



**INSTITUTO
FEDERAL**
Pernambuco

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
PERNAMBUCO

Campus Caruaru

Graduação em Engenharia Mecânica

LUCAS DE MELO ARAÚJO

**ANÁLISE DO CONTROLE PID DE POSIÇÃO APLICADO A UM ROBÔ
CARTESIANO ELETROPNEUMÁTICO**

CARUARU

2021

LUCAS DE MELO ARAÚJO

**ANÁLISE DO CONTROLE PID DE POSIÇÃO APLICADO A UM ROBÔ
CARTESIANO ELETROPNEUMÁTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Alexander Patrick Chaves de Sena.

CARUARU

2021

A663a

Araújo, Lucas de Melo

Análise do controle PID de posição aplicado a um robô cartesiano eletropneumático/
Lucas de Melo Araújo; orientação de Alexander Patrick Chaves de Sena. – Caruaru,
2021.

64 f.

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Coordenação de
Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, 2021.

1. Robótica – Engenharia Mecânica. 2. Protótipo robótico – posicionamento XY. 3.
Controlador – PID – Proporcional integral derivativo. 4. Robô manipulador
eletropneumático. 5. Robô cartesiano – Controle de posição. 6. Método Ziegler-Nichols.
7. Válvula eletropneumática. 8. Cilindro pneumático. 9. Software – LabVIEW – Matlab
10. Engenharia Mecânica – IFPE. I. Sena, Alexander Patrick Chaves de. II. Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. III. Trabalho de Conclusão
de Curso. IV. Título.

CDD: 629.892

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor do universo e de toda criação, o qual incessantemente me deu disposição e força para concluir mais esta etapa da vida.

Ao meu pai, Valdeci Nascimento, que sempre me ajudou com seu apoio emocional e financeiro, me dando condições de concluir este curso da melhor forma possível.

A minha mãe, Tereza Catarina, por todo o cuidado comigo, se preocupando com os menores detalhes da minha vida e tentando me erguer sempre que me encontrava desanimado.

A minha fiel companheira Hithala Natasha que acompanhou boa parte da minha graduação e me acompanhou nos momentos difíceis, bem como dividiu junto a mim momentos de alegria.

A meus irmãos, Paulo Araújo e Alice Araújo, que também estiveram presentes em toda esta minha jornada.

Um agradecimento especial aos meus colegas de trabalho da Equipe Bajagreste que lutaram junto comigo, sempre buscando o crescimento pessoal e profissional com muita dedicação. Ao professor Diniz Junior pelo acompanhamento em todos os anos que fui participante desta equipe, sempre me aconselhando e ajudando como podia.

Ao meu orientador professor Alexander Patrick Chaves de Sena por toda paciência e dedicação em todas as dificuldades que tive neste trabalho.

Também a todos meus colegas de classe que guerrearam junto comigo nesta causa, onde nos unimos e conseguimos obter a vitória final.

A todos os professores e servidores do IFPE – Campus Caruaru que de alguma forma contribuíram para minha formação, serei eternamente grato.

ANÁLISE DO CONTROLE PID DE POSIÇÃO APLICADO A UM ROBÔ CARTESIANO ELETROPNEUMÁTICO

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para o posicionamento XY de um robô cartesiano eletropneumático, por meio de um método direto denominado Ziegler-Nichols, que permite o ajuste dos parâmetros do controlador sem a necessidade do conhecimento do modelo matemático do sistema. O conjunto é composto basicamente por três válvulas eletropneumáticas proporcionais e três cilindros pneumáticos, cada um com uma régua potenciométrica para realimentação do controlador em malha fechada. Para interface do computador com as válvulas e réguas potenciométricas foi utilizado o módulo de aquisição de dados NI USB-6289. O software LabVIEW[®] foi empregado para o desenvolvimento do controlador, e o Matlab[®] para analisar e apresentar os resultados experimentais. Sinais de referência do tipo degrau e imposição de distúrbios externos foram utilizados para a avaliação do desempenho do sistema para o controle de posição. Resultados experimentais apresentaram um erro máximo em regime permanente para o eixo X de 0,942% e de 12,5% ocorrido para o eixo Y em movimento de subida.

Palavras-chave: Controle de posição, PID, Robô Cartesiano, Válvulas eletropneumáticas, Cilindros Pneumáticos.

ANALYSIS OF THE PID POSITION CONTROL APPLIED TO AN ELETROPNEUMATIC CARTESIAN ROBOT

ABSTRACT

This work proposes the development of a PID controller for the XY positioning of an electropneumatic Cartesian robot, by means of an empirical rule called Ziegler-Nichols, which allows the adjustment of the controller parameters without the need for knowledge of the mathematical model of the system. The set consists basically of three proportional electropneumatic valves and three pneumatic cylinders, each with a potentiometric ruler for feedback from the controller in closed loop. The NI USB-6289 data acquisition module was used to interface the computer with the potentiometric valves and rulers. LabVIEW® software was used to develop the controller, and Matlab® to analyze and present the experimental results. Reference signs of the step type and imposition of external disturbances were used to evaluate the performance of the system for position control. Experimental results showed a maximum error in steady state for the X axis of 0.942% and 12.5% for the Y axis in uphill movement.

Keywords: Position control, PID, Cartesian Robot, Electropneumatic valves, Pneumatic Cylinders.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidade de condicionamento de ar.....	20
Figura 2 - Manifold.....	21
Figura 3 - Cilindro pneumático de dupla ação sem haste.....	22
Figura 4 - Válvula pneumática direcional 5/2 vias com acionamento por solenoide.....	23
Figura 5 - Número de posições de válvulas direcionais.....	23
Figura 6 - Número de vias de válvulas direcionais.....	24
Figura 7 - Tipos de acionamento de válvulas direcionais.....	24
Figura 8 - Válvula proporcional.....	25
Figura 9 - Simbologia da válvula proporcional.....	25
Figura 10 - Curva característica da válvula proporcional.....	26
Figura 11 - Curva da histerese da válvula proporcional.....	26
Figura 12 - Curva do erro de parada para trás da válvula proporcional.....	27
Figura 13 - Curva do erro de parada para frente da válvula proporcional.....	27
Figura 14 - Esquema de um controlador PID.....	28
Figura 15 - Curva de resposta em forma de S.....	31
Figura 16 - Oscilação sustentada com período P_{cr} (medido em segundos).....	32
Figura 17 - Diagrama de blocos do sistema de controle.....	35
Figura 18 - Bancada de testes do robô eletropneumático.....	36
Figura 19 - Módulo multifuncional da National Instruments NI USB-6289.....	37
Figura 20 - Código Fonte criado em LabVIEW.....	39
Figura 21 - Interface utilizada com base na programação em LabVIEW.....	39
Figura 22 - Diagrama funcional de um sistema moderno de aquisição por computador.....	40
Figura 23 - Sensor potenciométrico linear.....	41
Figura 24 - Sistema de medição de deslocamento por régua milimetrada para Eixo X (A) e Eixo Y (B).....	42
Figura 25 - Diagrama funcional do sistema de acionamento.....	44
Figura 26 - Válvulas eletropneumáticas proporcionais e cilindro pneumático.....	45
Figura 27 - Deslocamento 10 mm a 100 mm no eixo X.....	47
Figura 28 - Deslocamento 10 mm a 200 mm no eixo X.....	47
Figura 29 - Deslocamento 10 mm a 300 mm no eixo X.....	48
Figura 30 - Deslocamento 10 mm a 100 mm no eixo Y.....	49

Figura 31 - Deslocamento 10 mm a 200 mm no eixo Y.....	49
Figura 32 - Deslocamento 10 mm a 300 mm no eixo Y.....	50
Figura 33 - Deslocamento no eixo X com controlador P.	51
Figura 34 - Deslocamento no eixo Y com controlador P.	52
Figura 35 - Deslocamento no eixo X com controlador PI.....	53
Figura 36 - Deslocamento no eixo Y com controlador PI.....	53
Figura 37 - Deslocamento no eixo X com controlador PID.....	54
Figura 38 - Deslocamento no eixo Y com controlador PID.....	55
Figura 39 - Deslocamento no eixo X com controlador P ajustado.....	56
Figura 40 - Deslocamento 10 a 100mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida. 57	
Figura 41 - Deslocamento 10 a 200mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida. 58	
Figura 42 - Deslocamento 10 a 300mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida. 58	
Figura 43 - Deslocamento 100 a 10mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida...59	
Figura 44 - Deslocamento 200 a 10mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida...60	
Figura 45 - Deslocamento 300 a 10mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida...60	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regra de sintonia de Ziegler e Nichols (primeiro método).....	32
Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler e Nichols (segundo método).	33
Tabela 3 - Dados amostrados para identificação da régua potenciométrica do Eixo X e Y. ...	42
Tabela 4 - Especificações técnicas das válvulas eletropneumáticas proporcionais.....	45
Tabela 5 - Valores críticos para o sistema cartesiano XY do robô.....	50
Tabela 6 - Ganhos dos controladores P, PI e PID para o eixo X.....	50
Tabela 7 - Ganhos dos controladores P, PI e PID para o eixo Y.....	51
Tabela 8 - Resposta temporal para o controlador P conforme Ziegler e Nichols.....	52
Tabela 9 - Resposta temporal para o controlador PI conforme Ziegler e Nichols.	54
Tabela 10 - Ganhos do controlador proporcional (P) para os eixos X e Y após ajustes.	56
Tabela 11 - Resposta temporal no eixo X com controlador P ajustado.....	56
Tabela 12 - Resposta temporal no eixo Y com controlador P ajustado para descida.....	59
Tabela 13 - Resposta temporal no eixo Y com controlador P ajustado para subida.	61

LISTA DE SIGLAS

DAQ	Data acquisition (Aquisição de dados)
DMV	Dahlin Variância Mínima
e	Erro percentual em regime permanente
GDL	Grau(s) de Liberdade
GPC	Controlador Preditivo Generalizado
K_{cr}	Ganho Crítico
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
M_o	Sobressinal percentual (<i>overshoot</i>)
MQR	Mínimos Quadrados Recursivos
NI	National Instruments
P	Proporcional
P_{cr}	Período Crítico
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
ROM	Read Only Memory (Memória apenas para leitura)
SSC	Sistema de Supervisão e Controle
T_R	Tempo de Subida
T_D	Tempo de Atraso
T_S	Tempo de Acomodação

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Considerações Iniciais.....	14
1.2 Objetivo Geral.....	15
1.3 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Organização do Trabalho.....	16
CAPÍTULO II.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Revisão Bibliográfica.....	17
2.2 Equipamentos Pneumáticos.....	19
2.2.1 <i>Distribuição e Condicionamento de Ar</i>	19
2.2.2 <i>Atuadores Pneumáticos</i>	21
2.2.3 <i>Válvula Direcional</i>	22
2.2.4 <i>Válvula Proporcional</i>	24
2.3 Controladores PID.....	28
2.3.1 <i>Modo proporcional</i>	29
2.3.2 <i>Modo Integral</i>	29
2.3.3 <i>Modo Derivativo</i>	30
2.4 Método Ziegler e Nichols.....	30
2.4.1 <i>Primeiro Método</i>	31
2.4.2 <i>Segundo Método</i>	32
CAPÍTULO III.....	34
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL.....	34
3.1 Malha de Controle Implementada.....	34
3.2 Montagem Experimental.....	35
3.2.1 <i>Módulo Multifuncional de Dados</i>	37
3.2.2 <i>Interface Homem-Máquina (Supervisório)</i>	37
3.2.3 <i>Sistema de Realimentação</i>	40
3.2.4 <i>Sistema de Acionamento</i>	43
CAPÍTULO IV.....	46
4 RESULTADOS.....	46
4.1 Testes Iniciais: Segundo Método de Ziegler e Nichols.....	46
4.1.1 <i>Determinação do Ganho Crítico (K_{cr}) e Período Crítico (P_{cr})</i>	46

4.1.2	<i>Ganhos dos Controladores P, PI e PID</i>	50
4.1.3	<i>Resultados com o Controlador Proporcional (P)</i>	51
4.1.4	<i>Resultados com o Controlador Proporcional Integral (PI)</i>	53
4.1.5	<i>Resultados com o Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)</i>	54
4.2	Testes Finais: Ajustes Finos no Controlador Selecionado.....	55
CAPÍTULO V.....		62
5	CONCLUSÃO	62
5.1.	Comentários Finais	62
5.2.	Conclusões	63
5.3.	Trabalhos Futuros	63
6	REFERÊNCIAS.....	64

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Ao longo das últimas décadas, a abertura de mercados e o processo de globalização da economia têm levado o setor industrial a um novo padrão de concorrência (mercado cada vez mais competitivo e exigente em qualidade, custos e atendimento de prazos), onde as formas tradicionais de gestão e produção não são mais suficientes para garantir a lucratividade e a sobrevivência no meio (VALE, 2011).

Visando o aumento de produtividade e padronização na qualidade de produtos, muitas indústrias têm buscado a automatização de sua produção baseada na utilização de robôs manipuladores para realização de tarefas pré-determinadas e repetitivas. Neste panorama, os robôs manipuladores estão sendo cada vez mais utilizados em atividades que envolvem precisão e alta velocidade (UNECE, 2004).

Nas indústrias de manufatura, a automação dos processos evolui de acordo com o progresso tecnológico da microeletrônica, das redes digitais e dos componentes mecânicos. No estágio atual de evolução tecnológica, pode-se citar a utilização de robôs industriais como uma das estratégias que mais se tem destacado, sendo objeto de um grande número de estudos e trabalhos científicos por se tratar de uma tecnologia com muitas perspectivas de mercado e de aprimoramentos (OLIVEIRA, 2007).

Por sua funcionalidade de posicionar objetos em posições estratégicas em um sistema de coordenadas espaciais, os robôs manipuladores cartesianos estão presentes em indústrias, onde o transporte e/ou posicionamento de alguns itens em pontos do processo fabril é exigido com rapidez e precisão, em adição ao isolamento para não contaminação ou para diminuição de riscos ocupacionais de contato (VALE, 2011). Além disso, somada à crescente demanda de equipamentos de automação e controle de sistemas em ambientes industriais, há o aumento de políticas ambientais, sendo importante a realização de uma investigação sobre fontes de alimentação requeridas pelos robôs manipuladores, buscando uma utilidade não poluente (VALE, 2011).

Assim, técnicas de controle para robôs cartesianos pneumáticos vêm sendo objeto frequente de estudos, pois são capazes de operar com rapidez, além de possuírem as vantagens de qualquer sistema pneumático, como a abundância de ar em ambientes sob condições normais, facilidade para transporte (por meio de tubulações), facilidade de

armazenamento por serem compressíveis (através de reservatórios), e não possuem matéria-prima (ar, neste caso) poluente (VALE, 2011).

O controlador mais utilizado é sem dúvida do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Este controlador é bastante popular em função de sua simplicidade e aplicabilidade em diversos sistemas. Disponível em praticamente todos os sistemas de controle e supervisão de plantas dinâmicas, este algoritmo apresenta teoria bastante explorada e difundida. Uma vantagem destes controladores, é que regras empíricas podem ser aplicadas, tais como Ziegler e Nichols, permitindo o ajuste dos parâmetros do controlador sem a necessidade do conhecimento do modelo matemático do sistema.

Apesar da maioria dos processos serem intrinsecamente não lineares, o uso deste tipo de controlador se baseia na consideração de que, em torno do ponto típico de operação, o sistema se comporta de maneira aproximadamente linear. Esta premissa funciona bem em grande parte dos processos, para uma determinada janela de tempo e operação, a partir da qual normalmente se faz necessária uma ressintonia do controlador (CARVALHO, 2010).

Em atendimento à necessidade de realização de novas pesquisas que envolvam o controle em servo-atuadores para o posicionamento, o presente trabalho tem por objetivo a implementação de um controlador PID aplicado em um robô cartesiano com dois graus de liberdade, acionados por servo-válvulas eletropneumáticas do tipo proporcionais. Ao final do trabalho os resultados serão comparados com uma pesquisa semelhante presente na revisão bibliográfica.

1.2 Objetivo Geral

Projetar e implementar experimentalmente um controlador do tipo PID para um robô manipulador planar de dois graus de liberdade acionado por servo-válvulas eletropneumáticas do tipo proporcionais.

1.3 Objetivos Específicos

Do ponto de vista técnico, são objetivos específicos do trabalho:

- a) Realizar a instrumentação do protótipo robótico por meio de módulo multifuncional de dados, circuitos de condicionamento de sinais, computador (desktop) e software supervisorio (acompanhamento em tempo real das variáveis controladas);
- b) Projetar e implementar em Labview[®] e/ou Matlab[®], um controlador PID para o posicionamento XY do protótipo;

- c) Realizar uma análise dos resultados experimentais obtidos através da implementação do controlador;
- d) Apresentar as conclusões da pesquisa, comparando os resultados com trabalho semelhante da revisão bibliográfica.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo II, são apresentados conceitos a respeito dos principais componentes utilizados na implementação do projeto, como por exemplo: atuadores, sensores e válvulas. Também será abordada a teoria de aquisição de Dados (DAQ), bem como a de um controlador PID e do método Ziegler e Nichols.

O Capítulo III apresenta testes, funcionamento e a montagem do projeto. Descreve como os equipamentos estão conectados e a função de cada um dentro do sistema.

No Capítulo IV é feita a avaliação do controlador, nele são apresentados os testes do controlador, que foram feitos através do software LabVIEW, como também os resultados obtidos. Por último, é apresentada a conclusão do trabalho no Capítulo V.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a base teórica necessária para uma melhor compreensão dos procedimentos empregados ao longo deste trabalho. Inicialmente será apresentada uma breve revisão bibliográfica com alguns trabalhos relacionados ao tema proposto, e em seguida serão abordados temas como: equipamentos pneumáticos e eletropneumáticos, aquisição e controle de dados, teoria do controle (PID) em malha fechada e método Ziegler e Nichols.

2.1 Revisão Bibliográfica

Os robôs industriais são manipuladores formados por cadeias de corpos (elos), em cuja extremidade é fixada uma ferramenta ou garra (órgãos efetadores), através da qual é possível o robô executar determinadas tarefas. Por exemplo, uma determinada carga pode ser transportada seguindo uma determinada trajetória para uma posição final, ambas pré-estabelecidas na entrada do controle (SOUZA, 2010).

Os elos que formam a cadeia são interligados por meio de juntas que, de acordo com o movimento relativo entre os elos, podem ser de translação ou de rotação. O movimento da ferramenta é o resultado do movimento das juntas, realizado pelos atuadores e monitorado por sensores (ROMANO, 2002).

A utilização de servo-atuadores pneumáticos para acionamento dos robôs é limitada pelas não linearidades inerentes a estes sistemas, principalmente devido à compressibilidade do ar. Uma das maiores preocupações é com a determinação dos modelos matemáticos que regem o comportamento dinâmico dos mesmos, pois são difíceis de serem determinados com precisão através das leis da física. Este comportamento não linear tem limitado a utilização deste servo-atuador em tarefas em que se exija um seguimento preciso de trajetória em que o movimento se dê de forma suave e contínua (CARVALHO, 2009).

Contudo, graças ao desenvolvimento de novas técnicas de instrumentação e de componentes pneumáticos de precisão (tais como sensores digitais, servo-válvulas de alto desempenho, novos cilindros e tipos de vedações), vem aumentando significativamente a capacidade funcional dos produtos servo-pneumáticos de competir com os servoposicionadores elétricos e hidráulicos em custo e desempenho (STOLL, 2001).

Estes fatores, aliados aos avanços da eletrônica, microinformática e ao surgimento de novas técnicas e estratégias de controle na área da pneumática, tem contribuído para o

desenvolvimento de diversas pesquisas com resultados satisfatórios, proporcionando uma maior aceitação da aplicação desses sistemas na execução de tarefas que antes eram difíceis de serem efetuadas pelos mesmos (OLIVEIRA, 2002).

No sistema de malha fechada surge o papel do “controlador” que através da comparação entre o valor desejado e o valor medido, manipula uma ou mais variáveis de forma a eliminar esta diferença. Desta forma, o controlador tem como objetivo manter a(s) variável(is) de interesse no valor desejável, rejeitando as possíveis perturbações externas e realizando os ajustes solicitados. Um controlador mal ajustado ou impróprio pode piorar a condição de controle do sistema, podendo levar o mesmo a se tornar instável (CARVALHO, 2010).

Souza (2010) projetou e implementou controladores adaptativos auto ajustáveis de Dahlin Variância Mínima (DMV), para modelar e controlar em tempo real dois elos de um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade (3 GDL) cartesiano.

Meira (2010) projetou e implementou controladores adaptativos utilizando a técnica de controle Dahlin Variância Mínima (DMV) com o critério de Favier e Hassani, para controle de posição dos três elos de um robô manipulador eletropneumático com três GDL.

Riul et al. (2010) apresentaram a identificação pelo Mínimos Quadrados Recursivos (MQR) dos parâmetros nos três elos de um robô manipulador eletropneumático de três GDL, projetando controladores adaptativos auto ajustáveis explícitos com os parâmetros obtidos. Os resultados indicam que o algoritmo de identificação foi satisfatório, pois os controladores projetados atenderam as especificações de desempenho impostas ao sistema.

Vale (2011) apresentou projetos e a implementação de três controladores adaptativos preditivos auto ajustáveis, sendo um Controlador do tipo Preditivo Generalizado (GPC) convencional, um híbrido (GPC+PD) e um GPC com restrição da variável de controle, todos aplicados em um manipulador eletropneumático cartesiano de três GDL e três elos.

Em Ayadi et al. (2016) foi implementado um controlador robusto baseado na estratégia de modo deslizante adaptável (com ganho proporcional derivativo) para controlar a posição do sistema eletropneumático. Os parâmetros adaptativos foram obtidos com base na análise de estabilidade de Lyapunov para garantir a estabilidade do sistema.

Em Ferreira (2016) foi desenvolvido um controlador preditivo generalizado (GPC) adaptativo e um controlador proporcional integral derivativo (PID) convencional, em um robô manipulador planar de dois graus de liberdade (2 GDL) composto por um elo rotacional e outro prismático. O autor apresentou um comparativo dos resultados entre os dois controladores implementados.

Silva et al. (2019) apresentou o desenvolvimento de um controlador Fuzzy tipo Mamdani para o posicionamento XY do mesmo robô cartesiano analisado neste trabalho, utilizando sinais de referência do tipo degrau para a avaliação do desempenho do sistema de controle.

Teixeira (2020) desenvolveu um sistema eletrônico para controle de servoposicionadores pneumáticos, baseado em sistemas de tempo real. Para validação da solução proposta, a arquitetura desenvolvida foi utilizada para o controle de um servoposicionador pneumático, na qual foram programados dois algoritmos: controle por modos deslizantes (Slide Mode Control) e o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

2.2 Equipamentos Pneumáticos

2.2.1 Distribuição e Condicionamento de Ar

A unidade de condicionamento de ar é composta pelo filtro de ar e regulador de pressão. Ela faz a filtragem e regulagem da pressão na linha de ar comprimido que alimenta os componentes pneumáticos do sistema. Sua principal finalidade é o ajuste da pressão, que ocorre quando a pressão primária, chamada de pressão de entrada, fornecida pelo compressor, é ajustada para o valor de pressão utilizada no posto de trabalho, que é chamada de pressão de trabalho (XAVIER, 2013).

É a pressão de trabalho que determina a força com que o atuador opera. A unidade de condicionamento de ar é necessária em qualquer sistema pneumático. Ela aumenta a vida útil dos componentes, visto que permite que estes trabalhem em melhores condições (XAVIER, 2013). A Figura 1 apresenta uma unidade de condicionamento de ar típica.

Figura 1 - Unidade de condicionamento de ar.



Fonte: <http://www.festo-didactic.com>.

- *Filtro de Ar*

O filtro tem a função de reter as impurezas suspensas no fluxo de ar, fazendo com que o ar circule sem resistência pelos componentes do sistema (PARKER, 2002).

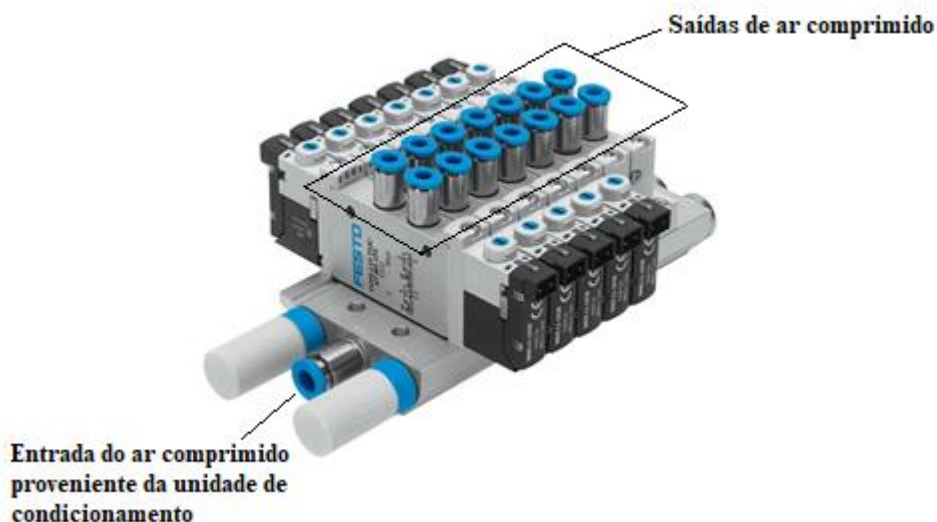
- *Regulador de Pressão*

O regulador de pressão está presente na unidade de condicionamento de ar para ajustar a pressão do fluxo de ar comprimido. Assim, os componentes pneumáticos do sistema trabalham com a pressão de ar desejável. O regulador possibilita aos componentes trabalharem com uma pressão de trabalho próxima do ideal, através da regulagem da pressão primária. Com isso, ele consegue compensar automaticamente o volume de ar requerido pelos equipamentos do sistema (PARKER, 2002).

- *Manifold*

O Manifold distribui o ar comprimido proveniente do sistema de tratamento de ar para os equipamentos pneumáticos e eletropneumáticos (XAVIER, 2013). Na Figura 2 é apresentado um exemplo de Manifold.

Figura 2 - Manifold



Fonte: <http://www.festo-didactic.com>.

2.2.2 Atuadores Pneumáticos

Os atuadores pneumáticos são os componentes que transformam a energia contida no ar comprimido em trabalho. Podem ser do tipo rotativo, oscilante ou linear. Os atuadores rotativos convertem a energia pneumática em energia mecânica por movimento rotativo contínuo. Os oscilantes convertem a energia pneumática em energia mecânica, através do movimento rotativo com ângulo limitado por certo número de graus. Já os lineares convertem a energia pneumática em movimentos lineares ou angulares (DALL'AMICO, 2002).

Os cilindros pneumáticos (atuadores lineares) podem ser de ação simples, que utilizam o ar comprimido para realizar trabalho em apenas um sentido, ou de ação dupla, que realizam trabalho nos dois sentidos de movimento (DALL'AMICO, 2002).

“Cilindros de ação dupla ou duplo efeito são os atuadores lineares em que a pressão do ar atua nos dois sentidos do movimento do êmbolo, podendo, portanto produzir trabalho útil no seu avanço e/ou no seu recuo” (BOLLMANN, 1997).

- *Cilindro de Dupla Ação Sem Haste*

O cilindro pneumático sem haste é formado por um cursor, localizado na parte de fora da camisa do cilindro, que acompanha o movimento do êmbolo que está na parte interior da camisa. O acoplamento entre o êmbolo e o cursor pode ser feito de forma magnética ou mecânica. O acoplamento magnético é feito por um conjunto de ímãs localizado na parte de dentro do cursor, e o acoplamento mecânico, que

possibilita a movimentação de cargas mais pesadas, é feito por uma fita metálica guiada em um canal com vedação dinâmica (XAVIER, 2013).

Este cilindro, por não possuir haste, possui a mesma área em ambos os lados e conseqüentemente a mesma força de avanço e recuo. O cilindro sem haste é aplicado onde são necessários cursos muito grandes e a flambagem na haste do cilindro comum se torna um problema. Comparando-se com os cilindros com haste, o cilindro sem haste reduz em 50% o espaço necessário para a instalação do mesmo (SILVA, 2002). A Figura 3 apresenta um exemplo deste cilindro.

Figura 3 - Cilindro pneumático de dupla ação sem haste



Fonte: <http://www.festo-didactic.com>.

2.2.3 Válvula Direcional

A válvula é um componente do circuito pneumático que se destina a controlar a direção, pressão e/ou vazão do ar comprimido. Elas podem ter um controle direcional de 2 a 5 vias, além de serem reguladoras de vazão/pressão, sendo utilizadas com diversos tipos de atuadores (PARKER, 2002). As válvulas direcionais podem ser classificadas de acordo com as suas características, que serão apresentadas no decorrer deste tópico.

Na Figura 4 é apresentado um modelo de válvula direcional 5/2 vias, que possui esse nome por ter cinco portas e duas posições de válvula. Uma porta é a de entrada de ar, duas são de saída de ar e as outras duas funcionam como escapes de ar em cada um dos lados do cilindro (atuador). Quanto às posições, a válvula 5/2 vias opera com a alternância de entradas e saídas de cada lado do cilindro acionado pela válvula (DYNAMICATEC, 2020).

Figura 4 - Válvula pneumática direcional 5/2 vias com acionamento por solenoide.

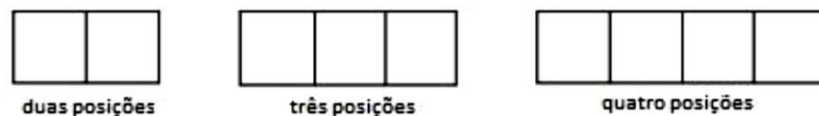


Fonte: <http://www.festo-didactic.com>.

- *Número de Posições*

É o número de manobras diferentes que a válvula direcional pode realizar. Cada manobra permite que a válvula possa orientar o fluxo de ar comprimido para uma trajetória, ou bloqueá-lo (XAVIER, 2013). O número de posições é representado pelo número de quadrados na simbologia das válvulas direcionais, conforme representado na Figura 5.

Figura 5 - Número de posições de válvulas direcionais.

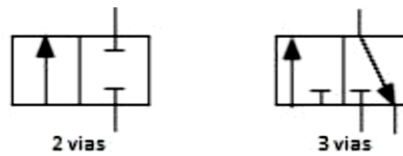


Fonte: (STEWART, 1978).

- *Número de Vias*

O número de vias é o número de conexões existentes na válvula, que representam a passagem de ar comprimido através de uma seta, ou o bloqueio do ar comprimido através de um T. O número de vias é determinado pela quantidade de vezes que os símbolos tocam o lado de um quadrado do símbolo da válvula (XAVIER, 2013). Na Figura 6 é apresentada a simbologia para determinação do número de vias de uma válvula direcional.

Figura 6 - Número de vias de válvulas direcionais.

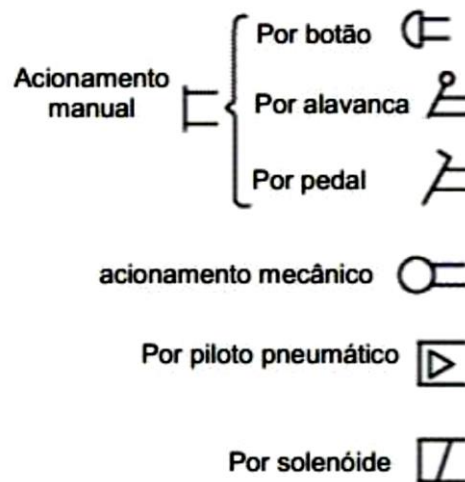


Fonte: (STEWART, 1978).

- *Tipos de Acionamentos*

A comutação das válvulas é realizada por acionamentos externos, e estes efetuam a mudança do seu estado das válvulas. As válvulas podem ainda ser comutadas por um tipo de acionamento, ou por uma combinação entre os acionamentos (XAVIER, 2013). Na Figura 7 alguns tipos de acionamentos são representados.

Figura 7 - Tipos de acionamento de válvulas direcionais.



Fonte: (STEWART, 1978).

2.2.4 *Válvula Proporcional*

A válvula pneumática proporcional é destinada a comandos de precisão. Ela controla o sentido e a vazão do ar comprimido para dois diferentes sentidos, que na aplicação do servoposicionador são o avanço e recuo do cilindro de dupla ação sem haste (XAVIER, 2013). Na Figura 8 é apresentado um modelo desta válvula.

Figura 8 - Válvula proporcional.

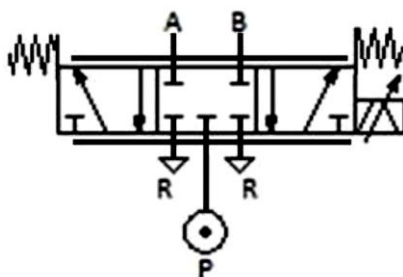


Fonte: <http://www.festo-didactic.com>.

A válvula proporcional é controlada por uma entrada de tensão com uma escala de zero até dez Volts. Quando a válvula proporcional recebe uma entrada de cinco volts, ela se posiciona no estado central, que é a sua posição de repouso, onde todas as vias estão bloqueadas, ou seja, a vazão de saída é igual à zero (XAVIER, 2013).

Ao receber uma entrada decrescente, em rampa, de cinco até zero Volt, a válvula aumenta proporcionalmente de zero até o valor máximo a vazão de saída do ar comprimido no sentido da conexão P para B, conforme representado na Figura 9. E ao receber uma entrada crescente, em rampa, de cinco até dez Volts, a válvula realiza o mesmo procedimento, mas no sentido da conexão P para A (XAVIER, 2013).

Figura 9 - Simbologia da válvula proporcional.

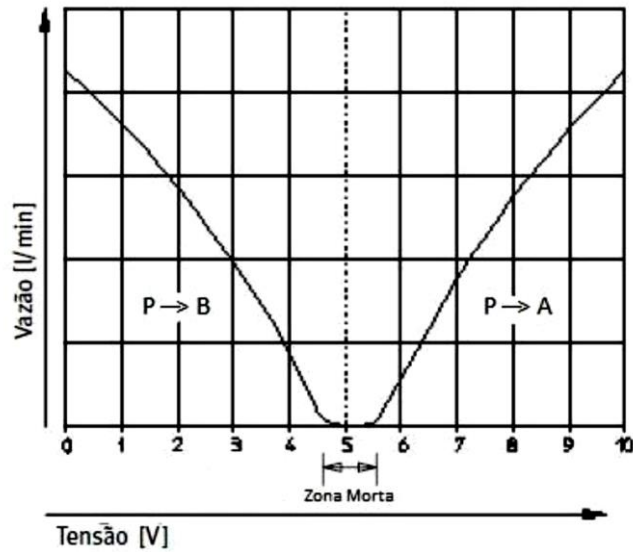


Fonte: (XAVIER, 2013).

As válvulas proporcionais possuem algumas características desfavoráveis para o controle de posição, como zona morta, histerese e erros de parada pra trás e pra frente. Neste tipo de válvula, dependendo da tecnologia de fabricação utilizada, existe uma região de zona morta que pode variar entre 0,5% e 10% a partir da região central, tanto para o sentido de

avanço quanto para o de recuo (DE NEGRI, 1998). Na região de zona morta, representada na Figura 10, a válvula está fechada, e o fluxo de ar não acontece em nenhuma direção.

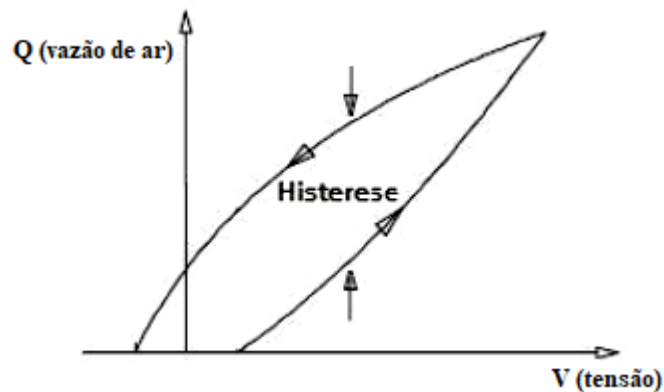
Figura 10 - Curva característica da válvula proporcional.



Fonte: (XAVIER, 2013).

A histerese e os erros de parada pra trás e pra frente são relacionados entre si e acontecem devido ao solenoide proporcional, atrito e folgas da válvula. A histerese é a não linearidade característica da válvula proporcional que pode ser definida pela diferença entre saídas obtidas com a aplicação de um mesmo valor do sinal de entrada, quando o ciclo completo de sinal de entrada é concluído (DE NEGRI, 1998). Na Figura 11 é apresentada a curva de histerese para uma válvula proporcional.

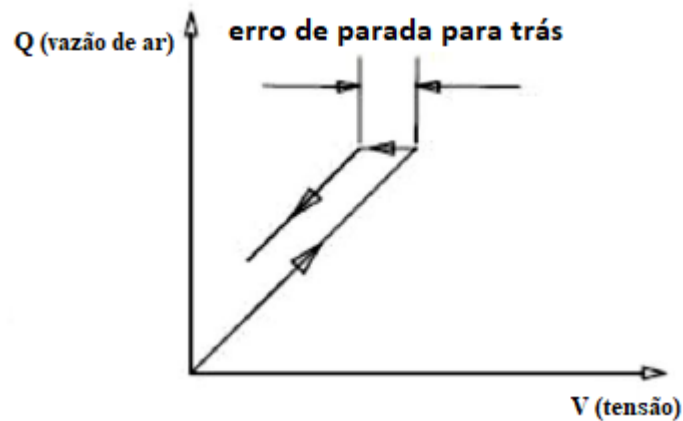
Figura 11 - Curva da histerese da válvula proporcional.



Fonte: (XAVIER, 2013).

O erro de parada pra trás é o valor total do sinal de tensão de entrada que se faz necessário para gerar no sinal de saída uma mudança perceptível, quando a partir de um ponto de parada acontece uma mudança na direção da vazão gerada pela válvula (DE NEGRI, 1998). Na Figura 12 é apresentada a curva de erro para trás de uma válvula proporcional.

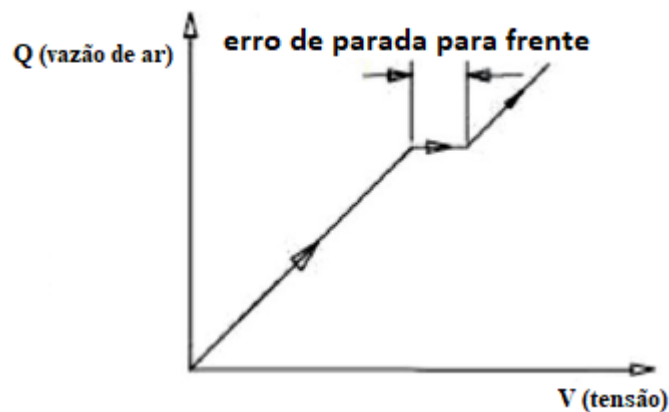
Figura 12 - Curva do erro de parada para trás da válvula proporcional.



Fonte: (XAVIER, 2013).

O erro de parada para frente é o valor que precisa ser incrementado no sinal de tensão de entrada para criar uma mudança perceptível do sinal de saída, quando acontece uma parada da válvula e depois a mesma continua o movimento na mesma direção (DE NEGRI, 1998). Na Figura 13 é apresentada a curva de erro para frente de uma válvula proporcional.

Figura 13 - Curva do erro de parada para frente da válvula proporcional.



Fonte: (XAVIER, 2013).

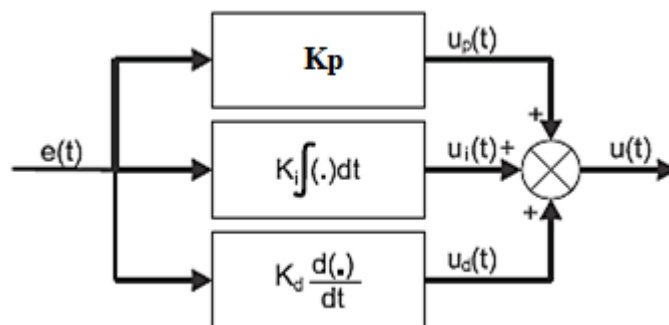
2.3 Controladores PID

É interessante notar que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente emprega esquemas de controle PID ou PID modificado. Como a maioria dos controladores PID são ajustados em campo, diferentes tipos de regras de sintonia vêm sendo propostas na literatura. Com a utilização dessas regras de sintonia, ajustes finos no controlador PID podem ser feitos também em campo (OGATA, 2010).

Além disso, métodos de sintonia automática vêm sendo desenvolvidos e alguns controladores PID têm a capacidade de fazer sintonia automática on-line. Estruturas PID modificadas, como o controle PID com vários graus de liberdade, atualmente estão em uso na indústria. Vários métodos práticos de comutação suave (de operação manual para operação automática) e ganho programado estão comercialmente disponíveis (OGATA, 2010).

A utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis. Na área dos sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos de controle PID e os controles PID modificados provaram sua utilidade conferindo um controle satisfatório, embora em muitas situações eles possam não proporcionar um controle ótimo (OGATA, 2010). O esquema deste controlador é representado na Figura 14.

Figura 14 - Esquema de um controlador PID.



Fonte: (REGIS, 2013).

A lei de controle do controlador PID no domínio do tempo pode ser descrita matematicamente pela Equação (1) (BOBÁL *et al*, 2005).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

onde,

- $u(t)$: é a variável de controle;
- $e(t)$: é a variável erro de trajetória;
- K_p : é o ganho proporcional;
- T_i : é o tempo integral;
- T_d : é o tempo derivativo;

Este controlador é dividido em três modos: proporcional, integral e derivativo, que serão definidos nos tópicos a seguir.

2.3.1 Modo proporcional

O termo proporcional faz com que a variável de saída do controlador seja proporcional ao valor do erro efetivo. A resposta controlada por esse termo é ajustada multiplicando-se o erro $e(t)$ pela constante de ganho proporcional K_p . O termo proporcional é então calculado pela equação (2) (BOBÁL *et al*, 2005).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2)$$

O valor escolhido para o ajuste da variável de ganho proporcional tem forte influência na ação de controle. Por este tipo de modo apresentar um erro em estado estacionário, a escolha do ganho proporcional deve ser realizada de forma criteriosa, pois se o valor escolhido para K_p for muito pequeno em relação aos demais ganhos (integral e derivativo), o controlador não conseguirá responder as perturbações do sistema; porém, se este valor foi muito alto, o sistema irá tender para a instabilidade, tornando o controlador mais oscilatório. Uma escolha muito alta no valor do ganho também pode acarretar uma formação de sobressinal no sistema (OGATA, 2010).

2.3.2 Modo Integral

Essa ação de controle elimina o erro em estado estacionário que ocorre com o uso do controlador de ganho proporcional. A Equação (3) mostra a ação de controle do modo integral (BOBÁL *et al*, 2005).

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot d(t) \quad (3)$$

2.3.3 Modo Derivativo

A ação de controle do modo derivativo é proporcional à taxa de variação do sinal de erro ao longo do tempo e ao ganho derivativo T_d . O modo derivativo é dado pela equação (4) (BOBÁL *et al*, 2005).

$$u(t) = T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

Essa ação do controlador serve para atenuar a magnitude do sobressinal produzido pelo modo integral, devido ao fato dela agir na previsão da variação do erro. Se esse fator for somado a um valor alto do ganho derivativo o sistema torna-se instável (OGATA, 2010).

2.4 Método Ziegler e Nichols

Se um modelo matemático da planta pode ser obtido, então é possível aplicar várias técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador que atenderão às especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Contudo, se a planta for muito complexa, de modo que seu modelo matemático não possa ser obtido facilmente, então a abordagem analítica do projeto do controlador PID não será possível. Temos então de recorrer a abordagens experimentais de sintonia de controladores PID (OGATA, 2010).

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler e Nichols sugeriram regras para a sintonia de controladores PID (o que significa ajustar os valores de K_p , T_i e T_d) baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada. Estas regras sugerem um conjunto de valores de K_p , T_i e T_d que vão proporcionar uma operação estável do sistema (OGATA, 2010).

Contudo, o sistema resultante pode exibir um sobressinal máximo grande na resposta do degrau, o que é inaceitável. Nesse caso, precisamos fazer uma série de sintonias finas até que um resultado aceitável seja obtido. De fato, as regras de sintonia de Ziegler e Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de K_p , T_i e T_d logo na primeira tentativa (OGATA, 2010).

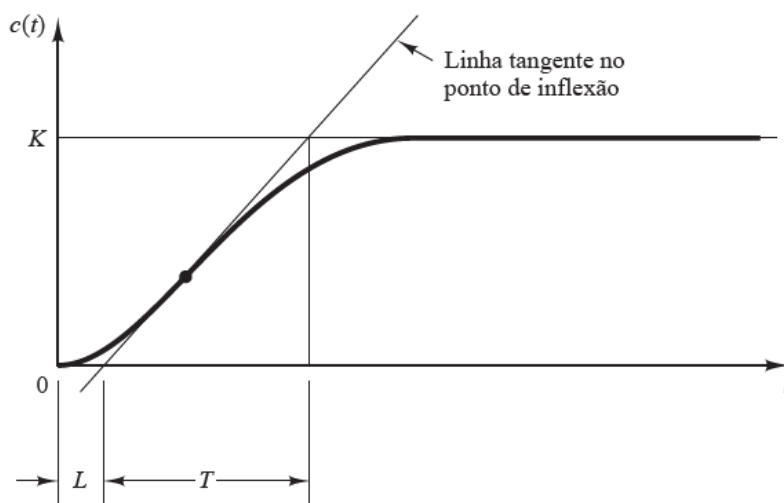
Ziegler e Nichols propuseram regras para a determinação de valores do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d , baseadas nas características da resposta transitória de dada planta. Essa determinação dos parâmetros dos controladores PID ou de sintonia dos controladores PID pode ser feita por engenheiros de campo, por meio de experimentos com a planta. Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler e Nichols: o primeiro e o segundo método (OGATA, 2010). Será feita a seguir uma breve apresentação dos dois.

2.4.1 Primeiro Método

No primeiro método, obtemos experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário. Esse método se aplica se a curva de resposta ao degrau de entrada tiver o aspecto de um S. Essa curva de resposta ao degrau pode ser gerada experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica da planta (OGATA, 2010).

A curva com o formato em S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$, como apresenta a Figura 15 (OGATA, 2010).

Figura 15 - Curva de resposta em forma de S.



Fonte: (OGATA, 2010).

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d , de acordo com as fórmulas que aparecem na Tabela 1.

Tabela 1 - Regra de sintonia de Ziegler e Nichols (primeiro método).

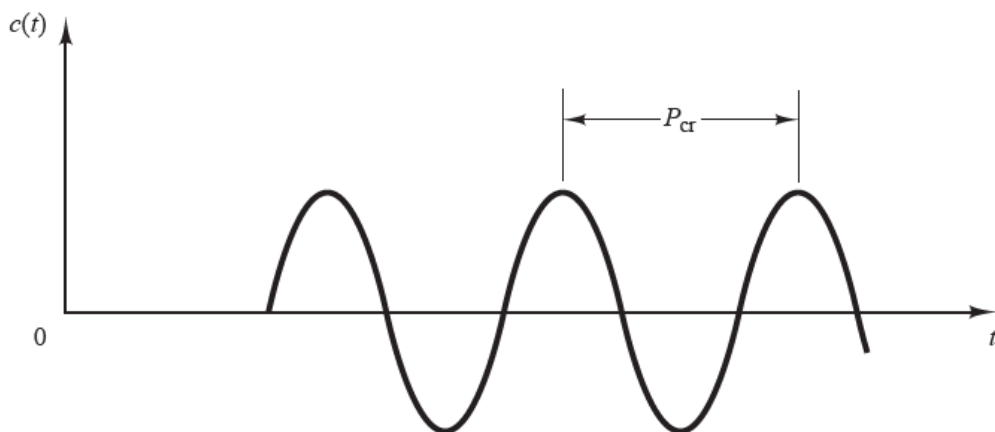
Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: (OGATA, 2010).

2.4.2 Segundo Método

No segundo método, definimos primeiro $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Usando somente a ação de controle proporcional, aumente K_p de 0 ao valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez (se a saída não exibe uma oscilação sustentada para qualquer valor que K_p pode assumir, então esse método não se aplica). Portanto, o ganho crítico K_{cr} e o período P_{cr} correspondente são determinados experimentalmente, conforme apresenta a Figura 16. Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d de acordo com as fórmulas mostradas na Tabela 2 (OGATA, 2010).

Figura 16 - Oscilação sustentada com período P_{cr} (medido em segundos).



Fonte: (OGATA, 2010).

Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler e Nichols (segundo método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: (OGATA, 2010).

CAPÍTULO III

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

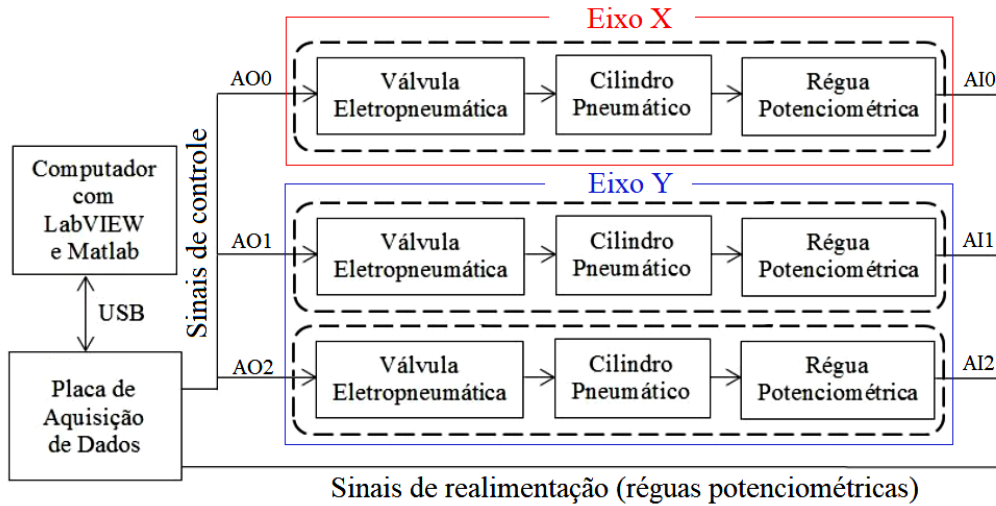
Este capítulo apresenta como os equipamentos foram dispostos para a estrutura do sistema proposto, as suas finalidades e seu funcionamento.

3.1 Malha de Controle Implementada

Em um sistema de malha fechada, o sinal atuante de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada (*setpoint*) e o sinal de retroação (sinal de saída), excita o controlador de modo a reduzir o erro e trazer o valor do sinal de saída para o valor desejado, sendo a realimentação uma característica necessária. A realimentação do sistema ocorre através dos transdutores para deslocamento linear, que retornam ao controlador o sinal analógico de tensão, que representa a associação tensão/deslocamento linear. Desta forma, a instrumentação é responsável por garantir que os dados referentes à realimentação do sistema possam chegar corretamente ao controlador.

Observando o fato de os modelos dos elos serem desacoplados, para realizar o controle de posição é possível desenvolver duas malhas de controle fechadas, distintas e independentes para cada eixo, conforme o diagrama apresentado na Figura 17 (representação da malha em vermelho para o eixo X e em azul para o eixo Y). Uma malha de controle (apenas um sinal de controle) foi utilizada para a movimentação dos dois conjuntos válvula-cilindro-régua. Os dois conjuntos eletromecânicos do eixo Y foram ajustados para haver sincronização nos deslocamentos.

Figura 17 - Diagrama de blocos do sistema de controle.

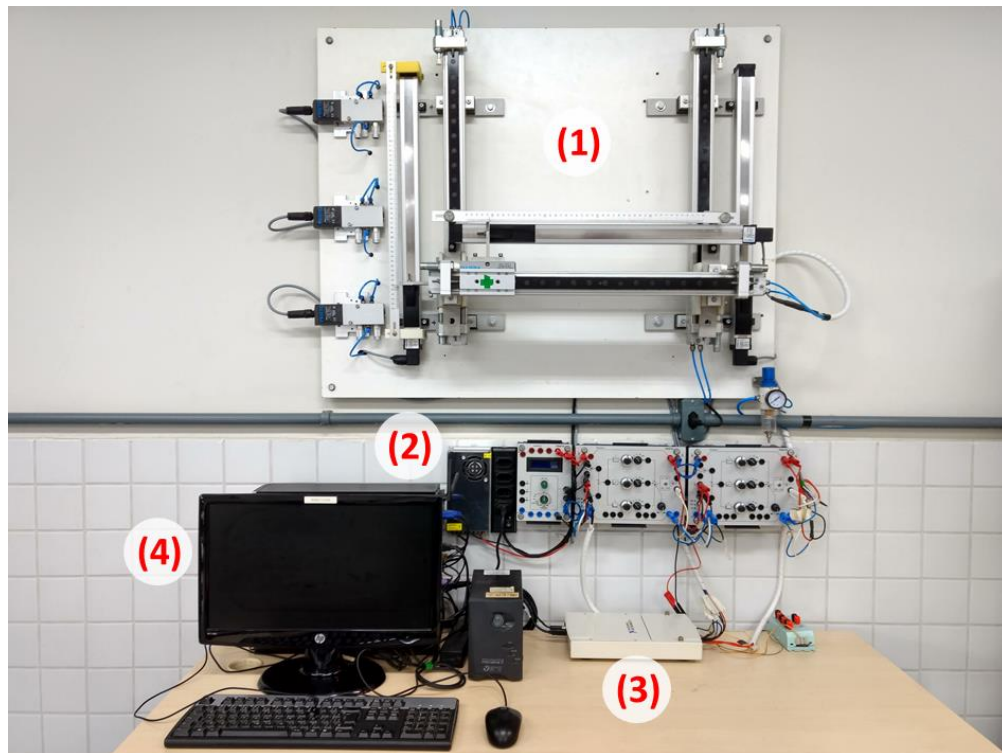


Fonte: autoria própria.

3.2 Montagem Experimental

A bancada de testes utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 18, composta por: um robô manipulador eletropneumático (1), uma fonte variável de corrente contínua (2), um módulo de aquisição de dados, NI USB-6289 (3) e um computador com o software Labview® (4). O robô manipulador eletropneumático de dois graus de liberdade (2GDL) é composto por dois elos paralelos. Esse robô é, portanto, cartesiano e possui duas juntas prismáticas, resultando num movimento composto de duas translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de referência cartesiano XY. Desta forma os modelos dos elos são desacoplados.

Figura 18 - Bancada de testes do robô eletropneumático.



Fonte: autoria própria.

O sistema funciona da seguinte forma: o compressor fornece ar comprimido para as válvulas eletropneumáticas proporcionais (FESTO[®] 5/2 vias da série MPYE) de tensão de 24 VCC e sinais de controle analógicos em tensão de 0 a 10 VCC, que acionam os cilindros pneumáticos de dupla ação e haste simples (FESTO[®] série DGPL geração B de 25/450mm), dando o movimento ao órgão efetuator. Ambos os eixos, X e Y, possuem 400 mm de curso.

No computador a implementação da lei de controle do robô foi realizada através de programas computacionais desenvolvidos nas plataformas Labview[®] e Matlab[®]. O compressor da SHULZ, modelo MSL 10 ML/175, fornece o ar comprimido que aciona as válvulas proporcionais eletropneumáticas através dos dutos de condução dos fluxos de ar.

Uma fonte variável de corrente contínua (32VCC/6A), Tektronix[®] PWS 2326, é o equipamento utilizado para alimentar a válvula proporcional a uma tensão de 24 VCC, além das tensões auxiliares de alimentação dos transdutores de posição potenciométricos em 10 VCC. Dois conjuntos válvula-cilindro-régua foram utilizados para movimentação do eixo Y e um conjunto para eixo X.

3.2.1 Módulo Multifuncional de Dados

Na instrumentação do sistema, um módulo multifuncional de dados é utilizado para enviar sinais de controle para as válvulas eletropneumáticas proporcionais e adquirir os sinais medidos pelas réguas potenciométricas (FESTO® série MLO de 25/450mm). O módulo executa as funções de conversores A/D (analógico/digital) e D/A (digital/analógico) realizando a interface dos algoritmos de leitura das posições e controle durante o processo.

Dessa forma, realiza a digitalização por meio de um conversor A/D dos dados analógicos obtidos nas medições efetuadas nas réguas. O módulo de aquisição de dados (DAQ) utilizado, NI USB-6289, possui 48 I/O digitais, 4 saídas analógicas (2.86 MS/s) e 32 entradas analógicas (18 bits, 625 kS/s) com níveis programáveis de aquisição por canal, e tensões variando de $\pm 0,1V$ até $\pm 10V$. O modelo é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Módulo multifuncional da National Instruments NI USB-6289.



Fonte: <https://www.ni.com/pt-br>.

3.2.2 Interface Homem-Máquina (Supervisor)

Uma das principais bases da automação industrial é o sistema de supervisão e controle de um processo industrial. Este sistema consiste, de uma maneira geral, na atuação do homem nos processos de produção através de mecanismos confiáveis e que garantem um bom desempenho das ações, a segurança no controle de ambientes de difícil acesso humano e a minimização de falhas, garantindo assim a otimização da produção (JUNIOR, 2019).

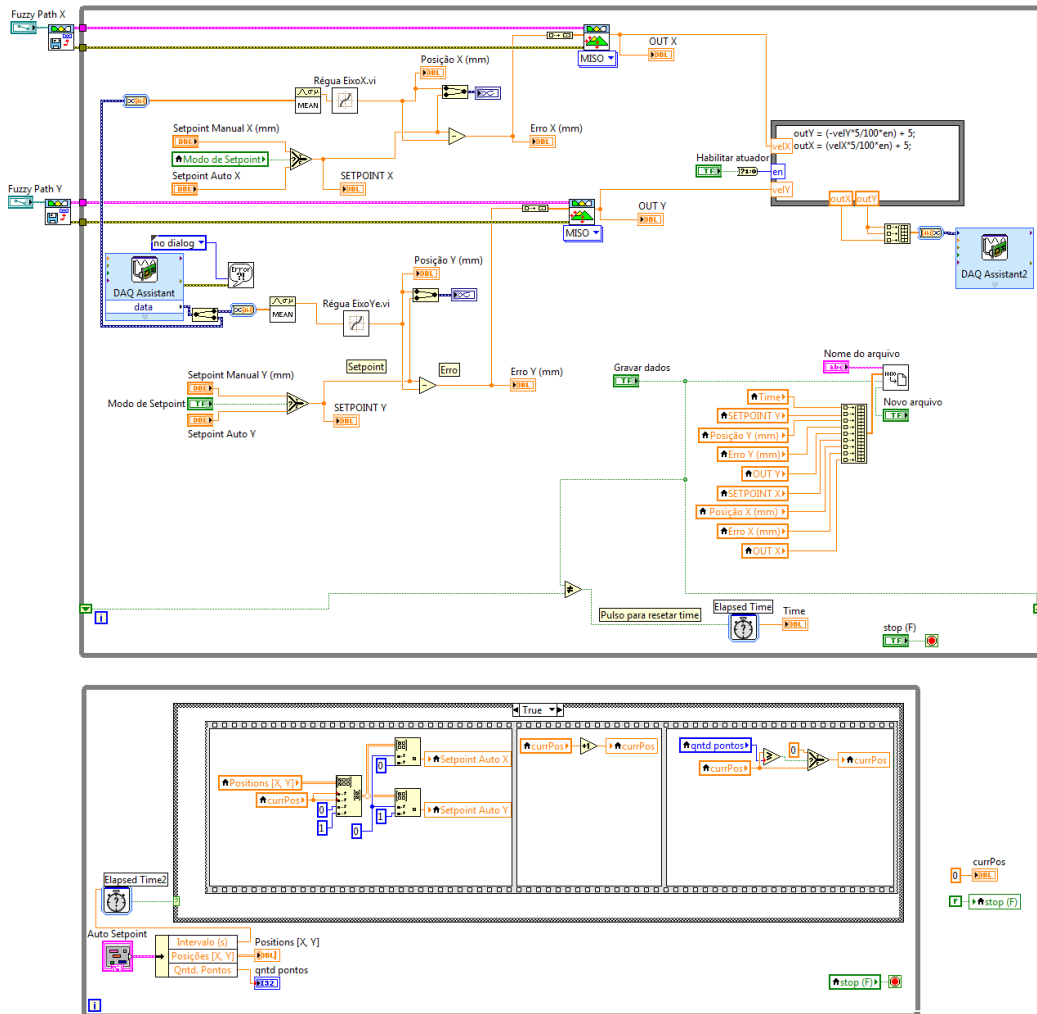
Um Sistema de Supervisão e Controle (SSC) é geralmente utilizado em aplicações que envolvam processos discretos típicos da indústria da manufatura (automobilística, autopeças, entre outras) devido às distâncias envolvidas entre o processo e o controle e supervisão serem limitadas, e uma rede local resolveria a questão da comunicação (JUNIOR, 2019).

O LabVIEW é um software da *National Instruments* que utiliza uma linguagem gráfica para o desenvolvimento de sistemas de medição e controle. Com a criação de instrumentos virtuais, como por exemplo, indicadores gráficos analógicos e digitais, o LabVIEW possibilita a interpretação virtual das variáveis a serem analisadas e controladas. Permite também a criação de interfaces homem-máquina intuitivas (supervisórios), com a utilização de símbolos muito semelhantes aos painéis de operações de máquinas, reproduzindo de forma fiel os instrumentos reais (NATIONAL, 2001).

O software é um ambiente de desenvolvimento que utiliza programação gráfica, ícones ao invés de textos, além de integração de hardware para a criação e teste de projetos de pequeno e grande porte de sistemas de medição e controle. Possibilita a aquisição de dados, o controle de instrumentos, registro de dados, análise de medição e produção de relatórios. O LabVIEW é um programa que integra todas as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de aplicações em um pequeno espaço de tempo com uma alta flexibilidade de soluções (NATIONAL, 2001).

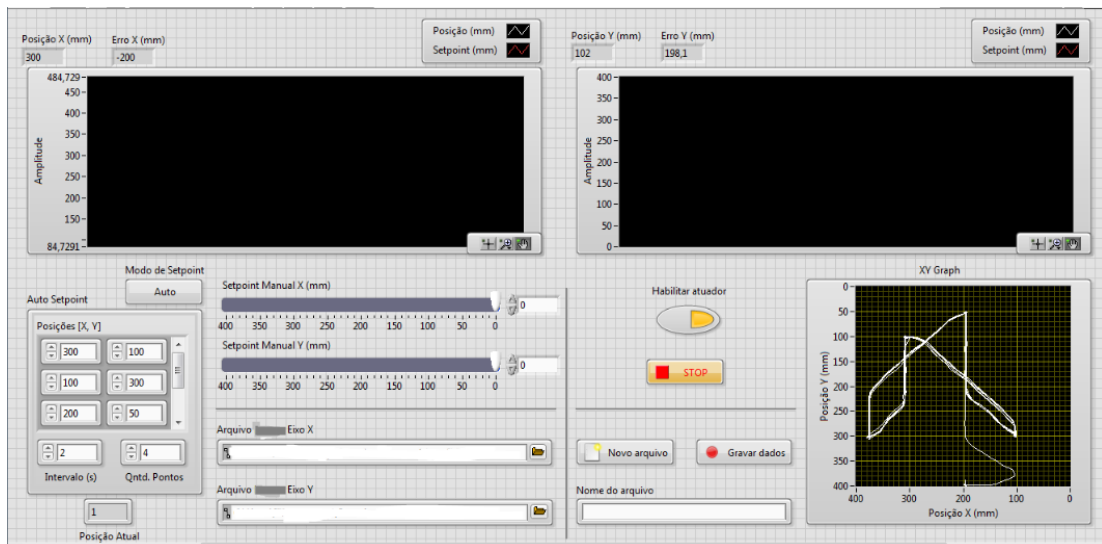
Para este trabalho foi criado um programa supervisório em LabVIEW que permitiu a visualização das saídas (posições finais) e entradas (posições de referências) por meio de gráficos plotados em tempo real. O código fonte do programa é apresentado na Figura 20 e a interface programada na Figura 21.

Figura 20 - Código Fonte criado em LabVIEW.



Fonte: autoria própria.

Figura 21 - Interface utilizada com base na programação em LabVIEW.



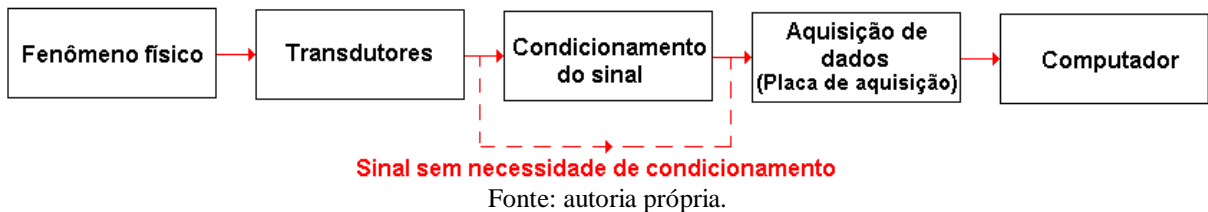
Fonte: autoria própria.

3.2.3 Sistema de Realimentação

A aquisição de dados se refere ao processo de fazer medições dos fenômenos físicos e registrá-los de alguma maneira para analisá-los. A aquisição de dados geralmente se distingue das formas mais antigas de gravação de gráficos em fita ou papel, pois os sinais são convertidos do meio analógico para o meio digital e, em seguida, são gravados digitalmente em memória ROM, mídia flash ou unidades de disco rígido (DEWESOFT, 2020).

Os elementos funcionais de um sistema de aquisição por computador são comumente os sensores e transdutores, os cabos de ligação, o condicionamento de sinal (quando necessário), o equipamento de aquisição de dados e o computador com o software DAQ (DEWESOFT, 2020). A Figura 22 apresenta o diagrama esquemático da aquisição de sinais de um fenômeno físico para controle por meio de um computador.

Figura 22 - Diagrama funcional de um sistema moderno de aquisição por computador.



Um potenciômetro é um divisor de tensão ajustável que se baseia em um resistor de três terminais. Um terminal está conectado a uma fonte de tensão, enquanto outro está conectado ao aterramento. O terceiro terminal se conecta a uma escova que desliza ao longo de uma superfície resistiva fixa. Para potenciômetros usados como sensores de posição, a escova é presa à carga. Quando a carga se move, o pincel desliza sobre a superfície resistiva. Isso altera a resistência, causando uma alteração na tensão de saída. A linearidade da saída varia de acordo com os parâmetros do dispositivo e a interação entre as escovas e a superfície resistiva (DYNAPAR, 2020). A Figura 23 apresenta um típico sensor potenciométrico.

Figura 23 - Sensor potenciométrico linear.



Fonte: <http://www.festo-didactic.com>.

Para o sistema de realimentação, foi acoplada a cada cursor de cilindro uma régua potenciométrica (transdutor de posição resistivo) que permite a leitura da posição, tornando também possível o cálculo da velocidade linear por meio de programação.

O transdutor potenciométrico fornece um sinal de resposta proporcional ao deslocamento do seu cursor. Sendo este cursor fixado à haste do cilindro, fornece, portanto, a informação referente ao deslocamento desta haste. É dotado de três terminais (a,b,c), sendo os terminais “a” e “b” alimentados com uma tensão fixa de 10 VCC e o terminal “c” de saída (cursor móvel acoplado à haste do cilindro), que possui sua tensão variável de acordo com o deslocamento, é ligado a um canal de entrada analógica do módulo de aquisição.

Foi realizado um conjunto de ensaios experimentais para identificação (equacionamento) da relação entre tensão e deslocamento para cada régua potenciométrica (XY). A partir da aquisição das tensões em cada régua potenciométrica por meio de uma entrada analógica do módulo de aquisição, os dados foram computados através da equação para cada conjunto régua-cilindro, tornando possível o cálculo da distância percorrida por meio de programação em Labview. Como parâmetro comparativo aos valores calculados por meio de software, foram utilizadas régua milimetradas fixadas na máquina, conforme a Figura 24.

90	1,985	1,98	1,98	1,97	1,98	1,98	0,00548
100	2,19	2,19	2,195	2,19	2,19	2,19	0,00224
110	2,415	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	0,00224
120	2,62	2,63	2,63	2,625	2,63	2,63	0,00447
130	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	0,00000
140	3,055	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	0,00224
150	3,27	3,28	3,27	3,27	3,28	3,27	0,00548
160	3,49	3,5	3,5	3,49	3,49	3,49	0,00548
170	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	0,00000
180	3,92	3,92	3,93	3,93	3,93	3,93	0,00548
190	4,15	4,15	4,15	4,14	4,15	4,15	0,00447
200	4,36	4,36	4,36	4,36	4,37	4,36	0,00447
210	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	0,00000
220	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,80	0,00000
230	5,01	5,01	5,01	5,01	5,02	5,01	0,00447
240	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23	0,00000
250	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	0,00000
260	5,67	5,66	5,67	5,67	5,66	5,67	0,00548
270	5,89	5,89	5,89	5,88	5,89	5,89	0,00447
280	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,10	0,00000
290	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	0,00000
300	6,54	6,53	6,54	6,53	6,54	6,54	0,00548
310	6,76	6,76	6,76	6,76	6,75	6,76	0,00447
320	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97	0,00000
330	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19	0,00000
340	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	0,00000
350	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	0,00000
360	7,84	7,84	7,85	7,84	7,84	7,84	0,00447
370	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	0,00000
380	8,28	8,28	8,29	8,28	8,28	8,28	0,00447
390	8,49	8,5	8,5	8,5	8,5	8,50	0,00447
400	8,71	8,71	8,71	8,71	8,71	8,71	0,00000

Fonte: autoria própria.

3.2.4 Sistema de Acionamento

O sistema de acionamento permite o ajuste do ar comprimido nos cilindros por meio da variação da tensão nos terminais das válvulas direcionais. A programação em Labview utiliza as saídas analógicas do módulo multifuncional. A Figura 25 apresenta o diagrama de blocos do sistema de acionamento. O módulo multifuncional na função de conversor digital analógico (D/A) serve para transformar os sinais digitais fornecidos pelo controlador em sinais analógicos de controle para as válvulas eletropneumáticas proporcionais. Cada sinal de saída do módulo (sinal de controle) tem valores que variam entre 0 e 10VCC.

Figura 25 - Diagrama funcional do sistema de acionamento.



Fonte: autoria própria.

O Labview disponibiliza o bloco DAQ Assistant Express VI, que contém um programa de configuração (*wizard*) dos sinais de entrada e saída do módulo multifuncional de dados para realizar quaisquer operações: analog input, analog output, digital I/O. Na configuração das saídas analógicas, definem-se as variações das tensões de saída, escolhendo-se ainda quais canais físicos de saída da placa serão utilizados.

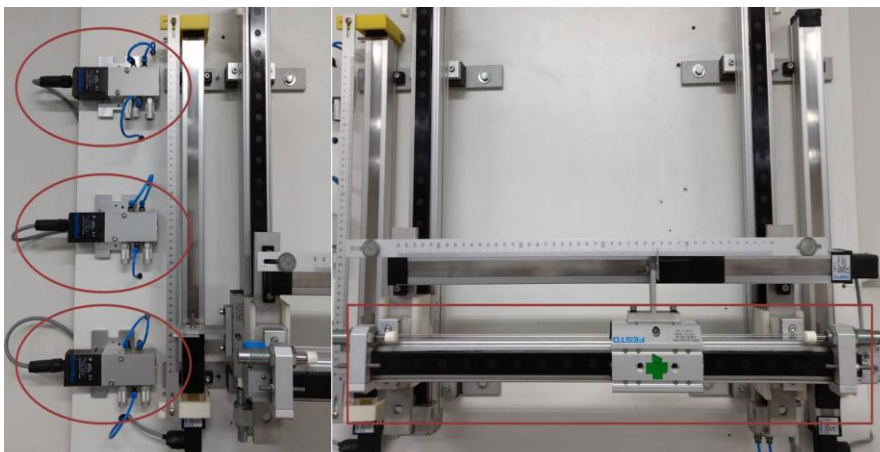
As válvulas eletropneumáticas proporcionais são os atuadores responsáveis por receber os sinais de excitação analógicos provenientes da placa de aquisição de dados, e assim direcionar proporcionalmente a vazão da linha de suprimento para as câmaras do cilindro e destas para atmosfera, fazendo com que a diferença de pressão nos êmbolos do cilindro forneça a força necessária ao movimento de sua haste.

Elas possuem um carretel com controlador de abertura que permite combinar o controle de direção e velocidade do cilindro, ou seja, a posição pode ser colocada em qualquer lugar entre 0% e 100% do curso por variação da corrente do solenoide. O cilindro pneumático é do tipo sem haste e é formado por um cursor, localizado na parte de fora da camisa do cilindro, que acompanha o movimento do êmbolo que está na parte interior da camisa.

O acoplamento entre o êmbolo e o cursor pode ser feito de forma magnética ou mecânica. O acoplamento mecânico é feito por uma fita metálica guiada em um canal com vedação dinâmica. Este cilindro, por não possuir haste, possui a mesma área em ambos os lados e conseqüentemente a mesma força de avanço e recuo. O cilindro sem haste é aplicado onde são necessários cursos muito grandes e a flambagem na haste do cilindro comum se torna um problema.

Na Figura 26 são apresentadas as válvulas e os cilindros utilizados no sistema de acionamento, e na Tabela 4 são apresentadas as especificações técnicas das válvulas proporcionais.

Figura 26 - Válvulas eletropneumáticas proporcionais e cilindro pneumático.



Fonte: autoria própria.

Tabela 4 - Especificações técnicas das válvulas eletropneumáticas proporcionais.

Modelo/Fabricante	MPYE-5-1/8-HF-010-B/Festo
Tipo	5/3 vias
Pressão absoluta de trabalho	Até 1,0 MPa (10 bar)
Vazão nominal	700 l/min
Temperatura de trabalho	5 °C a 40 °C
Temperatura ambiente	0 °C a 50 °C
Tensão de alimentação	24 VCC
Tensão de controle	0 a 10 VCC

Fonte: autoria própria.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados, assim como uma análise dos gráficos da resposta dos controladores à um sinal de referência do tipo degrau variável e ao distúrbio externo. São apresentados também algumas medidas de desempenho extraídas das curvas de resposta das bases X e Y. Os dados foram coletados com um programa em Labview[®] e os gráficos gerados a partir de um script no Matlab[®]. Nestes gráficos, a resposta (dada em milímetros) equivale ao deslocamento do robô no eixo citado.

4.1 Testes Iniciais: Segundo Método de Ziegler e Nichols

Conforme será apresentado neste tópico, observou-se que o sistema apresentou uma oscilação após uma variação no valor de K_p , logo o segundo método de Ziegler e Nichols se tornou aplicável para a situação encontrada.

4.1.1 Determinação do Ganho Crítico (K_{cr}) e Período Crítico (P_{cr})

Para determinar os valores de K_{cr} e P_{cr} foram realizados testes no robô levando em conta os deslocamentos partindo da posição de 10 mm (não partiu-se da posição 0 devido ao fato do cilindro ainda estar em contato com o freio mecânico do sistema) e indo para 100, 200 e 300 mm respectivamente. O procedimento foi o mesmo para os eixos X e Y do robô cartesiano.

- *Ganho Crítico e Período Crítico no Eixo X*

Após alterar experimentalmente o valor do ganho proporcional do sistema e observar seu deslocamento nas posições citadas anteriormente, notou-se que a partir do valor de 1,8 o sistema começava a oscilar em torno do *setpoint*, sendo este o valor do ganho crítico ($K_{cr,x}$) do sistema.

Após o início da oscilação do sistema, foram extraídos os dados por meio do LabVIEW, que posteriormente foram usados em uma programação Matlab para gerar os gráficos de análise, que são apresentados nas Figuras 27, 28 e 29, onde o sistema funcionou em malha fechada com um controlador puramente proporcional com ganho $K_p = K_{cr,x} = 1,8$.

Figura 27 - Deslocamento 10 mm a 100 mm no eixo X.

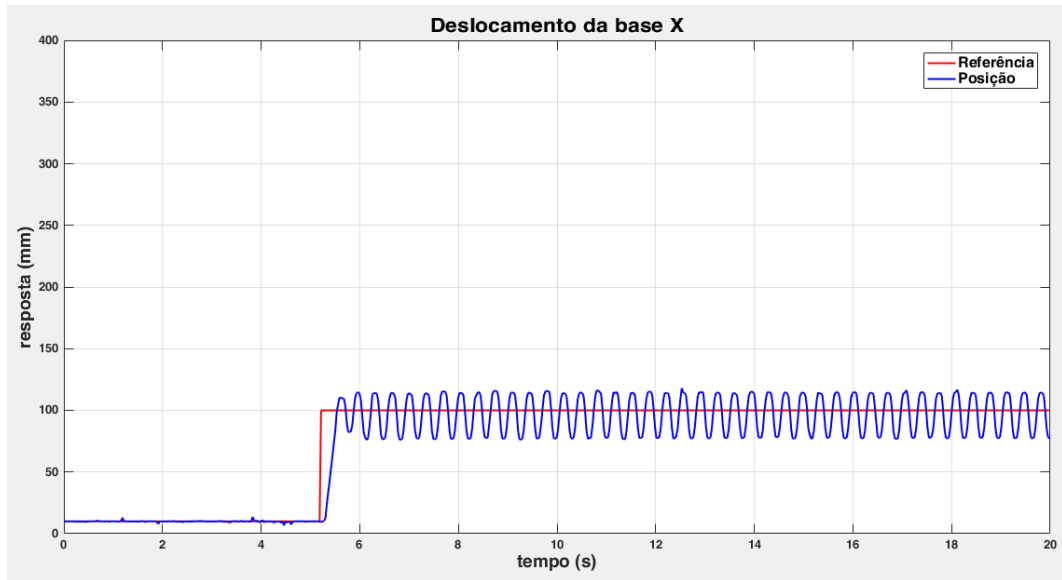
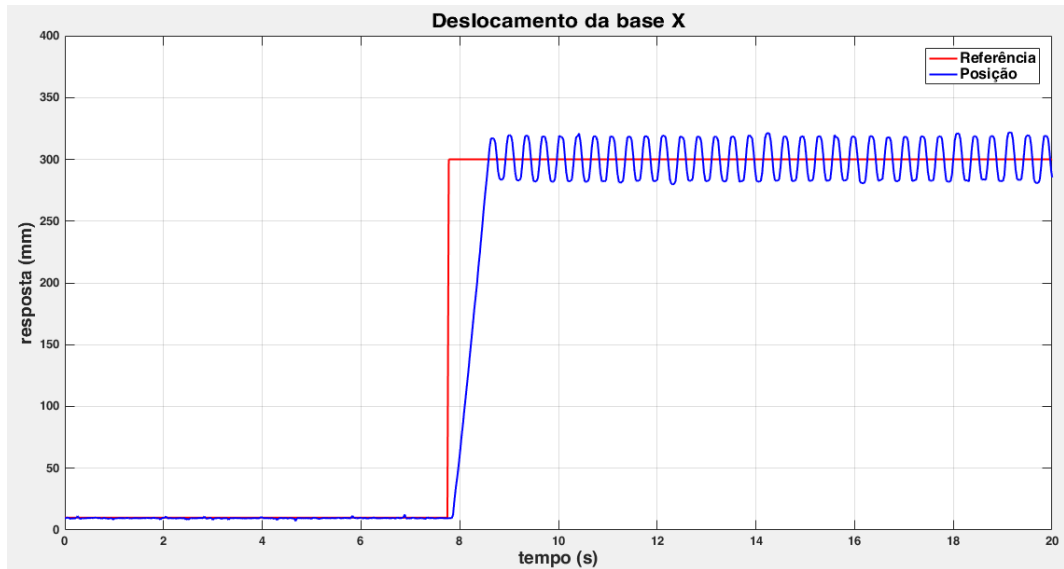


Figura 29 - Deslocamento 10 mm a 300 mm no eixo X.



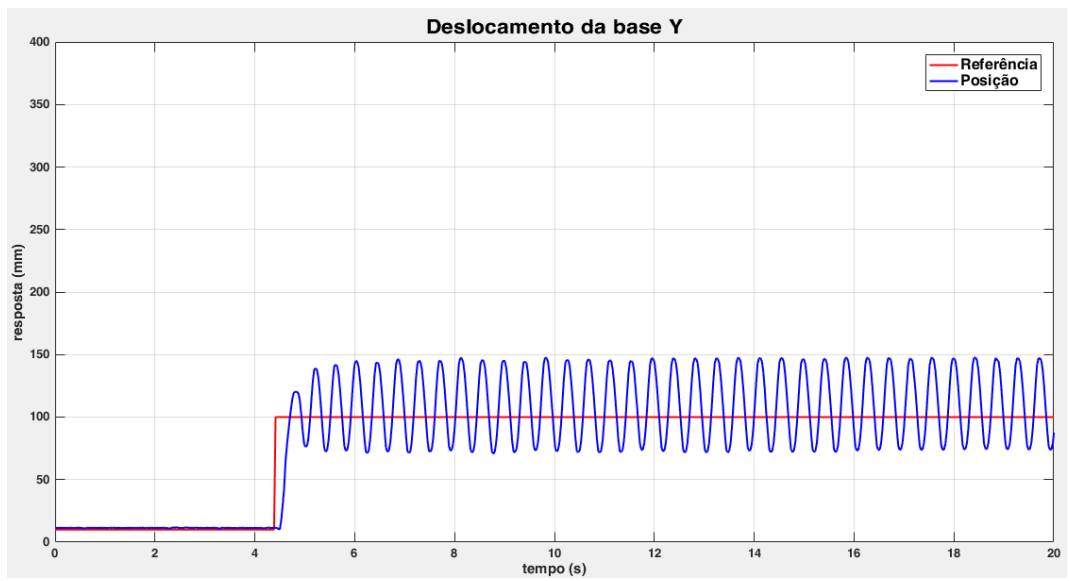
Fonte: autoria própria.

Após os gráficos serem gerados, foi possível notar que o valor do período crítico ($P_{cr,x}$), que é o período do sinal oscilatório encontrado, foi de 0,35 segundos para todos os deslocamentos propostos.

- *Ganho Crítico e Período Crítico no Eixo Y*

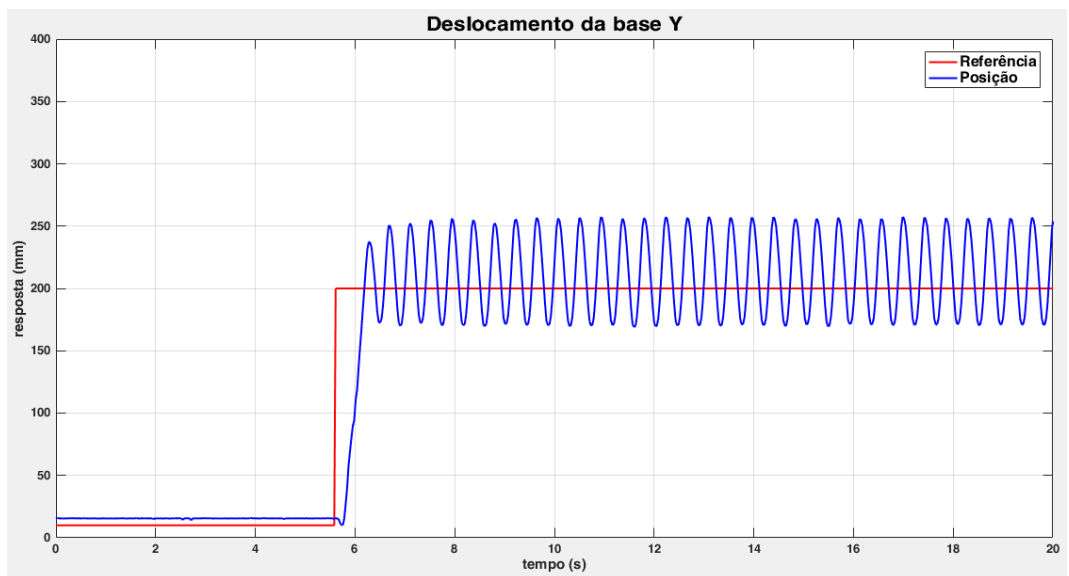
Seguindo a mesma lógica do eixo X, o valor de $K_{cr,y}$ foi de 1,1 (valor no qual o sistema começou oscilar). Os gráficos gerados para os mesmos deslocamentos são apresentados nas Figuras 30, 31 e 32. O valor encontrado para $P_{cr,y}$ foi de 0,41 segundos.

Figura 30 - Deslocamento 10 mm a 100 mm no eixo Y.



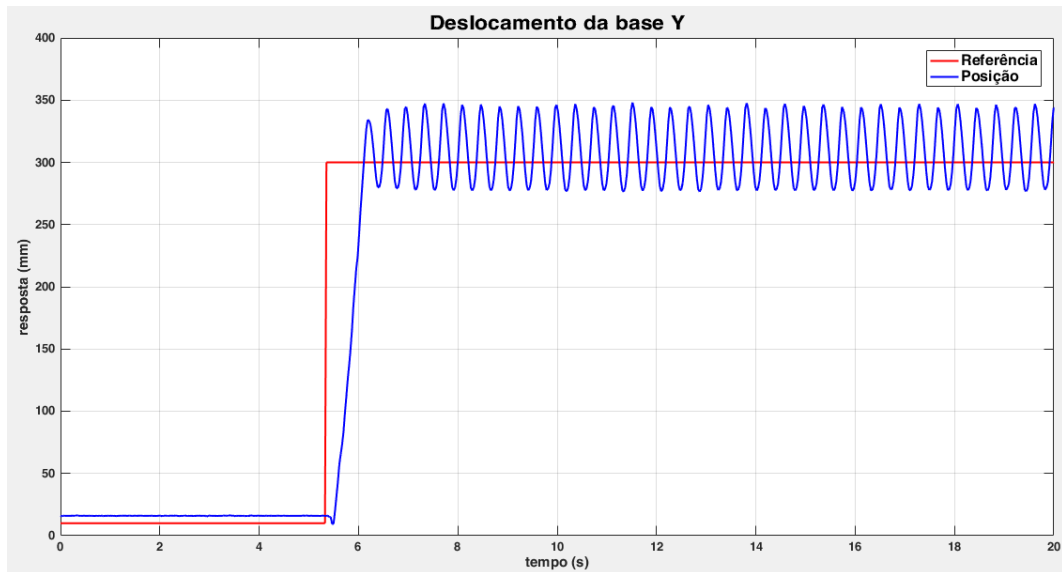
Fonte: autoria própria.

Figura 31 - Deslocamento 10 mm a 200 mm no eixo Y.



Fonte: autoria própria.

Figura 32 - Deslocamento 10 mm a 300 mm no eixo Y.



Fonte: autoria própria.

4.1.2 Ganhos dos Controladores P, PI e PID

Os valores de ganho crítico e período crítico obtidos no tópico anterior estão resumidos na Tabela 5.

Com estes valores, foi possível calcular o valor dos ganhos para os controladores P, PI e PID segundo a tabela do segundo método de Ziegler e Nichols. Todos os valores calculados se encontram na Tabela 6 para o eixo X e na Tabela 7 para o eixo Y.

Tabela 5 - Valores críticos para o sistema cartesiano XY do robô.

Eixo X		Eixo Y	
$K_{cr,x}$	$P_{cr,x}$	$K_{cr,y}$	$P_{cr,y}$
1,8	0,35s	1,1	0,41s

Fonte: autoria própria.

Tabela 6 - Ganhos dos controladores P, PI e PID para o eixo X.

	K_p	T_i	T_d
P	0,9	0	0
PI	0,81	0,292	0
PID	1,08	0,175	0,044

Fonte: autoria própria.

Tabela 7 - Ganhos dos controladores P, PI e PID para o eixo Y.

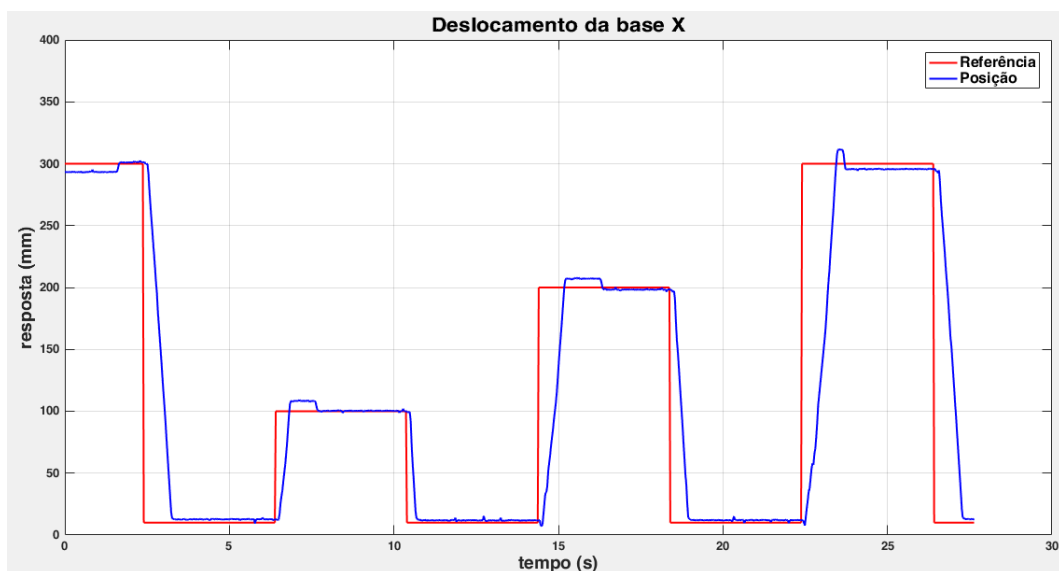
	K_p	T_i	T_d
P	0,55	0	0
PI	0,495	0,342	0
PID	0,66	0,205	0,051

Fonte: autoria própria.

4.1.3 Resultados com o Controlador Proporcional (P)

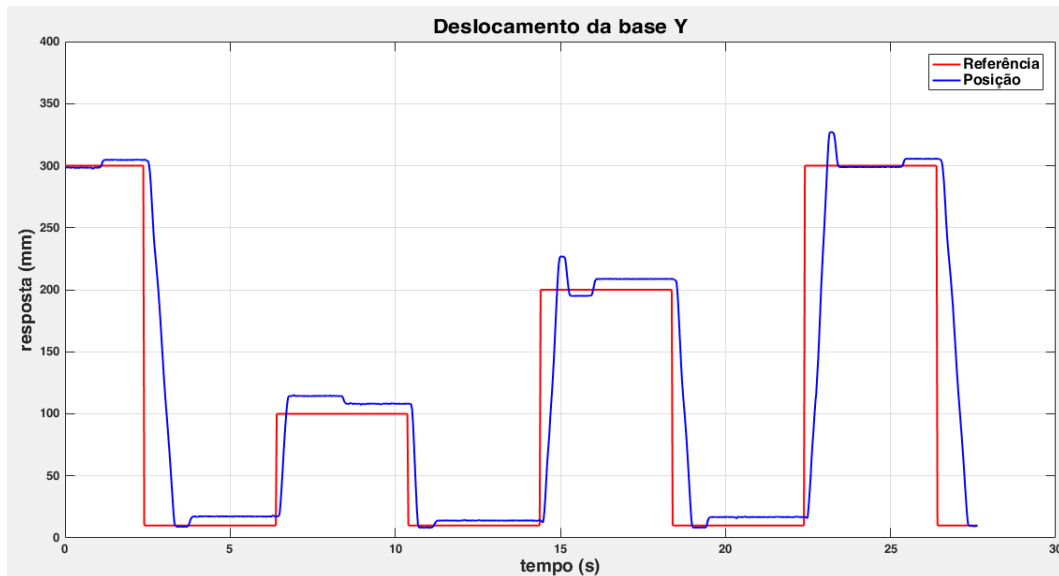
Considerando uma trajetória que passe pelos pontos definidos anteriormente, foram gerados os gráficos dos deslocamentos em X e Y do robô cartesiano com um controlador proporcional em ação, utilizando o ganho proporcional calculado anteriormente. Os gráficos são apresentados nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 - Deslocamento no eixo X com controlador P.



Fonte: autoria própria.

Figura 34 - Deslocamento no eixo Y com controlador P.



Fonte: autoria própria.

A resposta temporal deste controlador para o sistema está resumida na Tabela 8, em que:

T_r : tempo de subida;

T_d : tempo de atraso;

T_s : tempo de acomodação;

M_o : Sobressinal percentual (*overshoot*);

e : erro percentual em regime permanente.

Tabela 8 - Resposta temporal para o controlador P conforme Ziegler e Nichols.

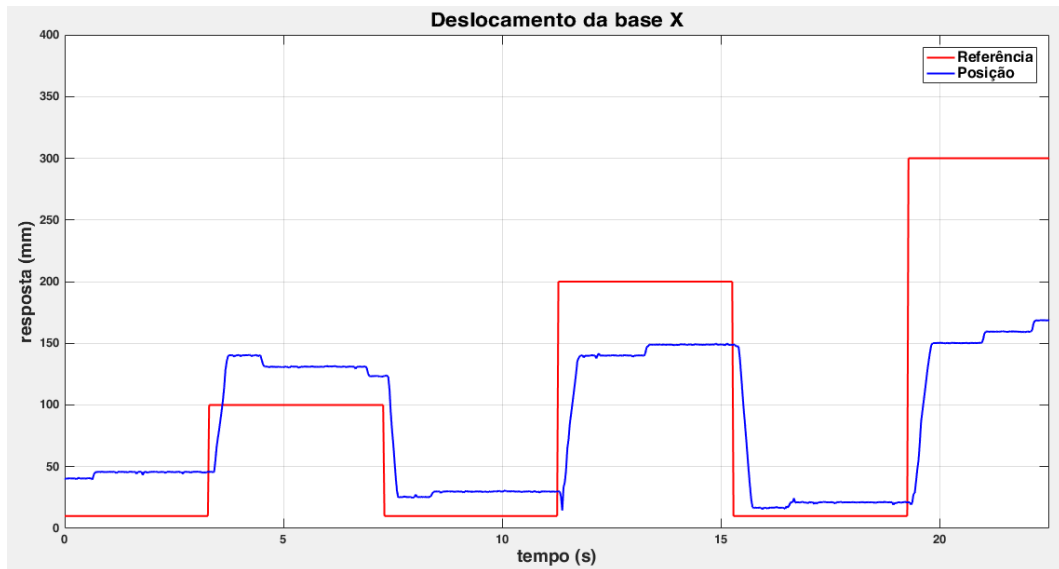
Deslocamento (mm)	Eixo X			Eixo Y		
	10 - 100	10 - 200	10 - 300	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	0,258	0,546	0,745	0,173	0,316	0,488
T_d (s)	0,289	0,518	0,689	0,174	0,318	0,432
T_s (s)	0,748	0,749	0,975	2,066	0,777	0,632
M_o (%)	10,28	4,21	3,95	17,13	14,11	9,33
e (%)	1,90	1,81	1,15	9,01	5,15	0,60

Fonte: autoria própria.

4.1.4 Resultados com o Controlador Proporcional Integral (PI)

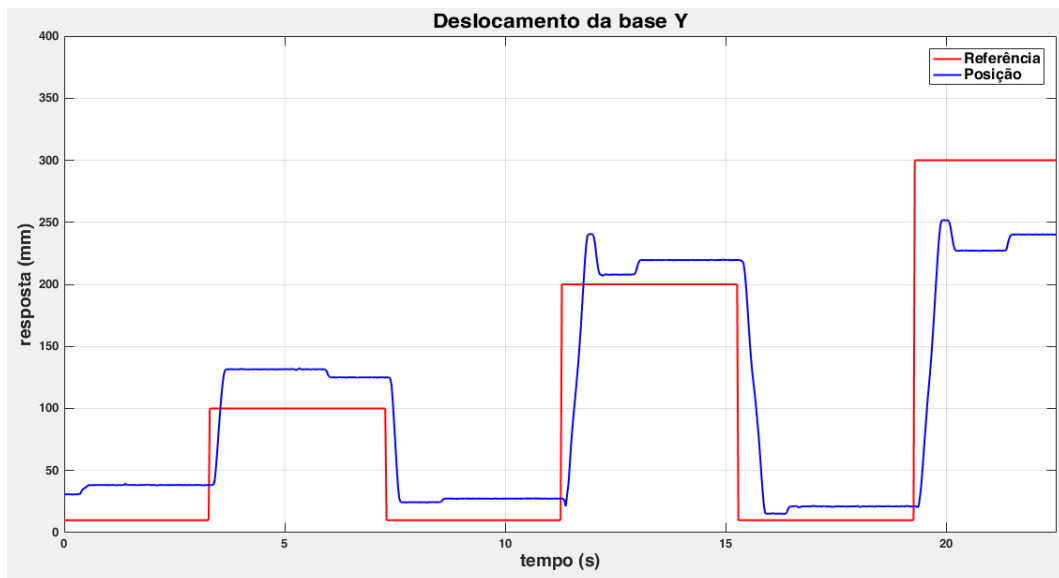
Ainda considerando o mesmo trajeto utilizado no controlador P, foram gerados os gráficos dos deslocamentos em X e Y do robô cartesiano com um controlador proporcional integral em ação, considerando os ganhos encontrados. Os gráficos são apresentados nas Figuras 35 e 36, e a resposta temporal na Tabela 9.

Figura 35 - Deslocamento no eixo X com controlador PI.



Fonte: autoria própria.

Figura 36 - Deslocamento no eixo Y com controlador PI.



Fonte: autoria própria.

Tabela 9 - Resposta temporal para o controlador PI conforme Ziegler e Nichols.

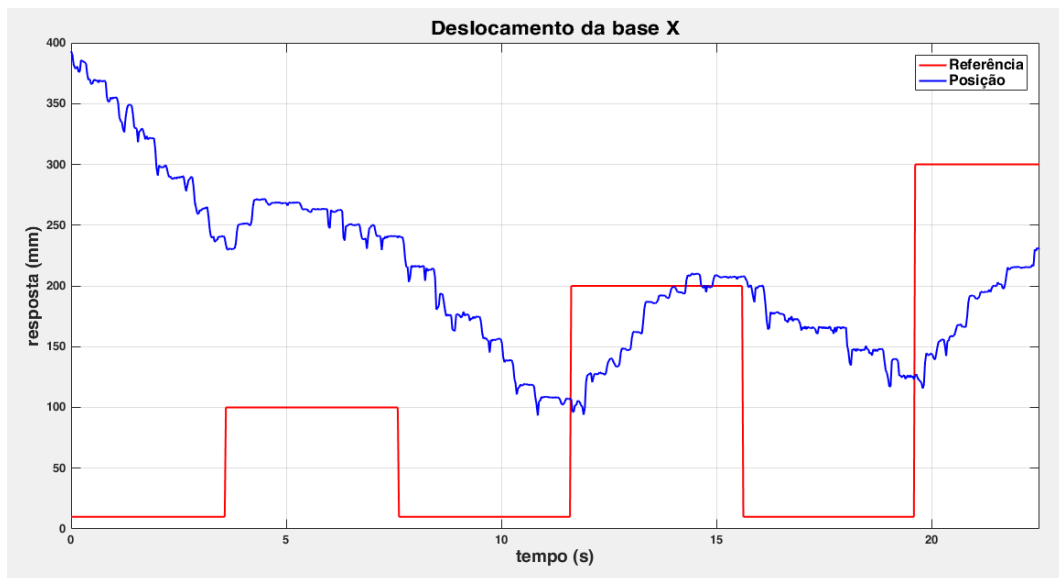
Deslocamento (mm)	Eixo X			Eixo Y		
	10 - 100	10 - 200	10 - 300	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	0,857	4,561	1,966	1,428	0,345	0,522
T_d (s)	0,143	0,347	1,705	0,143	0,290	0,404
T_s (s)	1,231	0,404	1,734	0,171	0,347	0,462
M_o (%)	45,28	26,76	48,30	36,38	21,38	16,65
e (%)	34,46	30,23	48,48	31,77	6,80	23,11

Fonte: autoria própria.

4.1.5 Resultados com o Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

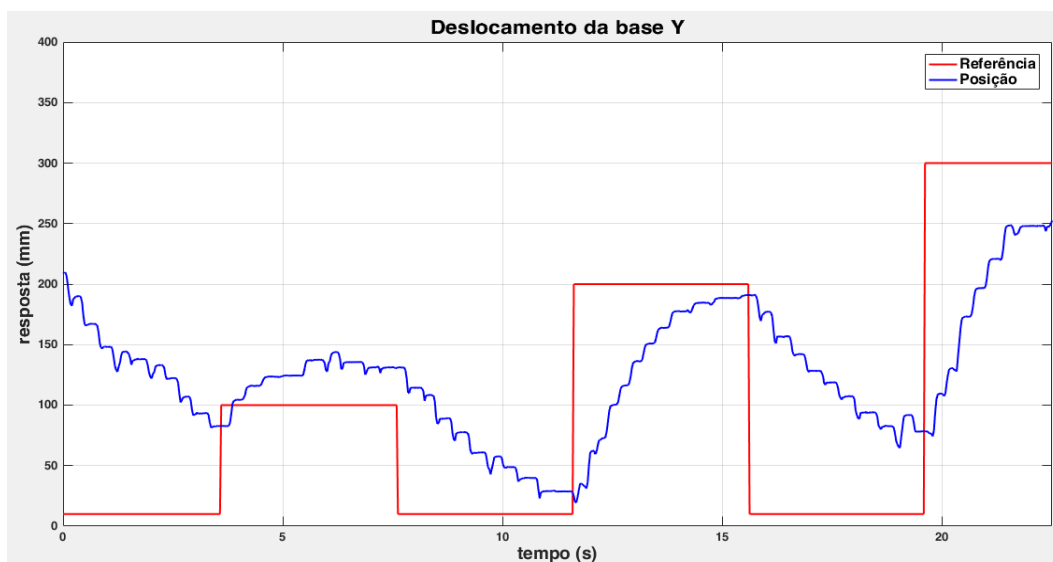
Os gráficos para este controlador são apresentados nas Figuras 37 e 38, sendo notória a influência negativa do ganho derivativo sobre o controle do sistema, que pode ser explicado pela sua não linearidade. Como o sistema não atinge o regime permanente (sofreu uma espécie de colapso) tornou-se inviável a resposta temporal do mesmo.

Figura 37 - Deslocamento no eixo X com controlador PID.



Fonte: autoria própria.

Figura 38 - Deslocamento no eixo Y com controlador PID.



Fonte: autoria própria.

4.2 Testes Finais: Ajustes Finos no Controlador Selecionado

Foi observado, conforme o segundo método de Ziegler e Nichols, e demonstrado nos tópicos anteriores, que o melhor resultado dentre os controladores foi o do tipo proporcional (P), pois no geral apresenta menores valores de sobressinal e erro em regime permanente. Isso pode ser explicado pela não linearidade do sistema, que não segue uma lógica temporal linear (que afeta diretamente os ganhos integral e derivativo) em relação à vazão de ar comprimido.

Porém, o controlador proporcional apresentado, mesmo estando dentro do sobressinal máximo proposto pela teoria de Ziegler e Nichols (25%), ainda possui um valor de 17,13% no eixo Y, para o deslocamento de 10 mm a 100 mm, o que pode ser considerado alto para diversas aplicações.

Isso significa dizer que se este robô, com este controlador e este deslocamento, fosse utilizado para uma solda em chapas grossas de aço, teria 17,13 mm de solda em uma região indesejada da chapa. Neste caso, é preferível um maior erro em regime permanente do que um sobressinal elevado, pois o erro pode ser compensado pelo operador. Tendo isto em mente, tornou-se necessária uma alteração manual do ganho proporcional, a partir dos valores obtidos anteriormente e do método de ajuste fino.

Após os ajustes terem sido efetuados, tomando como referência os valores obtidos segundo Ziegler e Nichols, foi observado que a ação da gravidade no eixo Y tornou inviável a ação de um único controlador para este eixo, então foram adotados dois ganhos proporcionais diferentes, sendo um para o movimento de descida ($K_{p,y\text{low}}$) e outro de subida ($K_{p,y\text{up}}$). Os novos ganhos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Ganhos do controlador proporcional (P) para os eixos X e Y após ajustes.

$K_{p,x}$	$K_{p,y,low}$	$K_{p,y,up}$
0,51	0,15	0,37

Fonte: autoria própria.

- *Controlador Proporcional (P) Ajustado para o Eixo X*

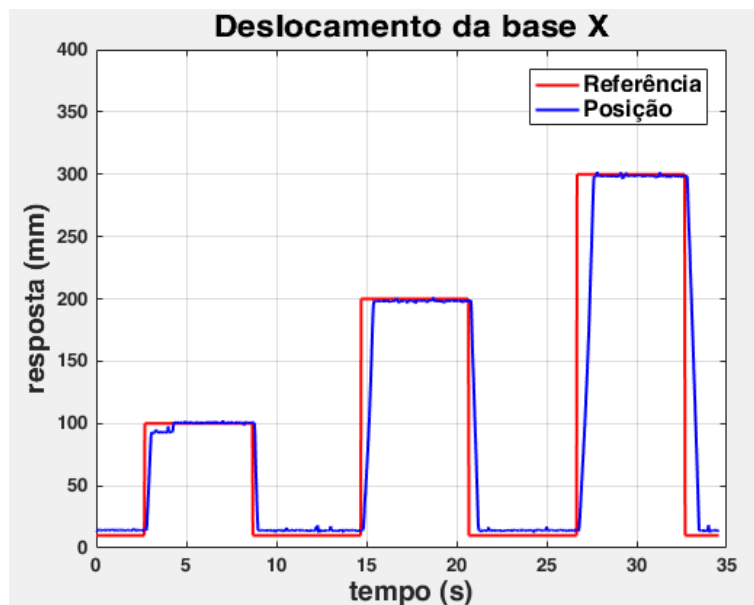
Os resultados após os ajustes para o eixo X é representado na Figura 39, e sua resposta temporal na Tabela 11.

Tabela 11 - Resposta temporal no eixo X com controlador P ajustado.

Deslocamento (mm)	Eixo X		
	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	0,231	0,463	0,663
T_d (s)	0,231	0,459	0,606
T_s (s)	1,582	0,666	0,920
M_o (%)	2,77	0,696	0,680
e (%)	0,66	0,942	0,477

Fonte: autoria própria.

Figura 39 - Deslocamento no eixo X com controlador P ajustado.



Fonte: autoria própria.

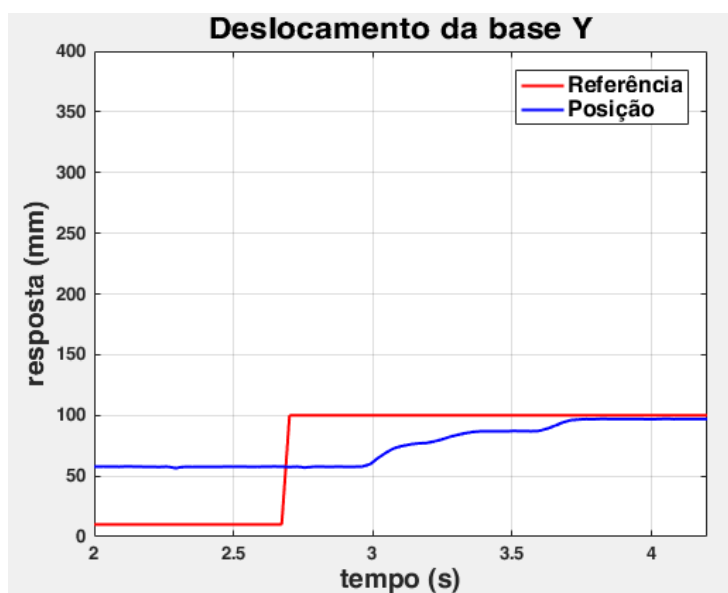
- *Controlador Proporcional Ajustado para o Eixo Y*

Conforme já citado anteriormente, foram encontrados dois ganhos proporcionais para o eixo Y, cujos resultados serão mostrados nos tópicos que se seguem. É válido ressaltar que o valor de 0 mm do gráfico corresponde a posição onde o robô está em sua posição mais alta (Figura 23B), logo o deslocamento de 10 mm a 100 mm corresponde a um movimento de descida, por exemplo.

- *Controlador Proporcional para Movimento de Descida no Eixo Y*

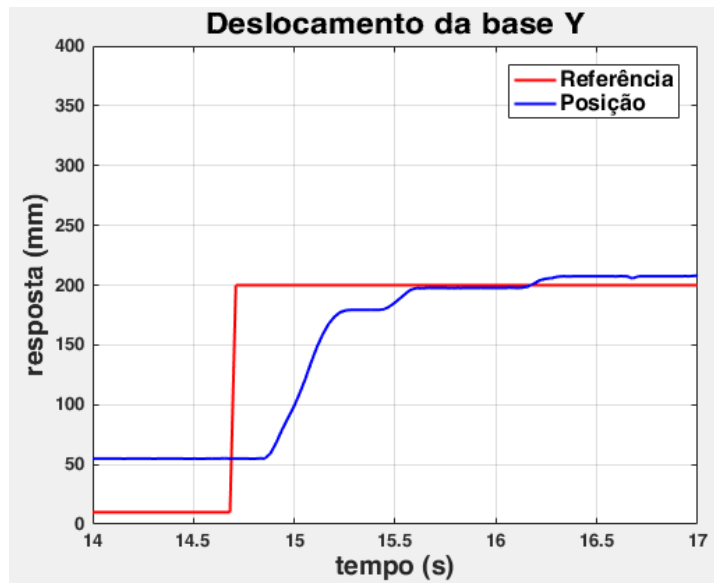
Os resultados para este controlador são apresentados nas Figuras 40, 41 e 42. A Tabela 12 apresenta a resposta temporal para este controlador.

Figura 40 - Deslocamento 10 a 100mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida.



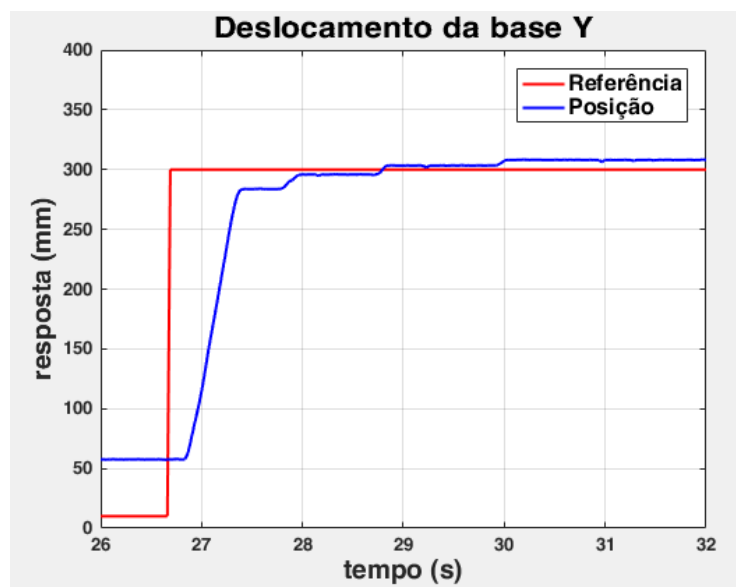
Fonte: autoria própria.

Figura 41 - Deslocamento 10 a 200mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida.



Fonte: autoria própria.

Figura 42 - Deslocamento 10 a 300mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida.



Fonte: autoria própria.

Tabela 12 - Resposta temporal no eixo Y com controlador P ajustado para descida.

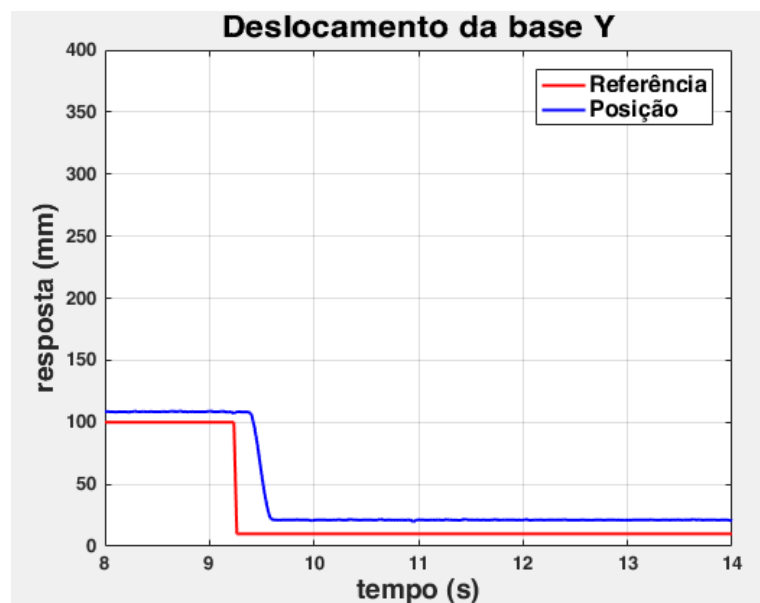
Deslocamento (mm)	Eixo Y (descida)		
	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	1,360	0,926	0,693
T_d (s)	0,408	0,315	0,402
T_s (s)	1,008	0,838	1,151
M_o (%)	3,15	4,19	2,95
e (%)	3,49	1,52	1,31

Fonte: autoria própria.

○ *Controlador Proporcional para Movimento de Subida no Eixo Y*

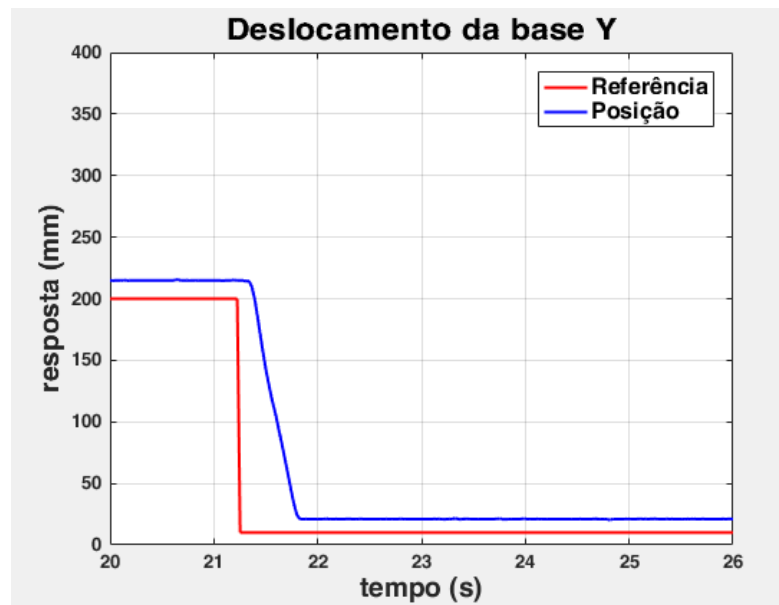
Os resultados para este controlador são apresentados nas Figuras 43, 44 e 45, bem como sua resposta temporal na Tabela 13.

Figura 43 - Deslocamento 100 a 10mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida.



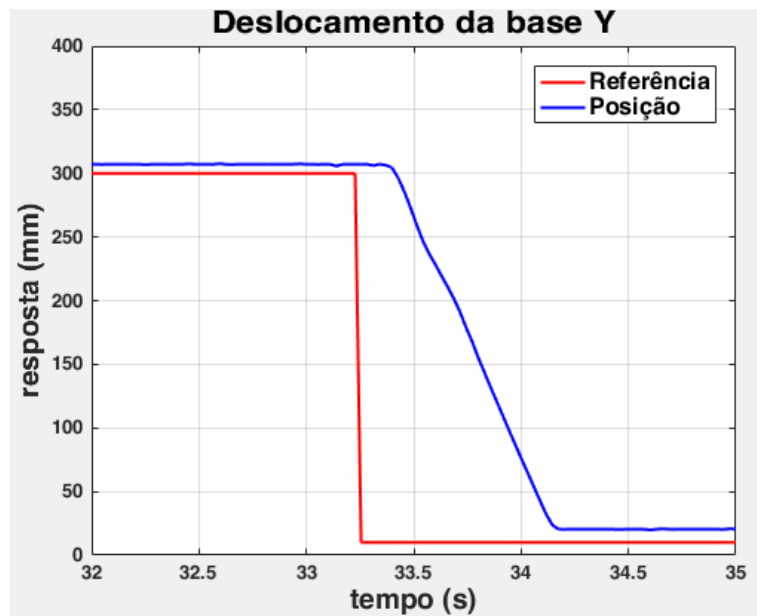
Fonte: autoria própria.

Figura 44 - Deslocamento 200 a 10mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida.



Fonte: autoria própria.

Figura 45 - Deslocamento 300 a 10mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida.



Fonte: autoria própria.

Tabela 13 - Resposta temporal no eixo Y com controlador P ajustado para subida.

Deslocamento (mm)	Eixo Y (subida)		
	100 - 10	200 - 10	300 - 10
T_r (s)	1,521	0,347	0,602
T_d (s)	0,229	0,345	0,544
T_s (s)	0,317	0,547	0,889
M_o (%)	10,96	5,39	3,39
e (%)	12,50	5,82	3,62

Fonte: autoria própria.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÃO

5.1. Comentários Finais

Neste trabalho foi realizada uma análise da aplicação de controladores PID para o posicionamento XY de um manipulador cartesiano composto por atuadores pneumáticos proporcionais. A avaliação foi realizada através de critérios de desempenhos, observando bandas operacionais onde o sistema se comportava empiricamente de forma aproximadamente linear.

Os resultados demonstraram que as ações derivativas e integrais, mesmo com ganhos mínimos, promoveram alterações negativas no desempenho do sistema, e neste sentido, os resultados positivos só foram observados com a aplicação da ação proporcional pura. É difícil formular um esclarecimento lúcido sobre o comportamento gráfico do controle quando implementadas as ações derivativas e integrais, devido a complexidade da planta. São diversos os fatores intrínsecos da máquina que podem ter ocasionado à sensibilidade negativa destes controladores. O esforço de identificação das fontes desta sensibilidade negativa é dispendioso devido principalmente, à falta de dados técnicos dos componentes diretamente relacionados ao controle tais como as eletroválvulas proporcionais. Entende-se, portanto, que explicações mais precisas sobre o mau comportamento das ações derivativas e integrais, requerem mais estudos sobre o próprio conjunto eletromecânico, tais como uma identificação de sistema, que irá ocorrer em trabalhos futuros.

A partir do ajuste fino aplicado apenas ao controlador proporcional obtido pelo método de Ziegler e Nichols, foi possível observar o desempenho em curtos (100 a 10 mm) e longos deslocamentos (300 a 10 mm), bem como na movimentação do eixo Y nos sentidos de subida e descida. Estas duas características alteram significativamente a dinâmica da máquina, onde um controlador ajustado para longas distâncias não apresentava bons resultados para curtas, e vice-versa. Alterações nas respostas também foram observadas comparando-se o movimento de subida e descida do eixo Y devido aos efeitos inerciais. Neste sentido, o ajuste dos ganhos buscou o menor valor de sobressinal e erro em regime permanente apenas para longas distâncias, bem como foram necessários dois diferentes ajustes para o eixo Y.

Dentre os diversos critérios de desempenho que poderiam ser analisados, o ajuste fino dos controladores foi baseado no sobressinal e no erro em regime permanente buscando a viabilidade em alguma aplicabilidade industrial como soldagem, furação, colagem, dentre

outros, onde a máquina não precisaria de alta resolução e precisão. Nesta perspectiva, observando os resultados de trabalhos semelhantes, bem como observando a magnitude dos erros aceitáveis observados nos processos de fabricação citados, estimou-se um erro máximo de 5% como parâmetro para a definição de “resultado satisfatório”.

5.2. Conclusões

Em relação ao erro em regime permanente, a aplicação dos controladores convencionais só apresentaram resultados satisfatórios (erro máximo de 3,49 %), quando a máquina estava realizando deslocamentos longos, tanto no eixo X quanto em Y. Em relação ao eixo Y, apenas os movimentos de descida apresentaram resultados satisfatórios. A definição de “satisfatório” nesta conclusão está baseada na comparação dos resultados com o trabalho de Ferreira (2016), que implementou um controlador PID convencional em um dispositivo semelhante, obtendo um erro máximo em regime de 2,534% e sobressinal máximo de 20,331%. O ajuste fino proporcionou uma melhora significativa nos sobressinais dos deslocamentos propostos, com exceção do deslocamento de 100 mm a 10 mm no eixo Y para o movimento de subida, onde o sobressinal atingiu o valor de aproximadamente 11%. Todos os outros valores não ultrapassaram 5,5%, considerando os dois eixos.

5.3. Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Investigação da influência das ações derivativas e integrais no controle da planta;
- Implementação de um controlador moderno não-linear ou inteligente;
- Implementação de uma técnica de identificação de sistema para obtenção gráfica do comportamento dinâmico da planta, bem como o modelo matemático em caixa-preta;
- Implementação de ferramentas de trabalho e análise sobre aplicações industriais factíveis.

6 REFERÊNCIAS

AYADI, A.; SOUFIEN, H.; SMAOUI, M.; CHAARI, A. **Robust Control of Electropneumatic Actuator Position via Adaptive Sliding Mode Approach**. 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, pp. 520-525, 2016.

CARVALHO, J.S.F. **Controle Adaptativo Aplicado em um Robô Manipulador de Dois Graus de Liberdade Planar**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2009.

DALL'AMICO, R. **Fundamentos da Pneumática I, II e III**. Apostila SMC Infotech Pneumáticos do Brasil, 2002.

DE NEGRI, V.J.; KINCELER, R.; SILVEIRA, J. **Automação em Controle Experimental em Hidráulica e Pneumática**. 109 f. Pós Graduação (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 1998.

DEWESOFT. **O que é Aquisição de Dados – DAQ ou DAS?** Artigo da Dewesoft, desenvolvedora e fabricante de sistemas de aquisição de dados para engenheiros. 2020.

DYNAMICATEC. **Válvula 5 2 vias**. Engenharia de processos industriais – Dynamicatec, 2020.

DYNAPAR. **Sensor de Posição: Como Escolher o Sensor Correto**. Centro de conhecimento – Dynapar Encoders, 2020.

FERREIRA, G.S. **Controle PID Convencional e GPC Adaptativo Aplicados em um Robô Manipulador Planar**. João Pessoa, 2016. Dissertação (Engenharia Mecânica). Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, 2016.

JUNIOR, E.G. **Introdução a Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados: SCADA**. 1ª ed. Rio de Janeiro – RJ. Alta Books Editora, 2019.

NATIONAL, Instruments Corporation. **Manual de Treinamento do LabVIEW Básico I**. 2001.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 5^o ed., São Paulo – SP, Ed. Pearson, 2010.

OLIVEIRA, M.F. **Projeto de um Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFRS, Porto Alegre – RS, Brasil, 2007.

PARKER, Hannifin Training. **Tecnologia Pneumática Industrial**. Apostila M1001-1 BR, Jacareí, São Paulo, 2002.

REGIS, L.P. **Projeto de um Controlador PD Adaptativo Via Alocação de Polos Aplicado Em um Robô Manipulador de Dois Graus de Liberdade Planar**. 80 f. Pós Graduação (Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2013.

ROMANO, V.F. **Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos**. Editora: Edgard Blucher Ltda, 2002.

SILVA, A.S.; ABREU, J.L.M.C.; ALMEIDA JUNIOR, A.G.; SOUZA, J.M.F.; SENA, A.P.C. **Fuzzy Position Control Applied To Electropneumatic Cartesian Robot**. In: III Congresso Internacional do PDVGT, 2019, Recife. Anais do III Congresso Internacional do PDVGT, 2019.

SILVA, E.F.N. **Proposta de Controle para uma Coluna de Destilação Didática: Mistura Binária Etanol – Água**. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Automação). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 2000.

SOUZA, O.B. **Controle Adaptativo Aplicado em Dois Elos de um Robô Manipulador Eletropneumático de Três Graus de Liberdade Cartesiano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa – PB, Brasil, 2010.

STEWART, Harry L. **Pneumática e Hidráulica**. São Paulo: Hemus, 481 f. 1978.

STOLL, K. **New Developments in Pneumatics**. Proceedings of The Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 34-40, Hangzhou, China, 2001.

TEIXEIRA, C.L. **Arquitetura Microcontrolada Programável Em Tempo Real Aplicada ao Controle de um Servoposicionador Pneumático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2020.

UNECE. **Worldwide Growth in the Period 2004-2007**, Technical report, United Nations Economic Commission for Europe – World Robotics, 2004.

VALE, V.A.C. **Controle de Posição de um Robô Cartesiano por Meio de Técnicas Adaptativas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa – PB, Brasil, 2011.

XAVIER, R.S.; DO COUTO, I.P. **Sistema de Controle de Posicionamento de Peças Utilizando a Pneumática Proporcional**. 73 f. Graduação (Engenharia Mecânica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2013.