planta.

Além disso, a utilização de ferramentas de *software* como o *System302* da SMAR e o *MATLAB* para controle, supervisão e análise de dados se mostrou eficaz, permitindo a aquisição de dados precisos e a realização de análises detalhadas do comportamento da planta. Essa integração entre *software* e hardware demonstrou ser um dos pontos fortes da metodologia adotada, contribuindo para a obtenção de resultados confiáveis.

De maneira geral, as atividades descritas neste capítulo forneceram uma base sólida para a compreensão do funcionamento da planta SMAR PD3-F e para a execução dos ensaios experimentais subsequentes.

4 Análise Estática

A realização da análise estática foi motivada por trabalhos anteriores desenvolvidos por alunos utilizando a planta didática SMAR cujo objetivo era controlar o nível do tanque de aquecimento por meio da válvula pneumática FY-31. Os testes realizados foram executados utilizando a mesma configuração do circuito hidráulico que está sendo aplicado neste trabalho, focando na malha 31 e na bomba monofásica. A Figura 13, apresenta-se os resultados de nível, abertura da válvula pneumática FY-31 e a vazão.

Com isso, foram realizados dois ensaios com a válvula pneumática FY-31 ajustada para uma abertura fixa de 30% escolhida de forma arbitrária por um período de 10 min com o intuito de verificar a repetibilidade dos resultados. Além disso, foram coletados os dados da vazão medida pelo sensor FIT-31 e o nível do tanque medido pelo sensor LIT-31. Uma observação a ser tomada, é que entre os ensaios, foi exigido que a válvula FY-31 fosse fechada. Outra observação é que foi esperado que o tanque de abastecimento esvaziasse para não haver interferência no nível do tanque e nem na vazão.

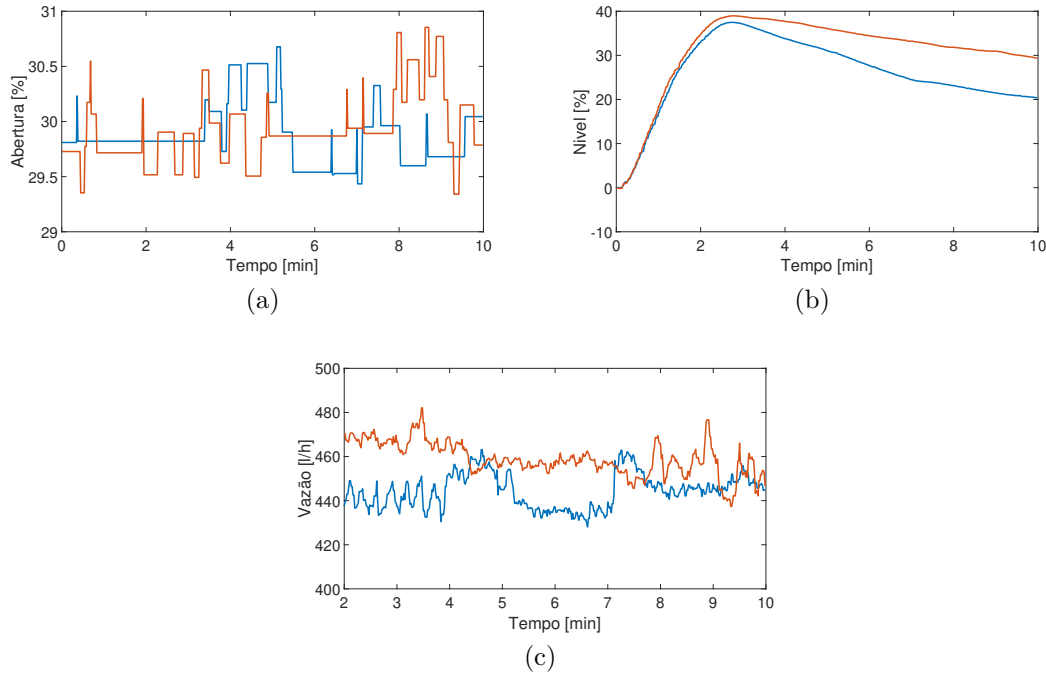
A Figura 13(a) apresenta a abertura real da válvula pneumática FY-31 em que foi aplicado um *setpoint* de 30%. Observa-se que o ponto inicial de operação é diferente nos dois casos e durante o ensaio a variação de abertura da válvula pneumática não seguiu um padrão. No primeiro ensaio, a válvula variou em torno de $\pm 0,5\%$ e no segundo ensaio houve uma variação de $\pm 0,7\%$.

Consequentemente, foi analisado o nível do tanque de aquecimento. A Figura 13(b) apresenta a variação do nível encontrada durante a realização dos ensaios. Nos dois primeiros minutos dos ensaios, o nível do tanque de aquecimento foi similar nos dois casos, apresentando uma variação de $\pm 2\%$ no nível do tanque. Entretanto, ao final dos ensaios, o nível do tanque apresentou uma discrepância de aproximadamente 10% de variação entre os resultados.

Devido à discrepância observada no nível do tanque de aquecimento, a vazão medida pelo sensor FIT-31 durante os dois ensaios foi analisada, conforme apresentado na Figura 13(c). Ao examinar os resultados durante os 0 min de ensaio observa-se que em $t = 2$ min, a variação foi de ± 25 l/h, coerente com a variação na abertura da válvula FY-31 nos dois primeiros minutos. No primeiro ensaio, representado em azul, a abertura apresenta um pico de oscilação, enquanto no segundo ensaio, a abertura varia em torno de $\pm 1\%$ durante esses dois minutos iniciais, explicando a discrepância observada na vazão.

No entanto, foi observada uma discrepância significativa nos resultados obtidos, mesmo sob condições idênticas de configuração. Essa variação indicou a necessidade de uma análise estática detalhada para entender e minimizar os fatores que influenciam o desempenho do sistema, assegurando a confiabilidade e a repetibilidade dos resultados nos ensaios subsequentes.

Figura 13 – Resultados dos ensaios de controle de nível por meio da válvula pneumática FY-31: (a) Valor real de abertura da válvula pneumática FY-31, (b) Nível medido pelo sensor LIT-31 e (c) Vazão medida pelo sensor FIT-31. O traçado em azul indica o resultado do primeiro ensaio e o traçado em vermelho indica o resultado do segundo ensaio.



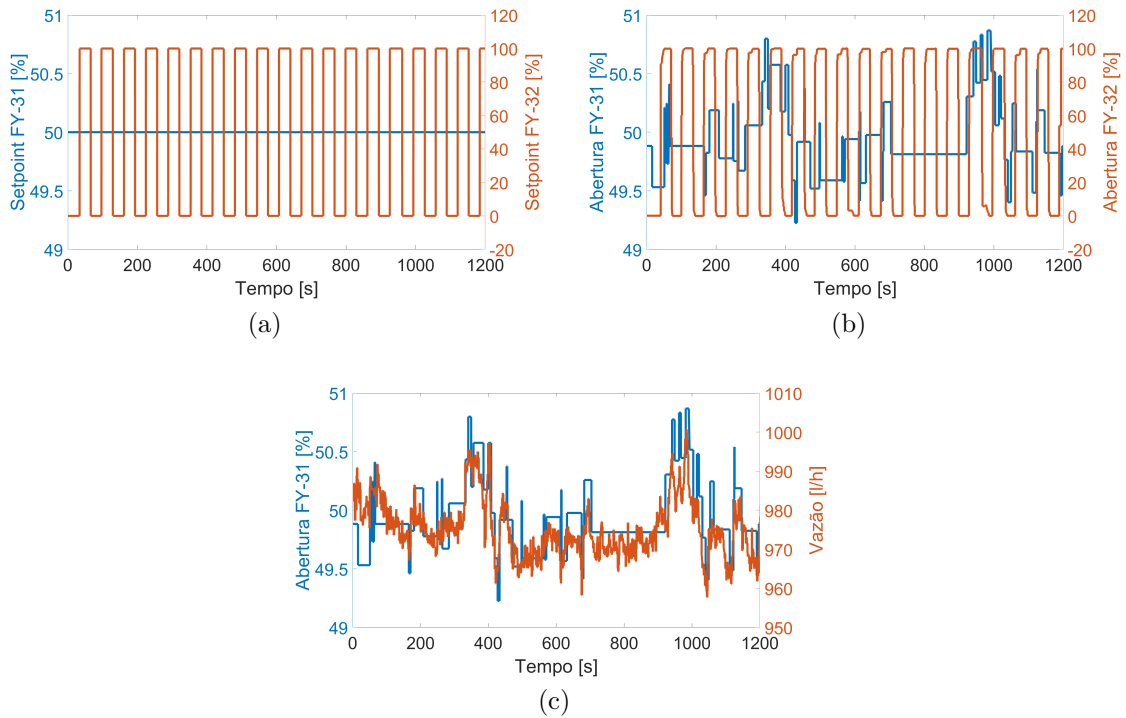
Fonte: do autor.

Logo, para compreender a variação observada na válvula pneumática, foi investigado inicialmente o fornecimento de ar comprimido. A variação no fornecimento de ar pode impactar diretamente o desempenho da válvula pneumática, afetando sua resposta e precisão durante as operações.

Sendo assim, foi realizado um teste preliminar com o intuito de movimentar o mecanismo da válvula, considerando que não se sabia há quanto tempo a válvula pneumática estava sem ser utilizada. Neste ensaio, foi realizado um algoritmo no *software* MATLAB em que a válvula FY-31 foi programada para abrir e fechar durante 10 min, variando de 0 a 100% a cada 30 s. Este procedimento teve como objetivo garantir que a válvula estivesse operando corretamente e identificar qualquer irregularidade no funcionamento devido à inatividade prolongada.

Em seguida, com o intuito de analisar o comportamento da válvula pneumática em condições operacionais reais, avaliando a estabilidade e a resposta da válvula, foi realizado outro algoritmo no qual a válvula FY-31 foi submetida a uma entrada degrau correspondente a 25% de sua abertura, enquanto a válvula FY-32 operava abrindo e fechando a cada 30 s, simulando uma perturbação no sistema de ar comprimido. Além desta perturbação da válvula FY-32 foi gerada outra perturbação manualmente, abrindo uma válvula de ar comprimido no laboratório de informática industrial. Durante esse

Figura 14 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.



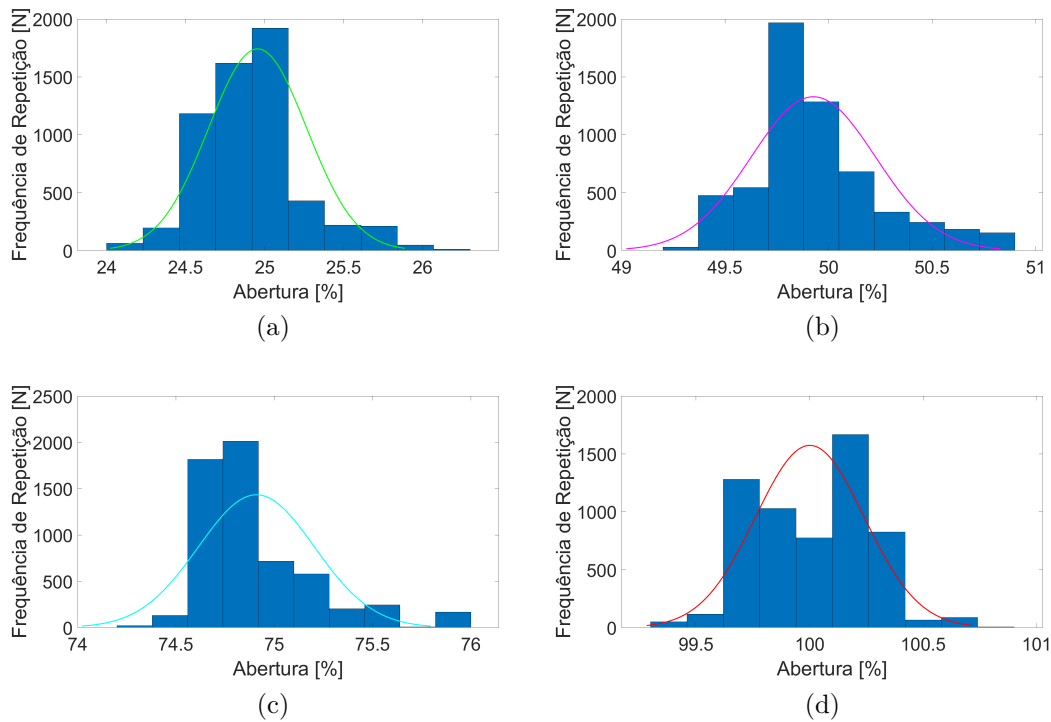
Fonte: do autor.

teste, foi registrado o monitoramento do estado da válvula FY-31 e da vazão pelo sensor FIT-31 em tempo real. A duração total do teste foi de 20 min. Posteriormente, foram realizados mais três testes, nos quais as entradas degraus aplicadas a válvula FY-31 foram variadas para 50%, 75% e 100%. As escolhas das entradas degraus de 25%, 50%, 75% e 100% foram baseadas em um trabalho anterior, visando cobrir uma ampla variedade de condições operacionais (LAGE, 2019).

A Figura 14(a) ilustra a entrada degrau de 50% aplicada a válvula FY-31, juntamente com a perturbação gerada pela variação da válvula FY-32. Na Figura 14(b), é apresentado o valor real dos sinais, onde se observa que a abertura real da válvula FY-31 em 50% variou aproximadamente $\pm 0,8\%$. Por fim, a Figura 14(c) mostra o comportamento da vazão em resposta ao desempenho da válvula pneumática FY-31, evidenciando que a vazão acompanha as oscilações da válvula nos momentos em que a abertura varia, ou seja, com a abertura da válvula variando em torno de $\pm 0,8\%$ a vazão variou entre 958 l/h e 1000 l/h.

Com isso, por meio de um algoritmo desenvolvido no *software* MATLAB foi realizado o processamento e análise dos dados em que aplicado a análise de distribuição gaussiana normal nos dados de abertura da válvula pneumática FY-31 como mostra a Figura 15. A seguir, será discutido os resultados para a abertura da válvula pneumática

Figura 15 – Análise dos dados de abertura da válvula pneumática FY-31 por meio da distribuição normal: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% e (d) 100%.



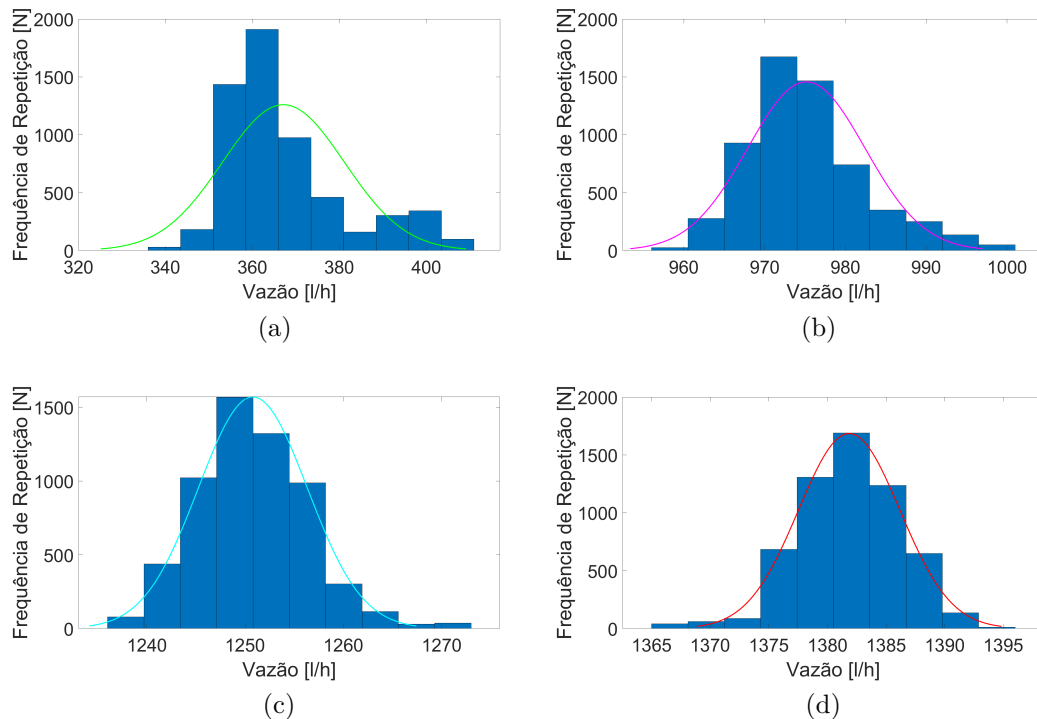
Fonte: do autor.

em 25% e 50% de abertura e para os resultados de 75% e 100% de abertura é só replicar a análise. A Figura 15(a) apresenta a distribuição das amostras para a abertura de 25% da válvula pneumática FY-31. Observa-se que a base da curva gaussiana é relativamente estreita, indicando uma menor dispersão das amostras ao redor do *setpoint*. A amplitude da curva é de 1700, refletindo em uma alta concentração de amostras muito próximas ao ponto de ajuste central. Esse comportamento sugere que, mesmo com variações introduzidas no circuito pneumático, a válvula FY-31 manteve-se bastante estável ao operar nesta faixa de abertura. A concentração das amostras entre 24,5% e 25% indica que a válvula apresentou uma resposta consistente e confiável, com pouca variação em torno do *setpoint*, reforçando a eficácia do controle mesmo sob condições variáveis de pressão no sistema.

A Figura 15(b) apresenta a distribuição das amostras para a abertura de 50% da válvula pneumática FY-31. Observa-se que a base da curva gaussiana para 50% é maior em comparação com a de 25%, sugerindo uma maior dispersão dos dados ao redor do *setpoint*. A amplitude da curva foi de 1400, indicando uma menor concentração de amostras próximas ao ponto de ajuste central. Isso pode indicar que, apesar da maior estabilidade em relação ao *setpoint*, houve uma leve variação no desempenho da válvula quando operando nessa faixa de abertura.

A análise de distribuição normal gaussiana também foi aplicada nos dados de vazão

Figura 16 – Análise dos dados de vazão que está diretamente relacionada com a abertura da válvula pneumática FY-31 por meio da distribuição normal: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% e (d) 100%.



Fonte: do autor.

coletados do sensor FIT-31 e os resultados são apresentados na Figura 16. A seguir, será discutido os resultados da vazão para a abertura da válvula pneumática em 25% e 50% e para os resultados de 75% e 100% de abertura é só replicar a análise. A Figura 16(a) apresenta os dados de vazão medida pelo sensor FIT-31 a 25% de abertura, o pico da vazão foi de aproximadamente 360 l/h, com variação entre 340 l/h e 400 l/h. A base da curva foi relativamente ampla, variando de 320 l/h a 420 l/h, com uma amplitude de 1300. Isso indica que, embora a vazão tenha acompanhado a abertura da válvula, houve uma maior dispersão dos valores, refletindo uma resposta do sistema um pouco mais variada em relação ao controle de vazão, mas ainda mantendo uma faixa previsível.

A Figura 16(b) apresenta os dados de vazão medida pelo sensor FIT-31 a 50% de abertura, o pico da vazão foi de aproximadamente 975 l/h, com variações entre 960 l/h e 1000 l/h. A base da curva se estendeu de 950 l/h a 1000 l/h, com uma amplitude de 1500. A largura da base sugere que, a 50% de abertura, a vazão foi mais estável e previsível em comparação com a vazão observada a 25% de abertura. A amplitude maior indica uma alta concentração de valores dentro desta faixa, mostrando que, apesar das possíveis variações na abertura da válvula, a vazão se manteve consistentemente próxima ao seu valor de pico, evidenciando um controle eficaz da vazão em resposta à abertura da válvula.

Com a análise de abertura da válvula pneumática para os quatro ensaios com

água e perturbação do sistema pneumático, obteve-se o seguinte resultado, como mostra a Tabela 1. Analisando os valores de μ , é visível que a válvula FY-31 alcançou as porcentagens de abertura desejadas com alta precisão. Em todas as aberturas (25%, 50%, 75%, e 100%), o valor médio de μ está muito próximo do *setpoint* desejado, mostrando que o sistema tem o potencial de atingir a abertura esperada da válvula com pequena variação.

O valor de σ é baixo em todas as condições testadas, variando entre 0,24 e 0,31. Isso sugere que a válvula FY-31 apresentou uma variação mínima em torno do *setpoint* durante as operações, indicando uma boa estabilidade do sistema. A menor variação foi observada na abertura de 100%, onde o σ foi de 0,24, sugerindo que o sistema é ligeiramente mais estável quando a válvula está totalmente aberta.

Tabela 1 – Distribuição normal medidos da válvula FY-31 e do sensor FIT-31

Setpoint FY-31 [%]	Valores Medidos			
	FY-31		FIT-31	
	μ	σ	μ	σ
25	24,96	0,31	367,14	14,01
50	49,93	0,30	975,16	7,27
75	74,91	0,30	1250,79	5,55
100	100	0,24	1381,74	4,33

Fonte: do autor.

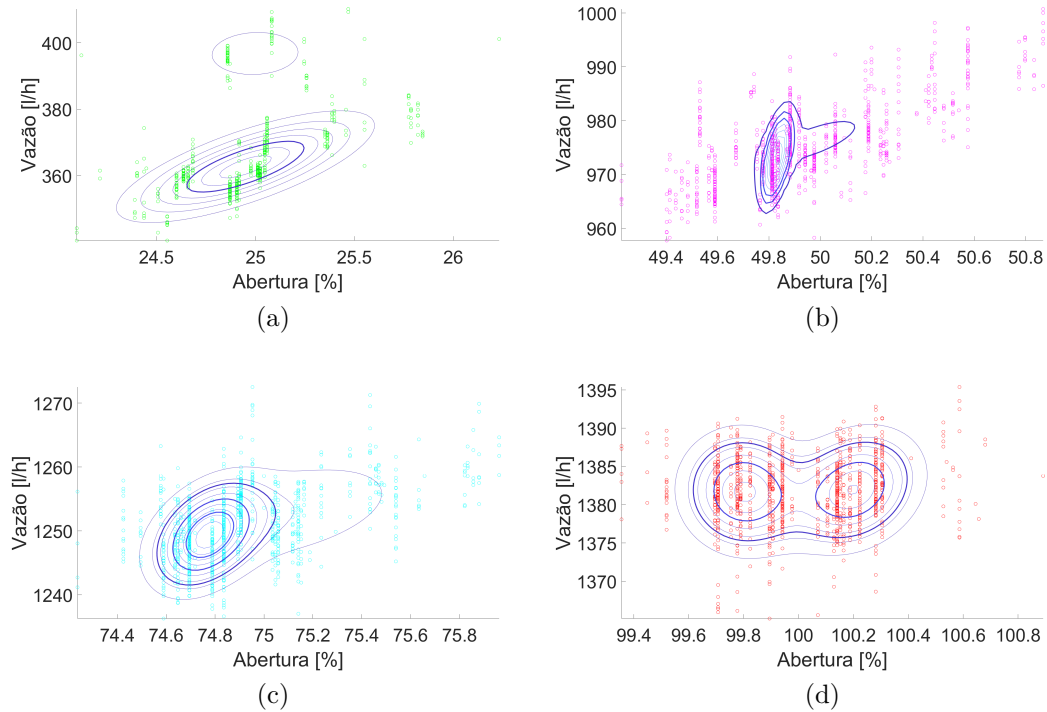
Com a análise da vazão com a abertura da válvula pneumática para os quatro ensaios com água e perturbação do sistema pneumático, obteve-se o seguinte resultado, como mostra a Tabela 1. Conforme os dados encontrados, com o aumento da abertura da válvula FY-31, observa-se um aumento correspondente na vazão média, conforme esperado. A vazão média passa de 367,14 l/h com a válvula a 25% de abertura, para 1381,74 l/h com a válvula totalmente aberta (100%). Este comportamento é consistente com a teoria, onde uma maior abertura da válvula resulta em maior fluxo de fluido.

O valor de σ diminui à medida que a abertura da válvula aumenta. No entanto, em 25% de abertura, o σ é de 14,01, indicando uma maior variação na vazão para aberturas menores. Essa variação pode ser atribuída à maior sensibilidade do sistema em baixas aberturas, onde pequenas mudanças na abertura da válvula podem causar variações relativamente maiores na vazão.

Em contraste, na abertura de 100%, o σ é de apenas 4,33, sugerindo que o sistema é mais estável e previsível em termos de vazão quando a válvula está completamente aberta.

A Figura 17 foi gerada a partir dos dados de distribuição normal da abertura da válvula FY-31 e dos valores de vazão coletados pelo sensor FIT-31. Na Figura 17(a), elipses são traçadas ao redor da concentração dos dados para uma abertura de 25%, indicando a relação entre a abertura da válvula pneumática FY-31 e a vazão correspondente. Um caso atípico foi observado na Figura 17(d), em que a concentração dos dados de abertura

Figura 17 – Correlação dos dados de abertura da válvula pneumática e vazão em dispersão com contorno indicativo da região de maior densidade: (a) 25 %, (b) 50 %, (c) 75 % e (d) 100 % .



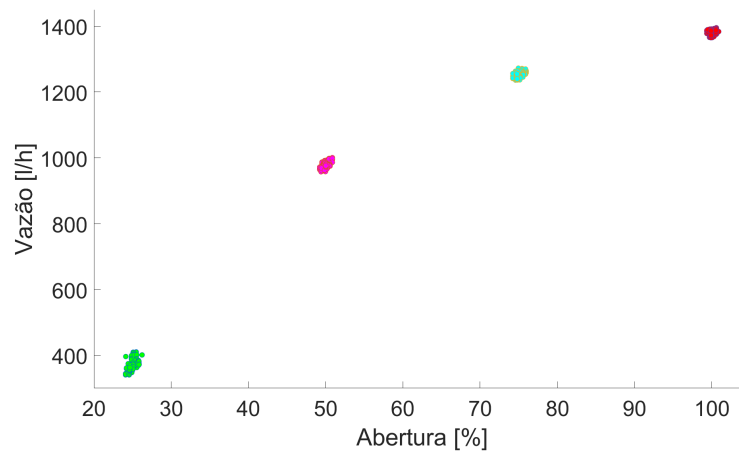
Fonte: do autor.

e vazão não ocorreu exatamente no *setpoint* estabelecido, mas em sua proximidade. Neste gráfico, surgiram duas elipses, uma em torno de 99,8% de abertura e outra em torno de 100,2%, o que é comprovado pela Figura 15(d). A mesma análise é aplicada aos *setpoints* de 50%, 75% e 100%, permitindo uma avaliação abrangente da resposta do sistema em diferentes condições operacionais.

A Figura 18, apresenta os dados de abertura da válvula FY-31 e da vazão do sensor FIT-31 para os *setpoints* de 25%, 50%, 75% e 100%. Observa-se que não há um comportamento linear entre a abertura da válvula e a vazão. No entanto, à medida que o *setpoint* de abertura da válvula aumenta, a vazão também aumenta consistentemente, enquanto a dispersão dos valores de vazão diminui. Isso sugere que o sistema opera de maneira mais estável em configurações de abertura maiores. A maior variação na vazão ocorre no *setpoint* de 25%, indicando que o sistema é mais sensível a pequenas alterações em níveis baixos de abertura. Essa sensibilidade, entretanto, diminui à medida que a abertura aumenta.

Contudo, a análise estática realizada indicou que o fornecimento de ar comprimido não parece ser a causa principal dos problemas observados na válvula pneumática FY-31. Os resultados mostraram que a válvula manteve-se relativamente estável, com variações mínimas durante os testes, o que sugere que a estabilidade da válvula sob condições

Figura 18 – Relação entre abertura da válvula FY-31 e vazão do sensor FIT-31 para diferentes *setpoints*.



Fonte: do autor.

estáticas é satisfatória.

No entanto, considerando que a análise estática não revelou grandes inconsistências, é possível que o problema esteja relacionado ao comportamento dinâmico da válvula. Questões como a resposta a variações rápidas, oscilação sob mudanças de *setpoint*, ou o tempo de resposta da válvula podem estar afetando o desempenho geral do sistema. Portanto, para uma compreensão completa e para solucionar possíveis falhas, é essencial realizar uma análise detalhada do comportamento dinâmico da válvula pneumática FY-31.

4.1 Considerações parciais

A realização dos testes de análise estática foi essencial para compreender a operação da válvula pneumática FY-31 e identificar potenciais inconsistências que poderiam afetar o desempenho do sistema. Os resultados dos ensaios mostraram variações na abertura real da válvula em relação ao *setpoint* estabelecido, indicando que, embora o sistema atinja os valores desejados de abertura, há uma pequena variação que pode ser influenciada por fatores externos, como variações no fornecimento de ar comprimido.

As discrepâncias observadas entre os ensaios repetidos, mesmo com configurações idênticas, reforçam a importância de uma análise detalhada do sistema pneumático e da resposta da válvula sob diferentes condições de operação. A investigação do fornecimento de ar comprimido, incluindo a execução de testes preliminares para movimentar o mecanismo da válvula, foi uma abordagem importante para assegurar que a válvula estivesse operando corretamente e identificar possíveis problemas relacionados à inatividade prolongada.

Os ensaios de entrada degrau, acompanhados por perturbações intencionais no

sistema, permitiram avaliar a estabilidade da válvula FY-31 em condições operacionais reais. A análise dos dados por meio da distribuição normal gaussiana indicou que, apesar das perturbações, a válvula manteve um bom desempenho, com variações mínimas ao redor dos *setpoints* estabelecidos. A variação na vazão também foi analisada, revelando uma dispersão nos resultados, mas ainda numa faixa aceitável para a operação do sistema.

Os valores de μ próximos aos *setpoints* desejados e as baixas variações σ reforçam que o sistema pneumático tem o potencial de operar com precisão e estabilidade, desde que as condições de operação sejam cuidadosamente monitoradas e controladas.

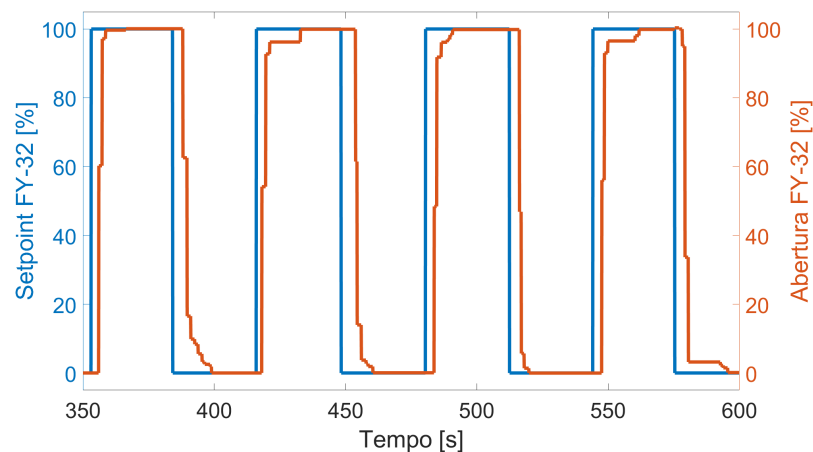
Essas considerações iniciais destacam a importância de uma análise contínua e detalhada do sistema para garantir a repetibilidade e confiabilidade dos resultados nos ensaios subsequentes. A partir desses resultados, serão exploradas análises dinâmicas para entender melhor o comportamento da válvula sob diferentes sinais de entrada e condições de operação, buscando otimizar o desempenho do sistema.

5 Análise Dinâmica

Com a conclusão da análise estática indicando que o fornecimento de ar comprimido não é a principal causa das variações observadas no desempenho da válvula pneumática FY-31, torna-se necessário investigar o comportamento dinâmico da válvula. A análise dinâmica visa compreender como a válvula responde a sinais de referências ao longo do tempo, considerando diferentes frequências e amplitudes, bem como sua capacidade de manter o desempenho sob condições de operações dinâmicas.

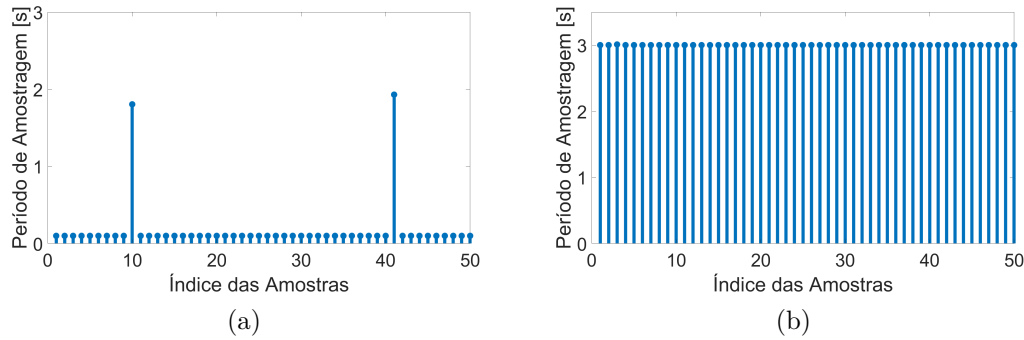
Para a análise dinâmica do sistema, a escolha dos sinais de referência é essencial para avaliar a resposta do sistema sob diferentes condições operacionais. Com base em um ensaio realizado durante a análise estática, conforme apresentado na Figura 19, foi possível orientar a seleção dos sinais adequados. No gráfico, o sinal de referência varia de 0 a 100 a cada 30 segundos (em azul), enquanto o sinal real correspondente à abertura da válvula pneumática FY-32 (em vermelho) revela que o sistema não consegue acompanhar a referência. Essa discrepância destaca a limitação do sistema em responder eficientemente a variações rápidas e abruptas, direcionando a escolha para sinais mais adequados a sistemas com resposta lenta.

Figura 19 – Resposta da válvula FY-32, em azul o sinal de entrada da válvula e em vermelho o desempenho real da válvula.



Fonte: do autor.

Para a realização da análise dinâmica, considera-se a aplicação de sinais senoidais e sinais *chirp* para caracterizar o comportamento da válvula pneumática FY-31. Estudos desenvolvidos por Sorli M. e Figliolini (2004) demonstram a eficácia dos sinais senoidais na avaliação de sistemas pneumáticos. Este trabalho evidencia que os sinais senoidais são particularmente adequados para examinar a resposta de válvulas pneumáticas a diferentes frequências e amplitudes, permitindo uma análise detalhada do comportamento dinâmico

Figura 20 – Períodos de amostragem: (a) $dt = 0,1$ s e (b) $dt = 3$ s.

Fonte: do autor.

e da estabilidade do sistema. A análise deste sinal é realizada na Seção 5.1.

A utilização do sinal *chirp* é apresentada em Novak Antonín e Simon (2010). Neste estudo mostra-se a eficiência do sinal *chirp* na identificação de sistemas não lineares, aproveitando sua capacidade de varrer uma ampla faixa de frequências de forma contínua e controlada. Essa característica permite uma análise detalhada da resposta do sistema ao longo de diferentes frequências. A análise deste sinal é realizada na Seção 5.2.

Para realizar a análise dinâmica da válvula pneumática FY-31, foi necessário realizar procedimentos iniciais para determinar o tempo de resposta do sistema e estabelecer critérios para a escolha dos períodos de amostragem e das frequências de oscilação. Essa etapa preliminar foi crucial para a aquisição dos dados.

Inicialmente, foi adotado um período de amostragem de $dt = 0,1$ s, com o intuito de obter a maior resolução possível nos dados. No entanto, observou-se que, com esse período de amostragem muito pequeno, as leituras apresentavam oscilações significativas em alguns pontos. Essas oscilações ocorreram periodicamente, aproximadamente a cada 30 amostras, o que indica que o sistema pode ter limitações na resposta rápida.

Para entender melhor esse comportamento, foram realizados testes com períodos de amostragem maiores. A partir desses testes, foi constatado que o sistema respondeu de maneira estável com períodos de amostragem até 3 s, o que é apresentado na 20. O gráfico 20(a) ilustra o período de amostragem de 0,1 s e suas variações, enquanto o gráfico 20(b) apresenta o período de amostragem mínimo no qual o sistema responde adequadamente. Com isso, foram definidas as frequências de oscilações de forma arbitrárias variando o dt e o np .

5.1 Sinais senoidais

O objetivo dos ensaios senoidais foi analisar a resposta dinâmica da válvula pneumática FY-31 em diferentes condições operacionais. Para isso, foram aplicadas frequências de 10 mHz, 13,3 mHz, 20 mHz, 28,6 mHz e 40 mHz, com amplitudes variando de 5% a 95%

e um *offset* de 50%. Esses valores foram selecionados estrategicamente para cobrir uma ampla faixa de frequências e amplitudes, garantindo uma análise detalhada e abrangente.

Cada frequência foi testada individualmente, permitindo a avaliação da resposta da válvula tanto em baixas quanto em altas frequências. A variação de amplitude de 5% a 95% assegurou que o sistema fosse testado sob diferentes níveis de excitação, enquanto o *offset* de 50% centralizou a operação em torno do ponto médio de abertura da válvula. Para cada frequência, foram realizados 14 ciclos de sinal, assegurando uma amostra significativa de dados para uma análise completa.

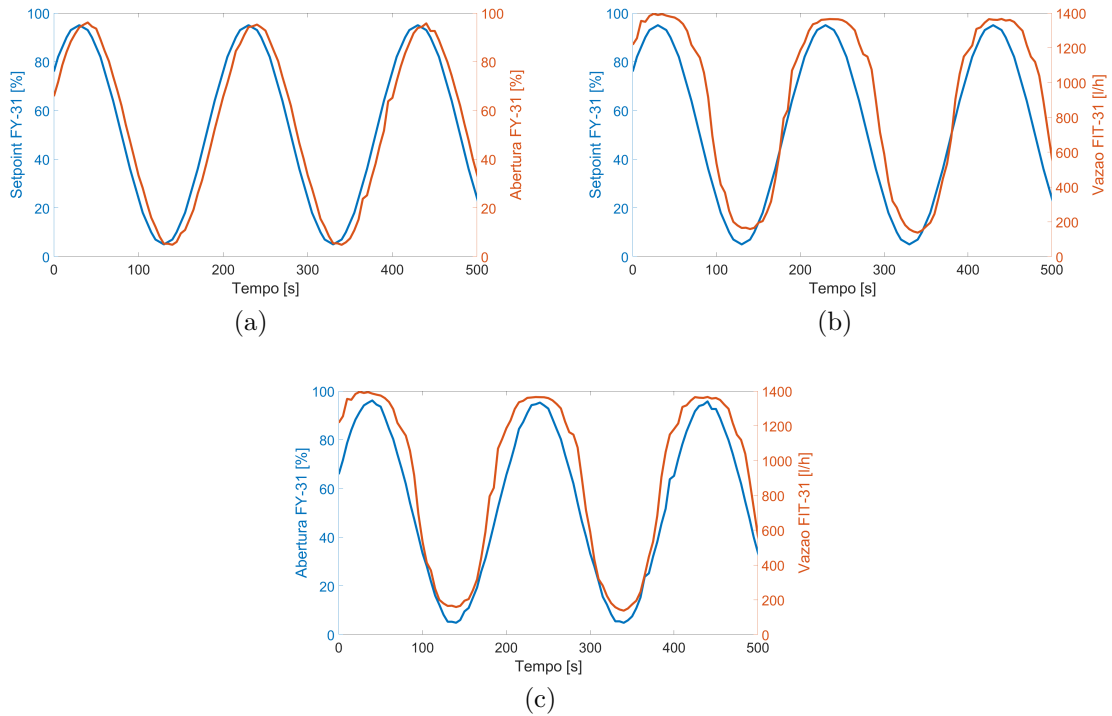
A Figura 21 apresenta os sinais obtidos com uma entrada senoidal de 5 mHz em função do tempo. Os gráficos foram ampliados e utilizados os primeiros 500 s, considerando que os sinais têm 14 ciclos. A Figura 21(a) mostra o sinal de referência aplicado na válvula FY-31 em azul e em vermelho mostra a abertura real da válvula. Observa-se que a abertura real da válvula está atrasada em relação ao *setpoint*, indicando um atraso na resposta da válvula ao sinal de controle.

A Figura 21(b) apresenta o sinal de referência aplicado na válvula FY-31 em azul e em vermelho mostra a vazão. Observa-se que a vazão também está atrasada em relação ao *setpoint*, refletindo o tempo necessário para que a válvula se ajuste e estabilize a vazão. E a Figura 21(c) mostra a abertura real da válvula FY-31 em azul e a vazão lida pelo sensor FIT-31 em vermelho. Com a abertura da válvula variando de 5% até 95% a vazão apresentou oscilação de aproximadamente 137 l/h até 1365 l/h. A abertura real da válvula e a vazão parecem estar quase em fase, sugerindo que, uma vez que a posição da válvula se estabiliza, a vazão responde quase imediatamente, com um atraso mínimo.

A Figura 22 ilustra diferentes relações entre o *setpoint*, a abertura real da válvula FY-31 e a vazão medida. A Figura 22(a) apresenta a relação do *setpoint* e a abertura real da válvula FY-31. Observa-se que o gráfico resultante formou uma figura de *Lissajous*, que geralmente indica a presença de uma diferença de fase entre os sinais e uma possível não linearidade na resposta da válvula. Isto sugere que a válvula tem um comportamento não linear, ou seja, apresenta um defasamento entre o sinal de referência e a abertura real da válvula FY-31.

A Figura 22(b) mostra a relação do *setpoint* e a vazão lida pelo sensor FIT-31. Observa-se que o gráfico resultante formou uma curva de *histerese*. A histerese indica que, para um mesmo valor de *setpoint*, a vazão não retorna ao mesmo valor ao diminuir o *setpoint*, sugerindo que o sistema apresenta um atraso na resposta da vazão em relação ao *setpoint*. Além disso, a relação entre a abertura da válvula FY-31 e a vazão também foi comprovada. Os resultados foram comparados com a análise estática apresentada na Figura 22(c). Neste gráfico, a curva de histerese é mais estreita, revelando uma relação mais direta entre a abertura da válvula e a vazão, com menor influência do atraso do sistema. Embora algum atraso ainda esteja presente, a vazão responde de maneira relativamente consistente à abertura real da válvula. Este gráfico demonstra claramente a transição da

Figura 21 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.

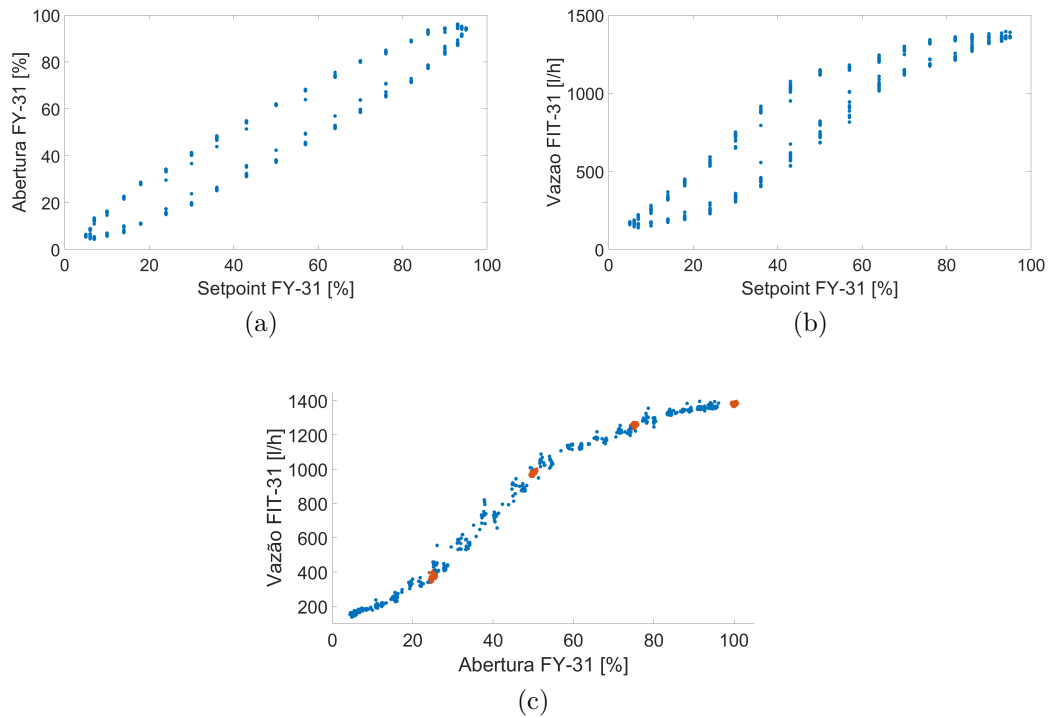


Fonte: do autor.

análise estática para a dinâmica. A análise estática foi baseada em quatro pontos de operação de *setpoint*, enquanto a análise dinâmica, realizada em um único ensaio, abrangeu todos os resultados da análise estática. Reproduzir esses resultados com a análise estática exigia ensaios múltiplos, cada um variando o *setpoint* da abertura da válvula pneumática FY-31, o que seria inviável em termos de tempo.

A Figura 22(c) apresenta a relação entre a abertura real da válvula FY-31 e a vazão. Este gráfico apresentou uma curva de histerese mais estreita, sugerindo que a relação entre a abertura real da válvula e a vazão é mais direta e menos influenciada por atraso do sistema. Embora haja algum grau de atraso, a vazão responde de forma relativamente consistente à abertura real da válvula. Observa-se que a curva de histerese formada no ensaio dinâmico é muito semelhante ao gráfico apresentado na Figura 18. Os valores encontrados na análise estática aparecem como parte do intervalo que está sob a análise dinâmica. Isso indica que as características observadas na análise estática, como a relação entre a abertura da válvula e a vazão, são mantidas mesmo quando o sistema está sujeito a variações dinâmicas. Dessa forma, a análise dinâmica não apenas confirma os comportamentos identificados na análise estática, mas também mostra como esses comportamentos ocorrem ao longo de um ciclo completo de variação da abertura da válvula.

Figura 22 – Correlação entre setpoint, abertura real da válvula e vazão (a) Setpoint vs abertura real, (b) Setpoint vs vazão e (c) Abertura real vs vazão.



Fonte: do autor.

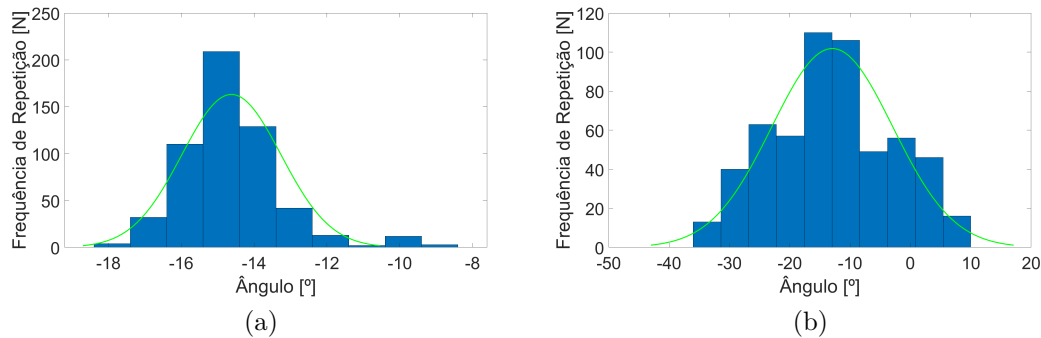
Para analisar a defasagem entre os sinais, foi inicialmente utilizada a transformada de Hilbert para calcular os ângulos de defasagem entre o *setpoint* e a abertura real da válvula FY-31, bem como entre o *setpoint* e a vazão. A transformada de Hilbert foi aplicada aos sinais normalizados para determinar a fase instantânea e, a partir dela, calcular a defasagem angular. Os ângulos de defasagem obtidos foram então usados para gerar histogramas das distribuições dessas defasagens, como mostra a Figura 23.

A Figura 23(a) apresenta a distribuição das amostras para cada intervalo de ângulo em relação à defasagem da abertura real da válvula FY-31 em relação ao sinal de referência, que foi uma senoide com frequência de 5 mHz. Observa-se que a maior concentração de defasagem ocorre em torno de aproximadamente -15° . Aplicando a mesma análise à Figura 23(b), que mostra a defasagem da vazão em relação ao *setpoint*, observa-se que o valor de defasagem mais frequente é em torno de aproximadamente -13° . Esses resultados indicam que, embora haja uma defasagem significativa em ambos os casos, a abertura da válvula e a vazão têm defasagens ligeiramente diferentes em relação ao sinal de referência.

A mesma análise foi realizada para os sinais de referência com frequências de 10 mHz, 13,3 mHz, 20 mHz, 28,6 mHz e 40 mHz. A Tabela 2 apresenta os resultados da defasagem da abertura real da válvula FY-31 em relação ao *setpoint* e também os resultados da defasagem da vazão em relação ao *setpoint* para todas essas frequências.

A análise comparativa dos dados de defasagem medidos para a abertura da válvula

Figura 23 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.



Fonte: do autor.

Tabela 2 – Distribuição normal medidos da defasagem válvula FY-31 e do sensor FIT-31

Setpoint FY-31 [mHz]	Valores Medidos			
	FY-31		FIT-31	
	μ	σ	μ	σ
5	-14,65	1,31	-12,83	10,08
10	-31,18	3,03	-27,29	10,50
13,33	-44,56	2,74	-39,39	10,43
20	-67,41	5,68	-60,02	12,52
28,57	-99,79	9,44	-83,74	14,70
40	-143,12	12,33	-118,51	25,85

Fonte: do autor.

válvula FY-31 e os valores de vazão lidos pelo sensor FIT-31 revela algumas tendências importantes. Para a válvula FY-31, observamos que a defasagem média aumenta de aproximadamente $-14,65^\circ$ para $-143,12^\circ$ conforme a frequência do *setpoint* varia de 5 mHz para 40 mHz. Essa tendência indica que a válvula tem uma dificuldade crescente em acompanhar mudanças rápidas à medida que a frequência aumenta. Além disso, o σ também aumenta com a frequência, sugerindo que a válvula se torna menos estável em frequências mais altas.

No caso da vazão lida pelo sensor FIT-31, a defasagem média também aumenta com a frequência, mas os valores são menores do que os observados para a válvula FY-31 em todas as frequências. A defasagem média μ varia de aproximadamente $-12,83^\circ$ a $-118,51^\circ$. No entanto, a vazão apresenta uma variabilidade maior, com desvios padrões significativamente maiores, especialmente em frequências mais altas. Isso indica uma maior dispersão nos dados de defasagem, sugerindo uma menor precisão.

Contudo, enquanto ambas as medições mostram um aumento da defasagem com o aumento da frequência, a vazão tende a ter uma defasagem média menor, mas com

uma maior variabilidade. Por outro lado, a abertura da válvula FY-31 exibe uma defasagem média mais alta, mas com uma variabilidade menor, indicando uma resposta mais previsível.

5.2 Sinais chirp

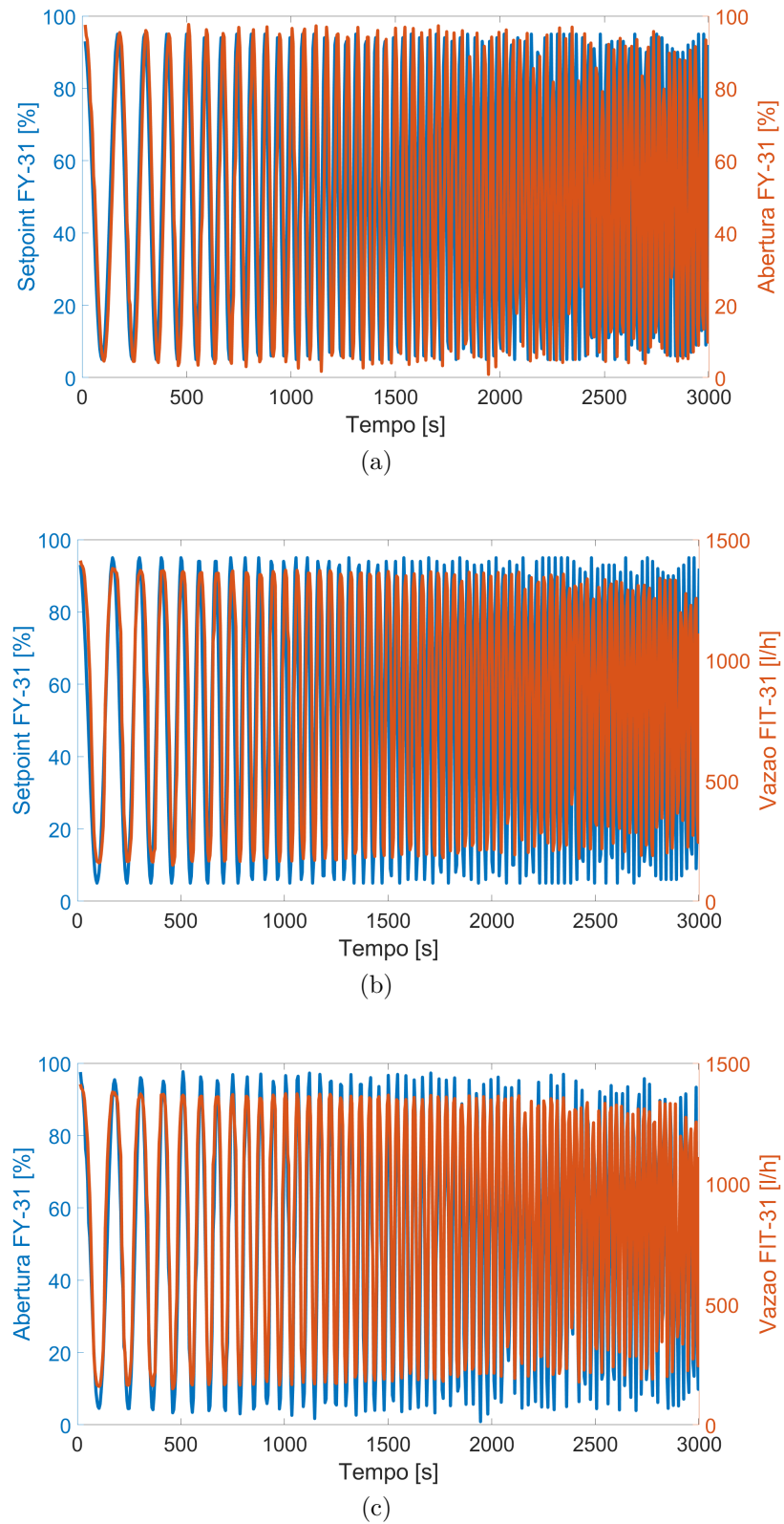
O objetivo dos ensaios com o sinal *chirp* foi avaliar a resposta dinâmica da válvula pneumática FY-31 ao longo de uma variação contínua de frequências. O sinal foi aplicado com frequências que aumentaram progressivamente, abrangendo o intervalo de 5 mHz a 40 mHz, com amplitudes variando de 5% a 95% e um *offset* de 50%. Esses parâmetros foram escolhidos para observar como a válvula reage a diferentes frequências em um único ensaio, permitindo uma análise abrangente do comportamento dinâmico da válvula ao longo de uma ampla faixa de operação. Assim como nos ensaios senoidais, a análise *chirp* permite identificar tendências e padrões de resposta que se repetem em diferentes frequências e amplitudes.

A Figura 24 apresenta os sinais obtidos devido à aplicação do sinal chirp linear como entrada da válvula FY-31. A Figura 24(a) mostra o sinal de referência em relação à abertura real da válvula FY-31. Este gráfico ilustra a resposta da abertura real da válvula pneumática FY-31 em relação ao *setpoint* aplicado durante a variação contínua de frequências. Observa-se que, em baixas frequências, a resposta da válvula tende a acompanhar o *setpoint* com maior precisão, indicando uma resposta estável. Entretanto, à medida que a frequência aumenta, é perceptível um atraso de fase entre o *setpoint* e a abertura real, evidenciando as limitações dinâmicas da válvula para acompanhar as mudanças em frequências mais elevadas.

A Figura 24(b) representa a relação entre o *setpoint* e a vazão medida pelo sensor FIT-31. Em frequências baixas, a vazão segue o *setpoint* de maneira mais precisa e estável, o que sugere que o sistema responde bem a comandos lentos. Contudo, em frequências mais altas, nota-se uma defasagem e variação na vazão, indicando que o comportamento do sistema se torna menos linear, provavelmente devido às limitações da válvula e do sensor em rastrear mudanças rápidas no *setpoint*. E a Figura 24(c) apresenta a correlação entre a abertura real da válvula e a vazão. Em baixas frequências, a curva traçada é mais suave, sugerindo uma relação quase linear entre abertura e vazão, caracterizando uma resposta estável e previsível do sistema. No entanto, conforme as frequências aumentam, começam a surgir distorções e dispersões na curva, evidenciando uma diminuição na correspondência entre abertura e vazão. Esse comportamento indica que, em frequências elevadas, o sistema apresenta não-linearidades, que afetam a precisão da resposta.

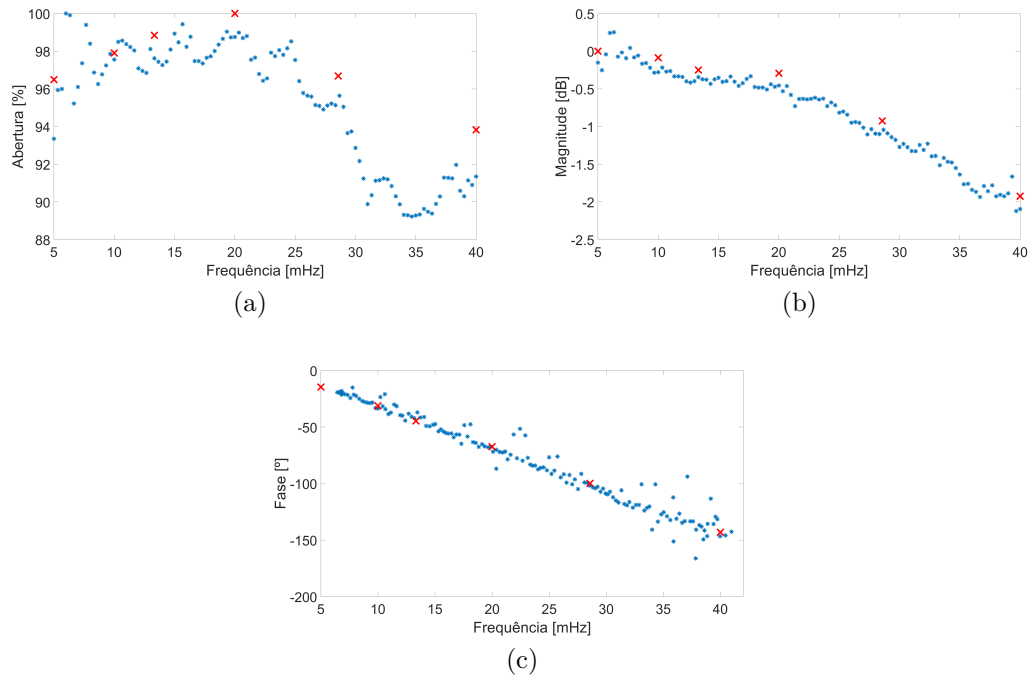
De forma análoga à análise senoidal, aplicou-se a Transformada de Hilbert para obter a defasagem entre o sinal de referência e a abertura real da válvula pneumática FY-31 durante o ensaio com sinal *chirp*. A Transformada de Hilbert permitiu calcular

Figura 24 – Comportamento da válvula FY-31 e da vazão durante a aplicação de entrada degrau de 50% sob perturbação: (a) Sinais de referência, (b) Sinais reais e (c) Vazão.



Fonte: do autor.

Figura 25 – Comportamento da válvula FY-31 no domínio da frequência: (a) abertura, (b) magnitude e (c) fase instantânea obtida a partir do sinal chirp (azul) e dos sinais senoidais (vermelho).



Fonte: do autor.

a fase instantânea de cada sinal, possibilitando uma análise detalhada da defasagem ao longo do tempo e em diferentes frequências.

A Figura 25 apresenta as variações de magnitude e fase dos sinais adquiridos em função da frequência. As variações de magnitude em função da frequência foram calculadas utilizando a Transformada rápida de Fourier. A defasagem instantânea entre os valores percentuais de referência, utilizados para controlar o posicionador, e os valores de vazão medidos por FIT-31 foram calculados usando a Transforma de Hilbert discreta. Todos os sinais foram filtrados por um filtro média-móvel, com número de amostras igual a 10.

Na Figura 25(a), apresenta-se a variação percentual da abertura real da válvula em função da frequência. Observa-se que, a partir de 20 mHz, o sistema apresenta uma atenuação mais acentuada, da ordem de 7%. Em aplicações industriais, esse parâmetro poderia ser utilizado como uma métrica para definir os limites de operação do sistema.

A Figura 25(b) apresenta os efeitos da redução do valor percentual de abertura real nos valores máximos de vazão medidos. O gráfico relaciona os valores de magnitude calculados a partir dos sinais medidos por FIT-31 aos valores percentuais de abertura reais, medidos por FY-31.

Optou-se por normalizar a curva resultante em função do valor máximo absoluto, e por representar o resultado em escala decibel para fins de comparação. Observa-se que a atenuação aumenta significativamente a partir de frequências superiores a 20 mHz,

alcançando -2 dB quando um sinal de referência com frequência de 40 mHz é aplicada ao sistema de controle do posicionador. Essa atenuação representaria uma redução de, aproximadamente, 20% nos valores máximos de vazão do sistema.

A Figura 25(c) apresenta os valores de defasagem instantâneos, calculados usando o sinal de referência *chirp* e os valores medidos por FIT-31. Os marcadores em vermelho presentes no gráfico indicam os resultados previamente apresentados na Tabela 2, obtidos a partir das análises realizadas utilizando sinais de referência senoidais.

5.3 Considerações parciais

A análise dinâmica realizada na válvula pneumática FY-31 da planta didática SMAR PD3-F permitiu compreender de forma detalhada o comportamento do conjunto atuador-válvula sob diferentes condições de excitação. Os resultados evidenciaram que, à medida que a frequência de operação aumenta, o sistema apresenta um atraso crescente entre o sinal de referência e a resposta da válvula, o que se manifesta pelo aumento progressivo da defasagem angular e pela atenuação da amplitude de abertura.

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, verificou-se que a defasagem média da válvula FY-31 aumenta de aproximadamente $-14,6^\circ$ a $-143,1^\circ$ quando a frequência do sinal de entrada varia de 5 mHz para 40 mHz. Essa tendência confirma que o sistema mantém um comportamento estável em baixas frequências, mas apresenta limitações de rastreamento em faixas mais elevadas, comprometendo a precisão do controle. O sensor FIT-31 demonstrou comportamento coerente, embora com maior dispersão dos dados, refletindo sua menor capacidade de acompanhar variações rápidas de vazão. A partir de 20 mHz, a defasagem ultrapassa 60° , e em 40 mHz excede 100° , o que indica uma degradação significativa da resposta dinâmica. Assim, a faixa operacional recomendada para o conjunto posicionador-válvula situa-se abaixo de 20 mHz, garantindo resposta estável e previsível.

A análise complementar utilizando o sinal *chirp* mostrou-se eficiente para caracterizar a resposta dinâmica em uma única varredura de frequência, eliminando a necessidade de múltiplos ensaios senoidais. Os resultados obtidos com o *chirp* apresentaram excelente concordância com aqueles obtidos pelos sinais senoidais, validando a metodologia empregada. Observou-se uma redução de aproximadamente 7% na amplitude de abertura a partir de 20 mHz e uma taxa média de variação de defasagem de cerca de $3,7^\circ/\text{mHz}$, evidenciando a coerência entre ambas as abordagens de análise.

Esses resultados confirmam que o atuador/posicionador da válvula FY-31 possui desempenho satisfatório em faixas de baixa e média frequência, com resposta praticamente linear e pequena defasagem. Entretanto, em frequências mais elevadas, tornam-se perceptíveis as limitações impostas pela inércia mecânica, compressibilidade do ar e dinâmica interna do posicionador, o que provoca histerese e aumento da defasagem.

Conclui-se, portanto, que o conjunto analisado apresenta comportamento dinâmico compatível com as características esperadas de sistemas pneumáticos, sendo adequado para aplicações de controle que operem com variações lentas ou moderadas de referência. Além disso, os resultados obtidos por meio do sinal *chirp* reforçam o potencial dessa metodologia para ensaios de caracterização, permitindo diagnósticos mais rápidos e precisos. Em contextos industriais, tais informações podem subsidiar a calibração de controladores e a identificação de faixas de operação seguras, contribuindo para maior confiabilidade e eficiência no controle de processos pneumáticos.

6 Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização estática e dinâmica de uma válvula do tipo globo controlada por um posicionador pneumático, utilizando a planta didática SMAR PD3-F. A metodologia adotada permitiu avaliar o desempenho do conjunto atuador-válvula por meio da aplicação de sinais de referência distintos e do monitoramento das variáveis de processo via rede digital FOUNDATION *Fieldbus*. O uso combinado dos softwares *System302* e *MATLAB*, integrados por meio do protocolo OPC, mostrou-se eficiente para a aquisição e análise de dados, possibilitando uma caracterização precisa e reproduzível do comportamento do sistema em regime estacionário e dinâmico.

Na análise estática, observou-se que o conjunto posicionador-válvula apresentou comportamento linear e estável dentro da faixa operacional estudada. As variações médias de abertura permaneceram em torno de 0,3%, enquanto as diferenças de vazão atingiram aproximadamente 14 l/h entre os pontos extremos analisados. Esses resultados indicam boa repetibilidade e sensibilidade do sistema, demonstrando que o fornecimento de ar comprimido e as condições mecânicas da válvula não foram os principais fatores responsáveis pelas variações observadas. Assim, a etapa estática forneceu uma base sólida para a investigação dinâmica subsequente.

Na análise dinâmica, os ensaios com sinais senoidais e *chirp* permitiram avaliar o comportamento da válvula em uma faixa de frequências compreendida entre 5 mHz e 40 mHz. Verificou-se que o sistema mantém boa resposta até aproximadamente 20 mHz, com defasagem inferior a 60° e pequena atenuação de amplitude. A partir dessa faixa, a defasagem aumenta progressivamente, alcançando cerca de 3,7°/mHz, e a amplitude de abertura sofre uma redução de até 7% a 40 mHz. Esses resultados confirmam as limitações dinâmicas típicas de sistemas pneumáticos, atribuídas à inércia mecânica e à compressibilidade do ar. A análise com sinal *chirp* apresentou forte concordância com os ensaios senoidais, comprovando sua eficácia na obtenção de respostas dinâmicas de forma mais rápida e abrangente.

Conclui-se, portanto, que para frequências mais elevadas, as limitações dinâmicas observadas devem ser consideradas na calibração e no projeto de controladores, a fim de mitigar efeitos de defasagem e histerese.

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Como propostas para trabalhos futuros, pode-se citar a implementação de controladores do tipo PID ou adaptativos para compensação de atraso e otimização da resposta dinâmica, de modo a ampliar a faixa de operação com estabilidade e precisão.

Além disso, propõe-se o desenvolvimento de uma estratégia de compensação estática das não linearidades da válvula, utilizando o ajuste polinomial da curva de calibração obtida experimentalmente. Essa abordagem permitiria linearizar a relação entre o sinal de controle e a vazão medida, minimizando efeitos como histerese e variações de sensibilidade, e melhorando o desempenho global do sistema de controle pneumático.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação*. 1^a. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Education do Brasil, 2013.
- ALI, H. I. et al. A review of pneumatic actuators (modeling and control). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 3, n. 2, p. 440–454, 2009.
- ASSAD, M. M.; NETO, M. S.; MEGGIOLARO, M. A. Estudo do comportamento de atrito em atuadores pneumáticos industriais. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, ABCM, Rio de Janeiro, Brasil, v. 6, p. 1–11, 2014.
- LAGE, R. L. *Projeto de um sistema de controle de nível para tanques industriais*. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, Brasil. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2429>>.
- NOVAK ANTONÍN E SIMON, L. e. K. F. e. L. P. Identificação de sistema não linear usando sinal de seno de varredura exponencial. *Transações IEEE sobre Instrumentação e Medição*, v. 59, n. 8, p. 2220–2229, 2010. doi: 10.1109/TIM.2009.2031836.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*. 3^a. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Education do Brasil, 2010.
- QIAN, J. yuan et al. Effects of orifice on pressure difference in pilot-control globe valve by experimental and numerical methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 41, p. 18562–18570, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991630547X>>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.070>.
- SCALI, C. et al. Caracterização experimental e diagnóstico de diferentes problemas em válvulas de controle. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 44, n. 1, p. 7334–7339, 2011. 18th IFAC World Congress. doi: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02755>.
- SMAR. *Manual de Operação da Planta Didática PD3-F*. Sertãozinho, Brasil, 2012. Disponível em: <<https://www.smar.com/manuals/PD3-F.pdf>> [Acesso em: setembro de 2024].
- SMAR., E. I. L. *Posicionador de Válvulas para Atuação e Controle FY302*. Sertãozinho, Brasil, 2024. Disponível em: <<https://www.smar.com.br/public/img/produtos/arquivos/fy302mp.pdf>> [Acesso em: janeiro de 2025].
- SMAR, E. I. L. *Transmissor de Pressão Fieldbus*. Sertãozinho, Brasil, 2024. Disponível em: <<https://www.smar.com.br/public/img/produtos/arquivos/ld302mp.pdf>> [Acesso em: janeiro de 2025].
- SORLI, M.; FIGLIOLINI, G.; PASTORELLI, S. Dynamic model of a pneumatic proportional pressure valve. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, v. 215, n. 3, p. 265–272, 2001. doi: 10.1109/AIM.2001.936540.
- SORLI M. E FIGLIOLINI, G. e. P. S. Modelo dinâmico e investigação experimental de uma válvula pneumática de pressão proporcional. *Transações IEEE/ASME em Mecatrônica*, v. 9, n. 1, p. 78–86, 2004. doi: 10.1109/TMECH.2004.823880.

YE, Q.; CHEN, J. Análise dinâmica de uma válvula solenóide de dois estágios operada por piloto utilizada em sistema pneumático. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 17, n. 5, p. 794–816, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.01.005>.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado Caracterização estática e dinâmica de válvulas pneumáticas industriais, é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 11 de novembro de 2025.

Gabriel Miki Portela