

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE ENSINO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

EDUARDA FABER

**MONTAGEM DE UMA BANCADA PNEUMÁTICA PARA
IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE POSIÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE ENSINO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

EDUARDA FABER

**MONTAGEM DE UMA BANCADA PNEUMÁTICA PARA
IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE POSIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de submetido ao
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Eduardo Yuji Sa-
kurada

Coorientador: Prof. Dr. Eng. Francisco Ra-
fael Moreira da Mota

FLORIANÓPOLIS, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Faber, Eduarda

Montagem de uma bancada pneumática para implementação de técnicas de controle de posição / Eduarda Faber; orientação de Eduardo Sakurada; coorientação de Francisco Mota. - Florianópolis, SC, 2022.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Pneumática. 2. Controle. 3. Bancada Pneumática.
4. PID. I. Sakurada, Eduardo. II. Mota, Francisco. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Montagem de uma bancada pneumática para implementação de técnicas de controle de posição.

MONTAGEM DE UMA BANCADA PNEUMÁTICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE POSIÇÃO

EDUARDA FABER

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de julho, 2022.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
EDUARDO YUJI SAKURADA
Data: 17/08/2022 10:17:18-0300
CPF: 016.152.299-81
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA
Data: 17/08/2022 10:47:33-0300
CPF: 012.003.153-16
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Francisco Rafael Moreira da Mota, Dr. Eng.
Coorientador
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
MARLUS DEC
Data: 17/08/2022 14:06:03-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Marlus Dec, Me. Eng.
Membro da banca
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
TAYLOR SOARES ROSA
Data: 17/08/2022 21:07:21-0300
CPF: 511.313.310-87
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Taylor Soares Rosa, Me. Eng.
Membro da banca
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, aos meus pais, as minhas irmãs e o meu namorado por fazer parte dessa parte decisiva da minha vida, e pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis enfrentados ao longo do curso.

Agradecer especialmente aos meus professores que contribuíram muito para realização desse projeto, meu orientador e coorientador respectivamente, Eduardo Yuji Sakurada e Francisco Rafael Moreira da Mota e ao Luiz Fernando Segalin de Andrade por dedicar uma manhã para me ajudar com a máquina de corte.

RESUMO

A pneumática é o campo da engenharia relacionado com os gases ou ar comprimido. É também o estudo da conversão da energia pneumática em energia mecânica. A principal propriedade do ar é a sua compressibilidade, é com isto em mente que os equipamentos de pneumática são desenvolvidos. Por conta das suas características, atualmente, os sistemas pneumáticos vêm sendo integrados a sistemas de controle, principalmente nas linhas de montagens de embalagens, envasamento, movimentação e transporte de materiais. Este trabalho aborda o desenvolvimento de uma bancada pneumática para testes de controle de posição, com o objetivo de oferecer aos alunos do Instituto Federal de Santa Catarina, um equipamento adequado para a realização de testes e aprimoramento do aprendizado. Para a montagem da bancada pneumática foi desenvolvido um módulo de integração, visando a possibilidade de fazer ensaios com diferentes tipos de controladores como arduino, CLP's, raspberry, entre outros. A bancada foi validada através de um controlador PID através de um computador, conectado a um módulo DAC (Digital To Analog Converter). No geral, a montagem da bancada obteve sucesso, com uma única ressalva de possuir uma área de zona morta presente na válvula direcional proporcional, o que resulta em um controle final impreciso.

Palavras-chave: Pneumática, Controle, PID, Bancada Pneumática, Válvulas, IFSC, Engenharia Mecatrônica

ABSTRACT

Pneumatics is the field of engineering related to gases or compressed air. It is also the study of the conversion of pneumatic energy into mechanical energy. The main property of air is its compressibility, it is with this in mind that pneumatic equipment is developed. Due to their characteristics, currently, pneumatic systems have been integrated into control systems, mainly in packaging assembly lines, bottling, material handling and transport. This work addresses the development of a pneumatic bench for position control tests, with the objective of offering the students of the Federal Institute of Santa Catarina, adequate equipment for carrying out tests and improving learning. For the assembly of the pneumatic bench, an integration module was developed, aiming at the possibility of performing tests with different types of controllers such as Arduino, PLC's, raspberry, among others. The bench was validated through a PID controller through a computer, connected to a DAC module (Digital To Analog Converter). Overall, the bench assembly was successful, with the Only caveat of having a dead zone área presente in the proportional directional valve, which results in an imprecise final control.

Keywords: Pneumatics. Control. PID. Pneumatic Bench. Valves. Mechatronics Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção de um regulador de pressão com escape	17
Figura 2 – Válvula proporcional de vazão	19
Figura 3 – Curva do ganho de vazão	19
Figura 4 – Representação de atuadores pneumáticos rotativos	20
Figura 5 – Atuador pneumático linear de simples ação	21
Figura 6 – Atuador pneumático linear de dupla ação	21
Figura 7 – Régua potenciométrica	22
Figura 8 – Funcionamento de um sensor de pressão	22
Figura 9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle	23
Figura 10 – Estrutura de controle NCTF	25
Figura 11 – Diagrama de funcionamento do sistema pneumático	34
Figura 12 – Diagrama ligações elétrica e pneumática	35
Figura 13 – Especificações técnicas da válvula proporcional	36
Figura 14 – Desenho em <i>SolidWorks</i>	39
Figura 15 – Testagem dos parâmetros da máquina a laser em MDF	40
Figura 16 – Resultado da impressão a laser com os parâmetros definidos	40
Figura 17 – Módulo de integração impresso a laser	41
Figura 18 – Montagem do módulo de integração	41
Figura 19 – Diagrama das ligações elétricas do módulo	42
Figura 20 – Tag dos cabos	43
Figura 21 – Conexões do módulo	43
Figura 22 – Gráfico calibração régua potenciométrica	45
Figura 23 – Diagrama de funcionamento da calibração	46
Figura 24 – Gráfico calibração sensor de pressão Seeed	47
Figura 25 – Gráfico calibração sensor SDE 10-5V	48
Figura 26 – Gráfico calibração sensor SDE 10-10V	49
Figura 27 – Teste da fonte de 24V	50
Figura 28 – Montagem final da bancada pneumática	51
Figura 29 – Conversor DAC utilizado	52
Figura 30 – Diagrama de blocos do sistema PID	53
Figura 31 – Interface do sistema PID	54
Figura 32 – Gráfico do tempo de resposta da válvula em descida	55
Figura 33 – Gráfico do tempo de resposta da válvula em subida	56
Figura 34 – Gráfico pressão(bar) x tempo(s) do sensor Festo 1-5V	57
Figura 35 – Interface gráfica do sistema PID utilizado para testar	58
Figura 36 – Gráfico teste em malha fechada com $K_p = 0,0072$	59
Figura 37 – Tabela Ziegler- Nichols	59
Figura 38 – Teste controlador P	60
Figura 39 – Teste controlador PI	61
Figura 40 – Teste controlador PID	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações Técnicas do Arduino Uno	26
Tabela 2 – Características <i>Raspberry</i>	26
Tabela 3 – Lista de componentes bancadas de controle.....	32
Tabela 4 – Componentes disponibilizados no laboratório	33
Tabela 5 – Especificações técnicas da régua potenciométrica série TLH	36
Tabela 6 – Especificações técnicas do sensor de pressão Sseeed	37
Tabela 7 – Especificações técnicas dos sensores de pressão Festo	38
Tabela 8 – Componentes necessários p/ compor o módulo de integração	39
Tabela 9 – Padrão de conexões dos cabos banana	43
Tabela 10 – Calibração régua potenciométrica	44
Tabela 11 – Calibração do sensor de 5V	46
Tabela 12 – Calibração Sensor de Pressão SDE 10 – 5V.....	48
Tabela 13 – Calibração Sensor de Pressão SDE 10 – 10V.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
DAC	<i>Digital To Analog Converter</i>
DAMM	<i>Departamento de Metal-Mecânica</i>
DC	<i>Direct Current</i>
IFSC	<i>Instituto Federal de Santa Catarina</i>
LASHIP	<i>Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos</i>
LQG	<i>Linear Quadratic Gaussian</i>
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
MOP	<i>Laboratório de Máquinas Operatrizes</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
NCT	<i>Nominal Characteristic Trajectory</i>
NCTF	<i>Nominal Characteristic Trajectory Following</i>
PI	<i>Proporcional-Integrador</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivativo</i>
UFSC	<i>Universidade Federal Santa Catarina</i>

LISTAS DE UNIDADES DE MEDIDAS

bar	<i>10⁵ Pascal</i>
°C	<i>Graus Celsius</i>
FS	<i>Femtosegundo</i>
g	<i>Grama</i>
Hz	<i>Hertz</i>
kg	<i>Quilograma</i>
kΩ	<i>Quiloohm</i>
mA	<i>Miliampere</i>
min	<i>Minuto</i>
mm	<i>Milímetro</i>
MPa	<i>Mega Pascal</i>
m/min	<i>Metro/minuto</i>
ms	<i>Milisegundo</i>
m/s	<i>Metro/segundo</i>
m/s ²	<i>Metro/segundo ao quadrado</i>
MΩ	<i>Megaohm</i>
N	<i>Newton</i>
V	<i>Volts</i>
W	<i>Watt</i>
μA	<i>Microampere</i>
μm	<i>Micrômetro</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa.....	12
1.2 Definição do problema.....	13
1.3 Objetivo geral	13
1.4 Objetivo específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Sistemas pneumáticos	15
2.1.1 Regulador de pressão	16
2.1.2 Filtro	17
2.1.3 Válvula direcional proporcional	18
2.1.4 Atuador	20
2.2 Sensores	21
2.2.1 Régua potenciométrica.....	21
2.2.2 Sensores de pressão.....	22
2.3 Sistemas de controle	23
2.3.1 PID – <i>Proportional Integral Derivative</i>	23
2.3.2 Fuzzy	24
2.3.3 NCTF- <i>Nominal Characteristic Trajectory Following</i>	24
2.4 Controladores	25
2.4.1 Arduino	25
2.4.2 Raspberry	26
2.4.3 CLP	27
2.5 Bancadas pneumáticas para controle de posição	27
3 BANCADA PNEUMÁTICA PARA CONTROLE AVANÇADO	32
3.1 Descrição da bancada	32
3.2 Desenvolvimento do módulo de integração	39
3.3 Testes realizados nos componentes	44
3.3.1 Régua potenciométrica	44
3.3.2 Sensores de pressão	45
3.3.3 Fontes de alimentação	50
3.4 Ensaios realizados na bancada	51
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	62
4.1 Análise e discussão dos resultados.....	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

O termo pneumática é derivado do grego *Pneumos* ou *Pneuma* (respiração, sopro) e é parte da engenharia que se ocupa da dinâmica e dos fenômenos físicos relacionados com os gases ou ar comprimido. É também o estudo da conversão da energia pneumática em energia mecânica, através dos respectivos elementos de trabalho.

A base da pneumática, por mais que seja um dos mais antigos conhecimentos da história da humanidade, somente no século XIX o estudo de suas propriedades e comportamento se tornou sistemático. Porém somente em meados do século XX é que essa área foi realmente colocada em prática no meio industrial. (SANTOS, 2009).

A base para o desenvolvimento de componentes e/ou circuitos hidráulicos e pneumáticos é proveniente da aplicação dos princípios da mecânica dos fluidos compressíveis e incompressíveis. Pensando em sistemas hidráulicos e pneumáticos juntamente com conceitos de automação e pneumática, De Negri (2001), mencionou o seguinte.

[...] os conceitos de controle e automação também estão relacionados com a hidráulica e pneumática, pois esta área da tecnologia possui diversos dispositivos para atuar de forma rotacional e translacional para uma grande gama de forças, torques, velocidades e rotações. O estudo na área de controle e automação é composto por diversas áreas como lógica Booleana, Teoria de controle, metrologia e mecatrônica, das quais são muito importantes para a compreensão dos sistemas hidráulicos e pneumáticos. [...] (DE NEGRI, 2001).

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de uma bancada pneumática para testes de controle posição. O equipamento vai permitir que os alunos possam realizar testes e aprimorar conhecimentos dos sistemas pneumáticos juntamente com teorias de controle.

1.1 Justificativa

Os sistemas pneumáticos se destacam por baixo custo, peso leve, durabilidade, limpeza, boa manutenibilidade e facilidade de implementação, uma vez que o ar comprimido está disponível na maioria das indústrias.

Os sistemas pneumáticos têm propriedades não lineares e são difíceis de controlar devido à alta compressibilidade do ar que torna sua rigidez muito baixa, dificultando o controle de seu movimento com precisão. Outra desvantagem é a presença de zona morta na válvula direcional, que afeta o controle e a resposta do atuador. Além dessas questões, ainda podem existir problemas relacionados com o atrito (estático e dinâmico) e erros de histerese. Por causa dessas características, os estudos na área de controle de sistemas tornam-se necessário, abrindo um amplo campo de pesquisa aplicada.

É possível observar que há diversos desafios para poder implementar técnicas de controle a sistemas pneumáticos. Pensando nisso, a proposta inicial é desenvolver uma bancada pneumática com equipamentos necessários para implementação de técnicas de controle. Inicialmente seriam técnicas mais simples, como PID, futuramente sendo implementadas técnicas de controle mais avançadas.

1.2 Definição do Problema

Sistemas pneumáticos tem muitas vantagens em relação aos outros sistemas de acionamentos, mesmo assim, tem um grande problema de controle. Visando realizar estudos em cima desse desafio foi pensado no desenvolvimento de uma bancada pneumática que possibilitasse realizar diversos testes de diferentes controladores.

Esse projeto será utilizado de forma acadêmica, para realização de estudos de controle e automação e pneumática, trazendo diversos benefícios para alunos do Instituto Federal de Santa Catarina, como por exemplo: facilidade na implementação de novas estratégias de controle, realizar testes comparativos entre estratégias de controle, flexibilidade e melhor aproveitamento no uso dos equipamentos da instituição.

1.3 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo geral a montagem de uma bancada pneumática para controle de posição com a técnica PID, buscando uma interface que

facilite uma implementação futura de técnicas mais apropriadas como Fuzzy, LQR, LQG, NCTF.

1.4 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, vários objetivos específicos foram propostos, para facilitar a criação e execução do produto:

- a) Revisar a bibliografia sobre as técnicas de controle e quais componentes são necessários para implementá-las;
- b) Especificar os componentes básicos para a montagem da bancada;
- c) Testar os componentes especificados para o projeto;
- d) Desenvolver um protótipo que possibilite a integração de diferentes controladores e sistemas de controle à bancada.
- e) Validar os resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos teóricos que foram utilizados para o desenvolvimento de uma bancada pneumática para a implementação de técnicas de controle de posição.

2.1 Sistemas pneumáticos

A pneumática é a tecnologia que utiliza a energia contida no ar comprimido transformando em energia cinética. Essa energia do ar comprimido é transformada através de atuadores constituídos de cilindros, motores e outros equipamentos.

A maior vantagem dessa tecnologia é a simplicidade em projetar equipamentos com um número elevado de atuadores. Tais atuadores são de grande importância para a automação de processos. Além dessa vantagem, a pneumática gera movimento linear por meio de cilindro com pistões, tem boa robustez, peso reduzido, custo acessível, além de diversas outras vantagens.

A integração da pneumática com sistemas de controle, tem tido um aumento notável nas funções disponíveis, o que há poucos anos era inimaginável. Por esses motivos, a pneumática integrada a sistemas de controle é a tecnologia mais utilizada na automação industrial. (PEREIRA, 2018).

É muito comum vermos atualmente essa tecnologia nas linhas de montagem, nas linhas de embalagens, em máquinas de alimentação em particular de envasamento, movimentação e transporte de materiais.

Claro que a pneumática tem suas desvantagens, como difícil regulação de velocidade dos atuadores, cabeamento complexo quando utilizados muitos atuadores, problemas com a vedação da tubulação entre outros (PRUDENTE, 2013).

Mesmo com suas desvantagens ainda é uma área que está sempre evoluindo e com certeza não está de fora da quarta revolução industrial. Afinal, combinando componentes pneumáticos com eletrônicos, é possível colher dados do sistema e aproveitá-los de diversas maneiras através da *IoT* e *Big Data*. Com isso fica mais fácil gerenciar e otimizar todos os processos (AUTOMAÇÃO, 2022).

Os sistemas pneumáticos mais básicos são divididos em 4 partes: compressão, secagem, transporte e aplicação. A compressão corresponde à etapa onde o ar é pressurizado, sendo realizado pelo compressor. A secagem ou filtragem, é a etapa que retira umidade e impurezas do ar que irá passar no sistema. Essa etapa é feita através dos filtros. O transporte corresponde as tubulações que transmitem o ar comprimido. Por fim a aplicação é a parte onde é colocado sensores e atuadores, para enfim realizar uma tarefa. (JHP AUTOMAÇÃO, [entre 2005 e 2022]).

2.1.1 Regulador de pressão

De forma geral os reguladores de pressão são componentes que foram projetados para proporcionar uma resposta rápida e uma regulação de pressão precisa, assim sendo aplicado no maior número de processos industriais.

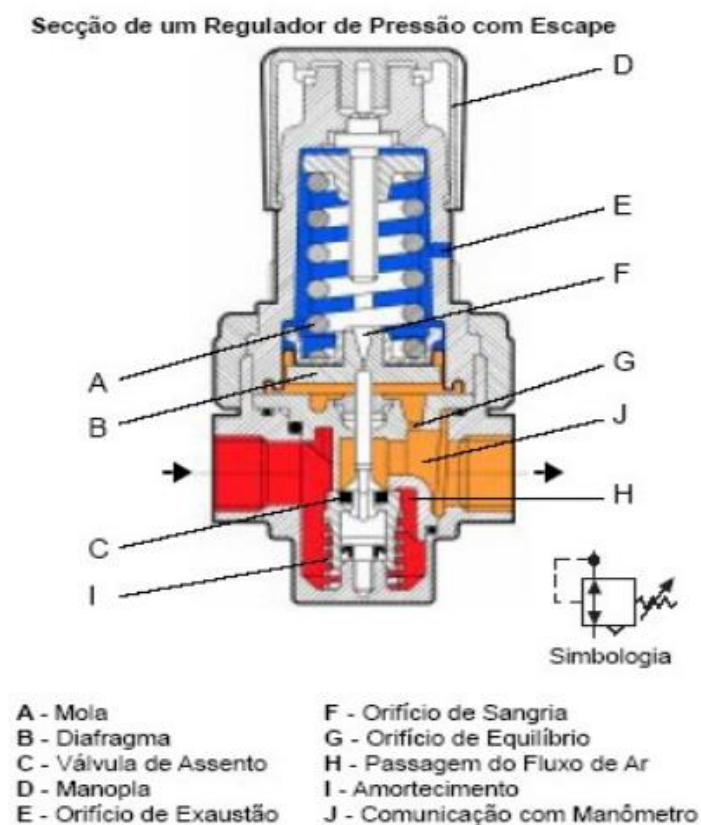
Os reguladores de pressão têm como principais características:

- Resposta rápida e regulação precisa, devido a uma aspiração secundária e a válvula de assento incorporado;
- Possibilidade de passagem de ar em dois sentidos diferentes;
- O diafragma de modo geral é projetado para proporcionar um aumento da vida útil do regulador;
- Existem dois orifícios destinados a manômetro que também são utilizados como orifícios de saída;
- Fácil manutenção;

De forma geral, os reguladores de pressão contêm diversos orifícios, assim como uma mola, um diafragma e o contato com um manômetro. Neste manômetro, dependendo de qual caminho o ar tomar é empurrada a mola, consequentemente movimentando o diafragma. Essa movimentação faz com que se tenha uma variação na pressão de saída. Às vezes é necessário realizar essa variação armazenando pressão dentro do componente ou permitindo a passagem do ar pelo orifício de

sangria da válvula. A Figura 1 ilustra a seção de um regulador de pressão e seus componentes. (SANTOS, 2009)

Figura 1 - Seção de um regulador de pressão com escape



Fonte: Santos (2009).

2.1.2 Filtro coalescente

Para evitar desgastes nos equipamentos pneumáticos o ar comprimido deve estar sempre limpo e seco, para isso é importante e necessário utilizar algum processo de filtragem.

Partículas sólidas, água e óleos no ar comprimido reduzem a vida útil e a funcionalidade dos componentes. A função do filtro é remover esses resíduos que contaminam o ar comprimido.

Existem filtros para o compressor e para rede. Normalmente os compressores de ar já tem contido neles um filtro que realiza uma primeira secagem e retira impurezas maiores, não sendo necessário a utilização de filtros para a rede em todas as aplicações. Para o projeto é utilizado filtro para rede, por necessitar que o ar seja o mais puro, para que nenhum tipo de partícula acabe interferindo em uma

bancada como um todo. Nesse tipo de utilização é possível encontrar os filtros coalescentes, filtro regulador lubrificador e filtro regulador de pressão.

Os filtros coalescentes são responsáveis pela purificação do ar comprimido, retendo umidade e partículas sólidas de até $0,01\ \mu\text{m}$. Os outros tipos de filtros também retêm umidade e partículas sólidas, porém são filtradas partículas de até $40\ \mu\text{m}$, fazendo com que não tenha a mesma eficiência dos filtros coalescentes. Por querer que o sistema tenha uma boa confiabilidade, foi utilizado este tipo de filtro. Ele tem um bom desempenho, diminuindo os riscos de manutenção da válvula direcional proporcional. (FILTRO, 2018).

2.1.3 Válvula direcional proporcional

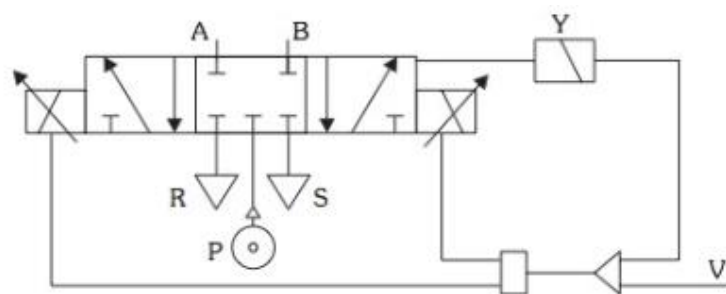
As válvulas proporcionais são um tipo de componente pneumático que é destinado a comandos de precisão. A pressão e a vazão de saída da válvula são reguladas através de sinais analógicos diretamente proporcionais aos sinais destas grandezas de entrada. (POWER & MOTION, 2009. tradução nossa).

Existem dois tipos de válvulas proporcionais: as de vazão e as de pressão. De modo geral, esses dois tipos de válvula atuam de forma parecida, pois eles controlam a grandeza especificada através de sinais elétricos.

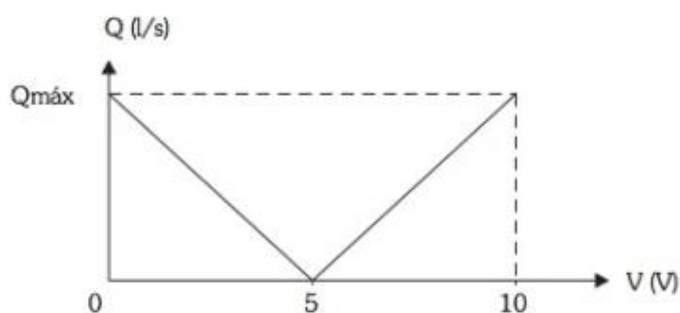
Normalmente essas válvulas são utilizadas para o controle de pressão ou vazão em operações, por exemplo, de controle de fechamento de garras pneumáticas e manipuladores, frenagem de movimentos, tensão e compressão de esforços em rolos, controle de velocidade para bobinamento, além de diversas outras aplicações (FIALHO, 2011).

As válvulas de vazão têm uma característica, diferente das válvulas de pressão. As de pressão aplicam uma pressão proporcionalmente ao valor de tensão de entrada. Diferentemente as válvulas de vazão possuem uma curva característica com uma posição de repouso em um estado central, normalmente de 5V. Nesta posição a vazão é nula. Aplicando a válvula valores de tensão decrescente de 5V a 0V, a vazão aumenta proporcionalmente até a vazão máxima no sentido da conexão P para B, conforme ilustra a Figura 2. Normalmente este tipo de válvula é utilizada para controle de velocidade e sentido de rotação para atuadores rotacionais. (BONACORSO e NOLL. 2013).

Figura 2 – Válvula proporcional de vazão



(a) Representação

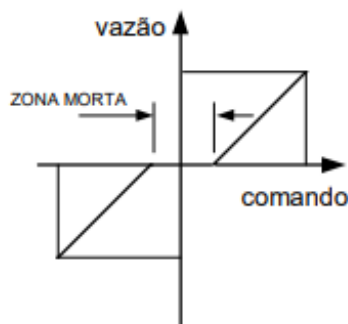


(b) Curva Característica

Fonte: Bonacorso e Noll (2013).

As válvulas direcionais proporcionais, porém, contêm uma característica não linear que as tornam difíceis de controlar, chamada de zona morta. Essa característica normalmente é decorrente da diferença das dimensões de suas partes internas. Além da diferença das dimensões, o atrito estático no carretel também pode causar este efeito. (ENDLER, 2014). A Figura 3 mostra o comportamento da vazão em função do sinal de entrada (comando). É possível visualizar a zona morta na região central do gráfico, onde a vazão é nula.

Figura 3 – Curva do ganho de vazão



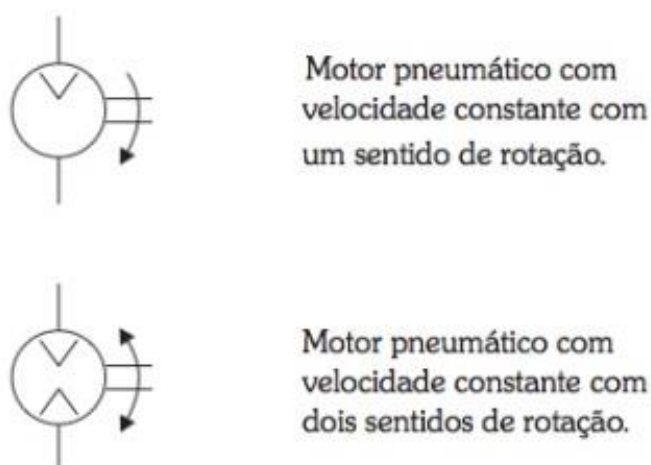
Fonte: Do Carmo (2003).

2.1.4 Atuador

Essa seção foi baseada na literatura do Fialho (2011). Um atuador pneumático é um componente que utiliza a energia contida no ar comprimido para gerar movimento mecânico. Existem dois principais tipos de atuadores, os que convertem a energia em movimento linear e os que convertem em movimento rotativo. Como outros componentes pneumáticos, eles são duráveis, oferecem simplicidade e alta resistência, além de poderem atuar em ambientes perigosos.

Os atuadores rotativos possuem um eixo rotativo que pode atingir velocidades elevadas. A construção interna destes componentes é variada: como motores com palhetas, motores de engrenagem, ou de pistão. A Figura 4 ilustra a representação de atuadores pneumáticos rotativos.

Figura 4 – Representação de atuadores pneumáticos rotativos

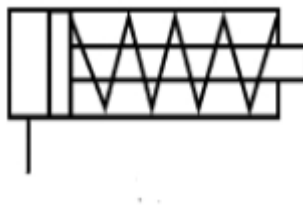


Fonte: Fialho (2011)

Atuadores lineares consistem em um pistão dentro de um cilindro oco, onde a pressão do ar gera uma força que move o pistão.

Dentre os atuadores lineares encontram-se os de simples ação e os de dupla ação. Atuadores de ações simples têm uma única porta de entrada de ar comprimido, atuando apenas em único sentido, onde o retorno à posição inicial se dá por ação de uma mola interna ou por uma força externa agindo no cilindro. São ideais para ações em uma única direção como levantar ou pressionar um objeto. A Figura 5 ilustra o um atuador linear de simples ação.

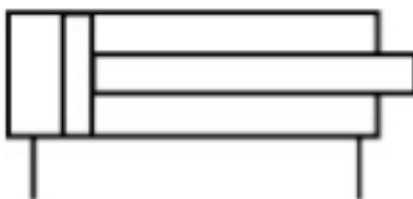
Figura 5- Atuador pneumático linear de simples ação



Fonte: Fialho (2011).

Já os atuadores de ação dupla possuem duas entradas de ar comprimido localizados nas suas extremidades possibilitando mover o pistão para frente e para trás com a pressão de ar, geralmente são controlados por uma válvula direcional. A Figura 6 ilustra o um atuador linear de dupla ação. (FIALHO,2011).

Figura 6- Atuador pneumático linear de dupla ação



Fonte: Fialho (2011)

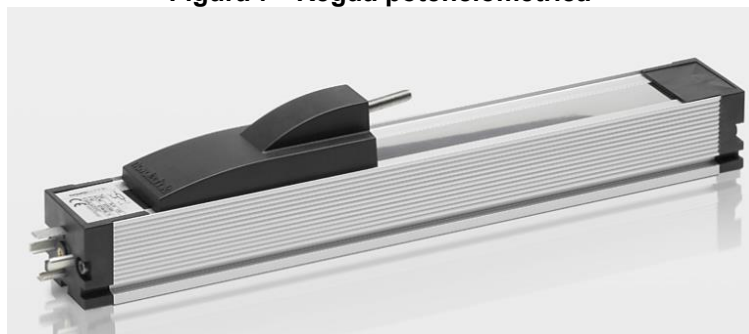
2.2 Sensores

2.2.1 Régua potenciométrica

Réguas potenciométricas também conhecidas como transdutores lineares resistivos, utilizam a tecnologia resistiva para detecção da posição linear de um curso ou haste, ou seja, a posição é detectada através da variação da resistência elétrica interna.

As réguas potenciométricas [...] são utilizadas em máquinas de diversos tipos, como por exemplo injetoras de plástico, robôs industriais, controle de abertura de válvulas, indústria em geral e diversas outras aplicações. [...] (NOVOTECHNIK, 2021). A Figura 7 ilustra uma régua potenciométrica da fabricante Novotechnik.

Figura 7 - Régua potenciométrica



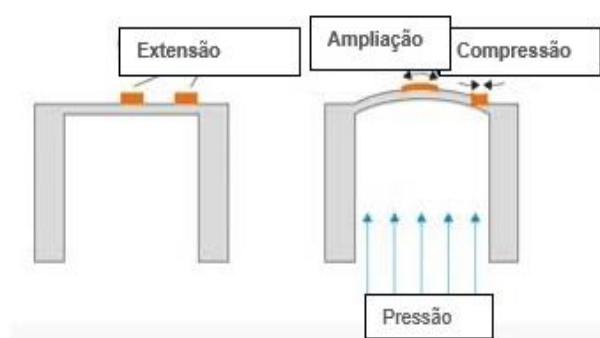
Fonte: Novotechnik (2021)

2.2.2 Sensores de pressão

Os sensores, transmissores ou transdutores de pressão são equipamentos que convertem o valor da pressão mecânica em um sinal elétrico proporcional. O sensor de pressão normalmente é composto por um corpo principal estável e um diafragma. O diafragma é o elemento mais importante para a medição de pressão e é equipado com estruturas de resistência sensíveis à tração e à compressão. Os sensores de pressão podem ser resistivos, capacitivos, piezo resistivos ou piezoelétricos.

Os sensores utilizados são sensores piezo resistivos, nos quais são muito semelhantes aos sensores resistivos. Os sensores piezo resistivos utilizam semicondutores juntamente ao diafragma que de acordo com a tração ou contração do diafragma modifica o sinal elétrico proporcionalmente, conforme a Figura 8. Esses semicondutores normalmente têm uma resistividade de 10 a 100 vezes maior que um metal que compõe os sensores resistivos, fazendo do piezoresistivo muito mais preciso e sensível às pressões muito baixas também. (MARQUES, 2020).

Figura 8 - Funcionamento de um sensor de pressão



Fonte: Marques (2020).

2.3 Sistemas de controle

Sistemas de controle atuam na regulação de um processo de forma que possibilite a automatização do sistema. De forma geral, o sistema deve agir de forma independente ao identificar erros e perturbações, conforme a Figura 9 mostra.

Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema de controle



Fonte: Klug (2019).

Existem diversos tipos de sistemas de controle, e, por isso, para cada processo, pode-se optar por utilizar um sistema de controle dentre uma vasta gama de escolhas, cabendo ao responsável decidir qual a melhor opção, para cada aplicação.

2.3.1 PID - *Proportional Integral Derivative*

O sistema de controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o método mais utilizado na área industrial, seguindo uma tendência mundial para a execução de sistemas de controle de processos industriais.

A grande utilização de sistemas de controle PID pode ser relacionada em parte ao seu ótimo desempenho em variadas condições de funcionamento, e em parte à sua simplicidade funcional, que permite sua manipulação de uma forma simples e direta. Seu uso, em particular, é adotado quando o modelo matemático que descreve o funcionamento da planta do sistema é desconhecido.

Como o nome sugere, o algoritmo do sistema de controle PID é composto por três coeficientes: proporcional, integral e derivativo, que são ajustados separadamente para obter a resposta desejada (OGATA, 2010).

2.3.2 Fuzzy

Os sistemas de controle Fuzzy utilizam a lógica nebulosa em conjunto com as técnicas de análise e inferências de inteligência artificial. De forma geral, a lógica nebulosa substitui variáveis numéricas por variáveis linguísticas relacionadas a conceitos peculiares à linguagem humana como pequeno, grande, quente, frio, perto, longe. Esses conjuntos admitem que uma variável pertença “um pouco” a ele. Sendo esse valor variando entre zero e um. Quanto mais próximo de 0 “menos pertence” a uma categoria.

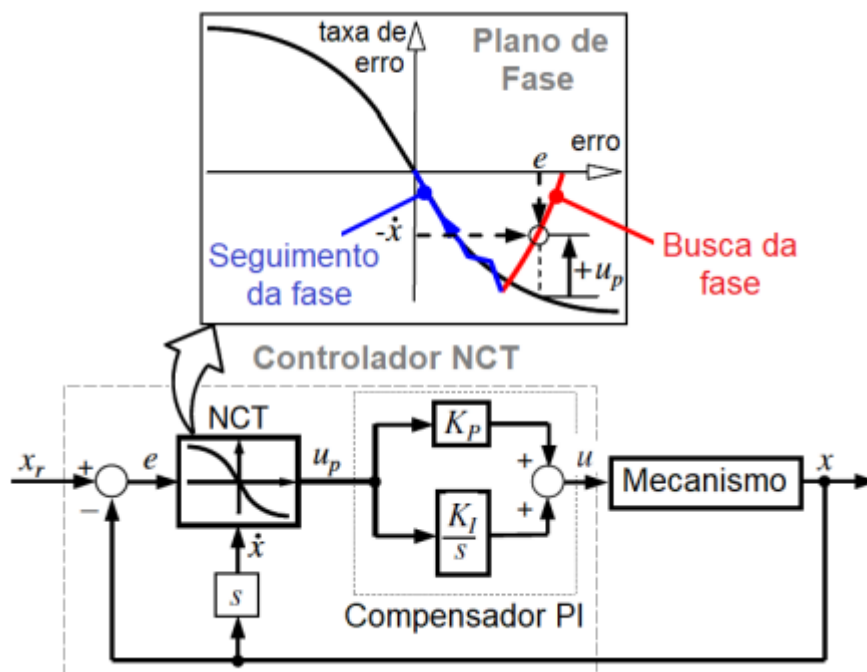
Para os controladores obterem um resultado satisfatório, é preciso que sejam desenvolvidos de forma personalizada para cada aplicação. Por consequência esse tipo de controlador se torna muito custoso, muitas vezes não justificando seu uso. Atualmente é possível encontrar blocos de controle fuzzy genéricos e simplificados, integrados aos seus sistemas de controle, visando substituir o PID em casos de processos não lineares. (TECHPLUS, 2017).

2.3.3 NCTF - *Nominal Characteristic Trajectory Following*

O sistema de controle *Nominal Characteristic Trajectory Following* (NCTF) é um controlador prático para sistemas de posicionamento ponto a ponto, ou contínuo, caracterizado por alta robustez a variações de parâmetros e alto desempenho de posicionamento.

Como pode-se observar na Figura 10, o controlador NCTF é composto por uma Trajetória Característica Nominal, conhecida como NCT e um compensador PI. O objetivo do compensador PI é fazer com que o movimento do mecanismo siga a NCT, terminando na origem do plano de fase. A saída da NCT é um sinal (up) determinado pela diferença entre a taxa de erro real de mecanismo ($-\dot{x}$) e a taxa de erro da NCT. No plano de fase, o movimento é dividido em duas etapas: a busca da fase e o seguimento da fase. Durante a busca da fase, o compensador controla o movimento do sistema para alcançar a NCT. No seguimento da fase, o compensador PI causa um movimento no mecanismo para seguir a NCT, levando-o de volta à origem do plano de fase. (MAEDA, 2007).

Figura 10 - Estrutura de controle NCTF



Fonte: Tiba (2021).

2.4 Controladores

Para poder executar os sistemas de controle apresentados (PID, Fuzzy, NCTF), é necessário fazer a implementação destes em algum tipo de controlador. Entre os controladores mais utilizados no meio acadêmico estão o Arduino, a Raspberry Pi, o controlador lógico programável, conhecido como CLP e o controlador industrial. Nas seções seguintes será comentado um pouco sobre cada um deles.

2.4.1 Arduino

O Arduino é um pequeno computador utilizado para programar e realizar ações utilizando a linguagem de programação, juntamente com a IDE da empresa. A linguagem de programação Arduino é de modo geral baseado na linguagem C. Com o arduino é possível desde piscar uma luz até realizar funções complexas de sistemas robóticos. (MCROBERTS. 2011).

O Arduino contém diversos modelos, como Uno, Mega, Mini entre outros. A utilização de cada modelo depende da sua aplicação. O Arduino Uno é o modelo

mais utilizado devido à boa relação custo-benefício e suas características seguem conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Especificações técnicas do Arduino Uno

Características Arduino Uno
Microcontrolador ATmega328P;
14 entradas e saídas digitais;
6 entradas analógicas;
32Kb de memória para armazenamento;
2Kb de memória RAM;
Operação em 5V;
Alimentação entre 7 e 12V.

Fonte: Adaptado de Arduino, [entre 2005 e 2022].

2.4.2 Raspberry

De acordo com o site da fabricante, a Raspberry Pi é um computador pequeno, forte e poderoso. Pode ser utilizado desde grandes indústrias com aplicações complexas até aulas de programação para crianças. Contém todos os recursos de um computador, como: conectividade sem fio à internet, portas HDMI e USB, além de boa memória RAM e poder de processamento. (MONK, 2016).

Assim como o arduino, a Raspberry contém diversos modelos, sendo a Raspberry Pi 4 um dos mais vendidos, contendo as especificações contidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características Raspberry

Características Raspberry Pi 4
Processador <i>Broadcom 2711 Quad-core</i> Cortex-A72 64bits 1,5 GHz
8Gb de memória RAM
Placa de rede wifi 2,4 GHz / 5,0 GHz
Bluetooth 5.0
4 portas USB
GPIO com 40 pinos
2 portas micro HDMI
Interface para <i>display</i>
Interface para câmera
Conector p2 para saída d áudio e vídeo
Slot para cartão micro SD
Alimentação 5V

Fonte: Adaptado de Raspberry Pi, [entre 2008 e 2022].

2.4.3 CLP Controlador lógico programável

De acordo com diversos portais, a ABNT define o CLP, ou controlador lógico programável, como um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais. (DJP AUTOMAÇÃO, 2020).

Os CLP's são considerados a evolução dos antigos painéis elétricos, por ter uma lógica fixa era impraticável realizar qualquer mudança ao projeto original já implementado. A tecnologia dos CLP's só foi possível graças aos Circuitos Integrados e da evolução da lógica digital.

Os CLP's estão em constante expansão na área de controle de processos e/ou automação industrial. Normalmente esse tipo de controlador utiliza as informações dos sensores e através de memórias e lógicas combinacionais é definido os estados das saídas.

Os CLP's tem comunicação através de canais seriais ou através de protocolos de rede, fazendo assim com que tenha controle das entradas e saídas de forma remota, através de sistemas supervisórios.

2.5 Bancadas pneumáticas para controle de posição

Este tópico cita os trabalhos, que foram usados como base e inspiração para realizar esse projeto.

As principais dissertações e/ou artigos que serviram de inspiração para o desenvolvimento deste projeto, foram aqueles que utilizaram as bancadas do Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos da UFSC, LASHIP. Como por exemplo a tese de Endler (2014) que utiliza as bancadas deste laboratório, pois suas bancadas são completas e os estudantes conseguem desenvolver vários tipos de sistemas hidráulicos e/ou pneumáticos. A bancada denominada IBYTU tem um projeto (mecânico, hidráulico, pneumático e elétrico) que permite a realização de quatro tipos de ensaios diferentes, tendo uma grande gama de possibilidades.

Esta bancada foi desenvolvida para otimizar a área de trabalho, permitindo um melhor aproveitamento durante os ensaios, e suas principais características são: modularidade dos componentes pneumáticos como válvulas e cilindros, reservatórios de ar com grande capacidade, unidade de potência e atuador hidráulico para aplicação de forças externas e sistema de aquisição de dados (VIGOLO, 2018).

Além das teses e dissertações envolvendo a bancada IBYTU, é possível encontrar diversos projetos de automação pneumática e hidráulica, como por exemplo, uma linha de produção de portas automotivas, desenvolvido por Silva (2017).

Endler (2014) dividiu o seu sistema em quatro partes. Em sistema pneumático, sistema de medição, sistema hidráulico de carregamento e sistema de aquisição de dados.

Assim como Endler (2014), Silva (2017) dividiu os equipamentos utilizados para montagem de sua bancada em quatro partes, porém com algumas diferenças. Foi abordado da seguinte maneira: componentes pneumáticos e eletropneumáticos, componentes hidráulicos e eletrohidráulicos, eletrônicos & elétricos e *softwares*. Por entender que foi montada a simulação de uma linha de montagem, muitos dos componentes hidráulicos e elétricos não seriam de tanto proveito, ou seja, não são encontrados os componentes utilizados.

Com o levantamento de componentes contidos nas bancadas IBYTU e na utilizada por SILVA (2017), foi possível visualizar e compreender os componentes básicos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Além dos trabalhos desenvolvidos na UFSC, foi usado de inspiração uma monografia do IFSC, desenvolvido por TIBA (2021): Bancada de testes pneumáticos para sistemas de controle NCTF.

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende-se facilitar o estudo e aprendizado dos estudantes do IFSC em relação a essas tecnologias.

3 BANCADA PNEUMÁTICA PARA CONTROLE DE POSIÇÃO

A utilização de sistemas pneumáticos aliados a técnicas de controle tende a crescer cada vez mais. O controle da tecnologia pneumática é de grande importância, devido a sua grande utilização na indústria. Através das bancadas estudadas, foi possível compreender o funcionamento de bancadas pneumáticas. Isso faz com que seja explorado no meio acadêmico a utilização destas duas áreas. Nos tópicos seguintes será tratado sobre a montagem de uma bancada para realização de testes de controle.

3.1 Descrição da bancada

Com o estudo já feito de bancadas pneumáticas para sistemas de controle, levantou-se os componentes mínimos necessários, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Lista de componentes bancadas de controle

Lista de Componentes de Bancadas de Controle	
Componente	Tipo de Equipamento
Cilindro pneumáticos	Pneumático
Válvula direcional proporcional	Eletropneumático
Transdutor de posição	Elétrico
Transdutores de pressão	Eletropneumático
Unidade de filtragem	Pneumático
Válvula reguladora de pressão	Pneumático
Sistema de Controle	Elétrico/Eletrônico
Fontes de alimentação para os sensores	Eletrônico

Fonte: Elaboração própria (2022).

Antes de iniciar o presente trabalho já havia uma estrutura de um projeto de controle de bancada pneumática, através de um controlador PID desenvolvido pela FESTO. Por utilizar esse controlador, a estrutura continha limitações por não poder utilizar outras técnicas de controle. Entretanto, comparando os componentes nas quais foram julgados necessários, foi possível reaproveitar a maioria dos componentes. Desta forma, foi necessário incluir alguns sensores e desenvolver um módulo de integração para substituir o controlador da FESTO. A tabela 4 mostra quais componentes estavam disponíveis para a nova proposta da bancada.

Tabela 4 - Componentes disponibilizados no laboratório

Quantidade	Componente	Foto
1	Atuador linear de dupla ação	
1	Régua potenciométrica	

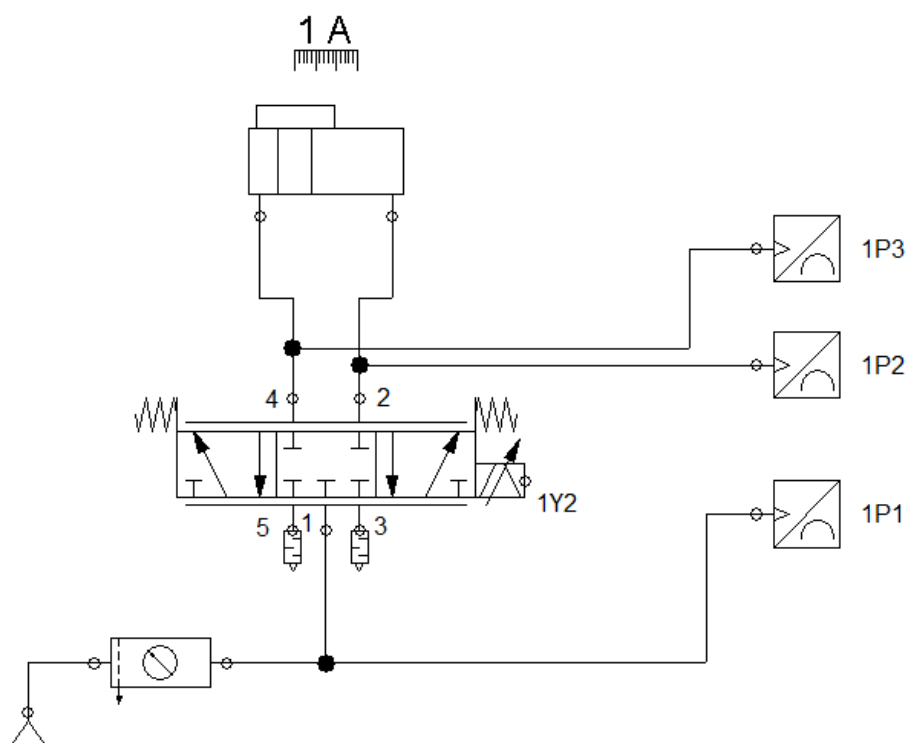
1	Válvula direcional proporcional de 5/3 vias	
2	Sensores de pressão piezo resistivo de 24V	
1	Sensor de pressão de 5V	
1	Filtro coalescente	
1	Fonte 5V	
1	Fonte de 24v	
1	Regulador de Pressão	

Fonte: Elaboração própria (2022).

De forma geral, uma bancada pneumática necessita da entrada de ar comprimido onde possa ser regulada a pressão. Essa regulação é feita através de uma válvula reguladora de pressão. Posteriormente, o ar passa pelo filtro coalescente.

Então é medida a pressão através de um sensor de pressão. Na saída do sensor é comandada a válvula na qual aciona o atuador. Este atuador é acoplado a um sistema de medição de posição, no caso uma régua potenciométrica. A Figura 11 ilustra o diagrama pneumático de funcionamento da bancada pneumática com os sensores de pressão 1P1, 1P2 e 1P3.

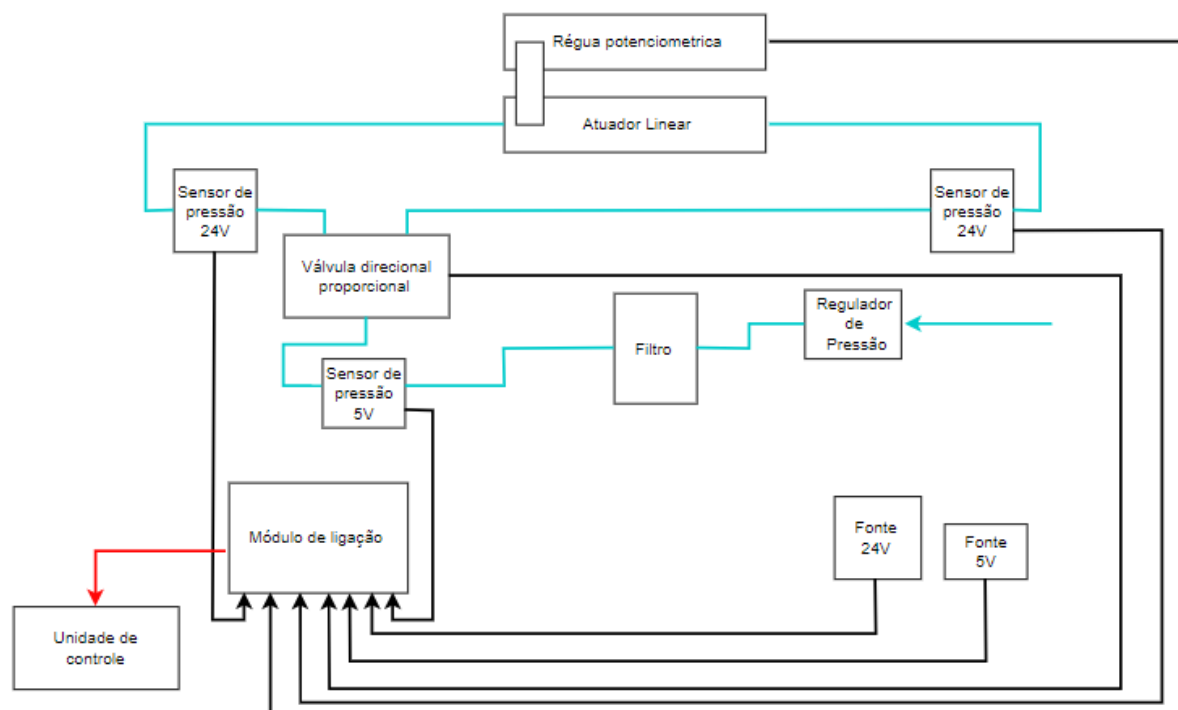
Figura 11 - Diagrama de funcionamento do sistema pneumático



Fonte: Elaboração própria (2022).

Para este sistema ser controlado, é necessário que os sensores através de sinais elétricos passem as informações a um controlador. Na Figura 12 é possível observar as ligações elétricas dos sensores com uma unidade de controle. Esta unidade pode ser algum controlador como CLP, arduino, Raspberry, computador, entre outros.

Figura 12 - Diagrama ligações elétrica e pneumática



Fonte: Elaboração própria (2022).

Foram realizados testes nos componentes da bancada para identificar a presença de falhas. Embora não tenha sido encontrado qualquer problema, a descrição dos testes é apresentada ao longo deste documento.

A válvula direcional proporcional é da fabricante *FESTO* e suas especificações estão contidos na Figura 13.

Figura 13 - Especificações técnicas da válvula proporcional

Especificações técnicas de eletricidade

Tensão de Alimentação	$V_b = 24 \text{ V DC} \pm 25\%$
Ondulação residual (ripple)	10% da tensão contínua conforme DIN 41 775 in V_s
Potência consumida	$P_{max} = 3,6 \text{ W}$ com 30 V DC e tempo de ativação de 100%
Valor do sinal de entrada	
– tensão	$V_{set} = 0 \dots 10 \text{ V DC}$
– corrente	$I_{set} = 4 \dots 20 \text{ mA}$
Sinal de saída proporcional ao real nível de pressão	
– tensão	$V_{act} = 0 \dots 10 \text{ V DC}$
– corrente	$I_{act} = 4 \dots 20 \text{ mA}$
Valor do sinal de entrada de um sensor de pressão externo	
– tensão	$V_{ext} = 0 \dots 10 \text{ V DC}$
– corrente	$I_{ext} = 4 \dots 20 \text{ mA}$
Alimentação para potenciômetro externo	$V = 10 \text{ V DC}$, recomendação $R = 4,7 \text{ k}\Omega$
Classe de proteção	IP 65 conforme DIN 40 050 com conector
Característica de segurança	Com a ruptura do cabo de alimentação, a pressão de saída será mantida sem regulagem.

Fonte: Festo (2001).

A régua potenciométrica utilizada é fabricada pela *Novotechnik* e tem os dados técnicos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações técnicas da régua potenciométrica série TLH

Elétrica, mecânica	
Tensão de operação permitida **	13 – 30 V DC
Resistência do potenciômetro	5 k Ω
Tolerância de resistência	± 20 %
Corrente do distribuído recomendado	≤ 1 μ A
Distância de trabalho elétrica eficaz	457 mm
Tensão de saída **	0 – 10 V DC
Temperatura ambiente de operação **	-30 – +100 °C
Máx. erro de linearidade	± 0.07 % FS*
Resolução e reprodutibilidade	≤ 0.01 mm
Polaridade segura**	yes
Resistência de isolamento (potenciômetro)	100 M Ω at 500 V; 0.1 bar
Rigidez dielétrica (potenciômetro)	500 Vms at 50 Hz; 1 min; 1 bar
Speed of adjustment	≤ 10 m/s
Aceleração durante o ajuste	≤ 200 m/s ²
Força de atuação (horizontal)	1 N
Máx. número de atuações	10 ⁸
Material (invólucro)	Alumínio
Peso	1000 g
Conexões	Cabo com plugues

Fonte: Novotechnik (2021) - Adaptado.

Foram utilizados no projeto 3 sensores piezo resistivos durante o projeto, sendo um da marca *SEED* e outros dois da *FESTO*. Na entrada 1 da válvula direcional está o sensor especificado na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas do sensor de pressão Seeed

Modelo	Sensor de 5V
Tensão de trabalho	5 +/- 0,5V DC
Corrente de trabalho	até 10 mA
Faixa de taxa de pressão de Trabalho	0 ~ 1,2 MPa
Máx. Pressão	2,4 MPa
Pressão destrutiva	3.0 MPa
Temperatura de trabalho	-20 a +/- 120°C
Tempo de resposta	até 2 ms
Grau de Proteção	IP 65
Ciclo de vida	1.000.000 unidades

Fonte: Seeed.(2018) - Adaptado.

Foi utilizado então o sensor *FESTO* de 0 a 10V conectado a saída 2 da válvula direcional proporcional. Este sensor está com as especificações técnicas na coluna SDE 10 – 10V / 20mA da tabela 7. Enquanto a saída ao lado esquerdo da válvula, chamada de saída 4 está sendo utilizado o sensor de 1 a 5V também da *FESTO*. O sensor posicionado na saída 4 também está com suas especificações técnicas na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações técnicas dos sensores de pressão Festo

Modelo	SDE 10 - 10V / 20mA	SDE 10 - 5V / 20mA
Médio	Ar comprimido, filtrado (lubrificado ou não lubrificado)	Ar comprimido, filtrado (lubrificado ou não lubrificado)
Faixa de medição de pressão	0 - 10 Bar	0 - 10 Bar
Pressão máxima	14 Bar	14 Bar
Tensão de alimentação	12 - 30V DC	12 - 30V DC

Tensão de Saída	0 - 10	1 - 5
Corrente de Saída	0 - 20 mA	4 - 20 mA
Erro linear	classe de precisão 1, +/- 0.5%	classe de precisão 1, +/- 0.5%
Faixa de frequência de medição	100Hz	100 Hz
Grau de proteção	IP 65	IP 65
Material	Alumínio	Alumínio
Peso	0.120Kg	0.120Kg
Faixa de Temperatura	0 a +85°C	0 a +85°C

Fonte: Festo, (2011) - Adaptado.

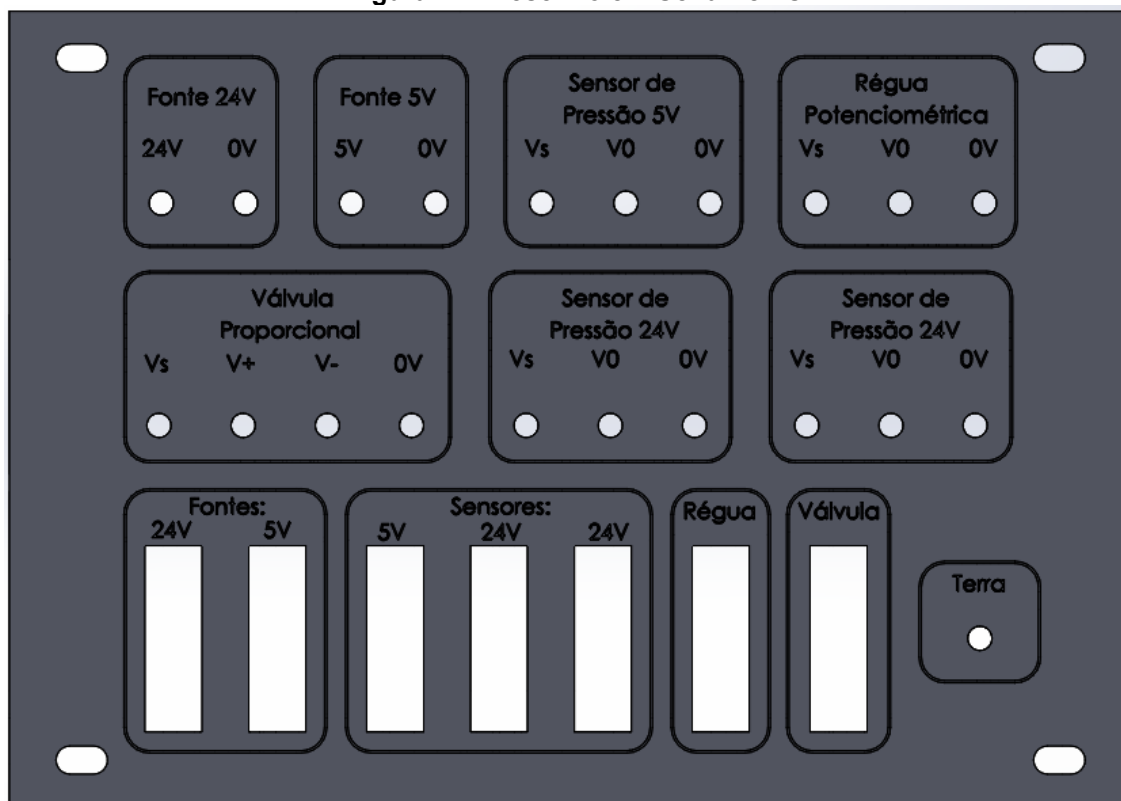
Além dos equipamentos descritos acima, foram utilizados, um regulador de pressão simples e um atuador linear de dupla ação com um curso de 200mm também da *FESTO*.

Com todos esses componentes faltava apenas um componente onde pudesse conectar diferentes controladores ao sistema pneumático. Desta forma, foi necessário desenvolver um módulo de integração desses sistemas, o qual será apresentado na próxima seção.

3.2 Desenvolvimento do módulo de integração

Este módulo foi pensado a fim de possibilitar a conexão de qualquer tipo de controlador. O projeto do módulo foi dividido em diversas partes, para que desta forma, apresentasse fácil visualização de onde seria o encaixe de cada componente. O *layout* do módulo foi desenvolvido no *software SolidWorks*, conforme está apresentado na Figura 14.

O módulo utilizou bornes de conexão e plugs fêmea, para realizar a conexão elétrica dos componentes. Na Tabela 8 é possível observar a quantidade necessária de cada um desses componentes.

Figura 14 - Desenho em *SolidWorks*

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 8 - Componentes necessários p/ compor o módulo de integração

Quantidade	Componente
14	Bornes de conexão
21	Plug Fêmea (pinos banana)

Fonte: Elaboração Própria (2022).

A placa que faz a interface do módulo foi feita em uma máquina de corte e gravação a laser no Laboratório de Máquinas Operatrizes (MOP), no Departamento Acadêmico de Metal Mecânica (DAMM) do IFSC. Com o desenho técnico desenvolvido, o módulo foi para a fabricação. O *software* utilizado para utilização na máquina a laser foi o *LaserDraw*. Um desafio foi encontrar os parâmetros corretos para que a gravação ficasse de forma legível. Chegou-se à conclusão de que o melhor material para realização do módulo seria o MDF. A Figura 15 ilustra a testagem dos parâmetros da máquina a laser no MDF.

Figura 15 - Testagem dos parâmetros da máquina a laser em MDF



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os principais parâmetros para a máquina a laser são potência e velocidade. Para obter o melhor acabamento foram definidos os valores de 8W e 10m/min. A Figura 16 mostra como ficou o acabamento com esses parâmetros e no fim, a Figura 17, ilustra o módulo após a finalização do corte a laser.

Figura 16 - Resultado da impressão a laser com os parâmetros definidos



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 17 - Módulo de integração impresso a laser



Fonte: Elaboração própria (2022).

Com o processo de fabricação do módulo finalizado, foram montados os componentes e o circuito elétrico. A Figura 18 ilustra como ficou o módulo ao final da montagem.

Figura 18 - Montagem do módulo de integração

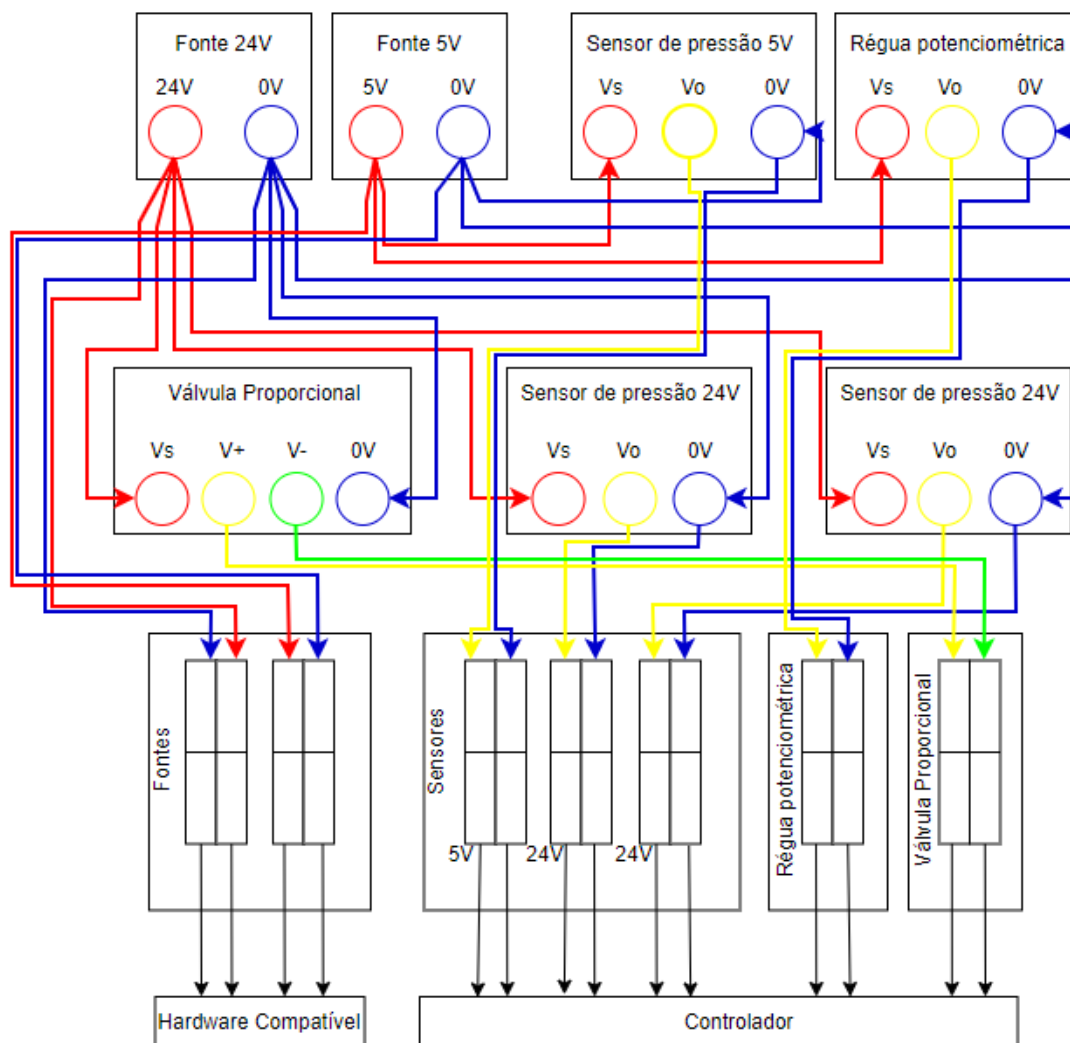


Fonte: Elaboração própria (2022).

As ligações elétricas foram feitas conforme a Figura 19, que ilustra a conexão dos componentes. Ao fim das ligações é possível observar que os sensores devem ser conectados ao controlador para o funcionamento do sistema. Ao lado da saída do circuito elétrico para o controlador, na parte esquerda inferior da Figura 19, existem 4 cabos (0V, 24V, 5V e 0V), os quais são destinados à utilização de controladores ou hardwares externos específicos, que necessitem desses valores de tensão.

Os bornes de conexão foram colocados no módulo afim de facilitar a conexão do controlador com o sistema pneumático. Estes bornes estão conectados internamente aos plugs fêmeas. Dessa maneira o usuário necessita conectar os componentes pneumáticos através dos pinos banana ao módulo e conectar o controlador nos fios que saem dos bornes.

Figura 19 - Diagrama das ligações elétricas do módulo



Fonte: Elaboração própria (2022).

As conexões externas necessárias são feitas seguindo um padrão de cor. Os cabos estão presos em grupos com identificação com os nomes dos componentes conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 – Tag dos cabos



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os cabos vermelhos são conectados nos pinos fêmeas vermelhos do módulo de integração. Os cabos azuis são conectados nos pinos fêmeas azuis do módulo. Assim como o cabo azul com uma fita amarela indicando que deve ser conectado ao plugue fêmea amarelo e o cabo azul com fita verde conectado ao plugue verde do módulo integrador. A Tabela 9 mostra de forma visual esse padrão de cores.

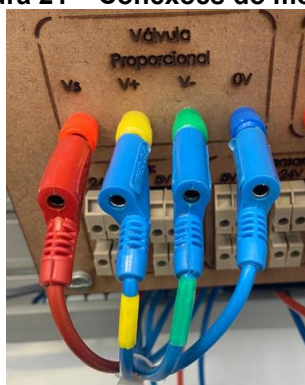
Tabela 9 – Padrão de conexões dos cabos banana

Cor do Cabo	Plugue Fêmea do Módulo
Vermelho	Vermelho
Azul	Azul
Azul com fita amarelo	Amarelo
Azul com fita verde	Verde

Fonte: Elaboração própria (2022).

A Figura 21 ilustra montagem feita conforme as instruções da Tabela 9.

Figura 21 – Conexões do módulo



Fonte: Elaboração própria (2022).

Com todas as conexões feitas, se iniciou a etapa de testes do módulo. Foi testado a continuidade de todos os cabos, e se havia conexão em curto. Após isso, foram feitas as calibrações dos componentes.

3.3 Estimativa de Erro dos componentes

Para poder ter confiabilidade no sistema pneumático, foi realizada uma comparação dos componentes com outros componentes disponíveis no laboratório. Esse passo é de suma importância para se obter o erro e a incerteza da bancada. Saber o erro máximo do sistema é importante para quem for desenvolver um controlador.

3.3.1 Régua potenciométrica

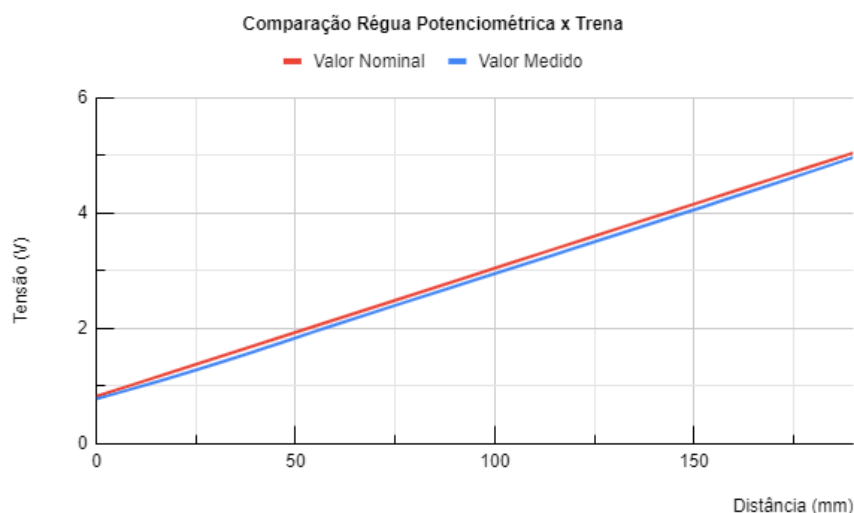
Uma trena foi posicionada de forma paralela na parte superior da régua potenciométrica. O procedimento de comparação foi realizado deslocando o "carro" até um ponto desejado, e por meio de um multímetro, fez-se a leitura daquela posição. Através do *Datasheet* foi calculado o valor nominal em tensão. Por ser um sensor linear esse cálculo foi simples, através de uma regra de 3. Foi feita a comparação em 11 pontos. Os resultados alcançados estão na Tabela 10 e na Figura 22 é mostrado graficamente o erro encontrado.

Tabela 10 – Estimativa de erro de uma régua potenciométrica
Comparação da Régua Potenciométrica com uma Trena

Ponto	Distância Nominal (mm)	Valor Nominal (V)	Média Valor Lido (6 leituras) (V)	Desvio Padrão	Erro (V)	Incerteza Tipo A (V)
1	0	0,822	0,779	0,002	- 0,043	0,00070
2	19	1,244	1,154	0,013	- 0,090	0,0053
3	38	1,667	1,563	0,084	- 0,104	0,034
4	57	2,089	1,998	0,012	- 0,091	0,0051
5	76	2,511	2,423	0,007	- 0,089	0,0028
6	95	2,933	2,839	0,019	- 0,094	0,0077
7	114	3,356	3,258	0,018	- 0,098	0,0072
8	133	3,778	3,677	0,013	- 0,101	0,0052
9	152	4,200	4,102	0,021	- 0,099	0,0086
10	171	4,622	4,528	0,017	- 0,094	0,0068
11	190	5,044	4,966	0,014	- 0,078	0,0058

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 22 – Estimativa de erro da régua potenciométrica



Fonte: Elaboração própria (2022).

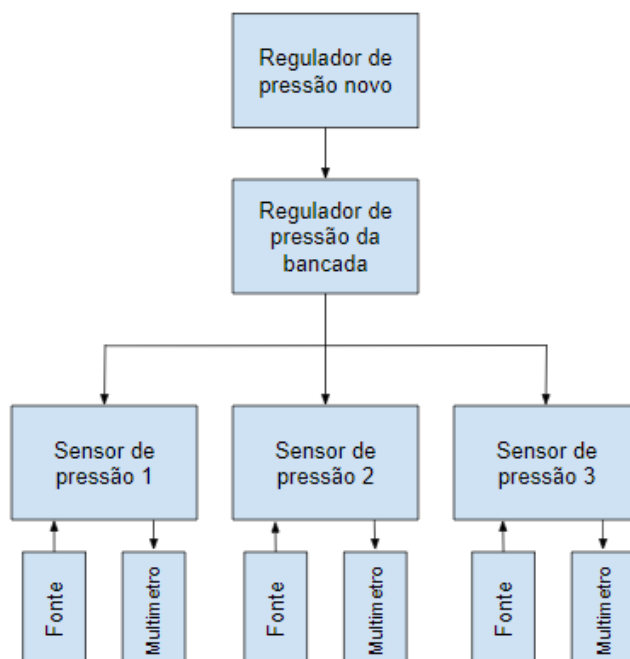
A comparação foi feita em 190mm, pois a régua potenciométrica tem um curso de 225mm, porém o início de curso do atuador está deslocado em 35mm em relação a régua potenciométrica.

Através de uma análise crítica é possível observar na Tabela 10 que no ponto 3, somando o erro com a incerteza é o pior ponto da régua potenciométrica. Logo, é possível assumir como a incerteza da régua potenciométrica como $E_{\max} = 0,138V$, ou $E_{\max} = 5,20 \text{ mm}$.

3.3.2 Sensores de pressão

O erro estimado dos sensores de pressão, foi feito entre os sensores de pressão e um regulador de pressão novo. A comparação foi feita de acordo com a Figura 23.

Figura 23 – Diagrama de funcionamento da estimativa de erro dos sensores de pressão



Fonte: Elaboração própria (2022).

Com o regulador de pressão novo, foi definido valores de pressão em bar. Em todos os pontos, em cada um dos sensores de pressão, foi realizada a leitura do

valor de tensão de saída através de um multímetro. Através do *Datasheet* de cada um dos sensores foi calculado o valor nominal em tensão. Por serem sensores de resposta linear esse cálculo foi realizado, através de uma regra de 3.

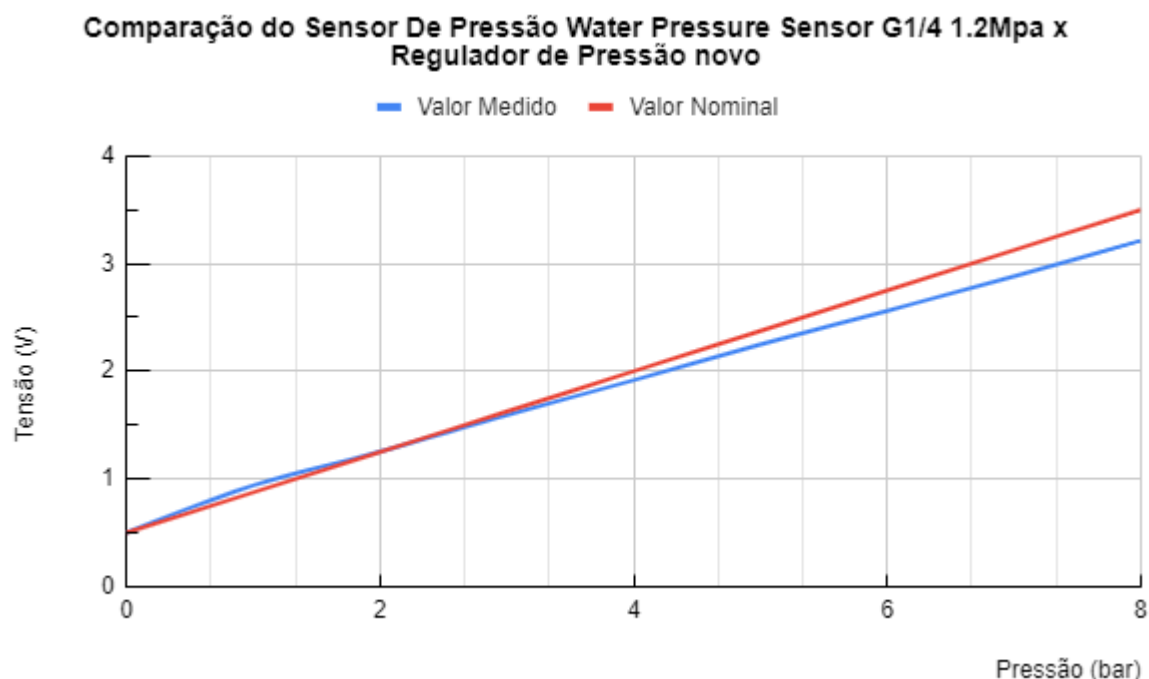
Para as medições do sensor de pressão da marca SEED, foi feita uma média de 6 leituras em 9 pontos diferentes. Na Tabela 11 e na Figura 24 é possível visualizar os resultados encontrados.

Tabela 11 – Resultado das medições do sensor de 5V

Medições do Sensor de Pressão Water Pressure Sensor G1/4 1.2 MPa						
Ponto	Pressão Nominal (bar)	Valor Nominal (V)	Média Valor Lido (6 leituras) (V)	Desvio Padrão	Erro (V)	Incerteza Tipo A (V)
1	0	0,500	0,501	0,015	0,001	0,0060
2	1	0,875	0,940	0,005	0,065	0,0019
3	2	1,250	1,254	0,007	0,003	0,0028
4	3	1,625	1,593	0,004	- 0,033	0,0017
5	4	2,000	1,916	0,020	- 0,084	0,0081
6	5	2,375	2,248	0,020	- 0,128	0,0083
7	6	2,750	2,562	0,010	- 0,189	0,0040
8	7	3,125	2,880	0,014	- 0,246	0,0058
9	8	3,500	3,214	0,021	- 0,287	0,0084

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 24 – Gráfico da comparação do sensor de pressão Seeed com o regulador de pressão novo



Fonte: Elaboração própria (2022).

É possível observar na Tabela 11 que o ponto 9 é o mais crítico. Somando o erro com a incerteza é possível assumir como o maior erro $E_{\max} = 0,2954V$, ou $E_{\max} = 0,3375 \text{ bar}$.

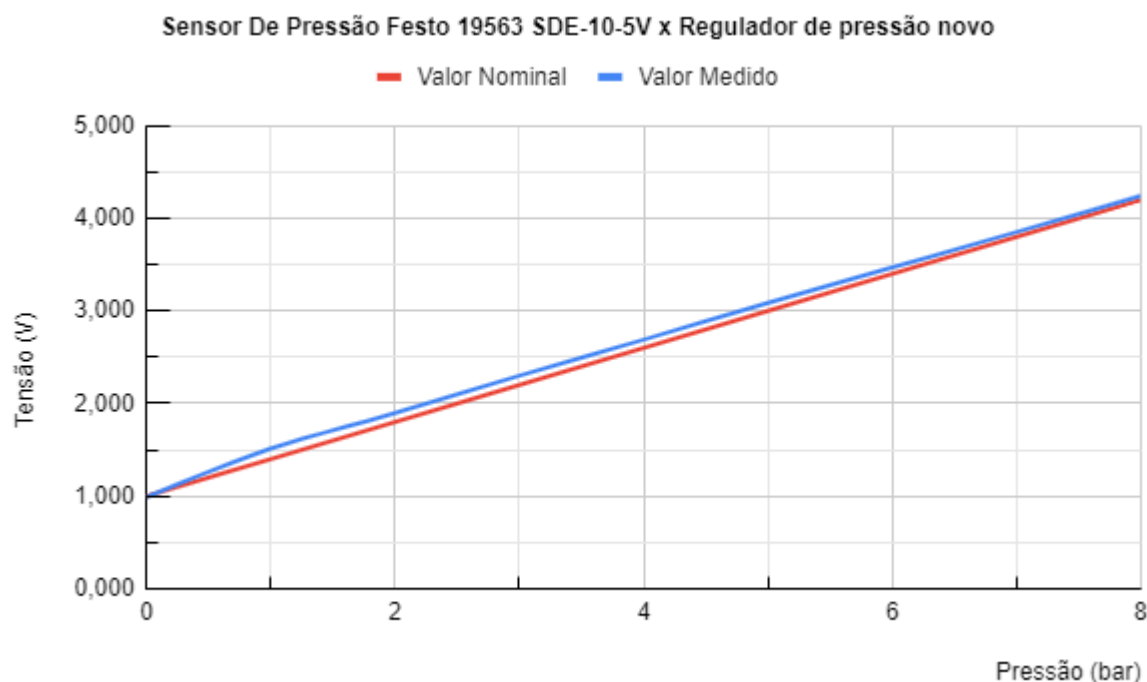
Os sensores da fabricante FESTO seguiram o mesmo procedimento de calibração do sensor da marca SEED. Foram realizadas 6 leituras, sendo 3 de forma crescente e 3 de forma decrescente. Na Tabela 14 e no gráfico na Figura 25 observa-se os resultados da calibração do sensor de 5V. É possível visualizar através da Tabela 12 o ponto crítico do sensor SDE – 10 – 5V. Este ponto crítico é encontrado somando o erro com a incerteza, podendo ser analisado e visto no ponto 2. Logo o erro máximo do sensor de pressão FESTO 5V é $E_{\max} = 0,1001V$, ou $E_{\max} = 0,0715 \text{ bar}$.

Tabela 12 – Resultado das Medições do Sensor de Pressão SDE 10 – 5V

Comparação Sensor de Pressão Festo 19563 SDE – 10 - 5V x Regulador de pressão novo						
Ponto	Pressão (bar)	Valor Nominal (V)	Média Valor Lido (6 leituras) (V)	Desvio Padrão	Erro (V)	Incerteza Tipo A (V)
1	0	1,0	0,989	0,016	- 0,011	0,0066
2	1	1,4	1,512	0,005	0,112	0,0022
3	2	1,8	1,896	0,007	0,095	0,0029
4	3	2,2	2,301	0,006	0,101	0,0026
5	4	2,6	2,690	0,023	0,089	0,0094
6	5	3,0	3,088	0,025	0,088	0,0102
7	6	3,4	3,469	0,011	0,069	0,0046
8	7	3,8	3,852	0,118	0,052	0,0481
9	8	4,2	4,243	0,106	0,042	0,0434

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 25 – Gráfico da comparação do sensor SDE 10-5V x regulador de pressão novo



Fonte: Elaboração própria (2022).

Assim como nos outros sensores, o sensor de 10V da fabricante FESTO, foi calibrado em paralelo com os outros dois. Através do multímetro foram coletados os dados do sensor e gerada a Tabela 13 e a partir dela foi gerado o gráfico da Figura 26.

Tabela 13 – Resultado das medições do sensor de pressão SDE 10- 10V

Calibração Sensor de Pressão Festo 19562 SDE – 10 - 10V						
Ponto	Distância Nominal (mm)	Valor Nominal (V)	Média Valor Lido (6 leituras) (V)	Desvio Padrão	Erro (V)	Incerteza Tipo A (V)
1	0	0,822	0,779	0,002	0,029	0,0050
2	1	1,244	1,154	0,013	0,275	0,0056
3	2	1,667	1,563	0,084	0,223	0,0064
4	3	2,089	1,998	0,012	0,241	0,0060
5	4	2,511	2,423	0,007	0,209	0,0232
6	5	2,933	2,839	0,019	0,227	0,0778
7	6	3,356	3,258	0,018	0,145	0,0110
8	7	3,778	3,677	0,013	0,125	0,0415
9	8	4,200	4,102	0,021	0,070	0,1109

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 26 – Gráfico da comparação do sensor SDE 10-10V com o regulador de pressão novo
 Gráfico da comparação do Sensor De Pressão Festo 19562 SDE-10-10V x Regulador de pressão novo



Fonte: Elaboração própria (2022).

Na análise dos pontos é possível observar que no ponto 2, é encontrado a maior soma do erro com a incerteza, sendo assim o pior ponto do sensor *FESTO* 10V. É possível assumir como erro máximo deste sensor os valores de $E_{max} = 0,2806V$, ou $E_{max} = 0,2256 \text{ bar}$.

Pode-se observar entre todos os sensores que o sensor *FESTO* de 5V é o de maior precisão, seguido pelo *FESTO* de 10V e o pior caso o sensor *SEED*. Porém conclui-se que o erro máximo encontrado não é muito alto, sendo possível utilizar o sistema com certa precisão.

3.3.3 Fontes de alimentação

Para saber se a tensão gerada pelas fontes de alimentação está sem ruído, foi realizada uma leitura através de um osciloscópio. Os resultados das fontes foram satisfatórios. A fonte de 5V apresentou um ruído baixo na terceira casa decimal, e a de 24V também apresentou ruído nesta ordem de grandeza. Então nenhuma fonte iria interferir em resultados na bancada. A Figura 27 ilustra um dos testes das fontes. Nesta figura é ilustrado o valor encontrado e o gráfico do sinal de corrente elétrica, medido através de um osciloscópio portátil durante o teste.

Figura 27 – Teste da fonte de 24V



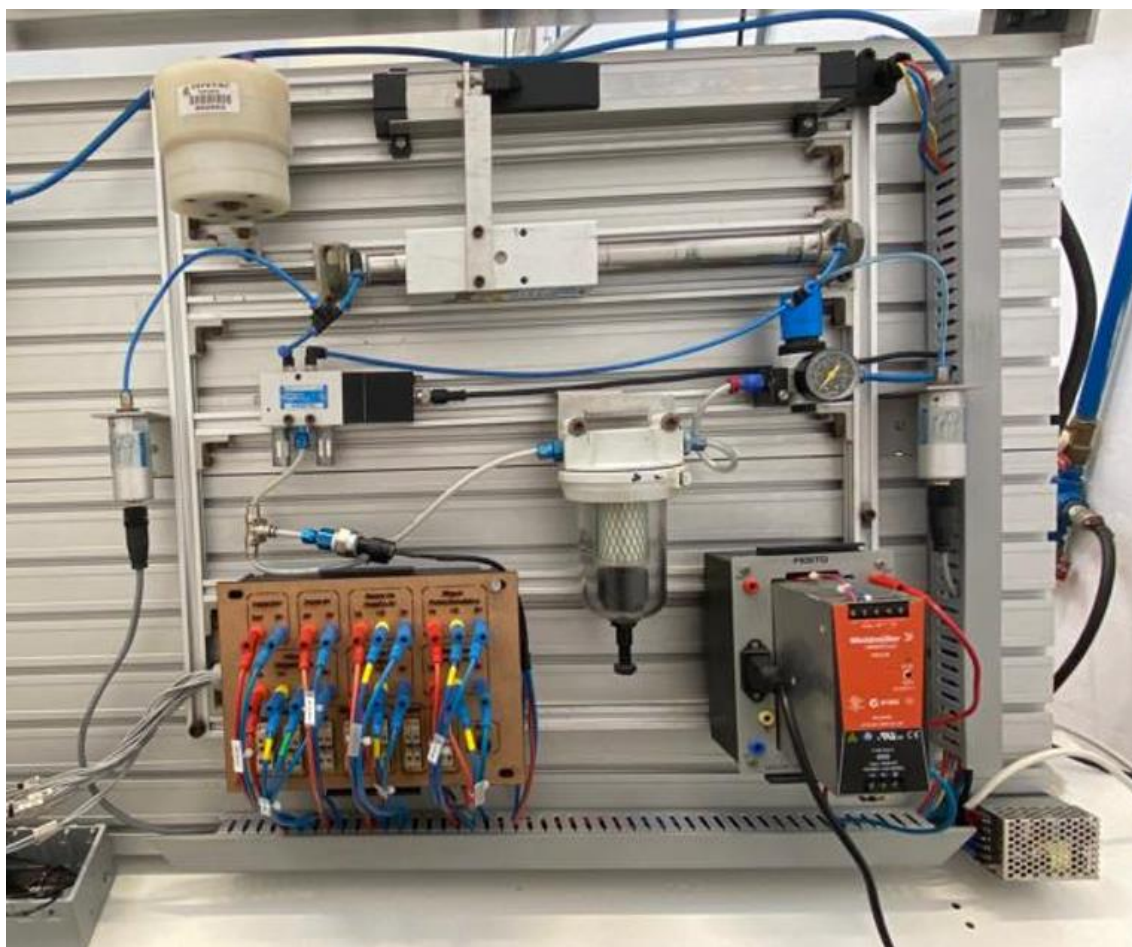
Fonte: Elaboração própria (2022).

3.4 Ensaios realizados na bancada

Com o desenvolvimento do módulo de integração foi realizada a montagem final da bancada composta de todos os componentes, como pode ser observado na Figura 28.

Basicamente os componentes eletropneumáticos são conectados ao módulo de integração, pela sua frente, através dos pinos banana. E na lateral do módulo são encaixados vários tipos de controladores, como um notebook, CLP, Arduino, *Raspberry*, entre outros. Paralelamente as ligações elétricas, as conexões pneumáticas são feitas de acordo com as Figuras 11 e 12 mencionada anteriormente.

Figura 28 - Montagem final da bancada pneumática para testes de controle

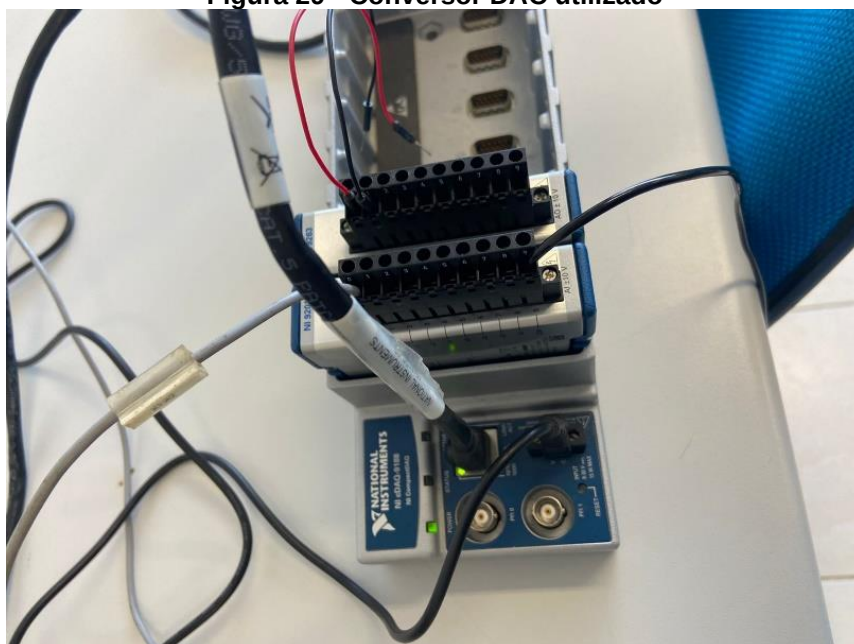


Fonte: Elaboração própria (2022).

Com a montagem finalizada, foram realizados dois ensaios diferentes. Um em Malha Aberta para analisar a zona morta da válvula e o tempo de resposta dos componentes da bancada, e outro em malha fechada com um controlador PID.

Para os testes foi disponibilizado um *software* desenvolvido pela plataforma *LabView*, onde foi criado um controlador PID. Através deste controlador foi possível realizar os testes mencionados. A conexão do notebook com a bancada foi feita através de um conversor DAC, como mostra a Figura 29.

Figura 29 - Conversor DAC utilizado



Fonte: Elaboração própria (2022).

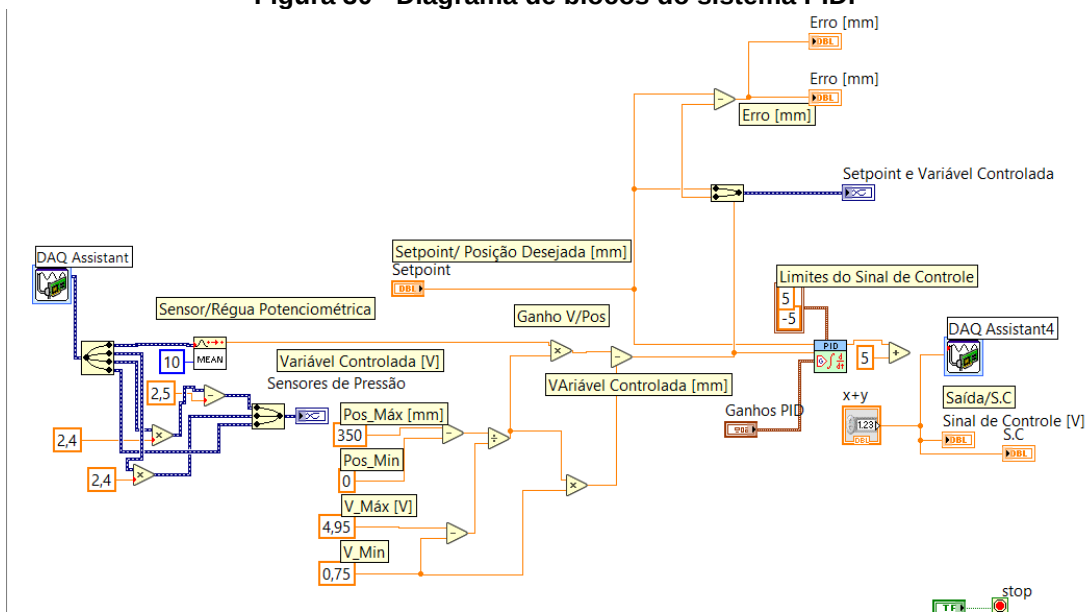
Para o teste em Malha aberta, foi desenvolvido o controlador a partir do diagrama de blocos da Figura 30. As entradas do sistema são:

- os valores dos sensores de pressão em tensão;
- o valor da régua potenciométrica em milímetros;
- o valor desejado ou o *setpoint* da distância que é a variável controlada do sistema.

Esse diagrama de blocos tem como saída o gráfico da comparação do *Setpoint* e variável controlada, gráfico dos sensores de pressão em tensão. É possível observar que o sistema está em malha aberta, pois não há conexão com os sinais de controle.

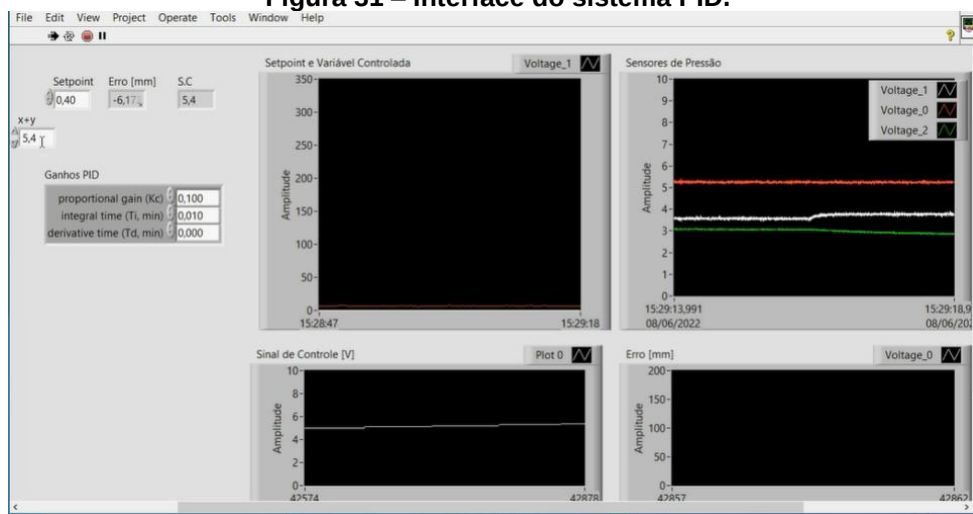
Através da interface, ilustrada na Figura 31, é possível informar o valor desejado de tensão da válvula direcional proporcional. Esta forma de entrada de dados, permite gerar um procedimento para identificar e visualizar a zona morta existente na válvula, nos dois sentidos. Tal procedimento é descrito logo a seguir.

Figura 30 - Diagrama de blocos do sistema PID.



Fonte: Mota (2022).

Figura 31 – Interface do sistema PID.



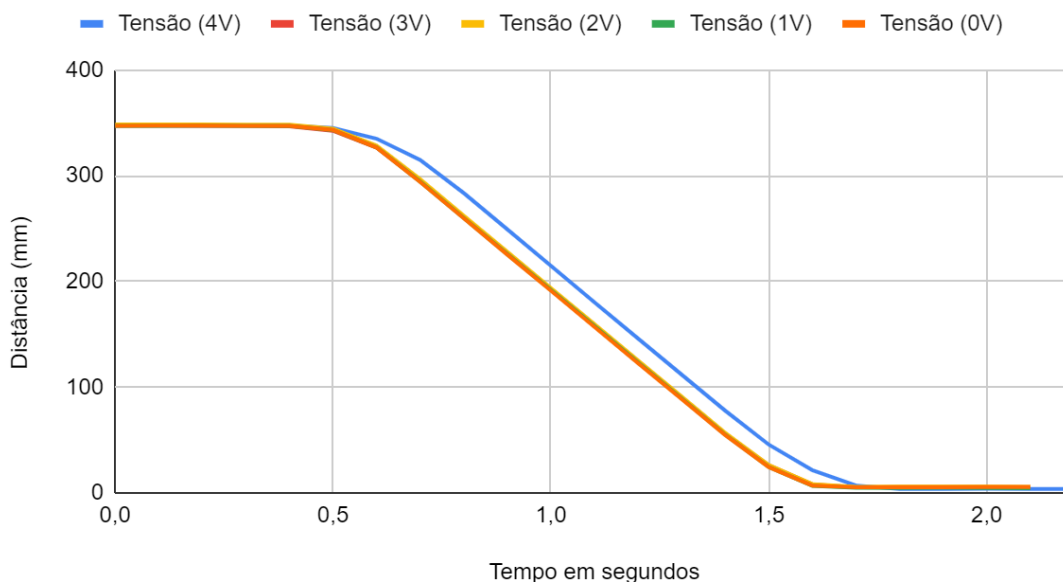
Fonte: Mota (2022).

Através da interface foram colocados valores de 5V a 0V e coletado os valores obtidos. Esses valores foram diminuídos de 0,1V em 0,1V até o momento que o atuador se movimentasse, verificando a existência da zona morta no cilindro para o lado esquerdo. Após a movimentação do atuador foi realizado o teste a cada 1V para analisar o tempo de resposta do sistema. Para encontrar a zona morta foi visto que quando aplicado o valor de 4,7V o cilindro começava a se movimentar, ou seja, zona morta para o lado esquerdo de 0,3V. Através do gráfico ilustrado na Figura 32 é

possível observar que se movimentou de 350mm a aproximadamente 0mm e para cada tensão aplicada, foi diminuindo o tempo de resposta da régua potenciométrica.

Figura 32 – Gráfico do tempo de resposta da válvula em descida

Gráfico do tempo de resposta da válvula direcional em descida

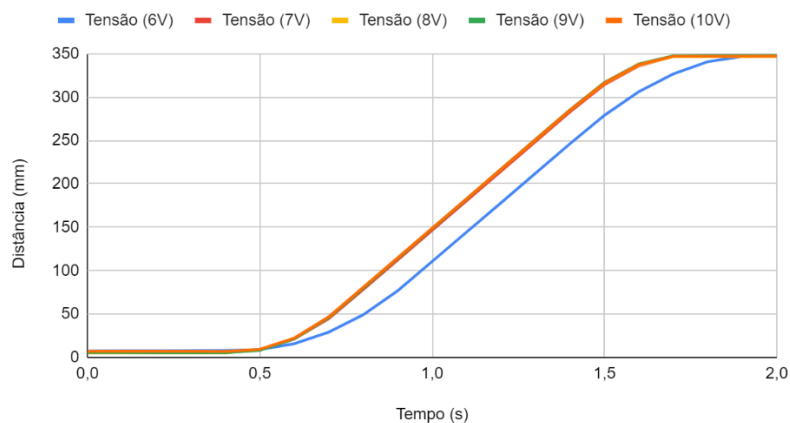


Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o lado direito, foi adotado o mesmo procedimento, porém os valores variaram de 5V a 10V. O cilindro se movimentou no valor de 5,5V, sendo assim o valor da zona morta para a direita foi de 0,5V. O tempo de resposta do atuador para a direita medido através da régua potenciométrica, está no gráfico ilustrado na Figura 33. O atuador se movimentou de 0 a 350mm com um tempo de resposta de no máximo 1,5s.

Figura 33 – Gráfico do tempo de resposta da válvula em subida

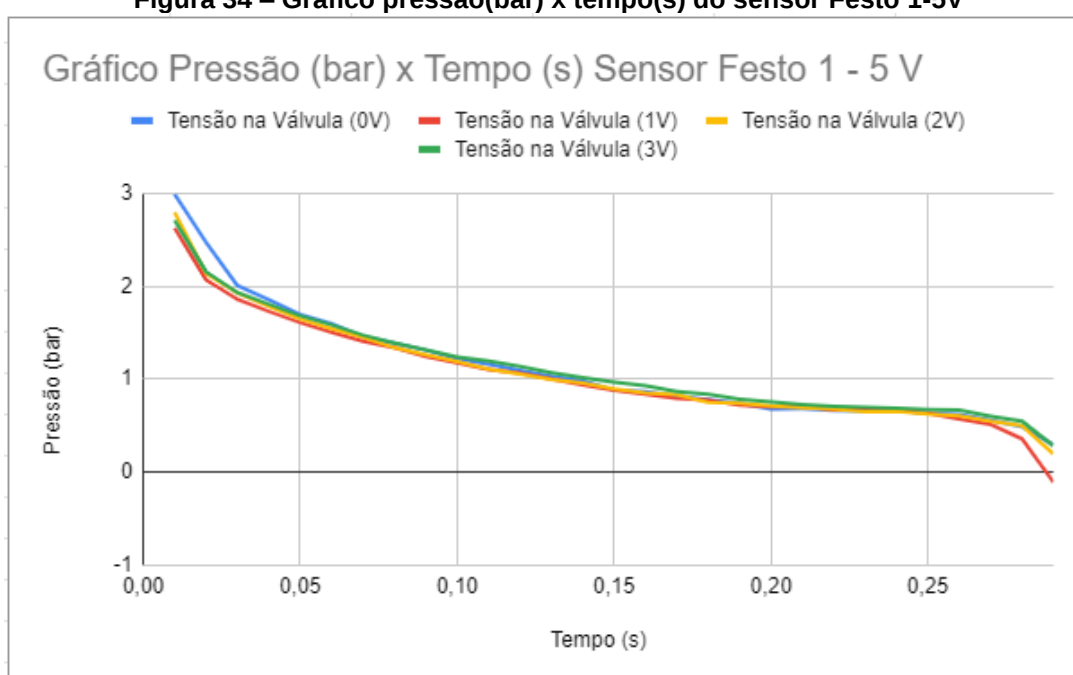
Gráfico do tempo de resposta da válvula direcional em subida



Fonte: Elaboração própria (2022).

Como mencionado anteriormente em paralelo ao teste de zona morta, além do teste do tempo de resposta da régua potenciométrica, foi observado o tempo de resposta dos sensores de pressão. É possível visualizar através do gráfico da Figura 34, o tempo de resposta para as tensões fora da zona morta no movimento de subida. Foi plotado o gráfico somente do sensor Festo 1 - 5V. É possível observar que para todas as tensões o sensor se comportou de maneira muito parecida, com um tempo de resposta próximo a 0,25s.

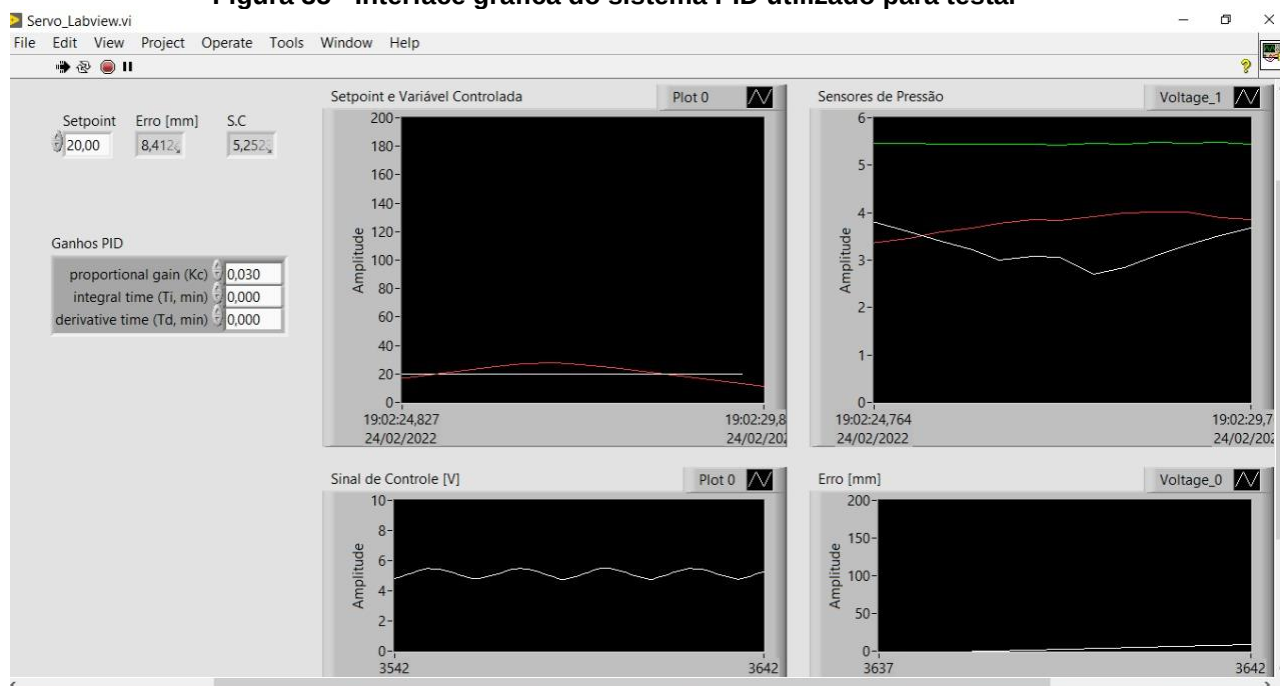
Figura 34 – Gráfico pressão(bar) x tempo(s) do sensor Festo 1-5V



Fonte: Elaboração própria (2022).

Após a verificação dos tempos de resposta e da zona morta da válvula foram realizados os testes em malha fechada. Através da interface gráfica vista na Figura 35, é possível informar ao sistema um valor de *Setpoint* e os ganhos PID. Podendo ser observado o comportamento do sistema através dos valores de Erro, da zona morta, mostrados no lado esquerdo da tela e dos gráficos contidos a direita. São visualizados quatro gráficos, onde o da esquerda acima é a comparação entre o *Setpoint* e o valor da variável controlada, no caso, a distância. O gráfico da direita acima é sobre os sensores de pressão sendo a linha verde o valor do sensor de entrada e as linhas branca e vermelha são dos valores dos sensores conectados às saídas da válvula proporcional. O gráfico da esquerda embaixo mostra o sinal de controle e, por fim, o último gráfico mostra o valor do Erro do sistema.

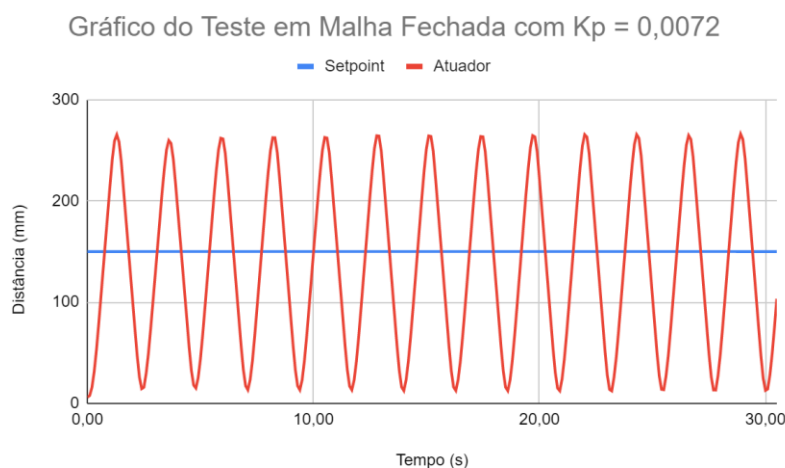
Figura 35 - Interface gráfica do sistema PID utilizado para testar



Fonte: Mota (2022).

Através da interface foi colocado o valor de *setpoint* de 150 mm, por ser o meio do curso do cilindro, utilizando valores para o ganho K_p com a finalidade de encontrar um momento que o sistema entrasse em oscilação crítica. Foi buscado que o sistema respondesse desta maneira para utilizar a teoria de Ziegler-Nichols. É encontrado esse parâmetro crítico aumentando de forma gradual o ganho K_p , até que o sistema oscile de forma constante, assim o controlador está no limite da estabilidade. (KAGUEYAMA, 2011). A Figura 36 ilustra a resposta do atuador para um valor de ganho, $K_p = 0,0072$.

Figura 36 – Gráfico teste em malha fechada com $K_p = 0,0072$



Fonte: Elaboração própria (2022).

De forma geral, o método Ziegler-Nichols através do ganho proporcional do sistema em oscilação crítica e do período da onda de resposta, é possível sintonizar os parâmetros de um controlador. A partir deste gráfico foi possível obter o valor do ganho e do período $T = 2,3s$ e $K_p = 0,0072$.

A partir desses dados é possível aplicar as equações desenvolvidas por Ziegler-Nichols e calcular os valores K_p , T_i e T_d para o controlador PID ideal, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Tabela Ziegler- Nichols

Controller Type	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_u$	0	0
PI	$0,45 K_u$	$P_u / 1,2$	-
PID	$0,6 K_u$	$P_u / 2$	$P_u / 8$

Fonte: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AEROSPACE ELECTRONICS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGY, (2015).

Através da Figura 37 acima, foram encontrados os valores para cada tipo de controlador: P, PI e PID.

Para o controlador P:

- $K_p = 0,0036$

Para o cálculo dos controladores PI e PID, utilizou-se o valor de P_u , também conhecido como período, em minutos. Foram encontrados os seguintes valores:

Para o controlador PI:

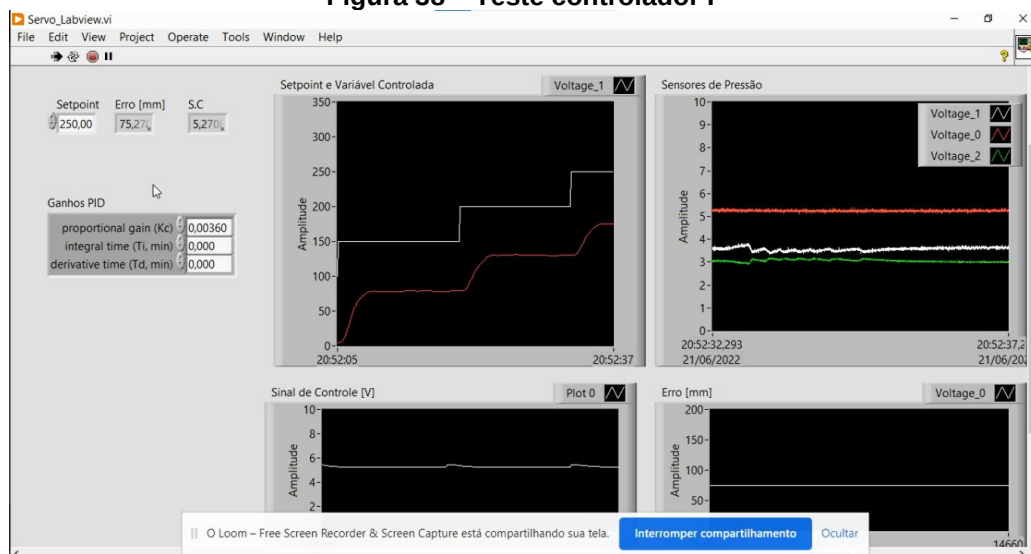
- $K_p = 0,00324$
- $T_i = 0,032$

Para o controlador PID:

- $K_p = 0,00432$
- $T_i = 0,0019$
- $T_d = 0,0048$

A partir dos valores acima foram realizados os testes dos controladores. Os testes para todos os controladores foram feitos enviando valores de *setpoint* de forma crescente de 50 em 50 mm. Na Figura 38, é possível observar a resposta do controlador P. Por conta da zona morta o controlador P somente se movimenta a partir de 150mm, com erros de mais de 70mm.

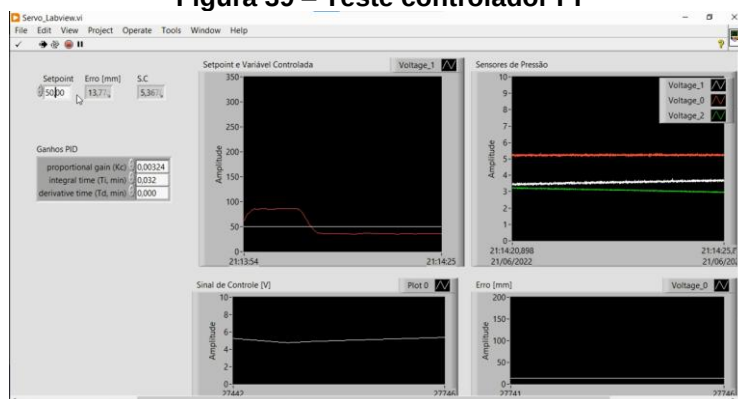
Figura 38 – Teste controlador P



Fonte: Mota (2022).

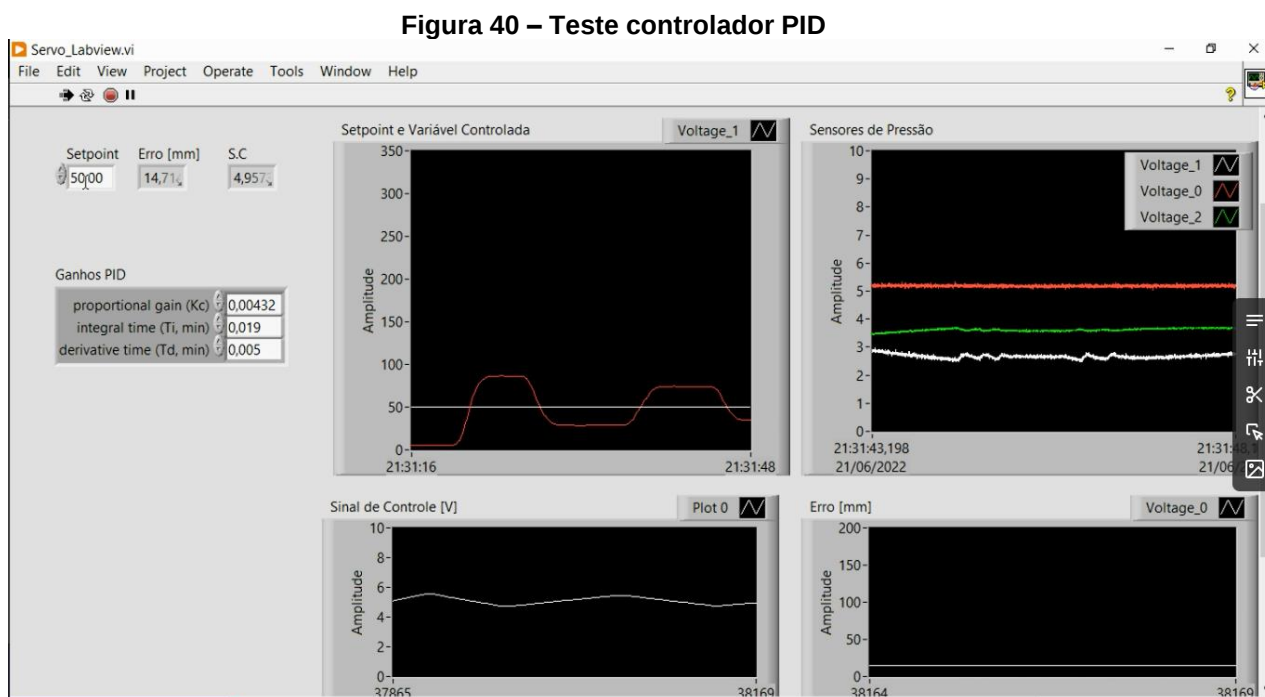
Para o controlador PI foi visto que o atuador se comportou de maneira esperada, oscilando até encontrar a estabilidade. A Figura 39 mostra a resposta do sistema enquanto o sistema ainda está oscilando sem encontrar sua estabilidade, por conta disso o valor observado na figura é diferente do erro máximo encontrado de $E_{max} = 15\text{mm}$.

Figura 39 – Teste controlador PI



Fonte: Mota (2022).

Por fim na Figura 40 é ilustrado a forma da resposta do controlador PID, ainda em oscilação. Assemelhou-se com o controlador PI, porém com um tempo de resposta menor. O erro máximo encontrado neste controlador em estabilidade também foi de $E_{max} = 15\text{mm}$. A figura apresenta outro valor, pois o sistema ainda estava entrando em estabilidade.



Fonte: Mota (2022).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise e discussão dos resultados

Foi possível observar na etapa de estimativa de erro dos componentes que os 3 sensores de pressão e o transdutor de posição tiveram um erro baixo em relação aos outros equipamentos, sendo possível ter uma boa confiabilidade nos resultados mostrados. A forma que o transdutor de posição foi calibrado não é a ideal devido a utilização da trena como instrumento de referência. Este tipo de instrumento não tem uma precisão muito boa, para garantir a confiabilidade. Caso fosse possível calibrar em uma máquina de medição por coordenadas, teríamos uma maior confiabilidade e assim, caso fosse necessário gerar uma tabela de “correção de erros”.

Com a bancada montada foi realizado os ensaios em malha aberta e malha fechada. Com o experimento em malha aberta foi detectado zona morta de 0,3V para o sentido decrescente e de 0,5V para o sentido crescente. Esses valores de zona morta são considerados um pouco elevados quando comparados a outros trabalhos. Nos testes de malha aberta foi possível também verificar o tempo de resposta dos sensores contidos no sistema. A régua potenciométrica teve um resultado muito veloz com tempo de resposta no máximo de 1,5s em uma situação em que a válvula tinha acabado de sair da zona morta.

Durante os testes, o sistema se comportou de forma esperada. É possível observar que se obteve integração do sistema de controle na qual absorveu dados dos sensores e foi possível transmitir os dados para o sistema pneumático. Porém foi observado que o valor de zona morta da válvula proporcional é demasiadamente alto para sistemas de controle tradicionais. Este comportamento pode ter sido causado por equipamentos mais antigos, perda de pressão em algum componente entre diversos outros possíveis problemas. Para uma tentativa de solução, seria realizar um sistema de controle, que calcule a velocidade e a aceleração do atuador.

Apesar desses problemas, o objetivo geral do trabalho foi atendido em montar uma bancada para testes de controle, pois na bancada é possível conectar vários tipos de controladores e verificar na prática o que ocorre.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visou a melhora na infraestrutura do laboratório de hidráulica e pneumática do IFSC, para facilitar e aprimorar o aprendizado na área de automação pneumática, que vem crescendo cada vez mais. Esta bancada é diferente da bancada anterior, que foi usada como base, por ser possível integrar um controlador e realizar os testes. Enquanto a outra não era possível realizar os testes de controle, ao máximo integrar um controlador PID da fabricante FESTO.

O grande diferencial da bancada montada durante este projeto é o módulo de integração por permitir que os controladores se comuniquem com a bancada pneumática. Além das fontes de tensão contidas na mesma.

A revisão bibliográfica foi de grande importância para analisar e entender os componentes necessários para o desenvolvimento de uma bancada. Além de compreender as conexões e como se comporta cada tipo de componente utilizado.

Os componentes básicos para a montagem de uma bancada foram bastantes discutidos através de bancadas já existentes. Utilizou-se como base as bancadas existentes no LASHIP, da UFSC, além de outros trabalhos que envolvem uma montagem de bancada. Através do que foi apurado, resultou em uma lista de componentes julgados como básicos para a montagem de uma bancada pneumática. A partir disso foi verificado a necessidade de compra e reaproveito de materiais do próprio instituto.

Cada componente julgado necessário passou por testes elétricos e pneumáticos para saber o estado de conservação e a necessidade de troca ou não de alguns equipamentos.

O desenvolvimento de um módulo que integrasse um controlador e um sistema pneumático se viu desafiador, por envolver a integração de componentes elétricos, eletrônicos e eletropneumáticos.

A calibração dos sensores para uma bancada se faz muito importante, para compreender os erros e incertezas do sistema. Entende-se que esta etapa da montagem é um dos mais importantes vistos que o controlador utiliza estes dados para atuar. Porém não foi possível realizar a calibração por falta de recursos do instituto, onde não foi possível obter padrões para realizar essas calibrações.

Foi utilizada a técnica de controle PID (implementada pelo professor Francisco Mota no *software LabView*), para realização dos testes e validação da bancada. Com os ensaios realizados foi possível observar que devido a zona morta alta, não é possível chegar ao *setpoint* desejado. Caso o sistema de controle utilizado fosse capaz de calcular a velocidade e aceleração a partir dos valores medidos de posição, seria possível realizar o controle avançado, devido a sua integração.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, mesmo com a ressalva da zona morta estar um pouco acima do esperado. Porém a bancada se mostra eficiente e com potencial a se tornar uma ferramenta bastante utilizada em um ambiente acadêmico que visa a busca do melhor aprendizado.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, a implementação de um motor com teste de velocidade, assim como a utilização de um atuador rotacional controlando o seu ângulo seria interessante, por poderem simular uma estação de trabalho na indústria. A implementação de sistemas de controle avançado como NCTF, utilizando a bancada montada, possivelmente trará resultados melhores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUÍNO. **Arduíno Uno Rev3**. [S. l.], [entre 2005 e 2022]. Disponível em: <http://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 30 mar. 2022.

AUTOMAÇÃO, DJP. **Pneumática industrial**: A pneumática está cada vez mais presente nas indústrias brasileiras. [S. l.], 12 maio 2020. Disponível em: <https://djpauto-macao.com/pneumatica-industrial-tudo-o-que-voce-precisa-saber/#:~:text=A%20pneum%C3%A1tica%20est%C3%A1%20cada%20vez%20mais%20presente%20nas%20ind%C3%BAstrias%20brasileiras.&text=A%20pneum%C3%A1tica%20%C3%A9%20uma%20%C3%A1rea,em%20m%C3%A1quinas%20e%20equipamentos%20industriais>. Acesso em: 12 fev. 2022.

BONACORSO, Nelso Gauze; NOLL, Valdir. **Automação Eletropneumática**. 12. ed. [S. l.]: Érica, 2018. 224 p.

CARMO, Paulo Francisco Do. **Proposta de Modelo Para Descrição da Vazão em Válvulas Direcionais Proporcionais, com Efeito de Vazamento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2003. Disponível em: http://laship.ufsc.br/site/wp-content/uploads/2003/05/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Carmo_2003.pdf. Acesso em: 4 abr. 2022.

CUNHA, Mauro A. B. - **Controle em Cascata de um Atuador Hidráulico: Contribuições Teóricas e Experimentais**. Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. UFSC, 2001. (Tese de Doutorado).

DE NEGRI, Victor Juliano. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e Controle**: PARTE I - Princípios gerais da hidráulica e pneumática. [S. l.: s. n.], 2001. Disponível em: <http://laship.ufsc.br/site/wp-content/uploads/2013/06/SistHPCon tAutP1.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

DJP AUTOMAÇÃO. **CLP (Controlador Lógico Programável) - Tudo o que você precisa saber**. [S. l.], 16 abr. 2020. Disponível em: <https://djpauto-macao.com/clp-controlador-logico-programavel/>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ENDLER, Luciano. **Uma solução para economia de ar comprimido em sistemas de controle de posição pneumáticos**. 2014. 224 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/130932/332240.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 mar. 2022.

FESTO. 14662121. **Válvulas Proporcionais**. Info 159. 2001. Disponível em: https://www.festo.com/cat/pt-br_br/data/doc_ptbr/PDF/PT/MPYE_PT.PDF. Acesso em: 02/03/22.

FESTO. **Pressure Sensor**. Type Sensor. 2011. Disponível em: <https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/44168/sde-.pdf>. Acesso em: 02/03/22.

FIALHO, Arivelto B. **Automação Pneumática** - Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos. Editora Saraiva, 2011. 9788536505176. Disponível em: <https://app.mnhabiblioteca.com.br/#/books/9788536505176/>. Acesso em: 20 fev. 2022.

FILTRO COALESCENTE. [S. l.], 7 maio 2018. Disponível em: <https://pneumaticsolucoes.com/filtro-coalescente-entenda/>. Acesso em: 19 fev. 2022.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON AEROSPACE ELECTRONICS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGY, 2015, Bali, Indonesia. **Optimizing Control based on Ant Colony Logic for Quadrotor Stabilization** [...]. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/300410730_Optimizing_control_based_on_ant_colony_logic_for_Quadrotor_stabilization. Acesso em: 6 jun. 2022.

JHP AUTOMAÇÃO (Brasil). **O que é pneumática? - Vamos definir**. [S. l.], [entre 2005 e 2022]. Disponível em: <https://www.jhpautomacao.com.br/o-que-e-pneumatica>. Acesso em: 14 mar. 2022.

KAGUEYAMA, Cintia Ayumi. **Sintonia do controlador PID: Método de Ziegler Nichols modificado**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, [S. l.], 2011. Disponível em: http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2011_CintiaAyumiKagueyama.pdf. Acesso em: 1 jun. 2022.

KLUG, Michael. **Sistemas de Controle - SIC**. [S. l.], 2019. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~michael.klug/SIC/control01.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MAEDA, G. J. **Practical Control of Lead screw Mechanism for Ultra-Precision Positioning**. Dissertação de Mestrado. Tokyo Institute of Technology, 2007.b

MARQUES, Samuel. **Como funciona um transmissor de pressão?**. [S. l.], 21 ago. 2020. Disponível em: <https://blog.wika.com.br/know-how/como-funciona-um-transmissor-de-pressao/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

MCROBERTS, Michael. **Arduíno Básico**. Primeira Edição. ed. [S. l.]: Novatec, 2011. 453 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/plugin-file.php/4287597/mod_resouce/content/2/Ardu%C3%ADno%20B%C3%A1sico%20-%20Michael%20McRoberts.pdf. Acesso em: 16 mar. 2022.

MONK, Simon. **Movimento, luz e som com Arduíno e Raspberry Pi**. [S. l.]: Novatec, 2016.

MOTA, F. R. M. **Diagrama de blocos: Controlador PID**. Florianópolis, 2022. Labview.

NOVOTECHNIK. Cardella Automation. **Régua Potenciométrica Novotechnik – Modelo TLH**. [S. l.], 6 jan. 2021. Disponível em: <https://novotechnik.ind.br/2021/01/06/regua-potenciometrica-novotechnik-modelo-tlh/>. Acesso em: 6 abr. 2022.

NOVOTECHNIK. **Position Transducers potentiometric up to 3000 mm**. 2021. Disponível em: https://novotechnik.ind.br/site/wp-content/uploads/2021/01/TLH_e.pdf. Acesso em: 02/03/22.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. [S. l.]: Pearson Universidades, 2010. 824 p.67

PEREIRA, Silvia Bruin. **Automação Pneumática**: Versátil, Atraente e Ainda de Baixo Custo. Revista Automação, 13 dez. 2018. Disponível em: <https://revista-automacao.com/news/15198-automa%C3%A7%C3%A3o-pneum%C3%A1tica-vers%C3%A1til,-atraente-e-ainda-de-baixo-custo>. Acesso em: 21 fev. 2022.

PNEUMÁTICA industrial: **Por que usar Pneumática para automação industrial?**. [S. l.], 1 jan. 2021. Disponível em: <https://www.mtibrasil.com.br/artigos/por-que-usar-pneumatica-na-automacao-industrial.php>. Acesso em: 12 fev. 2022.

POWER & MOTION. **BOOK 2, CHAPTER 14: Proportional control valves**. [S. l.], 7 jun. 2009. Disponível em: <https://www.powermotiontech.com/technologies/other-technologies/article/21884329/book-2-chapter-14-proportional-control-valves>. Acesso em: 1 abr. 2022.

PRUDENTE, Francesco. **Automação Industrial - Pneumática - Teoria e Aplicações**. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo GEN, 2013.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi 4**. [S. l.], [entre 2008 e 2022]. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. Acesso em: 7 abr. 2022.

RÉGUAS Potenciométricas Novotechnik. [S. l.]. Disponível em: <https://pneumaticsolucoes.com/filtro-coalescente-entenda/>. Acesso em: 20 fev. 2022.

SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Apostila Pneumática**. IFSC - Câmpus Araranguá, 22 jul. 2009. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/5/57/Pneumatica.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2022.

SANTOS, Eduardo Alves Portela. **Análise teórico experimental de um posicionador pneumático**. 1996. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 1996. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/158080/104622.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 mar. 2022.

SEED. **Water Pressure Sensor G1/4 1.2Mpa**. 2018. Disponível em: <https://www.seeedstudio.com/Water-Pressure-Sensor-G1-4-1-2MPa-p-2887.html>. Acesso em: 8 dez. 2021.

SILVA, Luiz Fávero e. **Projeto de automação pneumática e hidráulica de uma linha de produção simulada didática de portas automotivas**. 2017. TCC (Bacharel em Engenharia Automotiva) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2017. Disponível em: https://fga.unb.br/articles/0001/9097/Luiz_F_vero_e_Silva_-_TCC.pdf. Acesso em: 21 abr. 2022.

TAMESON. **Proportional Solenoid Valve: How They Work.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://tameson.com/proportional-solenoid-control-valve.html>. Acesso em: 6 abr. 2022.

TECHPLUS. **Técnicas de Controle Avançado.** [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.techplus.com.br/tecnicas-controle-avancado/>. Acesso em: 25 mar. 2022.

TIBA, Tatiane. **Controle De Um Servoposicionador Pneumático Utilizando A Técnica (NCTF) Nominal Characteristic Trajectory Following: Um Estudo de Simulação.** Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Instituto Federal de Santa Catarina. 2021.

VIGOLO, Vinícius. **Estudo Teórico-Experimental Para Auxílio No Dimensionamento De Sistemas De Atuação Pneumáticos.** 2018.