



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Anderson Guilherme Ceretta

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM ROBÔ PARA POSICIONAMENTO DE
SONDA COLETORA DE AMOSTRAS DE GRÃOS**

Florianópolis - SC
2025

Anderson Guilherme Ceretta

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM ROBÔ PARA POSICIONAMENTO DE
SONDA COLETORA DE AMOSTRAS DE GRÃOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr. Eng.
Coorientador: Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

Florianópolis - SC

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Ceretta, Anderson Guilherme

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM ROBÔ PARA POSICIONAMENTO DE
SONDA COLETORA DE AMOSTRAS DE GRÃOS / Anderson Guilherme
Ceretta ; orientador, Antonio Carlos Valdiero,
coorientador, Victor Juliano De Negri, 2025.

167 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Robô agrícola. 3. Coleta
automatizada de amostras de grãos. 4. Sistemas Hidráulicos
e Pneumáticos. 5. Pós-colheita de grãos. I. Valdiero,
Antonio Carlos . II. De Negri, Victor Juliano . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Anderson Guilherme Ceretta

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM ROBÔ PARA POSICIONAMENTO DE SONDA COLETORA DE AMOSTRAS DE GRÃOS

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luís Cesar da Silva, Dr. Eng.
Universidade Federal de Viçosa

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

 Documento assinado digitalmente
Henrique Simas
Data: 30/10/2025 10:38:27-0300
CPF: ***.194.639-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

 Documento assinado digitalmente
Antonio Carlos Valdiero
Data: 28/10/2025 08:47:52-0300
CPF: ***.227.377-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr. Eng.
Orientador

 Documento assinado digitalmente
Victor Juliano de Negri
Data: 29/10/2025 13:03:54-0300
CPF: ***.505.630-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.
Coorientador

Florianópolis, 2025.

À minha família pelo apoio incondicional, em especial aos meus pais Sandro e Taciana, aos meus irmãos Rafael e Bruno e à minha namorada Ana Maria.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria concedidas em todos os momentos desta jornada acadêmica e pessoal.

Aos meus pais, Sandro e Taciana, pelo amor incondicional, pelo apoio e pelo exemplo de dedicação e perseverança que me inspiraram. Aos meus irmãos, Rafael e Bruno, pela amizade, companheirismo e incentivo desde sempre.

À minha companheira e namorada Ana Maria, por estar presente nos momentos difíceis e nas pequenas vitórias, compartilhando desafios, conquistas, ideias e sonhos, tornando cada conquista mais leve e significativa.

Ao professor e orientador Antonio Carlos Valdiero, por sua orientação, apoio, amizade e por toda a confiança depositada em mim ao longo da pesquisa. Por seu conhecimento técnico e dedicação, que contribuíram para a concretização desta dissertação e para meu crescimento profissional e acadêmico.

Ao professor e coorientador Victor Juliano de Negri e toda a equipe do Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP), pela disponibilidade, suporte e por todo compartilhamento de conhecimentos que enriqueceram a pesquisa.

Ao Richard, Ruben e Edson, pela amizade e pela colaboração em todas as etapas da adaptação do robô. Estendo meu agradecimento a toda a equipe e amigos do Laboratório de Hardware (LHW), que sempre foram muito atenciosos e receptivos.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC), pela infraestrutura. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio de projetos de pesquisa aprovados (processos 306229/2021-8, 406936/2022-6, 310578/2025-6) com auxílio financeiro para infraestrutura laboratorial e bolsas de iniciação científica, mestrado e doutorado, os quais contribuíram na concepção desta pesquisa na área de formação de recursos humanos em engenharia.

Aos colegas de curso, amigos, professores e todas as demais pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, seja com apoio técnico, incentivo ou palavras de motivação nos momentos mais desafiadores.

A todos, minha sincera e profunda gratidão.

RESUMO

Este trabalho trata da avaliação experimental de um robô empregado como prova de conceito para o posicionamento automatizado de uma sonda coletora de amostras de grãos em unidades armazenadoras. A proposta visa substituir o processo manual de coleta, que apresenta baixa repetibilidade e impõe riscos aos operadores, como quedas devido ao trabalho em altura, inalação de poeira e partículas potencialmente alergênicas, esforço físico repetitivo e exposição prolongada a condições ambientais adversas, por uma solução automatizada com maior precisão e segurança. O robô avaliado possui três graus de liberdade, com duas juntas de revolução acionadas por atuadores hidráulicos e uma junta prismática acionada pneumáticamente. O controle adotado combina um controlador Proporcional-Integrativo com a compensação das características não-lineares de zona morta das válvulas de acionamento. Para o planejamento da trajetória do robô, empregam-se perfis de referência do tipo polinomial de sétimo grau e rampa linear, com pontos predefinidos que simulam posições da sonda coletora ao longo da carroceria de um caminhão graneleiro. A metodologia adotada integra um estudo sobre as inovações e necessidades do mercado perante a atividade, além da modelagem matemática e a execução dos ensaios na bancada experimental com o robô. Durante os ensaios, adquiram-se os sinais de posição das juntas do robô, as pressões nas câmaras de cada atuador e os sinais de controle aplicados às válvulas, possibilitando a avaliação do comportamento dinâmico do sistema e a comparação entre a trajetória desejada e a trajetória efetivamente executada. Os resultados obtidos indicam que o robô é capaz de seguir a trajetória de referência com erros compatíveis com os requisitos da aplicação proposta. A configuração cinemática adotada para a prova de conceito do robô demonstrou ser adequada para a execução da tarefa. A avaliação global do sistema evidencia que a estratégia de controle implementada, associada aos modelos de planejamento de trajetória adotados, pode viabilizar a automação do processo de coleta de amostras, reduzir a intervenção humana e aumentar a eficiência operacional em unidades armazenadoras de grãos a granel.

Palavras-chave: automação do pós-colheita, robô agrícola, amostragem de grãos automatizada.

ABSTRACT

This study presents the experimental evaluation of a robot developed as a proof of concept for the automated positioning of a grain sampling probe in storage units. The proposed solution aims to replace the manual sampling process, which exhibits low repeatability and poses risks to operators, such as falls from working at height, inhalation of dust and potentially allergenic particles, repetitive physical strain, and prolonged exposure to adverse environmental conditions, with an automated system offering greater precision and safety. The evaluated robot has three degrees of freedom, with two revolute joints actuated by hydraulic actuators and one prismatic joint actuated pneumatically. The adopted control strategy combines a Proportional-Integral controller with dead zone compensation for the actuation valves. Trajectory planning employs seventh-degree polynomial and linear ramp reference profiles, with predefined points simulating probe positions along the body of a grain truck. The methodology integrates a study of market innovations and requirements for this activity, mathematical modeling of the system, and execution of experimental tests on the robot in a dedicated laboratory setup. During testing, joint position signals, actuator chamber pressures, and control signals applied to the valves were acquired, enabling evaluation of the system's dynamic behavior and comparison between the desired and actual trajectories. The results indicate that the robot can follow the reference trajectory with errors compatible with the requirements of the proposed application. The adopted kinematic configuration proved adequate for executing the task in this proof-of-concept stage. Overall, the system evaluation shows that the implemented control strategy, combined with the adopted trajectory planning models, can enable the automation of the sampling process, reduce human intervention, and increase operational efficiency in bulk grain storage units.

Keywords: post-harvest automation, agricultural robot, automated grain sampling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista em perspectiva da bancada do robô hidráulico na forma antropomórfica.	21
Figura 2 – Diagrama esquemático da metodologia adotada.	24
Figura 3 – Diagrama esquemático de um exemplo de fluxo de trabalho num sistema agrícola.	29
Figura 4 – Diagrama de blocos das operações típicas realizadas em unidades armazenadoras de grãos a granel.	30
Figura 5 – Representação esquemática de uma unidade armazenadora de grãos.	30
Figura 6 – Oportunidades de automação em uma unidade de pós-colheita.	32
Figura 7 – Morfologia dos manipuladores.	34
Figura 8 – Robôs hidráulicos estudados.	36
Figura 9 – Robôs pneumáticos estudados.	38
Figura 10 – Pontos para coleta em caminhões e vagões conforme Norma ABNT NBR 11161:2016.	39
Figura 11 – Principais equipamentos utilizados na recepção para coleta de amostras de grãos.	40
Figura 12 – Foto de um operador coletando amostras com um calador composto.	41
Figura 13 – Esquema da sonda pneumática durante a operação de amostragem.	42
Figura 14 – Ilustração de implantação de coletor de amostras articulado RRPR.	42
Figura 15 – Coletor de amostras <i>DV Stork Rail sampler</i>	43
Figura 16 – Coletor de amostras do tipo cartesiano.	44
Figura 17 – Patentes representativas de sistemas automatizados para coleta de amostras de grãos.	47
Figura 18 – Ilustração do robô hidráulico na posição vertical (A) e na posição horizontal (B).	50
Figura 19 – Terceiro grau de liberdade do robô	51
Figura 20 – Ilustração da bancada do robô agrícola.	52
Figura 21 – Bancada experimental completa do robô agrícola.	52
Figura 22 – Representação do manipulador robótico.	53
Figura 23 – Circuito hidráulico do robô agrícola.	54
Figura 24 – Circuito pneumático da bancada experimental.	57
Figura 25 – Ilustração com vista lateral do robô com os parâmetros de Denavit-Hartenberg.	63
Figura 26 – Triângulo formado pelos pontos $O_i - 1$, A_i e B_i	65

Figura 27 – Diagrama esquemático do sistema de atuação hidráulico.....	67
Figura 28 – Não-linearidades incluídas no modelo matemático do atuador pneumático.....	70
Figura 29 – Elementos presentes no diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação.....	73
Figura 30 – Representação gráfica da inversa da não-linearidade de zona morta com suavização próxima à origem.....	75
Figura 31 – Vista superior do robô agrícola com a origem adotada e o sistema de coordenadas.	78
Figura 32 – Espaço de trabalho do manipulador robótico no plano (x, y)	79
Figura 33 – Representação do robô em diferentes posições do efetuador final.	80
Figura 34 – Pontos de referência e segmentos de trajetória definidos no plano.	82
Figura 35 – Trajetória de referência polinomial para o deslocamento do robô.....	87
Figura 36 – Trajetória de referência em rampa para o deslocamento do robô.	90
Figura 37 – Diagrama de blocos para aquisição de dados e controle do protótipo.	93
Figura 38 – Diagrama de blocos do esquema de compensação de zona morta.....	94
Figura 39 – Diagrama de blocos para aquisição de dados do atuador 1.....	95
Figura 40 – Diagrama de blocos para aquisição de dados do atuador 2.....	95
Figura 41 – Diagrama de blocos para aquisição de dados do atuador 3.....	96
Figura 42 – Trajetória de referência e realizada no espaço tridimensional.	97
Figura 43 – Posição dos atuadores ao longo do tempo de experimento.....	98
Figura 44 – Erro de posição dos atuadores ao longo do tempo.	99
Figura 45 – Trajetória desejada, trajetória realizada e erro de posição dos atuadores.	100
Figura 46 – Sinal de Controle das válvulas ao longo do tempo.	101
Figura 47 – Pressões nas câmaras A e B dos cilindros.....	102
Figura 48 – Comparação dos erros de posição entre as estratégias de controle para referência polinomial.....	103
Figura 49 – Comparação dos sinais de controle das válvulas nas quatro estratégias de controle para referência polinomial.	104
Figura 50 – Comparação das trajetórias realizadas no espaço tridimensional para referência polinomial.....	105
Figura 51 – Trajetória desejada e realizada pelo robô no espaço tridimensional com referência do tipo rampa.	106
Figura 52 – Posição dos atuadores ao longo do tempo para trajetória do tipo rampa.	107

Figura 53 – Erro de posição dos atuadores ao longo do tempo para trajetória do tipo rampa.	108
Figura 54 – Sinal de controle das válvulas para trajetória do tipo rampa.	109
Figura 55 – Pressão nas câmaras A e B e de suprimento para trajetória do tipo rampa.....	110
Figura 56 – Erro de posição dos atuadores para a trajetória rampa considerando as diferentes estratégias de controle.	111
Figura 57 – Sinais de controle aplicados às válvulas para a trajetória rampa considerando as diferentes estratégias de controle.....	112
Figura 58 – Trajetórias realizadas no espaço tridimensional para a referência rampa considerando as diferentes estratégias de controle.	113
Figura 59 – Comparação entre as trajetórias no espaço tridimensional.	114
Figura 60 – Comparação das trajetórias para um determinado intervalo de tempo.	115
Figura 61 – Perfis de velocidade e aceleração dos atuadores nos intervalos determinados. ..	116
Figura 62 – Comparação do erro de posição entre as trajetórias polinomial e do tipo rampa.	117
Figura 63 – Comparação dos sinais de controle para as trajetórias polinomial e do tipo rampa.	118
Figura 64 – Comparação das forças nos atuadores para as trajetórias polinomial e do tipo rampa.	119
Figura 65 – Projeção bidimensional (XY) das posições amostradas, posição de referência, baricentro e esfera de repetibilidade no instante de 28 segundos.....	121
Figura 66 – Dispersão das posições atingidas pelo efetuador final nos eixos X, Y e Z no instante de 28 segundos para as 10 repetições.	122
Figura 67 – Posição dos atuadores ao longo das 10 repetições da trajetória polinomial.	123
Figura B.1 – Ilustração de um robô com atuadores lineares acionando juntas de revolução.	139
Figura B.2 – Localização do atuador i em relação ao elo anterior e ao elo acionado.	140
Figura B.3 – Triângulo formado pelos pontos $O_i - 1$, A_i e B_i	141
Figura B.4 – Vista do mecanismo do manipulador com a indicação dos parâmetros de localização dos atuadores de acordo com D-H.....	143
Figura C.1 – Desenho esquemático do carretel da válvula de 4 vias.	145
Figura C.2 – Representação do atuador hidráulico.....	150
Figura D.1 – Desenho esquemático referente à válvula proporcional.....	155
Figura E.1 – Características combinadas da força de atrito em regime permanente.....	161

Figura E.2 – Representação do contato entre duas superfícies na região de interação.	162
Figura F.1 – Representação dos conceitos de acurácia e repetibilidade para 10 repetições...	165
Figura G.1 – Código QR para acesso ao vídeo demonstrativo da bancada experimental e funcionamento do robô agrícola.....	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Palavras-chave utilizadas na busca.	45
Tabela 2 – Resultado da busca de patentes.....	46
Tabela 3 – Especificações dos cilindros hidráulicos.	55
Tabela 4 – Especificações técnicas das válvulas proporcionais direcionais.	56
Tabela 5 – Características e parâmetros relacionados ao subsistema hidráulico.	56
Tabela 6 – Especificação do cilindro pneumático.	57
Tabela 7 – Principais especificações da servoválvula.	58
Tabela 8 – Especificações técnicas da placa dSPACE.	59
Tabela 9 – Especificações técnicas dos <i>encoders</i> incrementais.	60
Tabela 10 – Especificações técnicas dos transdutores de pressão hidráulica.	60
Tabela 11 – Especificações técnicas dos transdutores de pressão pneumática.	60
Tabela 12 – Especificações técnicas do transdutor de posição linear.	61
Tabela 13 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg para o robô em estudo.	63
Tabela 14 – Pontos de referência selecionados para o robô agrícola.	81
Tabela 15 – Polinômios de 7º grau para o equacionamento da posição desejada em X, Y e Z...85	
Tabela 16 – Valores utilizados para frequência angular de corte dos filtros.....	91
Tabela 17 – Valores dos ganhos do controlador e parâmetros da compensação da zona morta da válvula.....	92
Tabela 18 – Resultados da repetibilidade posicional do efetuator final em sete instantes da trajetória planejada.	120
Tabela A.1 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô SCARA.	135
Tabela B.1 – Parâmetros de localização dos atuadores em relação à estrutura do manipulador robótico.....	143

LISTA DE ABREVIATURAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPC	<i>International Patent Classification</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASHIP	Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
LHW	Laboratório de Hardware
PIB	Produto Interno Bruto
SCARA	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
UPCH	Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico

ALFABETO GREGO

α	Ângulo de inclinação do atuador	[rad]
α_i	Distância entre os eixos Z_{i-1} e Z_i	[m]
$\alpha(z, \dot{y})$	Função utilizada na representação do atrito estático	[-]
β_0	Módulo de compressibilidade do fluido hidráulico	[Pa]
β_e	Módulo de compressibilidade efetivo	[Pa]
β_i	Ângulo dado pelos segmentos $\overline{O_{i-1}A_i}$ e $\overline{O_{i-1}B_i}$	[rad]
γ	Razão dos calores específicos do gás	[-]
θ_1	Ângulo da primeira junta de revolução do robô	[rad]
θ_2	Ângulo da segunda junta de revolução do robô	[rad]
θ_i	Parâmetro de Denavit-Hartenberg: ângulo da junta i	[rad]
ξ_V	Razão de amortecimento da válvula	[-]
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
ρ_0	Massa específica do ar nas condições de referência	[kg/m ³]
σ_0	Coeficiente de rigidez das deformações microscópicas	[N/m]
σ_1	Coeficiente de amortecimento das microdeformações	[Ns/m]
σ_2	Coeficiente de amortecimento viscoso	[Ns/m]
τ	Vetor de torque aplicado nas juntas do robô	[-]
φ_{1i}	Ângulo formado entre o eixo x_{i-1} e o segmento $\overline{O_{i-1}A_i}$	[rad]
φ_{2i}	Ângulo formado entre o eixo x_i e o segmento $\overline{O_iA_i}$	[rad]
ω_f	Frequência angular de corte do filtro passa-baixa	[rad/s]
ω_n	Frequência natural	[rad/s]

ALFABETO LATINO

a_0	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_1	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_2	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_3	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_4	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_5	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_6	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_7	Coeficiente do polinômio de 7º grau da trajetória	[-]
a_i	Parâmetro de Denavit-Hartenberg: comprimento do elo i	[m]
A_0	Área do orifício de passagem do fluido	[m²]
$A_A, A_{11}, A_{12}, A_{13}$	Área da câmara A	[m²]
$A_B, A_{21}, A_{22}, A_{23}$	Área da câmara B	[m²]
A_{re}	Abertura relativa da servoválvula pneumática	[m²]
AP_m	Média aritmética da acurácia de posição	[m]
AP_p	Acurácia de posição individual	[m]
AP_x	Componente da acurácia de posição em X	[m]
AP_y	Componente da acurácia de posição em Y	[m]
AP_z	Componente da acurácia de posição em Z	[m]
B	Coeficiente de amortecimento viscoso do sistema	[Ns/m]
b	Razão de pressões crítica	[-]
C	Condutância sônica	[m⁵/N.s]
C_d	Coeficiente de descarga	[-]
d_3	Variável de junta: deslocamento linear da junta prismática	[m]
d_i	Parâmetro de Denavit-Hartenberg: Coordenada ao longo do eixo Z_{i-1} , no qual localiza a posição de X_i em relação à X_{i-1}	[m]
$D(s)$	Função de transferência do filtro passa-baixa	[-]
F_{atr}	Força de atrito	[N]
$F_{atr,ss}$	Força de atrito em regime permanente	[N]
F_c	Força de atrito de Coulomb	[N]
F_g	Força gravitacional atuante no sistema	[N]
F_H	Força hidráulica	[N]
F_{preC}	Força de pré-carga ou carga externa aplicada	[N]
F_s	Força de atrito estático máxima	[N]
$g_{ss}(\dot{y})$	Função do atrito em regime permanente	[-]
K_d	Ganho derivativo do controlador PID	[-]
K_i	Ganho integral do controlador PID	[-]
K_p	Ganho proporcional do controlador PID	[-]
K_{qu0}	Ganho de vazão em função da entrada de controle	[m³/sV]
K_{RP}	Ganho em regime permanente	[m³/(sPa⁰.⁵)]

K_V	Ganho de vazão total da válvula	$[m^3/(sPa^{0.5})]$
K_{VA}	Ganho de vazão parcial na via A da válvula	$[m^3/(sPa^{0.5})]$
K_{VB}	Ganho de vazão parcial na via B da válvula	$[m^3/(sPa^{0.5})]$
K_{VinA}	Ganho de vazamento interno da câmara A da válvula	$[m^3/(sPa^{0.5})]$
K_{VinB}	Ganho de vazamento interno da câmara B da válvula	$[m^3/(sPa^{0.5})]$
K_{Vp}	Ganho de vazão parcial	$[m^3/(sPa^{0.5})]$
K_x	Constante elástica da mola	$[N/m]$
L	Curso total da haste do atuador	$[m]$
l_1	Comprimento do primeiro elo do robô	$[m]$
l_2	Comprimento do segundo elo do robô	$[m]$
l_c	Largura da região de suavização linear na compensação da zona morta da válvula	$[V]$
L_{1i}	Distância entre a origem O_{i-1} e o ponto A_i	$[m]$
L_{2i}	Distância entre a origem O_{i-1} e o ponto B_i	$[m]$
L_{3i}	Distância entre o ponto A_i e B_i com o êmbolo posicionado na metade do curso do cilindro	$[m]$
M_t	Massa total a ser deslocada pelo atuador	$[kg]$
m_d	Inclinação da característica da zona morta no lado direito	$[-]$
m_e	Inclinação da característica da zona morta no lado esquerdo	$[-]$
n	Número de repetições de uma tarefa ou trajetória	$[-]$
P_0	Pressão absoluta de referência para o ar	$[Pa]$
p_1	Pressão a montante na válvula pneumática	$[Pa]$
p_2	Pressão a jusante na válvula pneumática	$[Pa]$
p_A	Pressão na câmara A	$[Pa]$
p_B	Pressão na câmara B	$[Pa]$
p_s	Pressão de suprimento do sistema	$[Pa]$
p_t	Pressão de retorno	$[Pa]$
q_i	Variável de junta generalizada para o elo i	$[rad]$
q_m	Vazão mássica de ar através da válvula pneumática	$[kg/s]$
q_{mA}	Vazão mássica da câmara A	$[kg/s]$
q_{mB}	Vazão mássica da câmara B	$[kg/s]$
q_V	Vazão volumétrica	$[m^3/s]$
q_{VA}	Vazão que entra na câmara A do cilindro hidráulico	$[m^3/s]$
q_{VB}	Vazão que sai da câmara B do cilindro hidráulico	$[m^3/s]$
q_{Vcn}	Vazão de controle nominal	$[m^3/s]$
q_{Vin}	Vazamento interno entre as câmaras A e B do cilindro	$[m^3/s]$
R	Constante universal dos gases perfeitos	$[J/kg.K]$
RPl	Repetibilidade de posição	$[m]$
SAP_p	Desvio padrão da acurácia de posição	$[m]$
t	Tempo	$[s]$
T_0	Temperatura nas condições de referência	$[K]$

U_c	Tensão de comando: sinal de controle	[V]
U_{cn}	Tensão nominal de operação da válvula hidráulica	[V]
U_d	Sinal de controle desejado	[V]
U_{zm}	Sinal de controle (tensão) após o bloco de zona morta	[V]
V	Volume	[m ³]
V_A	Volume da câmara A do atuador	[m ³]
V_{A0}	Volume inicial da câmara A do atuador	[m ³]
V_B	Volume da câmara B do atuador	[m ³]
V_{B0}	Volume inicial da câmara B do atuador	[m ³]
x_d	Posição desejada para o efetuator final no eixo X	[m]
x_{Ai}, y_{Ai}	Coordenadas do ponto A_i do atuador i	[m]
x_{Bi}, y_{Bi}	Coordenadas do ponto B_i do atuador i	[m]
X_m, Y_m, Z_m	Coordenadas da posição média (baricentro) das posições atingidas pelo efetuator final	[m]
y^A	Posição linear do atuador	[m]
y^V	Posição do carretel da válvula	[m]
$\dot{y}$	Velocidade do atuador	[m/s]
$\ddot{y}$	Aceleração do atuador	[m ² /s]
y_d	Posição desejada para o efetuator final no eixo Y	[m]
y_i	Deslocamento linear do atuador i	[m]
y_1	Deslocamento linear do atuador 1	[m]
y_2	Deslocamento linear do atuador 2	[m]
y_3	Deslocamento linear do atuador 3	[m]
z	Deformação no movimento de pré-deslizamento	[m]
$\dot{z}$	Taxa de variação do estado interno z no modelo de atrito	[m/s]
z_{ba}	Deslocamento da força de quebra	[m]
z_d	Posição desejada para o efetuator final no eixo Z	[m]
z_{max}	Valor máximo das microdeformações	[m]
z_{md}	Limite direito da zona-morta	[V]
z_{me}	Limite esquerdo da zona-morta	[V]
z_{ss}	Microdeformações em regime permanente	[m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	ANTECEDENTES DA PESQUISA	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.3	METODOLOGIA.....	23
1.4	JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	25
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1	AGRICULTURA BRASILEIRA	28
2.2	PROCESSO DE PÓS-COLHEITA DE GRÃOS	29
2.3	CONCEITOS, APLICAÇÕES E DESAFIOS DA ROBÓTICA	32
2.3.1	Sistemas de Acionamento Hidráulico e Pneumático em Robótica.....	34
2.4	ESTADO DA ARTE DA COLETA DE AMOSTRAS DE GRÃOS.....	38
2.4.1	Equipamentos Utilizados na Amostragem de Grãos.....	40
2.4.2	Busca de Patentes sobre Coletores de Amostras de Grãos	44
2.5	DISCUSSÕES	49
3	DESCRIÇÃO DO ROBÔ AGRÍCOLA	50
3.1	MECANISMO.....	53
3.2	ACIONAMENTO	54
3.2.1	Sistema de Acionamento Hidráulico.....	54
3.2.2	Sistema de Acionamento Pneumático	56
3.3	CONTROLE.....	58
3.4	DISCUSSÕES	61
4	MODELAGEM MATEMÁTICA	62
4.1	MODELAGEM CINEMÁTICA DO ROBÔ SCARA.....	62
4.1.1	Modelo de Transmissão entre um Atuador e um Elo.....	65
4.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE ATUAÇÃO	66
4.2.1	Modelagem Matemática do Sistema de Atuação Hidráulico.....	66
4.2.2	Modelagem Matemática do Sistema de Atuação Pneumático.....	69
4.3	ESTRATÉGIA DE CONTROLE E COMPENSAÇÃO DE ZONA MORTA NA VÁLVULA.....	72
4.3.1	Compensação da Zona Morta da Válvula.....	74
4.4	DISCUSSÕES	76

5	IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ROBÔ	77
5.1	DETERMINAÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO DO ROBÔ	77
5.2	PLANEJAMENTO DAS TRAJETÓRIAS DESEJADAS.....	80
5.2.1	Trajétória Desejada Polinomial de 7º Grau.....	83
5.2.2	Trajétória Desejada do Tipo Rampa	87
5.3	GANHOS DO CONTROLADOR E CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA A REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	90
5.4	IMPLEMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DO ROBÔ AGRÍCOLA	93
5.5	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO ROBÔ AGRÍCOLA	96
5.5.1	Resposta à Trajetória Polinomial.....	96
5.5.2	Resposta à Trajetória do Tipo Rampa	105
5.5.3	Análise Comparativa entre as Trajetórias Polinomial e Rampa	113
5.5.4	Avaliação da Repetibilidade do Robô.....	119
5.6	DISCUSSÕES	123
6	CONCLUSÃO.....	125
6.1	TRABALHOS FUTUROS	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
	APÊNDICE A – MODELAGEM CINEMÁTICA DO ROBÔ SCARA.....	135
	APÊNDICE B – MODELO DE TRANSMISSÃO ENTRE UM ATUADOR E UM ELO	139
	APÊNDICE C – MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE ATUAÇÃO HIDRÁULICO.....	144
	APÊNDICE D – MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE ATUAÇÃO PNEUMÁTICO	153
	APÊNDICE E – MODELO DE ATRITO DINÂMICO	159
	APÊNDICE F – EQUAÇÕES UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE DO ROBÔ	165
	APÊNDICE G – REGISTRO EM VÍDEO DO ROBÔ AGRÍCOLA.....	167

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação apresenta a avaliação experimental de um robô com acionamento hidráulico e pneumático empregado como prova de conceito para o posicionamento automatizado de uma sonda coletora de amostras de grãos na recepção de caminhões em unidades armazenadoras. O estudo investiga o desempenho do sistema em ambiente controlado, avaliando a capacidade de executar movimentos com precisão em pontos predefinidos. Discutem-se os fundamentos teóricos e metodológicos que sustentam o modelo cinemático, o planejamento de trajetória e o controle aplicado, bem como a análise dos resultados obtidos nos ensaios conduzidos diretamente com o robô na bancada experimental.

O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores e exportadores de grãos do mundo com culturas como soja, milho e trigo (CONAB, 2023). O agronegócio é um dos pilares da economia brasileira, contribuindo com cerca de 24% do *Produto Interno Bruto* (PIB), segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (2024). Para se destacar no mercado competitivo, é necessário que a indústria agrícola vá além da produção em grande escala, buscando eficiência em todas as fases da cadeia produtiva, desde o plantio até a armazenagem e distribuição, garantindo processos otimizados e resultados de qualidade. No entanto, conforme Freitas (2011, apud QUIRINO, 2017), perdas qualitativas e quantitativas, além de gargalos, como falhas nos processos e uso de equipamentos inadequados, são obstáculos que ainda precisam ser superados.

No contexto da pós-colheita, a qualidade dos grãos armazenados depende de um controle rigoroso em todas as etapas do processo. A análise inicial ocorre na recepção, em que a coleta de amostras permite a avaliação de parâmetros como teor de água, presença de impurezas e infestação por pragas (QUIRINO, 2019; CERETTA *et al.*, 2024), orientando a definição dos procedimentos subsequentes e garantindo que os grãos sejam encaminhados para o processamento adequado, evitando a deterioração do produto ao longo do armazenamento (CONAB, 2020).

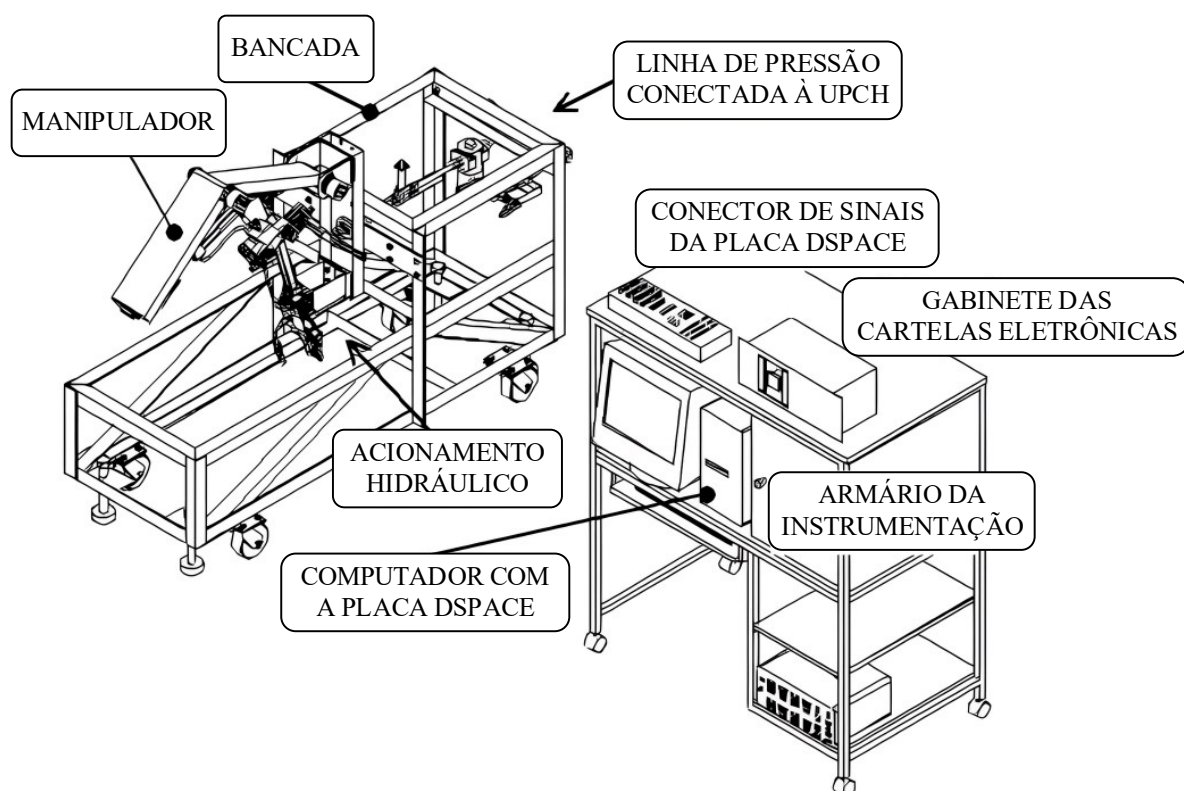
A coleta de amostras de grãos em unidades armazenadoras de grãos a granel, quando realizada manualmente ou por dispositivos mecânicos convencionais, apresenta limitações que comprometem a padronização e a confiabilidade da análise das amostras. A variabilidade introduzida pelo fator humano pode resultar em inconsistências nos processos de amostragem, assim como o tempo demandado para a execução da tarefa (VALDIERO *et al.*, 2024). Contudo, a aplicação de tecnologias automatizadas na agricultura segue uma tendência observada em setores industriais, nos quais a robotização tem sido incorporada para otimização de processos

produtivos. Nesse contexto, a aplicação de um robô para o posicionamento da sonda coletora representa uma estratégia alinhada às demandas por eficiência, padronização e redução de interferências operacionais.

1.1 ANTECEDENTES DA PESQUISA

A bancada experimental e o robô agrícola utilizado neste trabalho já foram empregados em estudos anteriores voltados ao desenvolvimento e aprimoramento de manipuladores hidráulicos, inicialmente configurado na forma antropomórfica, com foco em estratégias de controle e modelagem de sistemas robóticos. No presente trabalho, a estrutura foi adaptada para assumir a configuração SCARA, mais adequada à prova de conceito proposta. A Figura 1 apresenta uma vista em perspectiva do conjunto, que serviu de referência para a configuração atual adotada.

Figura 1 – Vista em perspectiva da bancada do robô hidráulico na forma antropomórfica.



Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

O estudo de Valdiero (2005) focou na modelagem matemática do manipulador hidráulico e na construção da bancada experimental, incorporando um modelo de compensação de atrito e de compensação da zona morta nas válvulas. O principal objetivo foi a

implementação de um controle em cascata, posteriormente comparado a um controle proporcional. Os resultados experimentais evidenciaram que a estratégia em cascata proporcionou boa precisão no controle de posição e melhor desempenho dinâmico, estabelecendo uma base para investigações subsequentes.

Dando continuidade a essa linha de pesquisa, Machado (2010) propôs melhorias no controle do manipulador, introduzindo uma abordagem em cascata com adaptação de parâmetros em tempo real. O estudo avançou na estabilidade do sistema e na compensação de incertezas dinâmicas sob diferentes condições operacionais.

Luche (2020) concentrou-se na otimização de trajetórias do robô, utilizando como base os dados, parâmetros e modelagens desenvolvidos por Valdiero (2005) e Machado (2010). O autor aplicou técnicas de otimização para planejar trajetórias que respeitassem os limites físicos do robô e garantissem maior suavidade e eficiência nos movimentos. No entanto, a validação dos resultados foi realizada exclusivamente por meio de simulações, sem implementação experimental em laboratório.

Em linha complementar, Baal (2024) propôs o desenvolvimento de um laboratório didático para cursos de engenharia baseado em uma unidade de pós-colheita de grãos. O objetivo é integrar teoria e prática no ensino e fortalecer a formação de competências profissionais. Dentro dessa unidade proposta, a coleta de amostras foi destacada como uma das operações que necessita de automação e robotização, devido à sua importância na pré-classificação de cargas e no controle de qualidade dos grãos, destacando-a como uma atividade relevante para o desenvolvimento de projetos e inovações futuras.

A fundamentação teórica e experimental dos estudos anteriores orientou as adaptações necessárias para a aplicação proposta. As modificações na configuração do robô seguiram as diretrizes de projeto previamente estabelecidas, servindo como base para a reformulação da bancada experimental e sua utilização no posicionamento automatizado da sonda coletora.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral é avaliar experimentalmente um robô com acionamento hidráulico e pneumático, empregado como prova de conceito para o posicionamento automatizado de uma sonda coletora de amostras de grãos, com foco no processo de coleta durante a recepção de caminhões em unidades armazenadoras de grãos a granel.

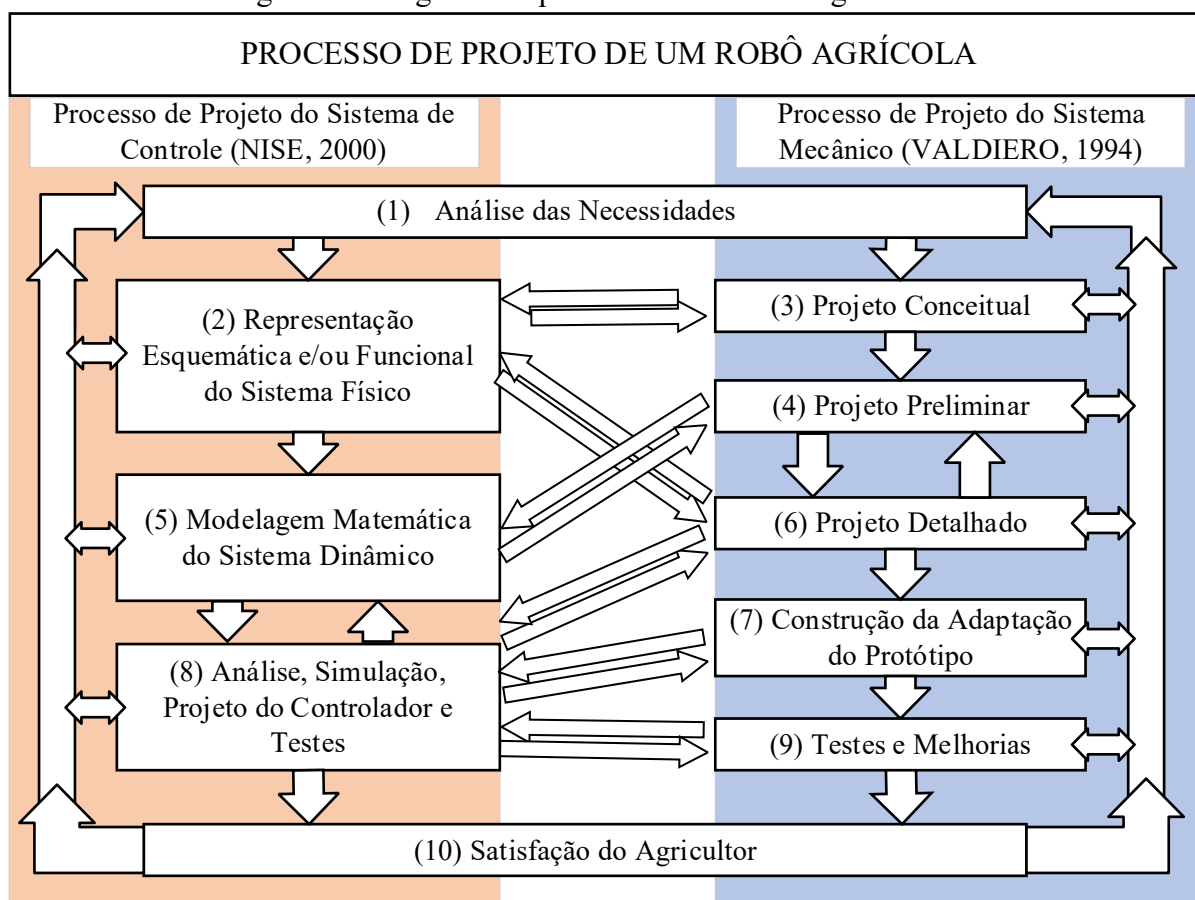
Para atingir o objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de coleta de amostras de grãos, com ênfase no estado atual da coleta mecanizada e em avanços relacionados a robôs com acionamento hidráulico e pneumático.
- Levantar patentes relacionadas à coleta de amostras de grãos, identificando inovações tecnológicas e integrando essas informações ao referencial teórico da pesquisa.
- Desenvolver a modelagem cinemática do robô, incluindo a definição da área de trabalho e a determinação das trajetórias de referência.
- Aplicar uma estratégia de controle clássico, combinada à compensação da zona morta das válvulas, para aprimorar o desempenho do sistema e reduzir o erro de posicionamento.
- Adaptar o robô para fins de prova de conceito, de forma a atender às exigências da aplicação proposta, e realizar ensaios experimentais em ambiente controlado para avaliar o desempenho no posicionamento automatizado de uma suposta sonda coletora de amostras de grãos.
- Divulgar os resultados obtidos por meio de publicações em periódicos científicos e em anais de eventos da área.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se no modelo proposto por Valdiero e Rasia (2016), que integra a metodologia de projeto de sistema mecânico e projeto de sistema de controle, conforme apresenta a Figura 2.

Figura 2 – Diagrama esquemático da metodologia adotada.



Fonte: Adaptado de Valdiero e Rasia (2016)

A análise das necessidades (1) compreende o levantamento do estado da arte da coleta de amostras de grãos e a busca de patentes. São identificados os requisitos de operação e normativas técnicas relacionadas aos coletores de amostras utilizados em unidades armazenadoras de grãos a granel.

A representação do sistema físico (2) e a interação entre seus componentes são descritas por meio do detalhamento do mecanismo, acionamento e controle. Tanto o projeto conceitual (3) quanto o projeto preliminar (4) e detalhado (6) já haviam sido desenvolvidos nos estudos de Valdiero (2005) e Machado (2010), os quais estruturaram a bancada experimental utilizada, definindo a configuração mecânica, o sistema de atuação e os recursos de instrumentação disponíveis. A modelagem matemática (5), abrangendo a cinemática do manipulador e a dinâmica dos atuadores hidráulicos e pneumático, é elaborada de forma a representar adequadamente o comportamento do sistema na aplicação proposta.

As adaptações necessárias (7) foram conduzidas para tornar o robô apto a atuar como prova de conceito na tarefa pretendida, envolvendo modificações na configuração mecânica, ajustes na lógica de controle e adequações nas trajetórias de referência para atender às

exigências do posicionamento automatizado durante a recepção de caminhões em unidades armazenadoras de grãos a granel.

Os testes (9) são realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do robô no posicionamento da sonda coletora, considerando critérios como precisão, repetibilidade e resposta dinâmica. Durante os ensaios, são registrados os sinais de posição dos atuadores, as pressões nas câmaras dos cilindros e os comandos aplicados às válvulas, permitindo a análise do erro de rastreamento. São analisados dois perfis distintos de trajetória: um suavizado, baseado em polinômio de sétimo grau, e outro com variações mais abruptas, construído a partir de rampas. Os dados obtidos são processados, os gráficos gerados e os resultados organizados para divulgação técnica e científica. Ao final dessa etapa, o sistema pode ser submetido a testes sob condições mais próximas da operação real e verificar a satisfação do agricultor (10).

Alunos de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina participam de forma ativa nas etapas de desenvolvimento, colaborando com as atividades práticas e contribuindo com diferentes perspectivas e troca de conhecimento ao longo do processo.

1.4 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

A automação tem se consolidado como uma solução eficiente em diversos setores industriais, incluindo a agricultura, em que sistemas robóticos vêm sendo aplicados há décadas em ambientes controlados, como estufas e cultivos protegidos (HACKENHAAR, 2015; MACHADO, 2022). Entretanto, as operações na etapa de pós-colheita ainda apresentam limitações tecnológicas que comprometem a qualidade do processo e a segurança do trabalho. A coleta manual de amostras, ainda predominante no setor, é um dos principais gargalos operacionais, caracterizada por inconsistência na execução, ausência de padronização, falta de monitoramento e exposição dos operadores a ambientes insalubres, com alta presença de poeira, ruído e vibrações (VALDIERO *et al.*, 2024).

A representatividade das amostras obtidas no momento da recepção dos grãos é determinante para o controle de qualidade e para o correto direcionamento das cargas às etapas subsequentes de armazenagem e beneficiamento (GONELI, 2021). Falhas nesse processo comprometem a análise de parâmetros como umidade, impurezas e infestação por pragas, podendo gerar decisões inadequadas e prejuízos durante o armazenamento (CERETTA *et al.*, 2024). Além dos desafios técnicos identificados na literatura, entrevistas com especialistas do setor de pós-colheita revelam uma defasagem tecnológica acentuada nas unidades

armazenadoras, particularmente no que se refere à automação de processos críticos como a coleta de amostras, classificação e a secagem (BAAL *et al.*, 2024). Soma-se a isso a escassez de mão de obra qualificada e a crescente necessidade de aumentar a eficiência operacional, o que reforça a urgência por soluções automatizadas.

Neste contexto, justifica-se a realização de um trabalho voltado à avaliação experimental de um robô capaz de executar o posicionamento automatizado de uma sonda coletora de amostras de grãos, como resposta às limitações operacionais identificadas nas unidades armazenadoras. A proposta representa um avanço tecnológico relevante, cuja principal contribuição consiste na validação do sistema como prova de conceito em ambiente laboratorial, com geração de dados técnicos sobre precisão, repetibilidade e desempenho do controle de posição do robô. Além disso, a pesquisa abre caminho para o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à automação das operações realizadas na etapa de pós-colheita de grãos.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices complementares.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, abordando os antecedentes da pesquisa, a definição dos objetivos, a metodologia empregada e as justificativas e contribuições previstas.

O Capítulo 2 reúne o referencial teórico que fundamenta o desenvolvimento do projeto, contextualizando a agricultura brasileira, os processos de pós-colheita de grãos e a aplicação da robótica na automação agrícola. São descritos os métodos convencionais e mecanizados de coleta de amostras, além de apresentar o estado da arte com base em estudos acadêmicos e patentes.

O Capítulo 3 descreve a bancada experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho, detalhando o mecanismo do robô, os sistemas de acionamento hidráulico e pneumático, o sistema de controle e as adaptações implementadas.

O Capítulo 4 apresenta a modelagem matemática do sistema, incluindo a modelagem cinemática do robô, a modelagem dos sistemas de atuação hidráulico e pneumático e a estratégia de compensação da zona morta das válvulas juntamente com o controle adotado.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais, abrangendo a determinação do espaço de trabalho, o planejamento das trajetórias desejadas, a definição dos

ganhos do controlador, a aquisição de dados e a avaliação do desempenho do robô frente às trajetórias.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa e os encaminhamentos para trabalhos futuros.

Ao final, são disponibilizadas as referências bibliográficas utilizadas e os apêndices contendo complementações da modelagem matemática e demais informações relevantes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresentam-se os conceitos e informações técnicas que sustentam a pesquisa, com enfoque na agricultura brasileira, no processo de pós-colheita de grãos e na automação como estratégia de otimização. Discutem-se os métodos de coleta de amostras, o levantamento de patentes e os avanços na robótica, com foco em sistemas de acionamento hidráulico e pneumático.

2.1 AGRICULTURA BRASILEIRA

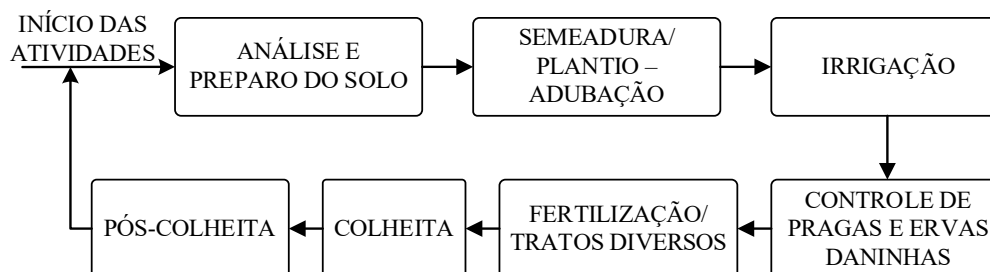
O setor agrícola brasileiro é reconhecido pela diversidade e pela produção, abrangendo aproximadamente 794 espécies vegetais de relevância econômica (BRASIL, 2021) e ocupando posição de liderança mundial nas exportações de carne bovina, frango, soja e açúcar (CROPLIFE BRASIL, 2022). Esse desempenho está diretamente relacionado ao crescimento da produtividade observado nas últimas décadas, impulsionado por avanços tecnológicos, políticas públicas e investimentos em pesquisa no setor. Entre 1975 e 2015, mais de 58% do aumento no valor bruto da produção agrícola foi atribuído ao desenvolvimento tecnológico (EMBRAPA, 2018). Além disso, o Brasil figura entre as poucas regiões do mundo com potencial para expandir suas áreas produtivas, dispondo de fronteiras agrícolas capazes de ampliar ainda mais sua produção (IBGE, 2019).

A modernização da agricultura tem avançado com o apoio de tecnologias como GPS (Sistema de Posicionamento Global), sistemas de informação geográfica e os princípios da agricultura de precisão, que incorporam automação, robótica e inteligência artificial ao processo produtivo (INAMASU *et al.*, 2020). De acordo com a Embrapa (2018), essas inovações ampliam as possibilidades de tornar a produção mais eficiente e sustentável. No entanto, o acesso a sistemas robotizados com custo acessível ainda é limitado, sobretudo para a agricultura familiar, o que dificulta a disseminação dessas soluções e a adoção de práticas mais adequadas à preservação dos recursos naturais (VALDIERO *et al.*, 2015).

O fluxo de trabalho em um sistema agrícola, detalhado no diagrama esquemático de Valdiero *et al.*, (2015) e representado na Figura 3, estrutura-se em sete etapas. Inicialmente, realiza-se a análise e o preparo do solo, compreendendo a avaliação de propriedades como pH, composição nutricional e matéria orgânica. Implementos agrícolas são utilizados para a correção de compactações no solo e o preparo da área para o plantio. Subsequentemente, o

processo de semeadura ou plantio efetua a inserção de sementes ou mudas, conforme as práticas estabelecidas para cada cultura.

Figura 3 – Diagrama esquemático de um exemplo de fluxo de trabalho num sistema agrícola.



Fonte: Adaptado de Valdiero *et al.* (2015)

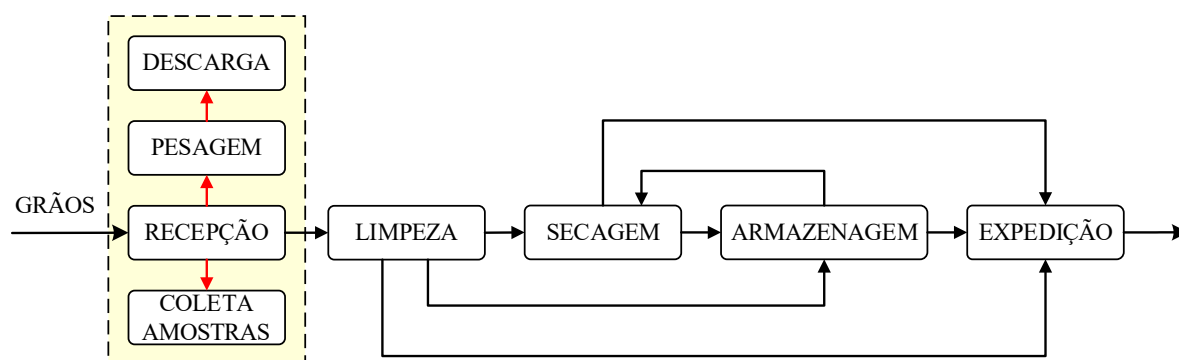
A irrigação, especialmente relevante em regiões com baixa precipitação, é responsável por fornecer água de maneira controlada às plantas. O controle de pragas e ervas daninhas busca reduzir os impactos causados por organismos ou vegetações que competem por recursos do solo. A etapa de fertilização, juntamente com outros tratamentos culturais, garante o fornecimento de nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das culturas.

Ao atingir a maturação, os produtos agrícolas são recolhidos na etapa de colheita, que precede o manejo pós-colheita. Este último estágio, discutido detalhadamente no Item 2.2 a seguir, abrange operações como a limpeza, armazenamento e expedição dos grãos, assegurando que os produtos alcancem o consumidor final em condições ideais.

2.2 PROCESSO DE PÓS-COLHEITA DE GRÃOS

O processo de pós-colheita de grãos compreende um conjunto de operações destinadas à preservação da qualidade do produto e à redução de perdas entre a colheita e a comercialização. Tais operações, que incluem recepção, limpeza, secagem, armazenagem e expedição, conforme ilustra a Figura 4, contribuem para a viabilidade econômica e para a manutenção das propriedades nutricionais dos grãos (EIFERT *et al.*, 2021). Estimativas do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR, 2018) indicam que falhas no manejo pós-colheita podem ocasionar perdas de até 20% da produção, o que ressalta a necessidade de processos controlados e otimizados.

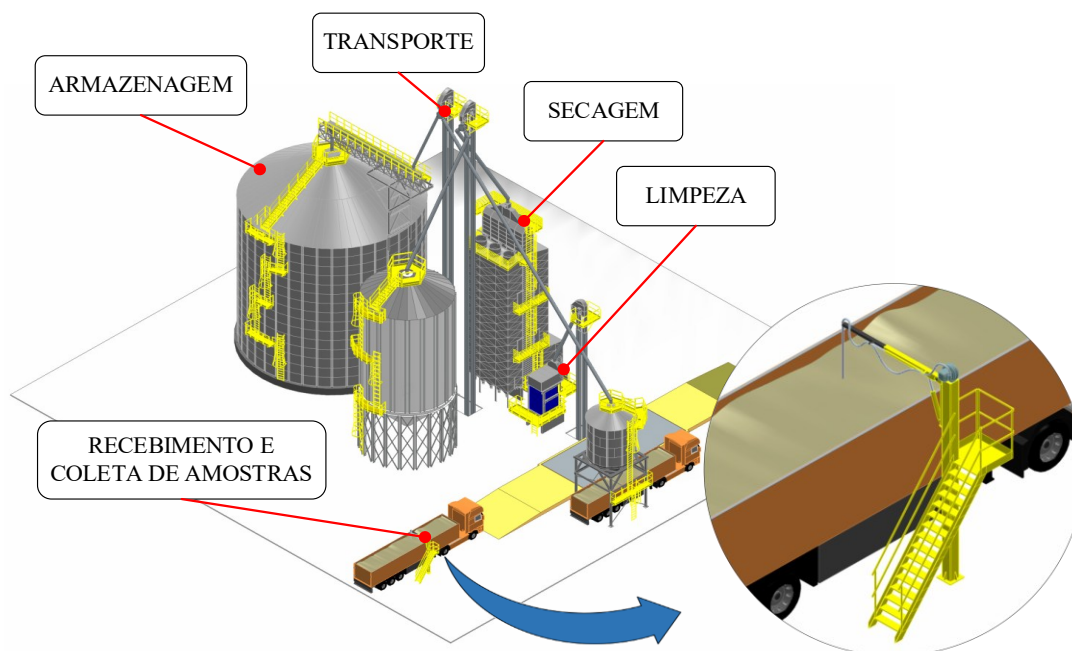
Figura 4 – Diagrama de blocos das operações típicas realizadas em unidades armazenadoras de grãos a granel.



Fonte: Adaptado de Milman (2002)

A Figura 5 apresenta um esquema de uma unidade armazenadora de grãos, com destaque para os setores físicos em que ocorrem as operações de coleta de amostras, limpeza, secagem e armazenamento. A recepção dos grãos inicia-se com a chegada dos produtos a unidade, local em que são pesados e amostrados para a avaliação dos parâmetros de umidade, impurezas e danos mecânicos. Com base nessa análise inicial, define-se o destino de cada lote, determinando-se se o produto necessita de processamento imediato ou se está apto à armazenagem. Segundo Eifert *et al.* (2021), um controle rigoroso na recepção reduz perdas associadas à mistura inadequada de lotes e otimiza a gestão do armazenamento.

Figura 5 – Representação esquemática de uma unidade armazenadora de grãos.



Fonte: Adaptado de Baal (2024)

A limpeza dos grãos é realizada após a recepção e tem como objetivo a remoção de impurezas, como palha, fragmentos vegetais e materiais estranhos. A presença de impurezas pode comprometer a conservação dos grãos e causar danos nos equipamentos utilizados nas etapas seguintes (MILMAN, 2002). Além disso, a remoção de impurezas reduz a retenção de umidade e dificulta o desenvolvimento de microrganismos (MARQUES, 2006).

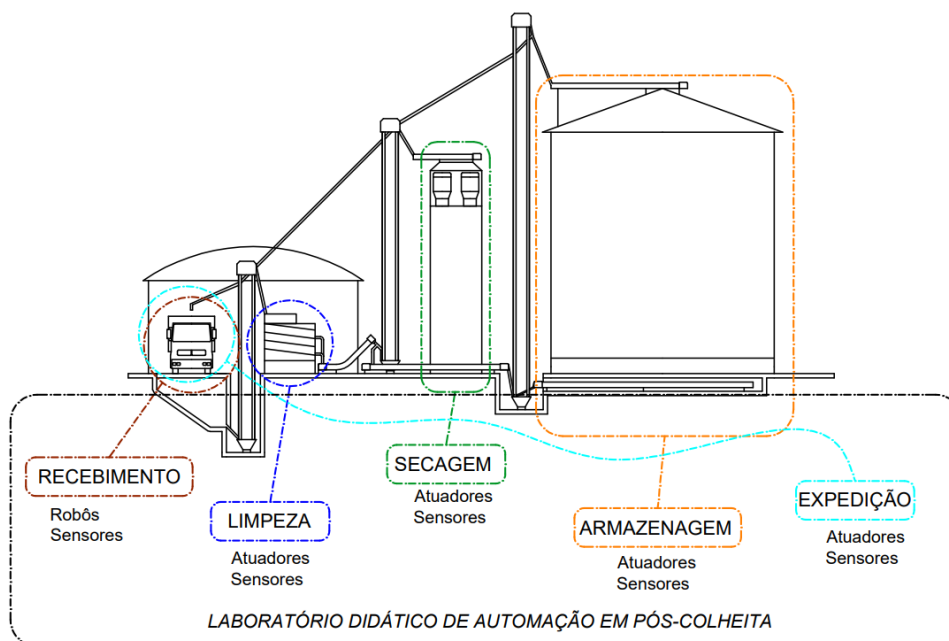
A secagem é uma das etapas mais críticas do processo, responsável por reduzir a umidade dos grãos para níveis adequados à armazenagem, evitando fermentação, germinação indesejada e proliferação de fungos. A umidade recomendada para armazenagem segura varia entre 11% e 13%, dependendo da espécie de grão (MARQUES, 2006). A secagem é realizada em secadores mecânicos, forçando a passagem de ar aquecido pelos grãos para remoção da umidade. Um controle inadequado pode comprometer a estrutura celular dos grãos e reduzir sua viabilidade para comercialização (LORINI *et al.*, 2002).

Após a secagem, os grãos são armazenados em silos ou armazéns até o momento de sua comercialização ou utilização industrial, podendo, se necessário, passar novamente pela etapa de secagem antes da expedição. A falta de controle adequado nessa etapa pode comprometer a qualidade e resultar em perdas econômicas (MILMAN, 2002; SENAR, 2018). Para minimizar esses riscos, sistemas de aeração são empregados para controlar a temperatura interna, prevenindo o superaquecimento que favorece a fermentação e degradação dos grãos (SILVA, 2021).

A última etapa da cadeia é a expedição, que consiste na retirada dos grãos dos silos e seu transporte para distribuição (MARQUES, 2006). A adoção de sistemas eficientes de movimentação preserva a qualidade dos grãos ao longo da cadeia de distribuição.

Ao contrário de outras áreas do agronegócio, em que inovações tecnológicas sempre foram incorporadas às práticas diárias, como na mecanização agrícola, o setor de pós-colheita por anos careceu de avanços para reduzir as perdas ao longo do processo (GONELI, 2021). Baal *et al.* (2024), ao propor um laboratório didático de automação no pós-colheita, destaca oportunidades para inovação tecnológica e aprimoramento dos processos envolvidos, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Oportunidades de automação em uma unidade de pós-colheita.



Fonte: Baal *et al.* (2024)

A implementação de sensores, atuadores e sistemas automatizados nas etapas de recebimento, limpeza, secagem, armazenagem e expedição possibilita um controle mais preciso das variáveis operacionais, consequentemente contribuindo para reduzir perdas ao longo do processo. A integração dessas tecnologias com plataformas baseadas em *Internet das Coisas* (IoT) viabiliza o monitoramento remoto em tempo real, permitindo ajustes automáticos e aprimorando a gestão do pós-colheita (BAAL *et al.*, 2024).

2.3 CONCEITOS, APLICAÇÕES E DESAFIOS DA ROBÓTICA

A robótica é uma área que envolve a criação e o controle de máquinas capazes de realizar tarefas de forma autônoma ou assistida, alterando o ambiente físico ao seu redor. No contexto industrial, a norma ISO 8373:2021 (ISO, 2021) caracteriza um robô como um manipulador multifuncional, controlado automaticamente, reprogramável e com três ou mais eixos, podendo ser fixo ou montado em uma plataforma móvel para uso em aplicações de automação em um ambiente industrial.

Geralmente, robôs industriais apresentam uma cadeia cinemática aberta, em que cada junta oferece um grau de liberdade ao sistema. O grau de liberdade determina a capacidade do robô de alcançar diferentes pontos dentro do seu espaço de trabalho, sendo que a mobilidade

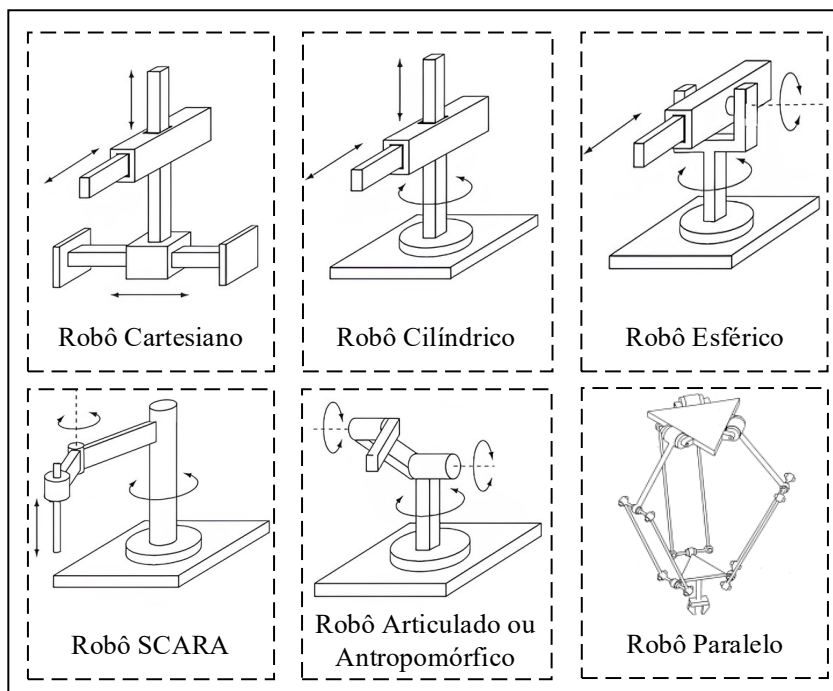
do manipulador depende da quantidade e do tipo de juntas que conectam os elos da estrutura (SCIAVICCO & SICILIANO, 1996).

Para Siciliano *et al.* (2010), um manipulador robótico é composto de um braço que proporciona mobilidade, um punho para destreza e um efetuator final, responsável por realizar a tarefa específica atribuída ao robô. A estrutura mecânica varia de acordo com as aplicações e o ambiente em que são utilizados.

A classificação dos robôs pode ser realizada com base em diversas características estruturais, tais como o número de graus de liberdade, a geometria do espaço de trabalho, as características de movimento, bem como o tipo de controle e acionamento empregado. No entanto, a classificação mais comum é feita pela composição de suas juntas (BARRIENTOS *et al.*, 2007), sendo as mais utilizadas a junta prismática, a junta de revolução e a junta esférica.

Entre as classificações de robôs industriais incluem-se os robôs cartesianos, cilíndricos, esféricos, articulados, paralelos e SCARA, ilustrados na Figura 7. Na nomenclatura das configurações, a letra P refere-se a junta prismática, de movimento linear, e a letra R a junta de revolução, de movimento rotacional. Os robôs cartesianos, de configuração PPP, são adequados para trajetórias lineares em um espaço de trabalho paralelepípedo (SCIAVICCO & SICILIANO, 1996). Robôs cilíndricos (PPR) e esféricos (PRR) combinam movimentos lineares e rotacionais para atender a volumes de trabalho específicos (ROMANO, 2002). Robôs articulados possuem múltiplas juntas de revolução e oferecem grande flexibilidade, enquanto os paralelos, com estrutura cinemática fechada, apresentam alta rigidez e força (ROMANO, 2002; SCIAVICCO & SICILIANO, 1996). O robô SCARA, de configuração RRP, combina duas juntas de revolução e uma prismática, sendo indicado para movimentações rápidas e precisas no plano horizontal, com ampla aplicação em montagem e manipulação (ALSHAMASIN *et al.*, 2009).

Figura 7 – Morfologia dos manipuladores.



Fonte: Adaptado de Barrientos *et al.*, (2007)

A robótica tem sido aplicada em indústrias como automotiva, eletrônica e farmacêutica, especialmente em tarefas que exigem alta precisão e repetitividade. Segundo Grassi (2005), os robôs se destacam em ambientes que demandam eficiência e resistência, superando as capacidades humanas em operações repetitivas ou de risco. No entanto, a implementação de robôs enfrenta desafios relacionados à configuração do espaço de trabalho, que é definido pelo alcance do efetuador final e pelo número e tipo de juntas do manipulador (BERGAMASCHI *et al.*, 2005).

2.3.1 Sistemas de Acionamento Hidráulico e Pneumático em Robótica

A escolha dos atuadores impacta diretamente no desempenho do robô. Pode-se classificar os sistemas de acionamento em três principais tipos: elétrico, hidráulico e pneumático, cada um com vantagens específicas para determinadas aplicações. Atuadores elétricos oferecem alta precisão, mas apresentam limitações em relação à força gerada. Atuadores hidráulicos são utilizados em aplicações que exigem força elevada. Atuadores pneumáticos destacam-se pelo baixo custo, leveza e facilidade de instalação, sendo uma alternativa atrativa para aplicações que exigem velocidade e flexibilidade (GERVINI, 2014).

Neste trabalho, a atenção concentra-se em robôs com sistemas de acionamento hidráulico e pneumático, em função das características do robô avaliado.

Para a área de robôs com acionamento hidráulico, a pesquisa de Valdiero (2005) contribui como uma referência para o entendimento desses sistemas, abordando controle, mecanismos e acionamento em diferentes aplicações. No entanto, é necessário acompanhar inovações e tecnologias mais recentes. De acordo com Koivumäki, Zhu e Mattila (2019), os estudos em robôs hidráulicos têm se concentrado em otimizar a eficiência energética e a precisão, principalmente por meio de sistemas de controle inteligentes. O uso de algoritmos avançados, como aprendizado de máquina, tem permitido que esses robôs se tornem mais adaptáveis a diferentes ambientes e condições operacionais.

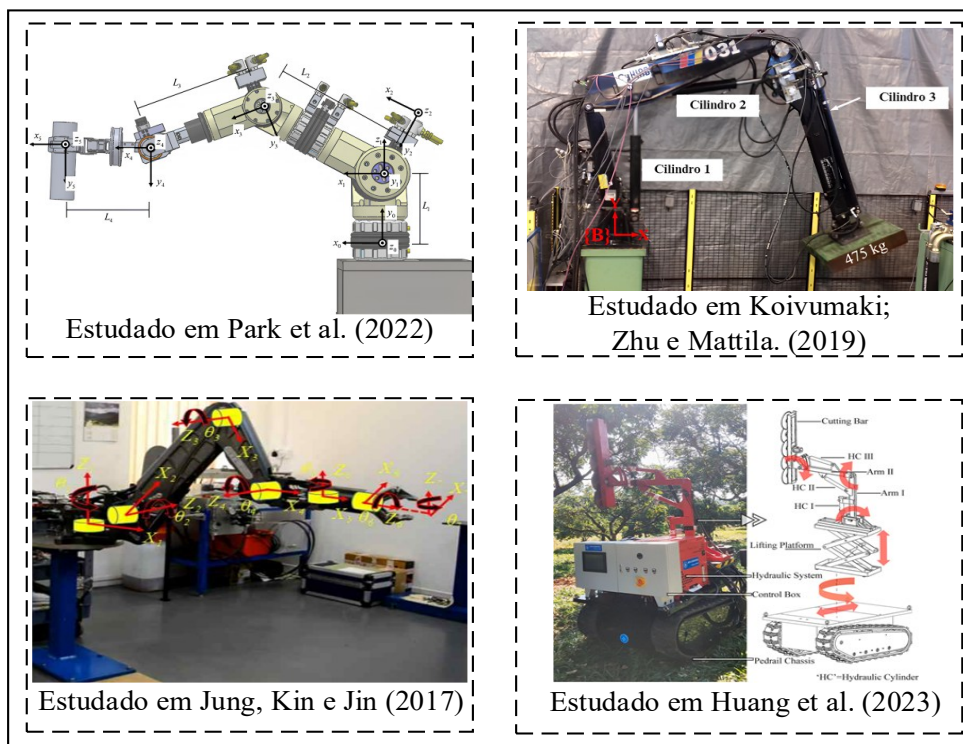
Suzumori e Faudzi (2018) apontam que, embora os motores elétricos tenham dominado o cenário industrial nas últimas décadas, recentes inovações em atuadores hidráulicos compactos e eficientes têm renovado o interesse por essa tecnologia, especialmente em robôs móveis e manipuladores industriais.

Dentre as aplicações e estudos sobre robôs hidráulicos, ilustrados na Figura 8, incluem-se:

- **Estudo de Park *et al.* (2022):** desenvolveu um manipulador hidráulico de quatro graus de liberdade voltado para tarefas de inserção de objetos cilíndricos. Esse manipulador utiliza atuadores rotativos que operam sob alta pressão, com controle de impedância que garante a estabilidade e precisão durante a execução das tarefas. Nos experimentos realizados, o manipulador alcançou uma taxa de sucesso de 100% na inserção de objetos.
- **Estudo de Koivumäki, Zhu e Mattila (2019):** apresentaram um manipulador hidráulico de três graus de liberdade com foco em eficiência energética. O sistema utiliza válvulas proporcionais para controlar os atuadores hidráulicos, alcançando alta precisão no controle de posição e força. Além disso, os testes realizados demonstraram uma redução de 45% no consumo de energia, sem comprometer o desempenho do robô.
- **Estudo de Jung, Kin e Jin (2017):** desenvolveram um robô com dois manipuladores hidráulicos, projetado para operações de resgate em desastres. Equipado com seis graus de liberdade em cada manipulador, o robô foi concebido para lidar com objetos pesados em ambientes de alto risco, contando com uma cabine blindada para proteger o operador. Essa configuração torna o robô eficaz para missões em locais na qual o acesso humano é inviável.

- **Estudo de Huang *et al.* (2023):** apresentaram um robô hidráulico de poda, projetado para operar em ambientes agrícolas. O robô conta com seis graus de liberdade, sendo quatro nos braços hidráulicos e dois no chassi. Através de cilindros hidráulicos, o sistema de poda permite que o robô realize cortes precisos em árvores frutíferas, otimizando o processo de colheita e manutenção em pomares.

Figura 8 – Robôs hidráulicos estudados.



Fonte: Autor (2025), com base em Park *et al.* (2022), Koivumäki, Zhu e Mattila (2019), Jung, Kin e Jin (2017) e Huang *et al.* (2023)

Na área da pneumática, o desenvolvimento de robôs também tem se mostrado promissor, oferecendo precisão e segurança, principalmente em aplicações médicas. Esses sistemas utilizam ar comprimido para gerar movimentos suaves e controlados, tornando-os adequados para ambientes que exigem interações seguras entre humanos e máquinas. Pesquisas recentes focam em melhorar o controle de força e de posição, ampliando as possibilidades de aplicação e aumentando a eficiência desses sistemas.

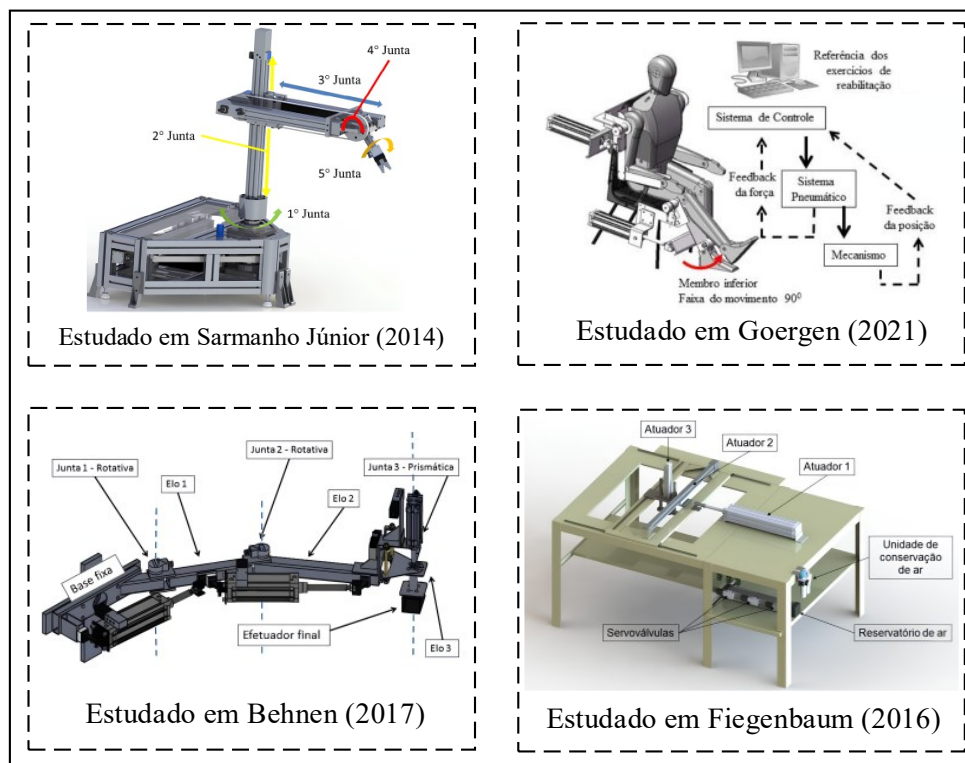
Dentre as aplicações e estudos sobre robôs pneumáticos, ilustrados na Figura 9 incluem-se:

- **Estudo de Sarmanho Junior (2014):** apresenta o desenvolvimento de um robô com cinco graus de liberdade acionado pneumaticamente, abordando os desafios

associados à compressibilidade do ar e ao atrito nas juntas. O projeto incluiu a concepção da estrutura mecânica, a seleção dos atuadores pneumáticos e o desenvolvimento de um controlador não linear com compensação de atrito. O robô foi projetado para operar em ambientes industriais, manipulando cargas leves em tarefas de movimentação repetitiva.

- **Estudo de Goergen (2021):** apresenta o desenvolvimento de uma bancada robotizada acionada pneumaticamente para reabilitação física, focando no controle de força aplicado a membros inferiores. O sistema utiliza cilindros pneumáticos de dupla ação acoplados a uma estrutura mecânica estacionária, permitindo movimentos controlados de flexão e extensão. O estudo destaca o potencial do acionamento pneumático para dispositivos médicos, ressaltando sua flexibilidade e baixo custo operacional.
- **Estudo de Behnen (2017):** apresenta o desenvolvimento de um robô SCARA com três graus de liberdade acionado pneumaticamente, focando na modelagem matemática e na identificação experimental das principais não linearidades do sistema. O robô possui duas juntas de revolução e uma junta prismática, sendo acionado por cilindros pneumáticos de dupla ação controlados por servoválvulas proporcionais. O projeto incluiu a definição da estrutura mecânica, a caracterização dos atuadores e a implementação de um sistema de controle de posição. O estudo reforça a viabilidade do acionamento pneumático em aplicações robóticas industriais e agrícolas.
- **Estudo de Fiegenbaum (2016):** apresenta um robô do tipo Gantry acionado pneumaticamente, com foco na melhoria da precisão e na adequação para tarefas do tipo pega-e-posiciona (*pick-and-place*). O sistema utiliza cilindros pneumáticos para gerar movimento linear, sendo controlado por servoválvulas proporcionais operando em malha fechada. Os testes experimentais validaram a estratégia de controle adotada, demonstrando a viabilidade do acionamento pneumático para tarefas industriais que demandam precisão no posicionamento.

Figura 9 – Robôs pneumáticos estudados.



Fonte: Autor (2025), com base em Sarmanho Junior (2014), Goergen (2021), Behnen (2017) e Fiegenbaum (2016)

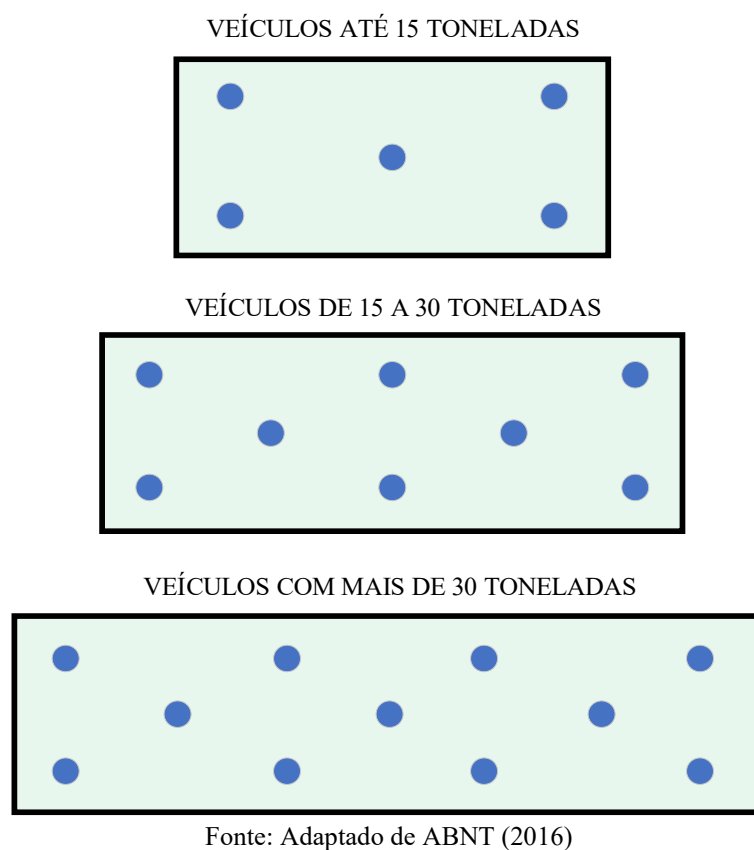
2.4 ESTADO DA ARTE DA COLETA DE AMOSTRAS DE GRÃOS

No Brasil, a amostragem de grãos é um procedimento regulamentado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabelece padrões técnicos para assegurar a representatividade das amostras e a confiabilidade dos resultados (MAPA, 2011). No âmbito internacional, a norma ISO 24333:2009 especifica procedimentos para amostragem de grãos a granel durante o transporte, incluindo diretrizes para a seleção e distribuição dos pontos de coleta ao longo da carga, de forma a garantir que a amostra seja homogênea e representativa (ISO, 2009). Já a norma ABNT NBR 11161:2016 define, para o contexto nacional, as diretrizes para a coleta de amostras em veículos transportadores de grãos, especificando o número mínimo de pontos de retirada de acordo com a massa da carga: 5 pontos para cargas de até 15 toneladas, 8 pontos para cargas entre 15 e 30 toneladas e 11 pontos para cargas acima de 30 toneladas. Também determina que a coleta seja realizada em diferentes profundidades, visando reduzir vieses e assegurar a representatividade.

A Figura 10 apresenta a distribuição aproximada dos pontos de coleta indicados pelas normas, podendo haver variações na localização exata em função das dimensões e do tipo de

carroceria dos veículos. Dessa forma, não há distâncias fixas previamente determinadas entre os pontos, devendo-se respeitar as recomendações normativas quanto ao número e à abrangência das coletas para assegurar a representatividade da amostra.

Figura 10 – Pontos para coleta em caminhões e vagões conforme Norma ABNT NBR 11161:2016.

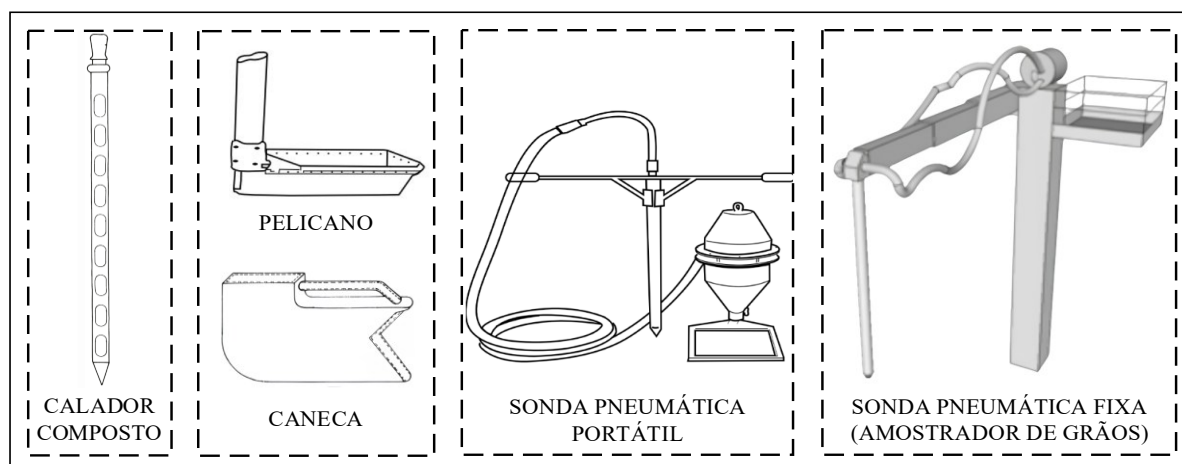


Embora as normativas estabeleçam procedimentos padronizados, estudos indicam que a distribuição irregular de impurezas e as variações de umidade ao longo da carga podem comprometer a precisão das análises, particularmente se a amostragem não for conduzida com o devido rigor (WHITAKER *et al.*, 2011). Adicionalmente, em contextos operacionais, relatos de profissionais da área sugerem que coletas aleatórias tendem a refletir com maior precisão a variabilidade presente na carga.

2.4.1 Equipamentos Utilizados na Amostragem de Grãos

A eficiência da amostragem está diretamente relacionada à metodologia e à tecnologia empregada. A Figura 11 ilustra os principais equipamentos utilizados neste processo, os quais são detalhados na sequência.

Figura 11 – Principais equipamentos utilizados na recepção para coleta de amostras de grãos.



Fonte: Adaptado de Quirino (2017)

Equipamentos manuais de amostragem seguem sendo empregados em unidades armazenadoras pela facilidade de uso e pelo baixo custo de aquisição e manutenção, permitindo a coleta direta de grãos no momento da recepção e/ou expedição. Cabe ressaltar que a representatividade das amostras pode ser afetada pelas limitações do método manual. Os principais equipamentos manuais de coleta de grãos incluem:

- **Caladores compostos:** Utilizados para a coleta em grãos a granel, esses equipamentos possuem múltiplas aberturas que permitem a retirada simultânea de amostras em diferentes profundidades (QUIRINO, 2017).
- **Canecos ou baldes:** Aplicados na coleta de grãos em movimento, como nas descargas de silos e transportadores, são dispositivos usados para uma amostragem rápida entre as etapas do pós-colheita.
- **Sondas pneumáticas portáteis:** Equipadas com sistemas de sucção, essas sondas permitem a extração dos grãos de silos ou caminhões, sendo uma alternativa para coletas em volumes maiores. A eficiência do processo depende do ajuste correto da vazão de ar, evitando a segregação de partículas leves e impurezas (CONAB, 2015).

A exposição dos operadores a riscos de segurança, como quedas ao acessar a carga e inalação de poeira durante a coleta, representa uma das principais desvantagens desse método (conforme ilustrado na Figura 12). Além disso, a repetibilidade das coletas é comprometida por variações na técnica de manuseio do equipamento, fadiga do operador e na distribuição irregular dos pontos de amostragem.

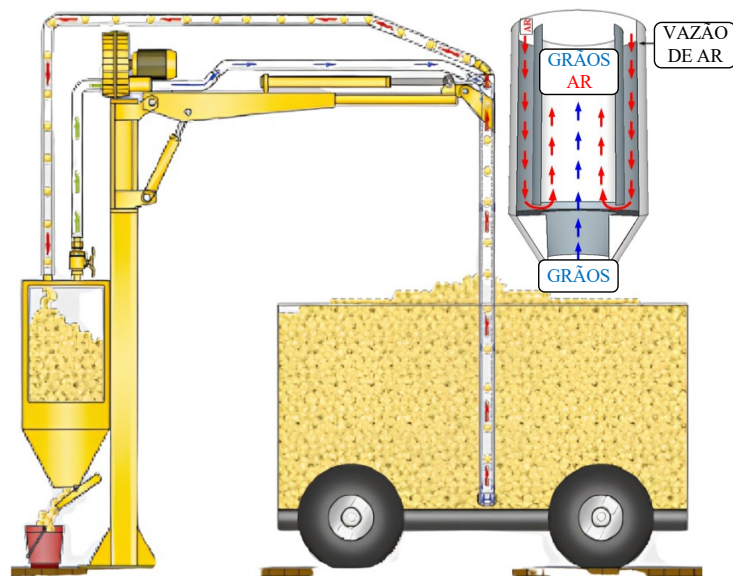
Figura 12 – Foto de um operador coletando amostras com um calador composto.



Fonte: Ceretta *et al.* (2024)

Já em sistemas de amostragem mecanizada, a sonda coletora é responsável pela retirada e pelo transporte da amostra até o ponto de análise, independentemente do mecanismo empregado para seu posicionamento. A Figura 13 apresenta o esquema de operação de uma sonda que executa simultaneamente a coleta e o transporte dos grãos até o reservatório de análise. Esse tipo de sonda utiliza dois tubos concêntricos e um sistema de ventilação que gera vazão de ar suficiente para aspirar os grãos a partir da ponteira, conduzindo-os por sucção até o ponto de análise (SAUR, 2024; QUIRINO, 2017). Também são encontrados modelos com parafuso helicoidal, cuja rotação impulsiona os grãos coletados até um compartimento intermediário, sendo posteriormente transferidos ao laboratório de análise.

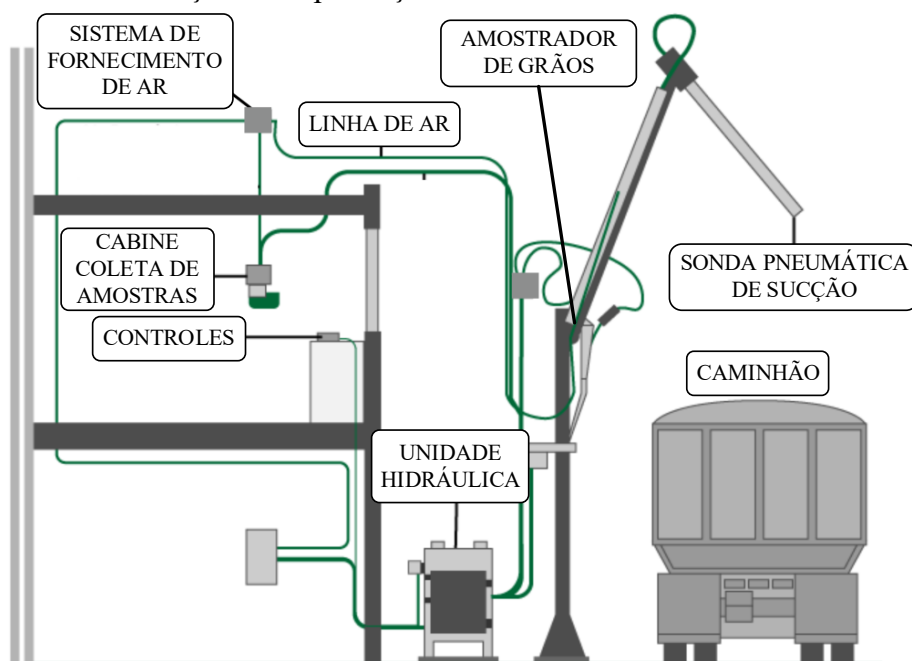
Figura 13 – Esquema da sonda pneumática durante a operação de amostragem.



Fonte: Adaptado de SAUR (2024); Quirino (2017)

A movimentação da sonda no processo de coleta pode ser realizada por diferentes mecanismos. Os sistemas mecanizados mais utilizados no setor são os amostradores de grãos com sonda pneumática (Figura 14), também chamados de “calador hidráulico”, que operam por meio de um braço articulado equipado com lança telescópica. Esses equipamentos possuem uma estrutura cinemática do tipo RRPR, possibilitando o posicionamento da sonda em diferentes pontos do caminhão (SAUR, 2024).

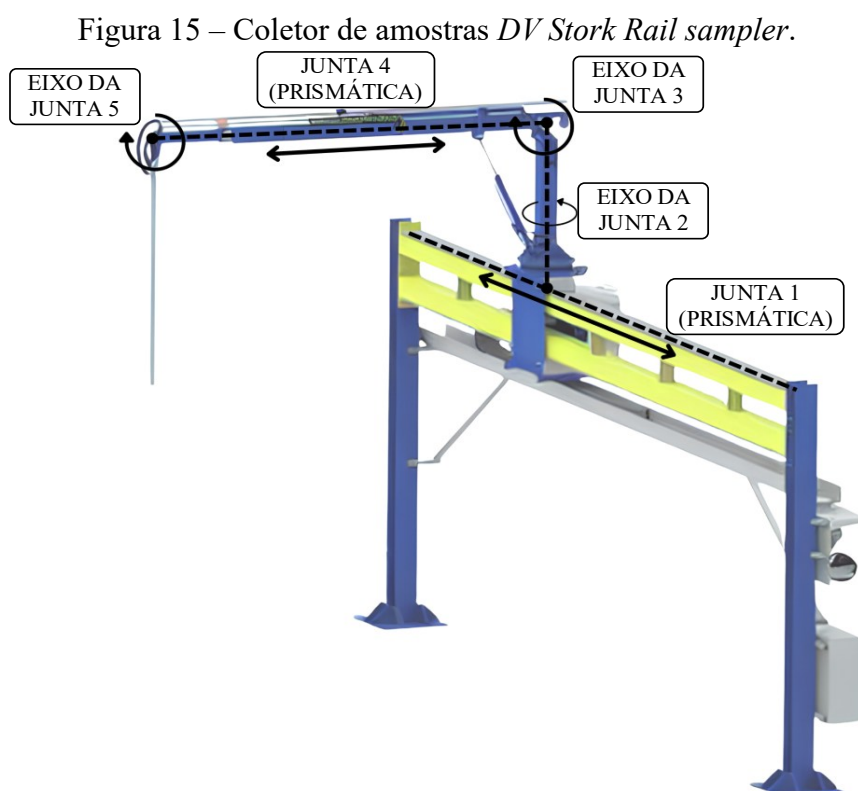
Figura 14 – Ilustração de implantação de coletor de amostras articulado RRPR.



Fonte: Adaptado de *Canadian Grain Commission* (2019)

A utilização desses equipamentos reduz significativamente o tempo de amostragem em comparação a métodos manuais, podendo ser concluída com média de 5 a 7 minutos, dependendo da configuração do sistema e do volume movimentado (CERETTA *et al.*, 2024). Além disso, minimiza riscos ocupacionais ao eliminar a necessidade de operadores acessarem diretamente a carga dos caminhões durante a coleta (CONAB, 2015; SAUR, 2024).

Outros sistemas mais avançados incluem amostradores com configuração PRRPR, como demonstra a Figura 15, que adicionam mais uma junta prismática ao equipamento, aumentando a mobilidade e permitindo a coleta em veículos de grande porte, como caminhões articulados e trens rodoviários (SERVITECH EXPRESS, 2024).



Fonte: Adaptado de Servitech Express (2024)

Recentemente, alguns fabricantes de outros países disponibilizaram coletores de amostras baseados em robôs cartesianos, que operam em coordenadas lineares nos eixos x, y e z (Figura 16). Nessa configuração, o deslocamento da sonda ocorre por meio de trilhos, prometendo um controle mais preciso sobre os pontos de coleta e assegurando uma amostragem uniforme ao longo de toda a carga transportada (TOUT POUR LE GRAIN, 2024).

Figura 16 – Coletor de amostras do tipo cartesiano.



Fonte: Adaptado de *Tout Pour Le Grain* (2024)

Embora a modernização dos processos de amostragem de grãos avance, Quirino (2017) aponta que os métodos atuais ainda apresentam variabilidade nos resultados, decorrente de fatores como a distribuição heterogênea dos grãos na carga, distribuição irregular dos pontos a serem amostrados e a influência das impurezas. Ademais, a adoção de amostradores mecanizados enfrenta desafios como o custo de aquisição, a infraestrutura requerida para instalação e a manutenção. Tais fatores dificultam sua implementação em unidades de menor porte, no qual os métodos manuais ainda predominam.

2.4.2 Busca de Patentes sobre Coletores de Amostras de Grãos

A busca de patentes complementa a revisão bibliográfica ao fornecer uma perspectiva técnica das soluções tecnológicas existentes relacionadas aos sistemas de coleta de amostras de grãos. Enquanto a revisão bibliográfica traz conceitos teóricos e avanços acadêmicos, o levantamento de patentes permite identificar inovações mais próximas da aplicação. Adicionalmente, essa busca auxilia na identificação de lacunas passíveis de exploração, o que contribui para melhorias no sistema proposto e para a consolidação de sua relevância técnica.

A metodologia de busca foi estruturada para a identificação de patentes relacionadas a sistemas de coleta de amostras de grãos com sondas pneumáticas fixas e mecanismos de posicionamento automatizado. O processo inicia-se com a seleção de bases de dados de reconhecimento nacional e internacional, as quais abrangem tanto registros concedidos quanto pedidos em tramitação. As plataformas consultadas compreendem:

- *Google Patents*
- **INPI Brasil (Instituto Nacional de Propriedade Industrial)**
- *Espacenet (European Patent Office)*
- **PATENTSCOPE (WIPO)**

As buscas são conduzidas com termos técnicos específicos e operadores booleanos, visando aumentar a precisão dos resultados. O emprego combinado de palavras-chave e classificações do sistema IPC (*International Patent Classification*) permite uma segmentação direcionada da pesquisa.

As palavras-chave são estabelecidas com base em termos técnicos associados ao processo de coleta de amostras de grãos. A Tabela 1 apresenta os termos utilizados.

Tabela 1 – Palavras-chave utilizadas na busca.

Língua	Termos Utilizados
Português	Coletor de amostras de grãos; calador de grãos; amostrador de grãos; sonda pneumática fixa, sonda coletora de grãos.
Inglês	<i>Truck grain sampler; fixed pneumatic probe; grain sampling system; grain sampler collector; grain probes.</i>

Fonte: Autor (2025)

O emprego de termos equivalentes em português e inglês amplia a cobertura geográfica da busca, ao considerar a diversidade terminológica utilizada nos registros de patentes de diferentes países. As expressões de busca são estruturadas com o uso dos operadores booleanos *AND*, *OR* e *NOT*. O operador *AND* é empregado para garantir a presença simultânea de termos específicos; o operador *OR*, para incluir variações e sinônimos; e o operador *NOT*, para excluir registros não pertinentes.

A seguir, apresenta-se as *strings* de busca utilizadas nas plataformas pesquisadas:

1. ("coletor de amostras de grãos" OR "amostrador de grãos" OR "sonda pneumática fixa" OR "calador de grãos" OR "sonda coletora de grãos") OR ("truck grain sampler" OR "fixed pneumatic probe" OR "grain sampling system" OR "grain sampler collector")
2. ("truck grain sampler" OR "fixed pneumatic probe" OR "grain sampling system" OR "grain sampler collector")
3. (COLET* AND GRÃO* AND AMOSTR*)

A Tabela 2 apresenta esses resultados da busca de patentes, com a indicação da base de dados consultada, das *strings* de busca e da quantidade total de registros encontrados.

Tabela 2 – Resultado da busca de patentes.

Base de Dados	String Utilizada	Resultados
<i>PATENTSCOPE</i>	2	15
<i>Espacenet</i>	2	42
INPI Brasil	3	22
<i>Google Patents</i>	1	168

Fonte: Autor (2025)

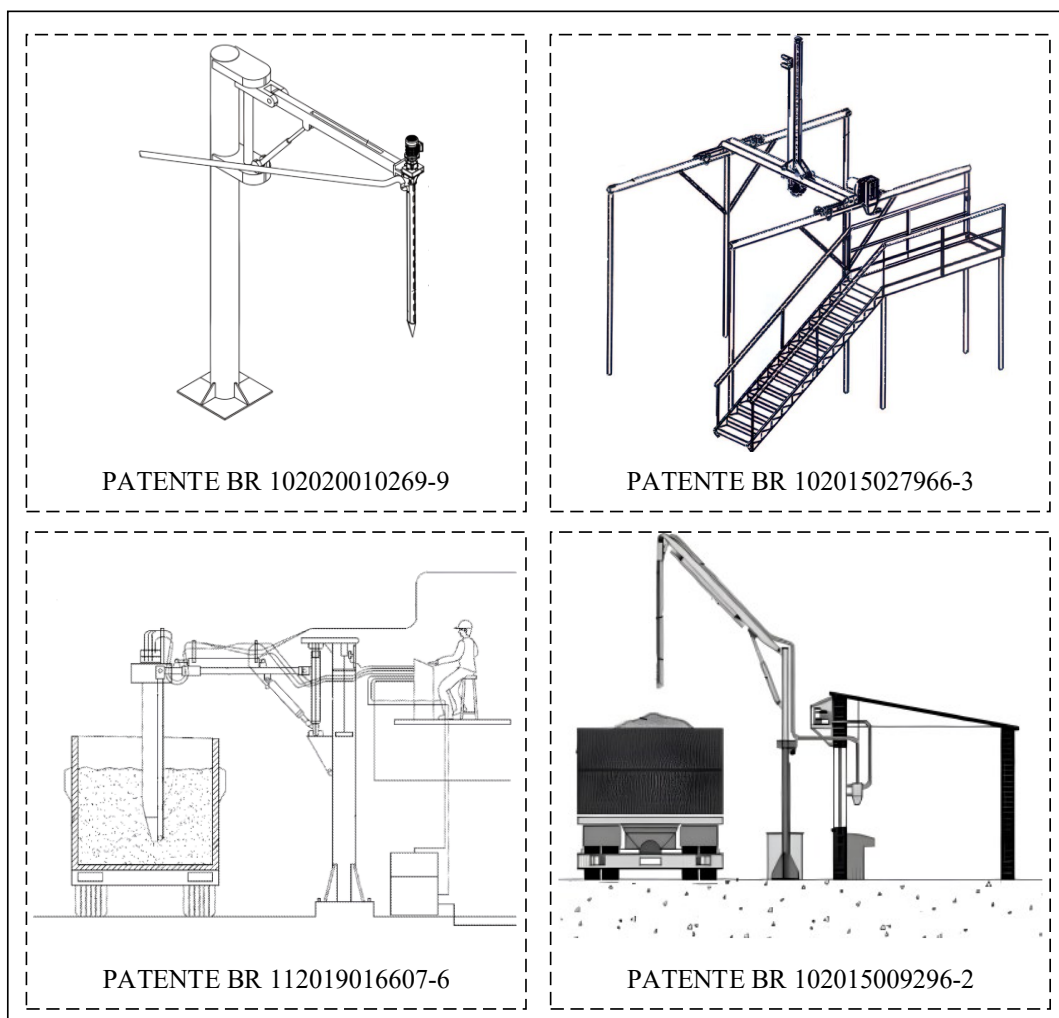
Os resultados obtidos na análise das patentes indicam uma predominância de registros enquadrados nas subclasses G01N 1/20 e A01F 25/22, conforme a *International Patent Classification* (IPC), mantida pela *World Intellectual Property Organization* (WIPO). A subclasse G01N 1/20 refere-se a dispositivos voltados à amostragem de materiais sólidos, granulares ou pulverulentos, enquanto A01F 25/22 abrange equipamentos destinados à manipulação, movimentação e coleta de grãos em operações típicas da etapa de pós-colheita.

Observou-se um volume significativo de registros, em maioria direcionados ao desenvolvimento de sistemas de controle e *softwares* para o gerenciamento do processo de amostragem. Verifica-se, igualmente, uma atenção particular à construção das sondas que penetram na carga de grãos, com variações de design que contemplam métodos de coleta por gavetas internas, sucção pneumática e sistemas helicoidais. Contudo, identificou-se um número reduzido de patentes que abordam diretamente os mecanismos de posicionamento da sonda coletora ou do amostrador de grãos como um sistema completo.

A partir dos registros encontrados, foram selecionadas para análise detalhada as soluções nacionais que apresentam características técnicas e funcionais compatíveis com os requisitos do robô avaliado nesta dissertação e com as condições operacionais das unidades armazenadoras de grãos no Brasil. A seleção considerou o tipo de manipulador, o princípio de acionamento, a aplicação em operações de coleta, manipulação ou movimentação de grãos e a viabilidade de implementação no contexto produtivo nacional. Embora a busca tenha incluído bases internacionais, optou-se por destacar patentes brasileiras devido ao acesso facilitado às informações completas e à maior proximidade com tecnologias efetivamente aplicadas no setor. A Figura 17 ilustra essas patentes selecionadas, que incluem um aperfeiçoamento estrutural da

sonda, uma configuração cartesiana para o amostrador de grãos e dois sistemas automatizados que contemplam, de forma integrada, a sonda coletora, o mecanismo de posicionamento e o controle do processo de amostragem.

Figura 17 – Patentes representativas de sistemas automatizados para coleta de amostras de grãos.



Fonte: Autor (2025)

A patente BR 102020010269-9 A2 trata do aperfeiçoamento de uma sonda caladora automática acoplada a um braço telescópico amostrador de grãos convencional. O objetivo da invenção é contribuir para a preservação da força física do operador e facilitar a coleta de amostras em qualquer parte da carga, na qual pode ser realizada de forma automática, controlada por CLP, ou manualmente, por alavancas. Apesar dessas características, o foco principal é funcionalidade da sonda, enquanto os aspectos relacionados ao mecanismo de posicionamento são pouco explorados.

A patente BR 102015027966-3 A2 descreve um coletor de amostras de grãos configurado como um robô cartesiano. A mobilidade nos eixos X e Y é acionada por motorreductores, enquanto o deslocamento no eixo Z é realizado diretamente por um motor elétrico, permitindo a coleta em toda a extensão da carga e em diferentes profundidades do caminhão a ser amostrado. O sistema opera automaticamente nas coordenadas X e Y, com ajuste na profundidade da coordenada Z conforme necessário. O objetivo é reduzir a intervenção manual e assegurar a conformidade com a legislação vigente.

A patente BR 112019016607-6 B1 descreve um sistema integrado por uma sonda espectrométrica e um amostrador de grãos automático, a qual permite obter os parâmetros do material a ser amostrado de maneira direta, sem precisar fazer a extração e o traslado de amostras até laboratórios. A configuração proposta pela patente reduz significativamente o tempo de amostragem, além de eliminar a geração de resíduos químicos durante a amostragem em laboratório. A sonda é acoplada a um braço articulado, cujo posicionamento é realizado por acionamento pneumático ou hidráulico. No entanto, a patente não apresenta soluções específicas para o mecanismo de posicionamento da sonda durante as operações.

A patente BR 102015009296-2 B1, em conjunto com a patente BR 102019013869-6 A2, ambas depositadas pelo mesmo titular, apresentam soluções para minimizar a necessidade de intervenção manual e reduzir os riscos aos operadores. A primeira propõe um sistema automatizado que combina um mecanismo articulado hidráulico de movimentação com controle eletrônico por meio de um computador, permitindo o deslocamento do coletor sobre a superfície da carga. Um diferencial dessa patente é o uso de uma câmera digital para mapear a carga, possibilitando ao operador definir remotamente os pontos de coleta por meio de uma interface digital. No entanto, o sistema ainda exige a seleção manual dos pontos de amostragem, limitando sua automação completa. A segunda patente aprimora esse conceito ao integrar um dispositivo de controle autônomo para amostragem em veículos, com monitoramento de posição via *encoders* (sensores de posição angular) incrementais e inclinômetros. Um *software* de reconhecimento de área processa imagens capturadas por câmera, gerando coordenadas cartesianas para movimentação da sonda coletora e ajustando a operação conforme obstáculos detectados. O controle do sistema é realizado por CLP, que processa os sinais dos sensores e comanda as válvulas conforme o necessário.

A análise das patentes evidencia avanços na automação da coleta de amostras de grãos, com melhorias focadas em ergonomia, segurança do operador e no controle do processo. No entanto, muitas tecnologias ainda dependem da intervenção humana, o que pode comprometer a confiabilidade do sistema. Além disso, a predominância de amostradores com configuração

cinemática articulada indica um espaço inexplorado para novos mecanismos de posicionamento da sonda, como configurações SCARA e cilíndricas.

2.5 DISCUSSÕES

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo evidencia a importância da automação no contexto da pós-colheita. Na etapa de recepção, em que ocorre a coleta de amostras de grãos, apesar da disponibilidade de amostradores mecanizados no mercado, a predominância de métodos manuais nas unidades armazenadoras ainda prevalece, apresentando limitações quanto à repetibilidade, segurança e representatividade das amostras.

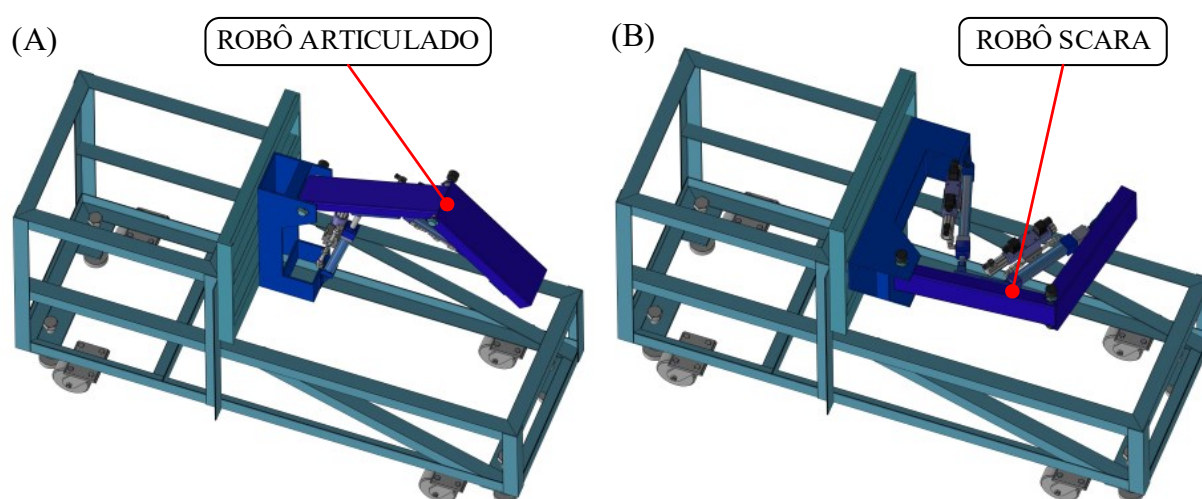
A análise de patentes revela que os esforços de desenvolvimento se concentram no aprimoramento das sondas e no controle do processo de amostragem, com menor atenção a soluções para o mecanismo de posicionamento automatizado. Essa lacuna, juntamente com a comprovada adaptabilidade, força, precisão e robustez de robôs com acionamento hidráulico e pneumático em ambientes agrícolas, sinaliza um considerável potencial para a aplicação de sistemas robóticos no setor.

3 DESCRIÇÃO DO ROBÔ AGRÍCOLA

Este capítulo apresenta o robô agrícola utilizado e avaliado neste trabalho, o qual se encontra no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O robô, com acionamento hidráulico e pneumático, é integrado a uma bancada experimental originalmente desenvolvida e utilizada nos trabalhos de Valdiero (2005), Machado (2010) e Luche (2020), conforme mencionado no Item 1.1. Detalham-se, na sequência, os principais aspectos técnicos da estrutura, os componentes que integram o sistema e as modificações realizadas para adequá-lo à aplicação proposta.

O robô pode ser montado na posição vertical (A), assumindo configuração articulada, ou na posição horizontal (B), adotando arquitetura cinemática serial do tipo SCARA, conforme ilustra a Figura 18. Essa versatilidade permite a realização de testes com ou sem a influência de torques gravitacionais nas juntas (VALDIERO, 2005). Neste trabalho, opta-se pela configuração horizontal devido às exigências da tarefa de amostragem, que demanda rigidez e repetibilidade no plano horizontal para o deslocamento sobre a carroceria de caminhões graneleiros, aliadas à facilidade de controle resultante da eliminação da ação gravitacional e à diferenciação em relação às soluções convencionais descritas em patentes depositadas.

Figura 18 – Ilustração do robô hidráulico na posição vertical (A) e na posição horizontal (B).

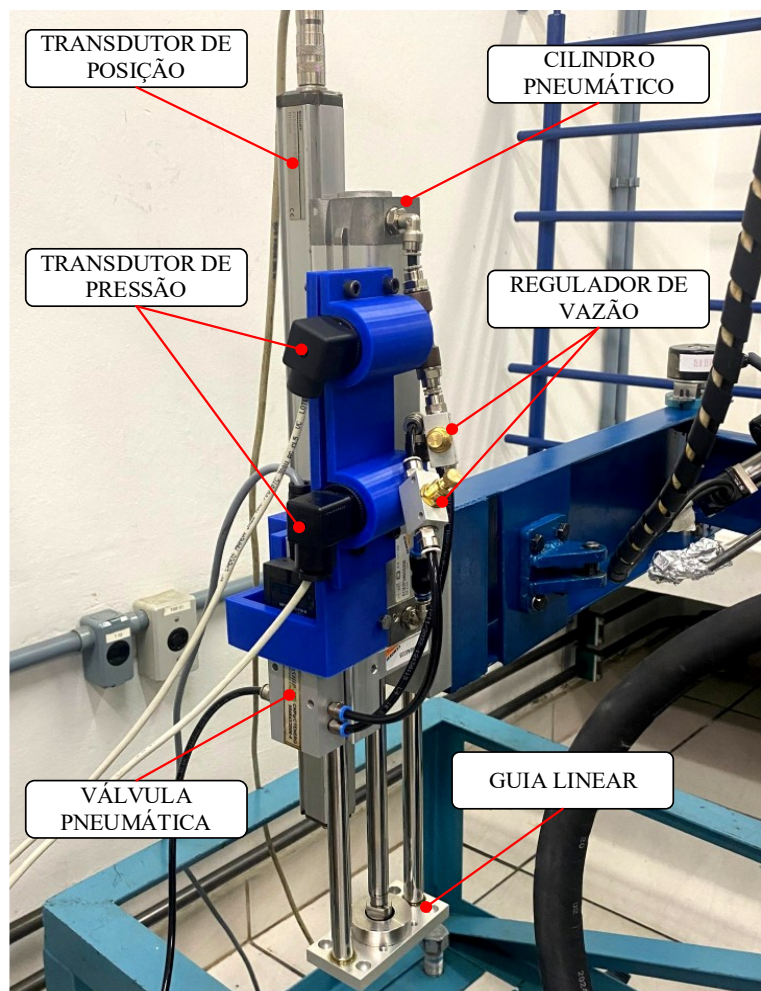


Fonte: Autor (2025)

Para adaptar o robô à tarefa de posicionamento da sonda coletora, implementam-se modificações que resultam em uma estrutura cinemática do tipo RRP. Essa adaptação consiste na inclusão de um terceiro grau de liberdade, acionado pneumaticamente e responsável pelos

deslocamentos no eixo Z. Tal adição proporciona a movimentação vertical necessária para o processo de amostragem, permitindo a inserção e retirada da sonda na massa de grãos. A Figura 19 destaca o terceiro grau de liberdade do robô.

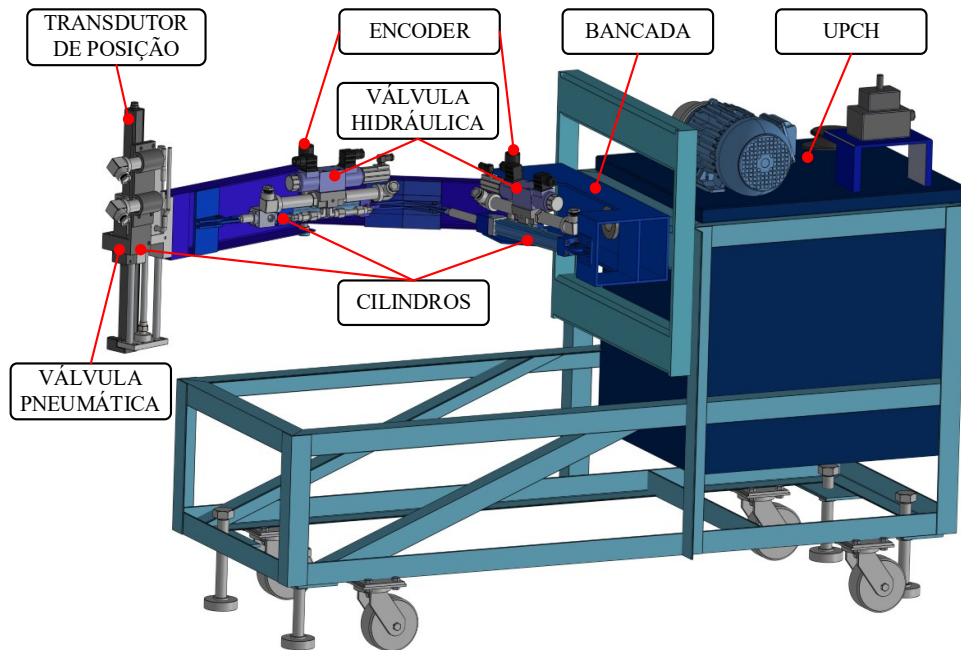
Figura 19 – Terceiro grau de liberdade do robô



Fonte: Autor (2025)

A Figura 20 exibe a ilustração em CAD do manipulador robótico com a configuração final adotada. São evidenciados os principais componentes estruturais e funcionais do sistema.

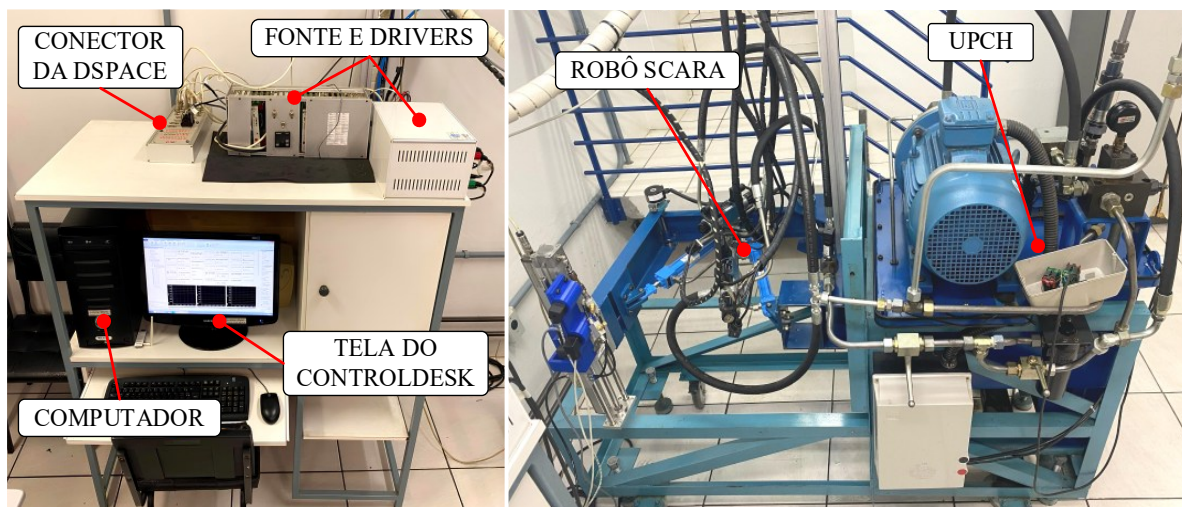
Figura 20 – Ilustração da bancada do robô agrícola.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 21 apresenta a bancada experimental completa, conforme instalada no laboratório. Esta bancada compreende o conjunto físico do robô, a unidade de potência hidráulica e o sistema computacional de controle. O sistema integra todos os elementos necessários para a operação em tempo real e para a aquisição dos sinais experimentais.

Figura 21 – Bancada experimental completa do robô agrícola.



Fonte: Autor (2025)

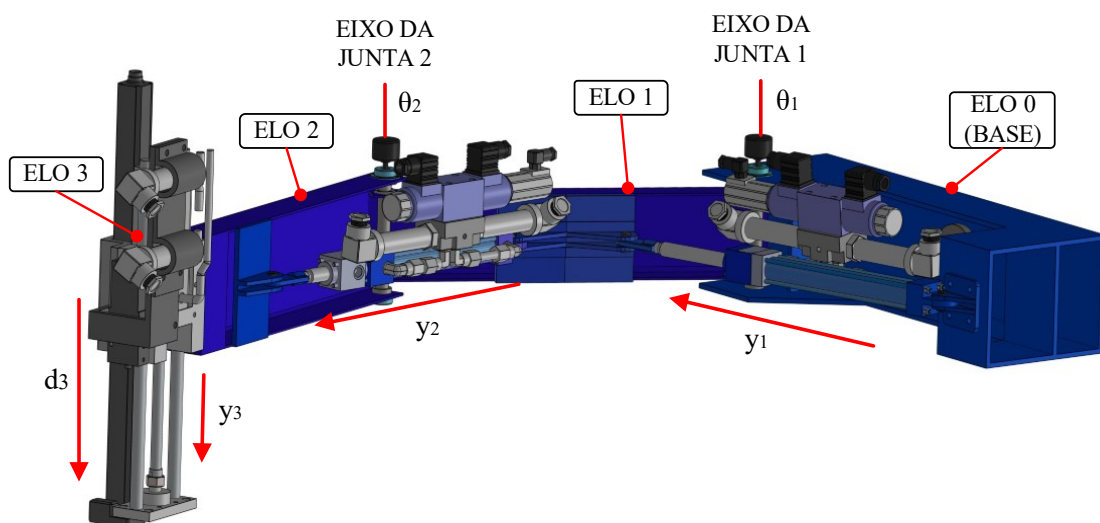
Segundo Valdiero (2012), um robô pode ser constituído por três componentes principais: mecanismo, acionamento e sistema de controle. A seguir, apresenta-se os detalhes técnicos de cada um desses componentes, conforme utilizado na bancada experimental.

3.1 MECANISMO

Todo manipulador robótico é dependente de uma estrutura física, a fim de desempenhar as tarefas que lhe são proporcionadas. O mecanismo compõe-se pela base (elo 0), elo 1, elo 2 e elo 3. Os elos 1 e 2 são construídos em estrutura tipo casca de aço, utilizando perfis em forma de U, e são interligados pelas juntas de revolução 1 e 2, constituídas por mancais com rolamentos de esferas de contato angular (VALDIERO, 2005). O elo 3 é formado por uma guia linear modelo 45NHT da marca Camozzi, com um curso de 335 mm, utilizada para restringir o giro da haste, evitar flexão e aumentar a precisão dos deslocamentos verticais.

Os movimentos dos elos 1 e 2 são representados pelas variáveis de junta θ_1 e θ_2 , medidos por meio de *encoders* incrementais, enquanto o elo 3 é representado por uma junta prismática d_3 . As forças necessárias para a movimentação dos elos são fornecidas por dois atuadores hidráulicos e um pneumático, ambos do tipo diferencial (descritos na seção seguinte), cujos deslocamentos lineares são descritos pelas variáveis y_1 , y_2 e y_3 . A Figura 22 apresenta uma representação em perspectiva do manipulador.

Figura 22 – Representação do manipulador robótico.



Fonte: Autor (2025)

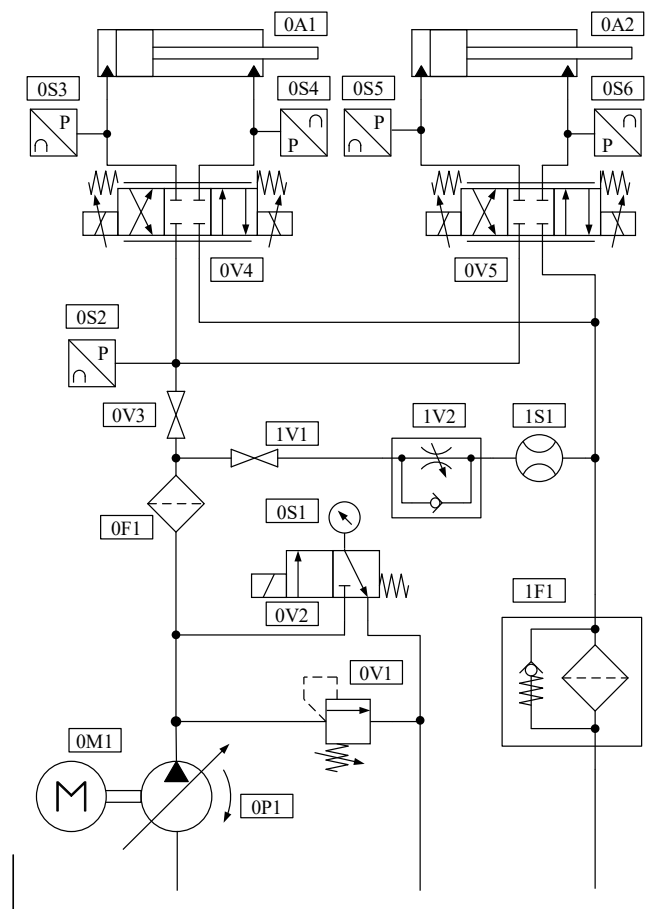
3.2 ACIONAMENTO

O sistema de acionamento é responsável por prover os movimentos requeridos pelo mecanismo durante a execução das tarefas do robô. Na sequência, descrevem-se os sistemas de acionamento hidráulico e pneumático implementados no robô.

3.2.1 Sistema de Acionamento Hidráulico

O sistema de acionamento hidráulico compõe-se de dois cilindros diferenciais de dupla ação, os quais são conectados a válvulas proporcionais direcionais de quatro vias por meio de tubos rígidos. O fluido hidráulico necessário é fornecido por uma Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico (UPCH), a qual assegura condições adequadas de vazão e pressão. A Figura 23 apresenta o diagrama do circuito hidráulico do robô conforme a ISO 1219-1:2012.

Figura 23 – Circuito hidráulico do robô agrícola.



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas dos cilindros hidráulicos utilizados nos atuadores, responsáveis pelo movimento das juntas 1 e 2.

Tabela 3 – Especificações dos cilindros hidráulicos.

Fabricante	Bosch Rexroth		
Modelo	CDT3MP5/25/18/200/Z1X/B1CHDTWW (Atuador 1)		
	CDT3MP5/25/18/150/Z1X/B1CHDTWW (Atuador 2)		
Área embolo	$A_{11} = A_{12} = 4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		
Área anular	$A_{21} = A_{22} = 2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		
Curso da haste	Atuador 1 (0,2 m	$y_{1\max} = 0,1 \text{ m}$	$y_{1\min} = -0,1 \text{ m}$)
	Atuador 2 (0,15 m	$y_{2\max} = 0,075 \text{ m}$	$y_{2\min} = -0,075 \text{ m}$)
Pressão máxima	210 bar		
Velocidade máxima da haste	0,5 m/s		
Tipo de fixação	Orelha articulada CGKA 12 (ISO 8133/ DIN 24555)		

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

Por meio das válvulas proporcionais de controle direcional, é possível regular a vazão de fluido hidráulico que entra e sai das câmaras dos cilindros (VALDIERO, 2005). As válvulas utilizadas são assimétricas e apresentam uma relação entre as vazões nos orifícios proporcional à relação entre as áreas dos cilindros diferenciais. A Tabela 4 contém as especificações técnicas das válvulas utilizadas e das cartelas eletrônicas amplificadoras, as quais são responsáveis por amplificar o sinal de controle enviado pelo sistema e converter esse sinal elétrico em corrente proporcional aplicada à bobina da válvula.

Tabela 4 – Especificações técnicas das válvulas proporcionais direcionais.

Fabricante	Bosch Rexroth
Modelo	4WRE6E1-08-2X/G24K4/V (para atuadores 1 e 2)
Coefficiente de Vazão	$k_a = 2 k_b = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{V} \cdot \text{Pa}^{1/2})$
Zona Morta	$Offset = 0,1 \text{ V}$, $zme = -1 \text{ V}$, $zmd = 1 \text{ V}$
Vazão nominal com $\Delta p = 10 \text{ bar}$	8 L/min $Q_b = Q_a / 2$ (Válvula assimétrica)
Vazão máxima	80 L/min
Sinal de controle	$\pm 10 \text{ V}$
Sinal LVDT carretel	$\pm 10 \text{ V}$
Tensão de alimentação	24 VDC
Cartela eletrônica amplificadora	VT-VRPA2-1-1X/V0/T1

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

O fluido hidráulico empregado é um óleo mineral, cujas principais propriedades estão listadas na Tabela 5. Nessa tabela, também são apresentados outros parâmetros relevantes do subsistema hidráulico, como os volumes existentes entre os êmbolos e os orifícios das válvulas.

Tabela 5 – Características e parâmetros relacionados ao subsistema hidráulico.

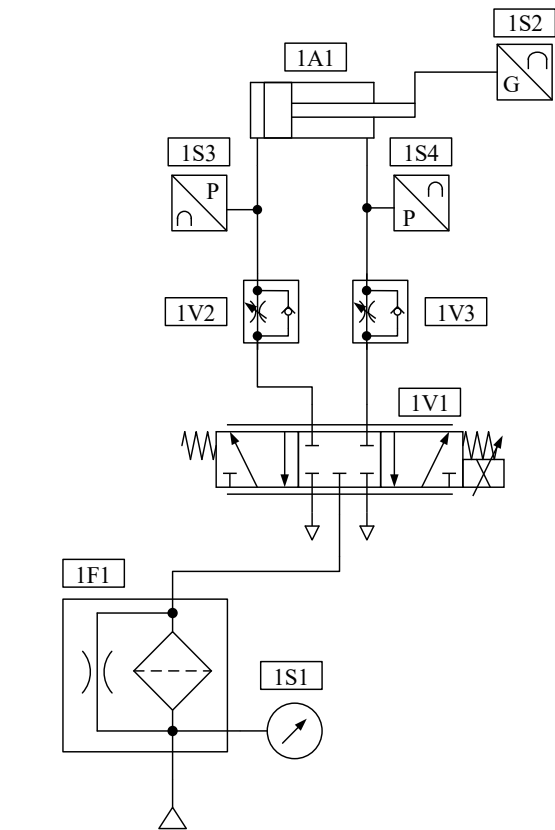
Fluido hidráulico	Mobil DTE 24 (ISO VG 32)
Módulo de elasticidade	$\beta = 10^9 \text{ Pa}$
Massa específica	$\rho = 850 \text{ kg/m}^3$
Pressão de suprimento	$p_s = 40 \text{ bar}$
Volume das câmaras com êmbolo na posição central (incluindo o volume das tubulações)	$V_{11} = 5,35 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (câmara 1, atuador 1) $V_{21} = 3,60 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (câmara 2, atuador 1) $V_{12} = 4,15 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (câmara 1, atuador 2) $V_{22} = 2,93 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (câmara 2, atuador 2)

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

3.2.2 Sistema de Acionamento Pneumático

O sistema de acionamento pneumático provê o movimento vertical do elo 3 do manipulador. A Figura 24 apresenta o circuito pneumático da bancada experimental do robô, o qual é representado conforme a norma ISO 1219-1:2012.

Figura 24 – Circuito pneumático da bancada experimental.



Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 6 encontram-se as principais características do cilindro pneumático utilizado. Esse cilindro é assimétrico e de dupla ação, com um diâmetro de 40 mm e curso de 200 mm.

Tabela 6 – Especificação do cilindro pneumático.

Fabricante	Camozzi Automation
Modelo	61M2P040A0200
Área embolo	$A_{13} = 1,256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Área anular	$A_{23} = 1,056 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Curso da haste	Atuador 3 ($y_{3_{max}} = 0,2 \text{ m}$ $y_{3_{min}} = 0 \text{ m}$)
Pressão máxima	10 bar
Velocidade máxima da haste	1 m/s

Fonte: Autor (2025)

O ar comprimido que alimenta o sistema pneumático do robô provém de um reservatório pressurizado por um compressor. Antes de chegar à servoválvula, o ar passa por uma unidade de tratamento do tipo filtro-regulador Série MC da Camozzi (MC104-D10), responsável por regular a pressão de suprimento e remover impurezas presentes no sistema. Essa unidade possui elemento filtrante de 5 μm , capaz de reter partículas de óxido e água condensada.

A servoválvula proporcional controla a passagem de ar para as câmaras do cilindro e, assim, regula o movimento do êmbolo conforme a demanda operacional. O deslocamento do carretel é ajustado a partir de uma tensão aplicada à solenoide. Utiliza-se a servoválvula modelo MPYE-5-M5-010-B, que opera com tensão de alimentação de 24 V fornecida por uma fonte externa. O sistema de controle envia um sinal analógico na faixa de 0 a 10 V que determina a posição do carretel e, conseqüentemente, a vazão de ar direcionada ao cilindro. As especificações técnicas da servoválvula constam na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais especificações da servoválvula.

Fabricante	FESTO
Modelo	MPYE-5-M5-010-B
Função de Válvula	5/3 vias, centro fechado
Vazão Nominal Padrão	100 L/min
Pressão de Trabalho	0 a 10 bar
Valor b	0,21
Valor C	0,45 L/sbar
Sinal de controle	0 - 10 V
Tensão de alimentação	24 V
Frequência Limite	115 Hz

Fonte: Autor (2025)

3.3 CONTROLE

O sistema de controle do robô compreende sensores para medição dos ângulos das juntas, transdutores de pressão instalados nas câmaras dos cilindros hidráulicos e um transdutor de posição linear dedicado ao deslocamento no eixo Z, fornecendo as informações necessárias para o monitoramento e controle em tempo real.

Os sinais de medição são enviados para a placa de controle dSPACE DS1104, instalada em um computador e conectada ao *software Simulink/MATLAB* por meio do ambiente *ControlDesk*. A DS1104 possui dezesseis canais de entrada e saída, sendo oito entradas analógicas para conversão analógico-digital (ADC) e oito saídas para conversão digital-analógica (DAC). Esses canais são utilizados para aquisição dos sinais dos sensores, além do envio dos sinais de comando para as válvulas, garantindo a interface em tempo real entre o sistema físico e o sistema de controle. A placa utiliza um processador *PowerPC* em conjunto com um processador de sinais digitais (DSP – *Digital Signal Processor*) e conta com periféricos específicos para sistemas de controle digital. Sua integração com o *Simulink/MATLAB* é realizada por meio de blocos dedicados, permitindo configurar diretamente as entradas e saídas utilizadas para o controle. A Tabela 8 apresenta as principais características da placa DS1104.

Tabela 8 – Especificações técnicas da placa dSPACE.

Fabricante	dSPACE (Digital Signal Processing and Control Engineering)
Modelo	DS1104
Processador	Power PC 603e 250MHz (main), DPS TMS320F240 (slave)
Host PC	Slot PCI 33MHz/ 32bit 5V
Memória	8Mb boot flash, 32Mb DRAM
Entradas ADC	8 canais (conversor analógico para digital)
Saídas DAC	8 canais (conversor digital para analógico)
Interface encoder incremental	2 entradas TTL ou RS422, tensão de alimentação 5V/0,5A
Sistema operacional	Windows
<i>Software</i>	ControlDesk/ integração com <i>MATLAB</i>

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

A Tabela 9 apresenta as especificações dos *encoders* utilizados. A resolução original de 500 pulsos por rotação é ampliada para 2000 pulsos por rotação por meio da interpolação realizada automaticamente pela placa DS1104.

Tabela 9 – Especificações técnicas dos *encoders* incrementais.

Fabricante	HOHNER
Modelo	Encoder incremental de eixo vazado cód. 7510-0622-0500
6 canais	ABO + ABO invertido A e B em quadrante de fase, O = Index.
Saída	5-30 V, proporcional à tensão de alimentação
Resolução	500 ppr (pulsos por rotação)

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

Os transdutores de pressão utilizados para leitura das pressões hidráulicas e pneumáticas contam com uma ponte amplificadora integrada para o sinal piezoelétrico, sendo denominados transmissores. As principais características estão descritas na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 – Especificações técnicas dos transdutores de pressão hidráulica.

Fabricante	ZÜRICH
Modelo	Transmissor de pressão PSI-420
Faixa	0-100 bar
Saída	0-10 V
Conexão	1/4 BSP
Tipo de sensor	Piezorresistivo
Alimentação	18 a 35 V

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

Tabela 11 – Especificações técnicas dos transdutores de pressão pneumática.

Fabricante	PRESSGAGE
Modelo	TPI-PRESS
Faixa	0-10 bar
Saída	0-10 V
Conexão	1/4 BSP
Tipo de sensor	Piezorresistivo
Alimentação	12 a 30 V

Fonte: Autor (2025)

O sistema de medição de posição no elo 3 do robô utiliza um transdutor magnético modelo BTL5-A11-M0400-P-S32 da fabricante Balluff, com faixa de medição de 400 mm e saída analógica de 0–10 V. As especificações técnicas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Especificações técnicas do transdutor de posição linear.

Fabricante	Balluff
Modelo	BTL5-A11-M0400-P-S32
Princípio de Medição	Magnético
Faixa de Medição	400 mm
Resolução	$\leq 0,1$ mV
Frequência de Amostragem	1 kHz
Tensão Operacional	20...28 V
Saída	Analógica (0-10 V)
Material Carcaça	Alumínio anodizado

Fonte: Autor (2025)

3.4 DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentou-se os principais aspectos técnicos do robô estudado. Detalharam-se a estrutura mecânica do sistema, os componentes responsáveis pelo acionamento dos elos e a integração de controle com os sensores e a aquisição dos sinais reais.

A configuração cinemática do robô agrícola mostra-se adequada para a tarefa de posicionamento da sonda coletora. A estrutura original, consolidada nos estudos anteriores, foi aproveitada sem comprometer a robustez, além disso, as modificações realizadas ampliaram a aplicabilidade de toda a bancada experimental.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem de matemática de sistemas envolve a aplicação de leis físicas para descrever o comportamento dos componentes e suas interações, resultando em um conjunto de equações matemáticas que representam o sistema físico com precisão (DE NEGRI, 1987 apud DESTRO, 2014). No contexto de sistemas robóticos, a modelagem permite representar as características físicas do robô por meio de equações que descrevem sua dinâmica, auxiliando na análise comportamental e na compreensão dos fenômenos que influenciam seu desempenho.

Neste capítulo, apresenta-se a modelagem matemática desenvolvida, abrangendo a modelagem cinemática do robô SCARA e o modelo de transmissão entre atuador e elo, bem como a modelagem dos sistemas de atuação hidráulico e pneumático. Além disso, são descritas a formulação do controle implementado e a metodologia de compensação da zona morta aplicada às válvulas proporcionais.

4.1 MODELAGEM CINEMÁTICA DO ROBÔ SCARA

Robôs do tipo SCARA são frequentemente empregados em tarefas de manipulação como pega-e-posiciona (*pick-and-place*) e em operações de montagem, dada a sua rigidez no eixo vertical e liberdade de movimento no plano horizontal. De modo geral, manipuladores robóticos compõem-se de uma cadeia de elos rígidos interconectados por juntas, na qual uma extremidade é a base e a oposta é o efetuador final. A cinemática, por sua vez, estuda os movimentos desses elos sem considerar as forças envolvidas. Trata-se, conforme descrito em Siciliano *et al.* (2008), da análise de como os deslocamentos dos elos alteram a estrutura do manipulador. Ceccarelli (2011) complementa que a cinemática de robôs consiste no estudo da configuração e do movimento da estrutura por análise geométrica, a qual desconsidera limites ou ações operacionais e a atuação dos atuadores.

A análise cinemática do manipulador é dividida em duas etapas: a cinemática direta, que determina a posição do efetuador final a partir das variáveis articulares, e a cinemática inversa, que permite calcular essas variáveis com base em uma posição desejada no espaço.

As variáveis estão definidas da seguinte forma:

θ_1 : Ângulo da primeira junta rotacional, que controla a rotação do primeiro elo em torno da base (eixo Z_0).

θ_2 : Ângulo da segunda junta rotacional, que controla a rotação do segundo elo em relação ao primeiro (eixo Z_1).

d_3 : Deslocamento linear da junta prismática, que controla a movimentação vertical (ao longo do eixo Z) do efetuador.

A Figura 25 e a Tabela 13 apresentam os parâmetros de Denavit-Hartenberg (D-H) adotados para representar o modelo cinemático do robô. Esta convenção define a relação geométrica entre elos consecutivos por meio de quatro parâmetros:

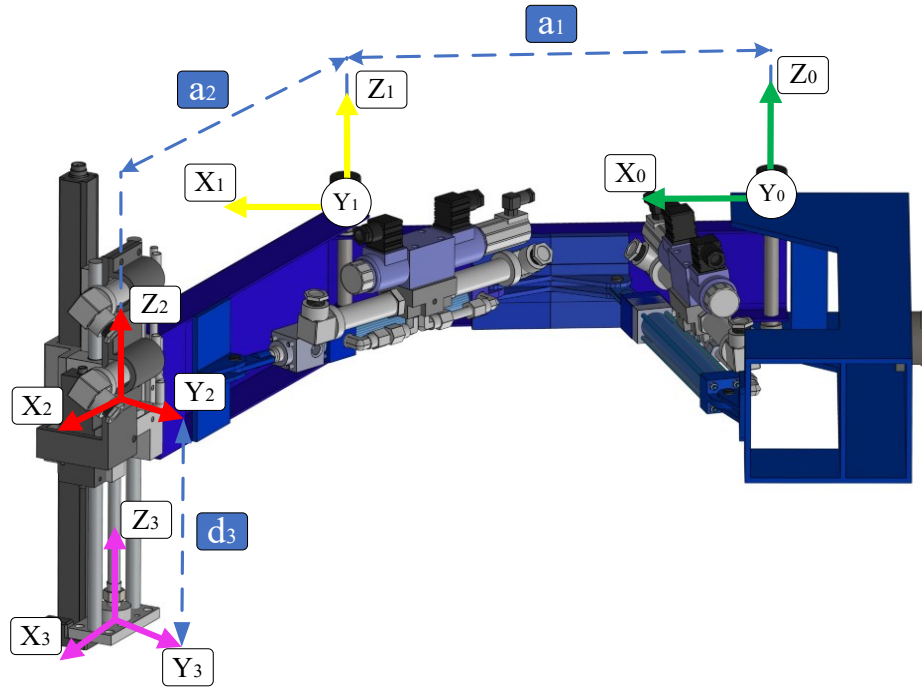
θ_i : ângulo entre o eixo X_{i-1} e o eixo X_i , medido em torno do eixo Z_{i-1} .

a_i : distância entre o eixo Z_{i-1} e o eixo Z_i , medida ao longo da normal comum X_i .

α_i : ângulo entre o eixo Z_{i-1} e o eixo Z_i , medido em torno do eixo X_i .

d_i : distância entre o eixo X_{i-1} e o eixo X_i , medida ao longo do eixo Z_{i-1} .

Figura 25 – Ilustração com vista lateral do robô com os parâmetros de Denavit-Hartenberg.



Fonte: Autor (2025)

Tabela 13 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg para o robô em estudo.

Elo (i)	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$-52^\circ \leq \theta_1 \leq 10^\circ$	$d_1 = 0$	$a_1 = l_1 = 0,5 \text{ m}$	$\alpha_1 = 0$
2	$42^\circ \leq \theta_2 \leq 85^\circ$	$d_1 = 0$	$a_2 = l_2 = 0,56 \text{ m}$	$\alpha_2 = 0$
3	$\theta_3 = 0$	$0 \leq d_3 \leq 0,2 \text{ m}$	$a_3 = 0$	$\alpha_3 = 0$

Fonte: Autor (2025)

em que l_1 corresponde ao comprimento do primeiro elo e l_2 corresponde ao comprimento do segundo elo.

Com base nesses parâmetros, a posição do efetuador final no espaço cartesiano (x, y, z) é determinada pelas equações da cinemática direta. A Equação (1) representa a coordenada x , enquanto a Equação (2) define a coordenada y , ambas dependentes das variáveis θ_1 e θ_2 . Já a coordenada vertical z é descrita pela Equação (3), diretamente associada ao deslocamento linear da junta prismática d_3 .

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

$$z = -d_3 \quad (3)$$

Para a obtenção das variáveis articulares a partir de uma posição desejada (x_d, y_d, z_d) no espaço cartesiano, utiliza-se a cinemática inversa. A Equação (4) fornece o valor de d_3 , enquanto as Equações (5) e (6) determinam os ângulos das juntas de revolução θ_1 e θ_2 , respectivamente.

$$d_3 = -z_d \quad (4)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (5)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(y_d, x_d) - \text{atan2}(l_2 \sin(\theta_2), l_1 + l_2 \cos(\theta_2)) \quad (6)$$

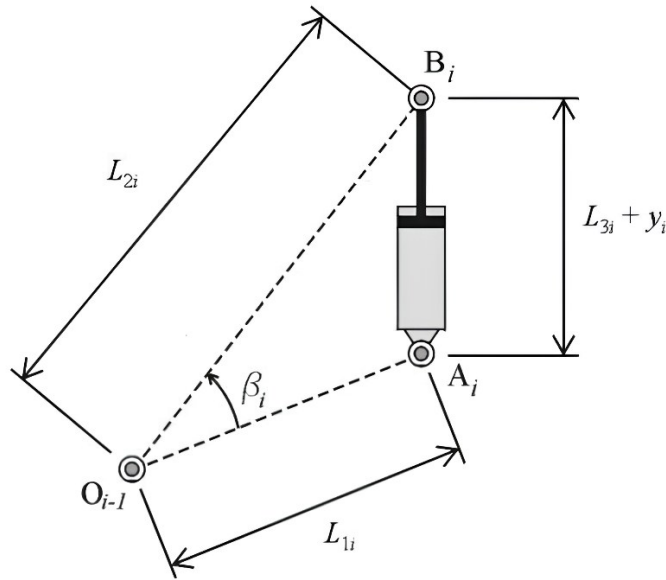
O desenvolvimento detalhado dessas equações, incluindo a construção das matrizes de transformação homogênea segundo a convenção de Denavit-Hartenberg, encontra-se apresentado no Apêndice A.

4.1.1 Modelo de Transmissão entre um Atuador e um Elo

A relação de transmissão entre atuador e elo é útil na dedução das equações cinemáticas e dinâmicas para uso no controle e simulação de robôs (PORSCH, 2020), usadas quando há sensores de posição angular, mas necessita-se saber do deslocamento linear da haste do cilindro. Essas relações são expressas no modelo dinâmico, na qual os deslocamentos lineares das hastes dos atuadores e também as rotações dos elos são dadas como funções dos parâmetros de localização dos atuadores em relação aos sistemas de referência da convenção de Denavit-Hartenberg (BEHNEN, 2017).

No estudo de Valdiero (2005) é proposta uma formulação geométrica generalizada que permite representar essa relação para qualquer configuração relativa entre o atuador linear e sua respectiva junta de revolução. A dedução baseia-se na análise do triângulo formado pelos pontos O_{i-1} , A_i e B_i , conforme ilustrado na Figura 26, permitindo a aplicação direta da lei dos cossenos. A dedução completa do modelo de transmissão utilizado encontra-se no Apêndice B.

Figura 26 – Triângulo formado pelos pontos O_{i-1} , A_i e B_i .



Fonte: Valdiero (2005)

Com isso, o deslocamento linear y_i do atuador i em função da variável de junta θ_i é determinado por:

$$f_{q \rightarrow y}(\theta_i) = \sqrt{L_{1i}^2 + L_{2i}^2 - 2|L_{1i}||L_{2i}|\cos(\theta_i - \Delta\varphi_i)} - L_{3i} \quad (7)$$

onde L_{1i} representa a distância entre O_{i-1} e A_i , L_{2i} corresponde à distância entre O_{i-1} e B_i , $\Delta\varphi_i$ é o ângulo construtivo definido pela diferença entre φ_{1i} e φ_{2i} , e L_{3i} corresponde ao comprimento de referência do atuador, adotado de forma que o deslocamento $y_i = 0$ coincida com o ponto central do curso do cilindro.

Essa equação representa o equacionamento fundamental da transmissão entre o atuador e o elo rotativo, sendo utilizada ao longo da modelagem para calcular o deslocamento físico das hastes a partir dos sinais medidos nos *encoders*.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE ATUAÇÃO

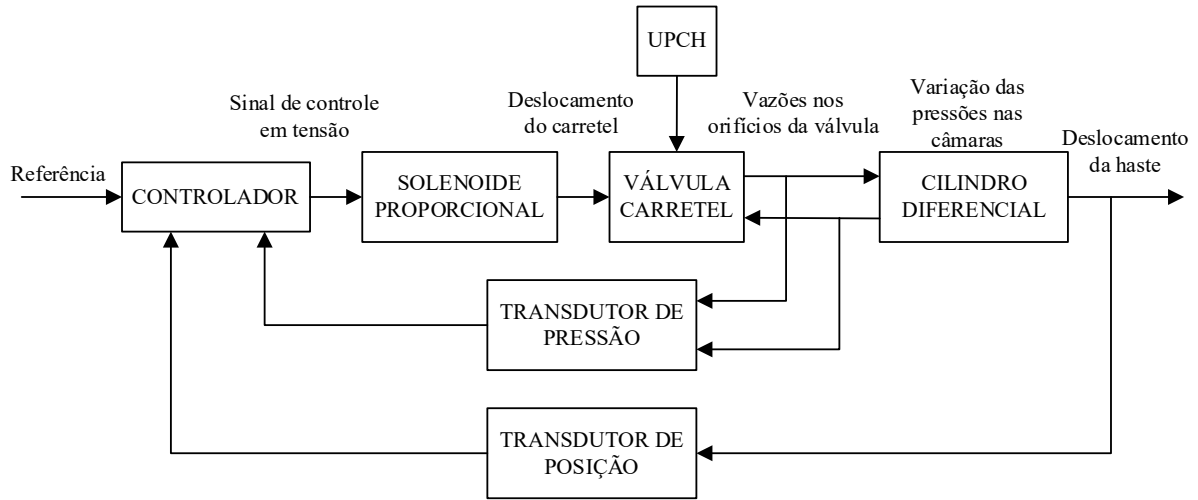
No domínio da hidráulica e pneumática, o estudo dos modelos matemáticos e dos componentes auxiliam o projetista a dimensionar e selecionar corretamente os componentes do sistema. Com base em informações fornecidas por catálogos de fabricantes, é possível atribuir valores aos parâmetros dos modelos utilizados na simulação, permitindo confrontar os resultados obtidos com os requisitos estabelecidos no projeto (MURARO, 2006; SZPAK, 2008; DE NEGRI, 2001). Em robôs com estes tipos de acionamento, os torques (τ) nas juntas são gerados por atuadores cuja dinâmica é complexa e deve ser considerada para garantir representatividade e um bom desempenho do sistema (VALDIERO, 2012).

A seguir, apresentam-se os modelos matemáticos que descrevem os sistemas de atuação hidráulico e pneumático, cujos detalhamentos completos encontram-se nos Apêndices C e D, respectivamente. O modelo dinâmico do atrito, utilizado na representação das forças resistivas internas ao sistema, está descrito no Apêndice E.

4.2.1 Modelagem Matemática do Sistema de Atuação Hidráulico

Nesta dissertação, o termo "atuador hidráulico" refere-se ao conjunto formado por uma válvula direcional proporcional assimétrica e um cilindro hidráulico assimétrico. A Figura 27 apresenta o diagrama esquemático do sistema hidráulico de atuação, cuja modelagem é apresentada a seguir.

Figura 27 – Diagrama esquemático do sistema de atuação hidráulico.



Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

Como citado em Pereira (2006), a válvula proporcional é modelada por meio de duas equações: uma que descreve a dinâmica de segunda ordem entre a tensão de entrada e o deslocamento do carretel, e outra que representa a vazão nos orifícios, obtida através da equação de Bernoulli.

A equação (8) representa a dinâmica de segunda ordem do carretel da válvula, deduzida a partir da equação do movimento e da 2ª Lei de Kirchhoff.

$$K_{RP} \cdot U_c = \frac{1}{(\omega_n^V)^2} \frac{d^2 y^V}{dt^2} + \frac{2\xi^V}{\omega_n^V} \frac{dy^V}{dt} + y^V \quad (8)$$

tal que o termo K_{RP} representa o ganho em regime permanente do carretel, y^V é a posição do carretel, ω_n^V é a frequência natural não amortecida da válvula, ξ^V é a razão de amortecimento adimensional da válvula, e U_c corresponde ao sinal de comando aplicado à válvula.

Para representar a equação de vazão em orifícios utiliza-se a equação de Bernoulli, detalhada em Valdiero (2001). Nessas válvulas, os orifícios que regulam a vazão de fluido são definidos pelo deslocamento do carretel, movendo os ressaltos em relação aos seus respectivos pórticos (SZPAK, 2008).

As equações (9) e (10) que representam a equação de vazão, considerando a sobreposição positiva do carretel e o vazamento interno, quando $y^V \geq 0$ são:

$$q_{VA} = \left(K_{VA} \frac{U_c}{U_{cn}} + K_{VinA} \right) \sqrt{p_S - p_A} - K_{VinA} \sqrt{p_A - p_T} \quad (9)$$

$$q_{VB} = \left(K_{VB} \frac{U_c}{U_{cn}} + K_{VinB} \right) \sqrt{p_B - p_T} - K_{VinB} \sqrt{p_S - p_B} \quad (10)$$

e as equações (11) e (12), para $y^V < 0$, são:

$$q_{VA} = - \left(K_{VA} \frac{|U_c|}{U_{cn}} + K_{VinA} \right) \sqrt{p_A - p_T} + K_{VinA} \sqrt{p_S - p_A} \quad (11)$$

$$q_{VB} = - \left(K_{VB} \frac{|U_c|}{U_{cn}} + K_{VinB} \right) \sqrt{p_S - p_B} + K_{VinB} \sqrt{p_B - p_T} \quad (12)$$

em que q_{VA} é a vazão na saída da válvula na via A; q_{VB} é a vazão na saída da válvula na via B; K_{VA} e K_{VB} são os coeficientes de vazão parcial nas vias A e B da válvula, respectivamente; U_{cn} é a tensão nominal de operação; K_{VinA} e K_{VinB} representam os coeficientes de vazamento interno nas vias A e B da válvula, respectivamente.

A movimentação do êmbolo do cilindro ocorre quando a força hidráulica, resultante da diferença de pressão nas câmaras A e B, supera a soma das forças de inércia, atrito, mola e pré-carga (DE NEGRI, 2001). Assim, a equação do movimento do cilindro hidráulico é expressa como:

$$(p_A A_A) - (p_B A_B) = M_t \frac{d^2 y^A}{dt^2} + K_x y^A + F_g + F_{atr} + F_{PreC} \quad (13)$$

sendo $(p_A A_A)$ representa a força gerada pela pressão p_A na área da câmara A, e $(p_B A_B)$ é a força correspondente na câmara B; F_g é a força gravitacional; F_{atr} corresponde à força de atrito no cilindro e nas guias da bancada; F_{PreC} é a força da carga aplicada; K_x é a constante elástica da mola; M_t é a massa total do sistema.

A vazão que entra no cilindro é dada pela equação da continuidade (FURST e DE NEGRI, 2002). Despreza-se o vazamento interno por ser, normalmente, muito pequeno quando comparado à vazão que entra no cilindro. Portanto a vazão de entrada na câmara A do cilindro é dada por (14) e a vazão de saída da câmara B do cilindro é dada por (15), sendo:

$$q_{VA} = A_A \frac{dy^A}{dt} + \frac{V_{A0} + A_A y^A}{\beta_e} \frac{dp_A}{dt} \quad (14)$$

$$q_{VB} = A_B \frac{dy^A}{dt} - \frac{V_{B0} - A_B \cdot y^A}{\beta_e} \cdot \frac{dp_B}{dt} \quad (15)$$

no qual o módulo de compressibilidade efetivo é representado por β_e . As pressões nas câmaras A e B do cilindro são indicadas, respectivamente, por p_A e p_B . As áreas das câmaras A e B são denotadas por A_A e A_B , enquanto os volumes iniciais dessas câmaras, que já incluem o volume das tubulações conectadas às respectivas saídas da válvula, são representados por V_{A0} e V_{B0} .

4.2.2 Modelagem Matemática do Sistema de Atuação Pneumático

Conforme citado em Vigolo (2018), um sistema de atuação pneumático consiste, principalmente, em uma válvula direcional e um atuador pneumático. A válvula pode ser do tipo *on/off* ou proporcional, enquanto o atuador pneumático pode ser configurado de diferentes maneiras, dependendo das exigências da aplicação.

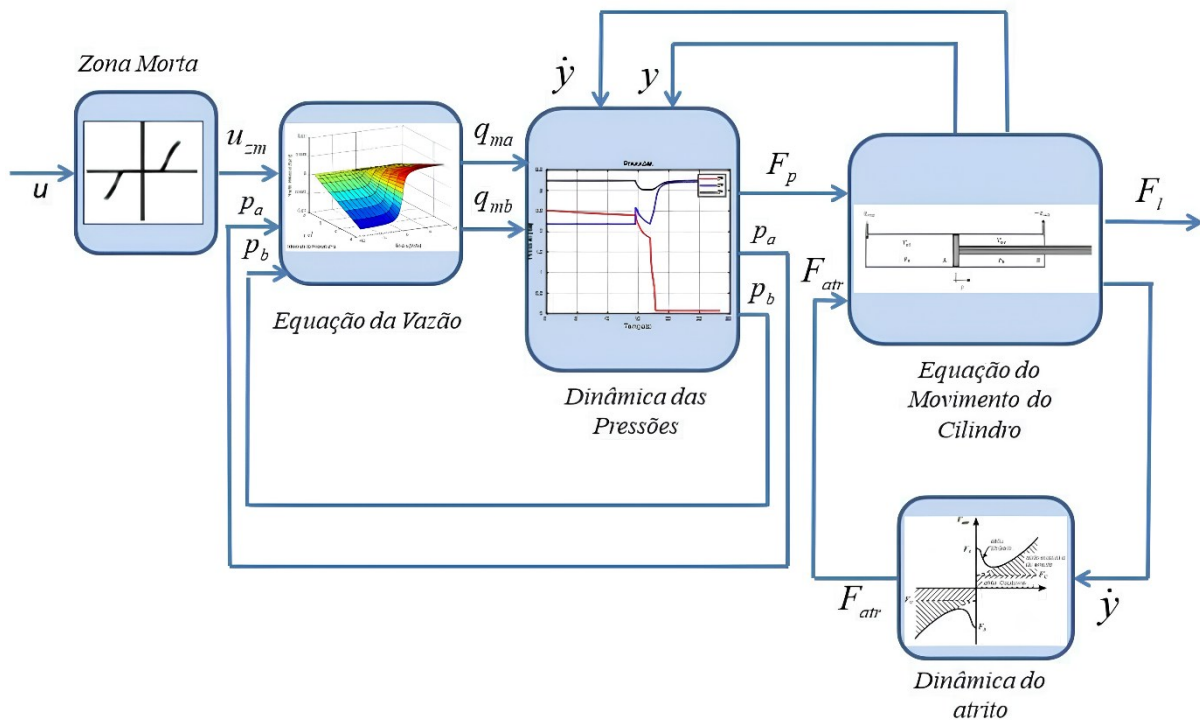
Para viabilizar a implementação de um modelo teórico em algoritmos de simulação, algumas simplificações e considerações físicas são adotadas para a modelagem matemática das características não-lineares do atuador pneumático abordado neste trabalho. Atuadores pneumáticos possuem uma natureza inerentemente não-linear, o que torna sua modelagem matemática um desafio, conforme apontado por Ritter (2010) e Pörsch (2020). Assim, foram estabelecidas as seguintes premissas, conforme utilizadas por Endler (2014):

- A energia cinética do gás é desconsiderada;
- O ar é tratado como um gás perfeito;
- Vazamentos nos dutos, na servoválvula e no êmbolo são ignorados;
- Os processos são considerados isentrópicos (adiabáticos e reversíveis);
- O sistema é assumido como adiabático, desconsiderando trocas de calor pelas paredes do cilindro;
- O atrito entre o pórtilo da válvula e o carretel não é considerado;
- A temperatura do ar de suprimento é assumida constante.

A Figura 28 apresenta um diagrama de blocos que esquematiza as principais não linearidades consideradas na modelagem matemática do atuador pneumático do robô. Segundo Pörsch (2020), a partir do sinal de controle (U_c), o primeiro bloco inclui a zona morta, que ocorre devido à largura do carretel ser maior que a largura do orifício de passagem de ar sob

pressão na servoválvula. O segundo bloco descreve a equação da vazão mássica nas câmaras do cilindro. O terceiro bloco representa a dinâmica das pressões, oriunda da equação de continuidade, resultando em duas equações não lineares de primeira ordem. A sequência inclui o bloco que representa a equação do movimento do atuador pneumático. Por fim, destaca-se o bloco da dinâmica do atrito, um dos fatores mais influentes na equação do movimento (VALDIERO, 2005; PÖRSCH, 2020), que representa um fenômeno complexo de descrever analiticamente.

Figura 28 – Não-linearidades incluídas no modelo matemático do atuador pneumático.



Fonte: Pörsch (2020)

Como citado em Endler (2014), a equação que descreve a vazão mássica da válvula, de acordo com a Norma ISO 6358-1:2013 (ISO, 2013), é válida quando os orifícios estão totalmente abertos. No entanto, quando uma válvula proporcional opera em regime de abertura parcial, ou seja, quando a tensão de referência aplicada é inferior à tensão máxima, é necessário incluir na equação o efeito da abertura relativa (A_{re}), assim obtendo a Equação (16).

$$q_m = \begin{cases} A_{re} p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2 - b}{p_1 - b} \right)^2} & \text{para } \frac{p_2}{p_1} > b \\ A_{re} p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} & \text{para } \frac{p_2}{p_1} \leq b \end{cases} \quad (16)$$

em que C é a condutância sônica, p_1 é a pressão a montante, p_2 é a pressão a jusante, ρ_0 é a massa específica do ar nas condições de referência, T_0 e T_1 são as temperaturas de referência e a montante, respectivamente, e b é a razão de pressão crítica.

A abertura relativa (A_{re}) pode ser determinada com base em ensaios ou por informações de catálogos de fabricantes. Para fins de modelagem simplificada, adota-se uma constante de proporcionalidade entre ambas (K_U), como expresso na Equação (17):

$$A_{re} = K_U U_{zm} \quad (17)$$

A válvula proporcional pneumática utilizada neste trabalho possui cinco portas, conforme a norma de representação: suprimento (porta 1), vias de trabalho (portas 2 e 4) e exaustões (portas 3 e 5). O comportamento do escoamento de ar comprimido entre essas portas varia conforme o sinal de comando aplicado. No entanto, situações envolvendo altas cargas ou velocidades elevadas podem inverter os sentidos esperados da vazão. Assim, torna-se necessário modelar as vazões mássicas nos dois sentidos possíveis de escoamento para as câmaras A e B do cilindro. Para isso, a modelagem considera os quatro caminhos distintos entre as portas da válvula, resultando em dois conjuntos de quatro equações para calcular q_{mA} e q_{mB} (vazões mássicas correspondentes às câmaras A e B do cilindro) com base na Equação (16) e (17), apresentada e detalhada no Apêndice D.

A equação do movimento do cilindro é obtida com base na aplicação da segunda Lei de Newton ao conjunto formado pelo êmbolo, haste e massa de carga. O balanço de forças atuantes é representado por:

$$p_A A_A - p_B A_B - F_{atr} + F_g = M \frac{d^2 y^A}{dt^2} \quad (18)$$

em que F_{atr} é a força de atrito, F_g é a força da gravidade, e M é a massa total do conjunto haste, êmbolo e a carga em movimento.

A dinâmica das pressões nas câmaras A e B do cilindro é obtida a partir da equação da continuidade aplicada a um volume de controle. É desconsiderando os vazamentos e assumindo comportamento isentrópico, assim como em Endler (2014). A variação da pressão nas câmaras do cilindro é descrita pelas expressões diferenciais apresentadas nas Equações (19) e (20):

$$\dot{p}_A = -\frac{A_A \dot{y} \gamma}{V_{A0} + A_A y^A} p_A + \frac{RT \gamma}{V_{A0} + A_A y^A} q_{mA} \quad (19)$$

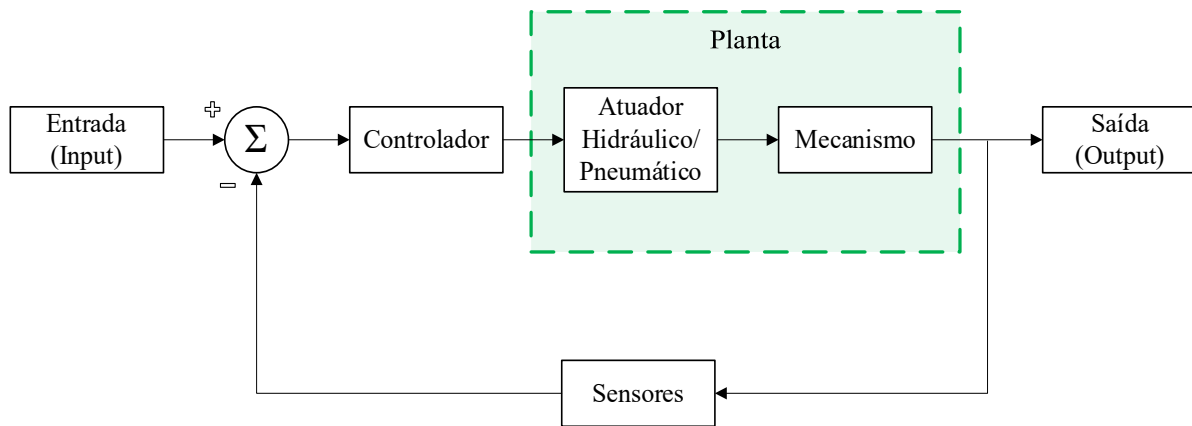
$$\dot{p}_B = \frac{A_B \dot{y} \gamma}{V_{B0} + A_B (L - y^A)} p_B - \frac{RT \gamma}{V_{B0} + A_B (L - y^A)} q_{mB} \quad (20)$$

no qual $\dot{y}$ representa a velocidade, A_A e A_B são as áreas das câmaras A e B, V_{A0} e V_{B0} correspondem aos volumes mortos de cada câmara, L é o curso total do atuador, p_A e p_B são as pressões nas câmaras, q_{mA} e q_{mB} são as vazões mássicas, γ é a razão dos calores específicos, T é a temperatura absoluta do gás e R é a constante dos gases.

4.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE E COMPENSAÇÃO DE ZONA MORTA NA VÁLVULA

O controle de um sistema dinâmico é o processo de ajustar suas variáveis de entrada para que a saída siga uma trajetória desejada, definida como referência. Esse processo envolve a utilização de hardware e *software* integrados, em conjunto com sensores responsáveis por medir as variáveis de interesse em tempo real (BEHNEN, 2017), conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Elementos presentes no diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação.



Fonte: Autor (2025)

A estratégia de controle adotada neste trabalho fundamenta-se na aplicação de controladores proporcional (P) e proporcional-integrativo (PI), inseridos em uma arquitetura de controle em malha fechada. Nessa configuração, a variável de entrada do sistema é continuamente ajustada em função do erro, definido como a diferença entre o valor medido da variável controlada e o sinal de referência, permitindo que o sistema corrija desvios operacionais e acompanhe de maneira satisfatória a trajetória desejada, mesmo diante de perturbações externas. O controlador P foi empregado em análises iniciais e a fins comparativos, possibilitando avaliar a resposta dinâmica básica do sistema, porém os resultados mais consistentes foram obtidos com o uso do controlador PI, que se mostrou mais eficaz na redução do erro em regime permanente e demais momentos do rastreamento de trajetória.

O controlador PI combina duas ações complementares: a ação proporcional e a ação integral. A componente proporcional é responsável por fornecer uma resposta imediata ao erro atual, ajustando o sinal de controle de maneira diretamente proporcional a este erro. Já a componente integral acumula o erro ao longo do tempo, o que significa que, mesmo um pequeno erro, se mantido, fará com que a componente integral aumente gradualmente, que faz com que o controlador elimine o erro de regime permanente (BEHNEN, 2017; PORSCH, 2020).

A representação matemática do sinal de controle gerado por um controlador PI, no domínio do tempo, é dada por:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (21)$$

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad (22)$$

em que K_p é o ganho proporcional, $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ é o ganho integral, T_i é o tempo integrativo e $e(t)$ é o erro entre a referência $y_d(t)$ e a saída medida $y(t)$.

No contexto desta aplicação, a utilização dos controladores P e PI se justifica pela consolidação de seu emprego em diversos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP), que demonstraram bom desempenho no controle de posição em diferentes aplicações de atuadores hidráulicos e pneumáticos. Optou-se por não empregar controladores com componente derivativa (PD ou PID), pois em sistemas sujeitos a ruídos e incertezas, essa ação tende a amplificar as perturbações e provocar oscilações indesejadas na resposta.

4.3.1 Compensação da Zona Morta da Válvula

De acordo com Maraschin (2015), a integração de controles lineares clássicos com estratégias que consideram as não linearidades presentes nos atuadores hidráulicos/pneumáticos, como a compensação da zona morta na válvula direcional proporcional, podem reduzir significativamente o erro de seguimento em relação à trajetória desejada, resultando em melhorias no controle de posição do sistema. Valdiero (2005), Pereira (2006), Andrighetto (2008), Szpak (2008), Machado (2010), entre outros, demonstram melhorias relevantes no desempenho do sistema com a aplicação desta técnica em seus respectivos trabalhos.

Nas válvulas proporcionais direcionais de carretel com sobreposição positiva (supercrítica), como as utilizadas neste trabalho, têm-se a presença da zona morta, que se refere à relação estática entre a entrada e a saída, na qual, para uma determinada faixa de valores de entrada, não ocorre nenhuma alteração ou resposta na saída (BEHNEN, 2017). Tal comportamento decorre do fato de que a largura do carretel é maior que a abertura de passagem do orifício, podendo comprometer o desempenho do sistema caso não seja realizada a devida compensação.

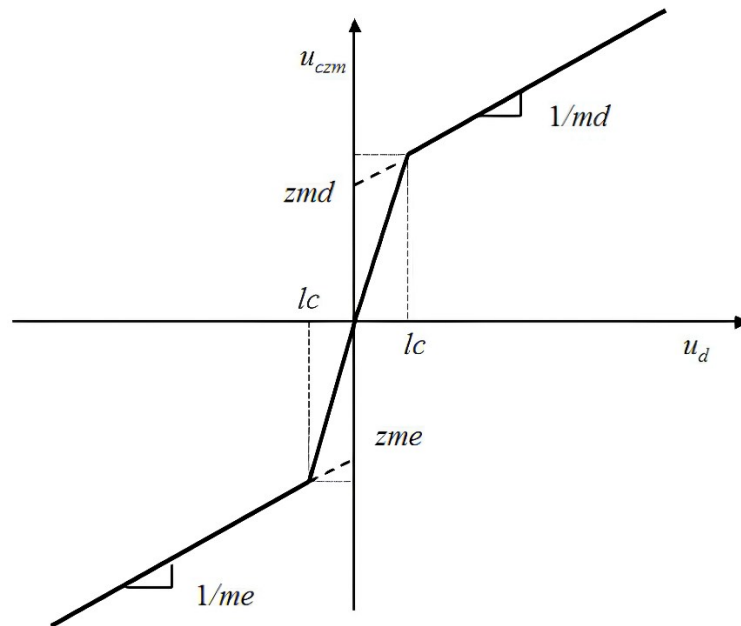
Segundo Valdiero (2012), há aplicações no qual a presença da zona morta pode ser intencional e até benéfica. Um exemplo ocorre em válvulas hidráulicas utilizadas em sistemas de suspensão automotiva, nas quais essa característica reduz vazamentos e contribui para a

manter a altura do veículo quando o motor está desligado. No entanto, quando a suspensão se encontra ativa, a zona morta passa a comprometer o desempenho, exigindo sua compensação por meio de estratégias no controle.

Para lidar com a não-linearidade da zona morta, foi adotada uma metodologia explícita em Valdiero (2005), também aplicada em Behnen (2017), Flores (2018) e Porsch (2020). Nessa abordagem, a compensação é feita utilizando a inversa fixa da zona morta, o que minimiza os efeitos negativos no desempenho do sistema.

A Figura 30 ilustra graficamente essa compensação por inversa da zona morta, com uma suavização linear próxima à origem.

Figura 30 – Representação gráfica da inversa da não-linearidade de zona morta com suavização próxima à origem.



Fonte: Valdiero (2012)

Nessa representação, u_d é o sinal de controle desejado, u_{czm} é a saída do compensador e l_c define a largura de compensação, que estabelece a região de suavização linear. Já zmd e zme são os limites direito e esquerdo da zona morta, respectivamente, assim como md e me são as inclinações. Essa compensação é descrita pela equação (23).

$$u_{czm}(t) = \begin{cases} \frac{u_d(t)}{md} + zmd & \rightarrow \text{se } u_d(t) \geq lc \\ \frac{u_d(t)}{md} - |zme| & \rightarrow \text{se } u_d(t) \leq -|lc| \\ \left(\frac{zmd + lc/md}{lc} \right) u_d(t) & \rightarrow \text{se } 0 \leq u_d(t) < lc \\ \left(\frac{|zme| + |lc|/me}{|lc|} \right) u_d(t) & \rightarrow \text{se } -|lc| \leq u_d(t) < 0 \end{cases} \quad (23)$$

4.4 DISCUSSÕES

Neste capítulo, foram descritos os principais modelos matemáticos para o robô, abordando os sistemas de atuação hidráulico e pneumático, a dinâmica do atrito, a compensação da zona morta, assim como a modelagem cinemática e a relação de transmissão entre atuadores e elos, que são importantes para a definição das referências de posição e por constituírem elementos necessários na estruturação do controle de posição empregado na prova de conceito do robô. No capítulo seguinte, discute-se os resultados experimentais obtidos, com o objetivo de validar a aplicação do robô na tarefa proposta.

5 IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ROBÔ

Este capítulo apresenta a implementação e a análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados diretamente no robô em bancada experimental, com ênfase na avaliação do desempenho para a prova de conceito do posicionamento automatizado de uma sonda coletora de amostras de grãos.

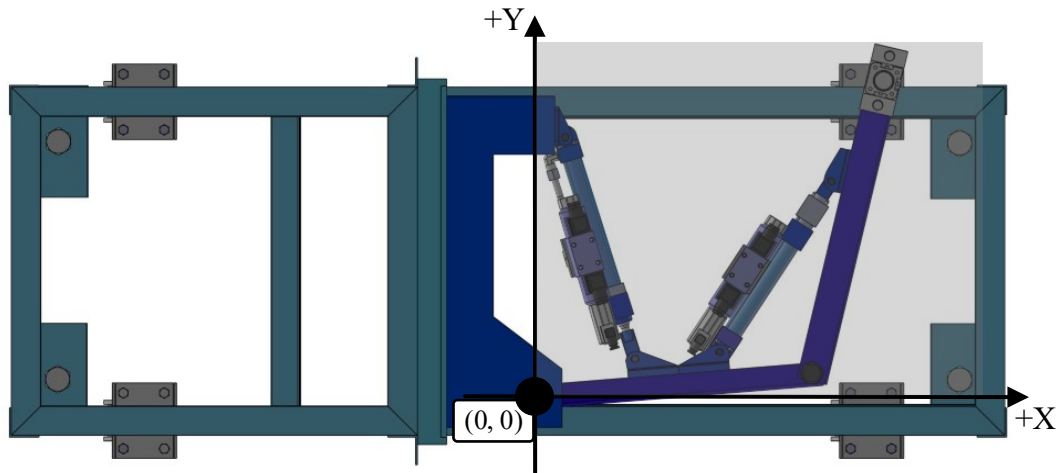
As seções iniciais tratam da determinação do espaço de trabalho do robô, do planejamento das trajetórias desejadas, da definição dos ganhos utilizados pelo controlador PI com compensação da zona morta das válvulas, das condições operacionais adotadas, bem como da implementação do sistema de controle e da aquisição dos dados experimentais.

Em seguida, avalia-se o desempenho do robô na execução das trajetórias planejadas, considerando a influência do controle e da compensação da zona morta no rastreamento dos pontos desejados. Realizam-se também comparações entre os controladores P e PI, com e sem a compensação da zona morta, visando quantificar o impacto dessas abordagens no desempenho do sistema. Por fim, apresenta-se uma análise da repetibilidade posicional do robô, baseada em repetições sucessivas da trajetória, verificando a consistência do sistema em alcançar os mesmos pontos sob condições operacionais constantes.

5.1 DETERMINAÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO DO ROBÔ

A determinação do espaço de trabalho de um robô define a área de atuação do efetuator final para execução da tarefa, considerando as limitações mecânicas impostas pelas articulações. Como citado em Spong *et al.* (2006), o espaço de trabalho refere-se à região em (x, y, z) no qual o efetuator pode operar, sendo diretamente influenciado pelos comprimentos dos elos e pelos limites de rotação das juntas. O sistema de coordenadas de referência adotado para a determinação do espaço de trabalho do robô é ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Vista superior do robô agrícola com a origem adotada e o sistema de coordenadas.

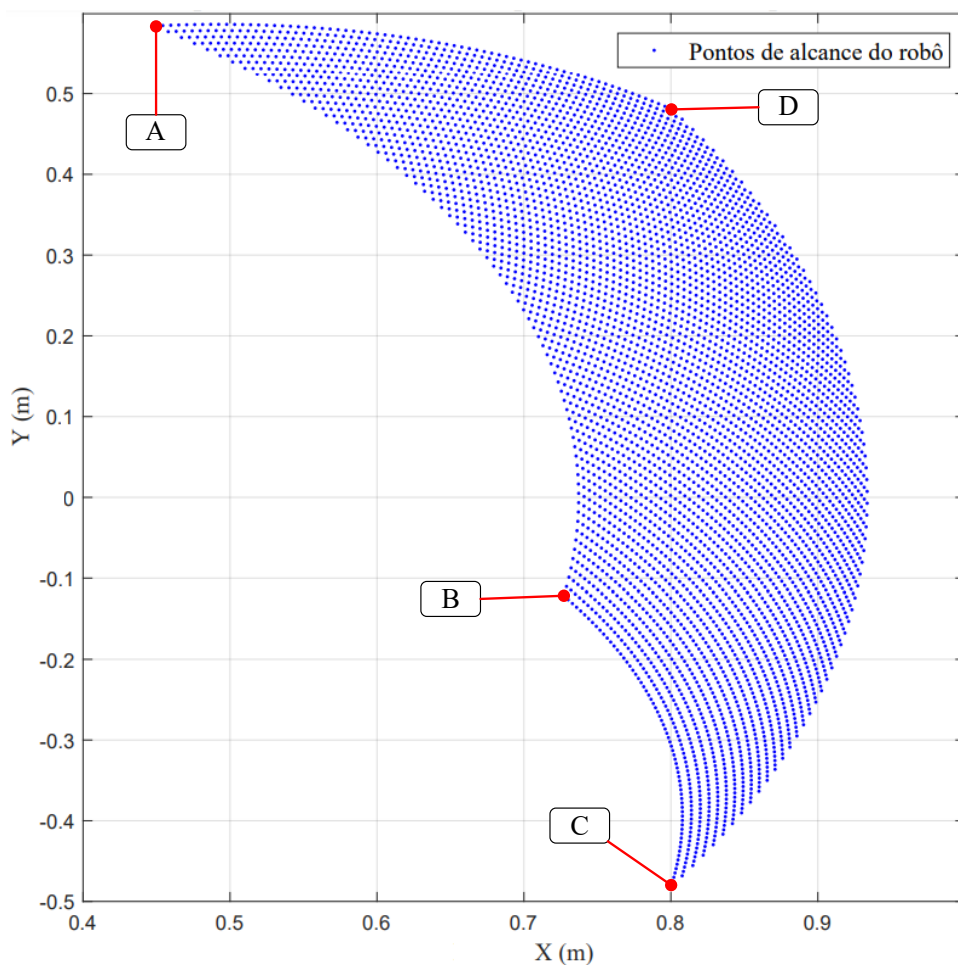


Fonte: Autor (2025)

Para determinar o espaço de trabalho, estabelecem-se os parâmetros geométricos com base nas dimensões dos elos l_1 e l_2 , além dos limites dos ângulos de rotação. As juntas de revolução possuem limites de rotação definidos por características físicas de construção: θ_1 varia de 10° a -52° e θ_2 varia de 85° a 42° , descrevendo o movimento relativo entre os dois elos.

A partir disto, por meio de simulação no *software MATLAB*, em que as equações de cinemática são aplicadas para calcular as posições do efetuator final no plano (X, Y) para diversas combinações dos ângulos de junta θ_1 e θ_2 , geram-se 1000 pontos. Esses pontos delineiam a área de trabalho do robô, conforme ilustra a Figura 32. Para esta representação do espaço de trabalho, o eixo Z (correspondente à profundidade), operado pela junta prismática com deslocamento de 0,2 m, não é representado, isso porque o eixo Z realiza movimentos em qualquer ponto dentro do espaço de trabalho bidimensional (X, Y) , que possuem maior relevância na tarefa pretendida.

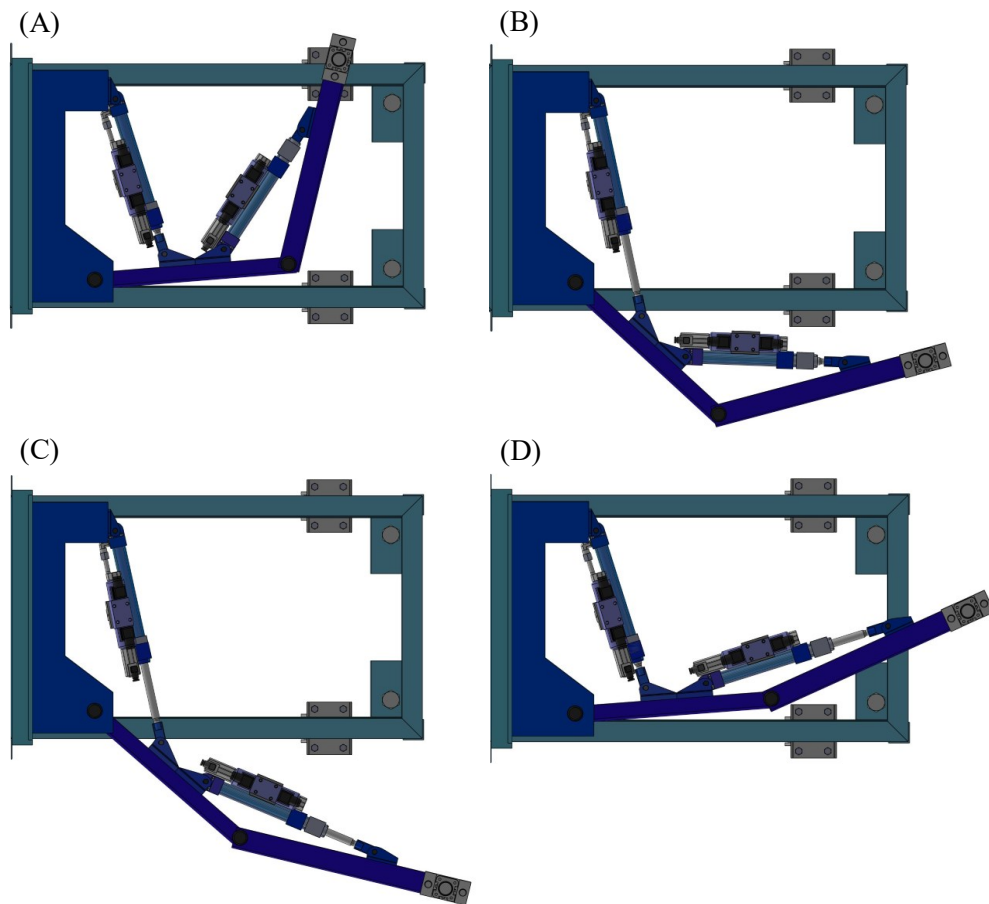
Figura 32 – Espaço de trabalho do manipulador robótico no plano (x, y) .



Fonte: Autor (2025)

A Figura 32 destaca quatro configurações distintas do manipulador (A, B, C e D), representativas de diferentes combinações de deslocamento dos atuadores (Figura 33). Os dois atuadores hidráulicos possuem cursos lineares de 0,2 m e 0,15 m, respectivamente, sendo definida como posição de referência (0 m) o ponto central de cada curso. Na configuração para atingir o ponto (A), os dois atuadores hidráulicos encontram-se completamente retraídos (-0,1 m e -0,075 m). Quando apenas o primeiro atuador avança, enquanto o segundo permanece retraído, o efetuador final atinge a posição indicada pelo ponto (B). Já no ponto (C), ambos os atuadores estão totalmente estendidos, caracterizando o maior alcance possível do efetuador. Por fim, no ponto (D), apenas o segundo atuador está avançado, com o primeiro mantido na posição retraída.

Figura 33 – Representação do robô em diferentes posições do efetuador final.



Fonte: Autor (2025)

5.2 PLANEJAMENTO DAS TRAJETÓRIAS DESEJADAS

Com o espaço de trabalho do robô delimitado, torna-se possível desenvolver o planejamento das trajetórias desejadas. O objetivo de planejar uma trajetória se dá pela necessidade de se obter informações e garantir com que o efetuador se mova entre pontos definidos, respeitando os limites do espaço de trabalho e as restrições cinemáticas das juntas (RICHTER, 2013). Com uma trajetória bem definida é possível diminuir as forças necessárias para movimentar o manipulador robótico e aumentar a vida útil dos componentes de acionamento.

Neste estudo, foram utilizadas duas abordagens distintas: uma trajetória polinomial de sétimo grau e uma trajetória linear do tipo rampa. A primeira foi adotada para gerar perfis suaves de posição, velocidade, aceleração e jerk, adequados a movimentos contínuos e menos exigentes em termos de solicitação mecânica. A segunda, de forma complementar, foi utilizada para provocar variações mais bruscas, permitindo avaliar a resposta do sistema diante de

solicitações intensas e velocidades constantes. Assim, a comparação entre os dois perfis oferece uma visão abrangente do desempenho do robô em condições de suavidade e de estresse.

Embora o controle seja realizado no espaço dos atuadores, as referências das trajetórias foram inicialmente definidas no espaço cartesiano (X, Y, Z). Posteriormente, essas referências passam pelo cálculo da cinemática inversa e pela aplicação do modelo de transmissão entre atuador e elo, resultando nos deslocamentos a serem seguidos pelos cilindros.

A Tabela 14 apresenta os pontos de referência definidos para o posicionamento ponto a ponto do robô. O ponto 1 corresponde à posição inicial de repouso, com os atuadores hidráulicos no centro de curso e o atuador pneumático totalmente retraído. A partir desse ponto, o robô se desloca sequencialmente para os pontos 2 a 6. Em cada posição XY, ocorre um deslocamento vertical de 0,18 m no eixo Z, representando a inserção e retirada da sonda coletora na massa de grãos. O ponto 7 corresponde ao retorno à posição inicial.

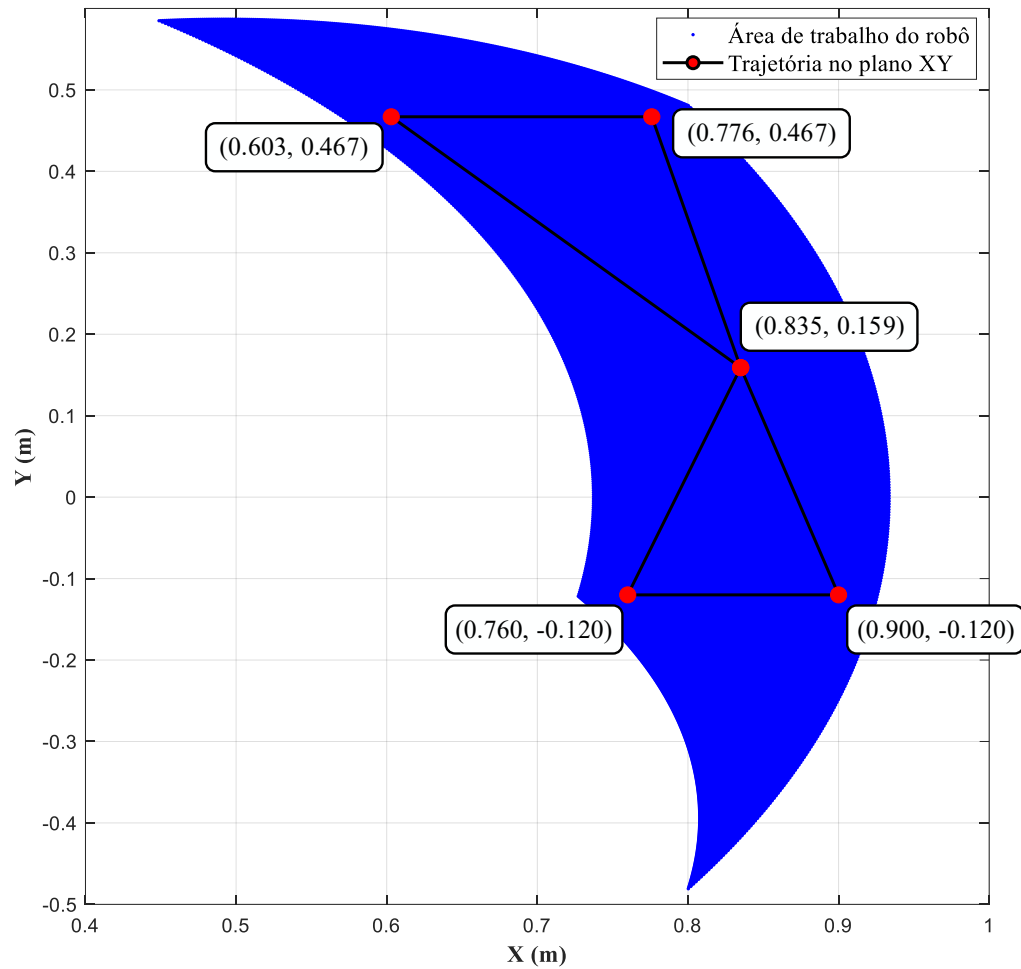
Tabela 14 – Pontos de referência selecionados para o robô agrícola.

Pontos Selecionados	X (m)	Y (m)	Z (m)
Repouso (1)	0.835	0.159	0
2	0.603	0.467	0.18
3	0.776	0.467	0.18
4	0.835	0.159	0.18
5	0.760	-0.120	0.18
6	0.900	-0.120	0.18
7	0.835	0.159	0

Fonte: Autor (2025)

A Figura 34 apresenta a disposição dos pontos de referência no plano XY utilizados na trajetória do robô, sobrepostos à área de trabalho.

Figura 34 – Pontos de referência e segmentos de trajetória definidos no plano.



Fonte: Autor (2025)

A trajetória completa do robô é estruturada com base nos pontos definidos na Tabela 14 e ilustrados na Figura 34, de modo que cada ciclo combina deslocamentos no plano XY e movimentos verticais no eixo Z. Cada transição entre dois pontos consecutivos no plano XY é realizada em 4 s, seja pelo perfil polinomial de 7º grau ou pela rampa linear. Ao atingir o novo ponto, o efetuador permanece parado em XY por 12 s, período no qual ocorre a sequência de movimentos no eixo Z: descida em 4 s, permanência na posição de inserção (0,18 m) por 4 s e retorno em 4 s. Após o término desse ciclo, o robô parte para o ponto seguinte, repetindo o mesmo padrão em todos os pontos de coleta.

O equacionamento das trajetórias de referência está apresentado nos itens 5.2.1 e 5.2.2, que descrevem, respectivamente, a formulação da trajetória polinomial de 7º grau e da trajetória linear do tipo rampa, com suas características e parâmetros de definição.

5.2.1 Trajetória Desejada Polinomial de 7º Grau

A trajetória polinomial de sétimo grau é empregada para gerar perfis de movimento entre os pontos selecionados de maneira suaves para posição, velocidade, aceleração e *jerk* (derivada da aceleração) ao longo do tempo. Apesar do controle implementado neste trabalho considerar apenas a referência de posição, a utilização deste tipo de trajetória garante compatibilidade com estratégias de controle mais avançadas. Caso se opte, em estudos futuros, pela adoção de arquiteturas como o controle em cascata, conforme proposto por Valdiero (2005) e Machado (2010), as referências já estarão devidamente parametrizadas, evitando a necessidade de reconfiguração da trajetória.

O polinômio geral é descrito pela equação (24) para a posição ao longo do tempo (t):

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 + a_6t^6 + a_7t^7 \quad (24)$$

Suas derivadas de primeira, segunda e terceira ordem fornecem, respectivamente, as expressões de velocidade, aceleração e *jerk* (Equações 25, 26 e 27). Os coeficientes ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$) são determinados a partir das condições de contorno impostas a cada trecho, assumindo posições inicial e final conhecidas e velocidades, acelerações e *jerk* nulos nos instantes de partida e chegada.

$$\dot{y}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 + 6a_6t^5 + 7a_7t^6 \quad (25)$$

$$\ddot{y}(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 + 30a_6t^4 + 42a_7t^5 \quad (26)$$

$$\dddot{y}(t) = 6a_3 + 24a_4t + 60a_5t^2 + 120a_6t^3 + 210a_7t^4 \quad (27)$$

Cada uma das funções $x_d(t)$, $y_d(t)$ e $z_d(t)$ (Equações 28, 29 e 30) é construída pela combinação de trechos que descrevem o deslocamento entre os pontos definidos na Tabela 14 e trechos em que o efetuador permanece parado. Nos intervalos de movimento, ajusta-se um polinômio de 7º grau ($P_1, P_2, P_3, P_4...$) que conecta as posições inicial e final, garantindo suavidade em posição, velocidade, aceleração e *jerk*. Já os períodos de permanência em um ponto são representados por funções constantes. Dessa forma, a trajetória completa resulta da

sucessão de segmentos polinomiais e constantes que compõem o ciclo definido para o robô executar os movimentos dentro da área de trabalho.

A função desejada para o eixo X, denotada por $x_d(t)$, é composta por seis segmentos polinomiais de 7º grau e sete trechos de valor constante. A Equação (28) por partes é dada por:

$$x_d(t) = \begin{cases} 0.835, & 0 \leq t \leq 10 \\ P_1(t - 10), & 10 < t < 14 \\ 0.603, & 14 \leq t \leq 26 \\ P_2(t - 26), & 26 < t < 30 \\ 0.776, & 30 \leq t \leq 42 \\ P_3(t - 42), & 42 < t < 46 \\ 0.835, & 46 \leq t \leq 58 \\ P_4(t - 58), & 58 < t < 62 \\ 0.760, & 62 \leq t \leq 74 \\ P_5(t - 74), & 74 < t < 78 \\ 0.900, & 78 \leq t \leq 90 \\ P_6(t - 90), & 90 < t < 94 \\ 0.835, & t \geq 94 \end{cases} \quad (28)$$

De forma equivalente, para o eixo Y, denotada por $y_d(t)$, também é composta por seis segmentos polinomiais de 7º grau e sete trechos de valor constante. A Equação (29) por partes é dada por:

$$y_d(t) = \begin{cases} 0.159, & 0 \leq t \leq 10 \\ P_7(t - 10), & 10 < t < 14 \\ 0.467, & 14 \leq t \leq 26 \\ P_8(t - 26), & 26 < t < 30 \\ 0.467, & 30 \leq t \leq 42 \\ P_9(t - 42), & 42 < t < 46 \\ 0.159, & 46 \leq t \leq 58 \\ P_{10}(t - 58), & 58 < t < 62 \\ -0.120, & 62 \leq t \leq 74 \\ P_{11}(t - 74), & 74 < t < 78 \\ -0.120, & 78 \leq t \leq 90 \\ P_{12}(t - 90), & 90 < t < 94 \\ 0.159, & t \geq 94 \end{cases} \quad (29)$$

A função desejada no eixo Z, denotada por $z_d(t)$, é definida por 21 trechos sequenciais, dos quais 10 são segmentos polinomiais de 7º grau. Esses segmentos são gerados a partir de um mesmo polinômio base. As fases de subida utilizam a forma $P_z(t - t_i)$, enquanto as fases de descida adotam $P_z(4 - (t - t_i))$, promovendo o espelhamento da trajetória em torno

do ponto de inversão. Os demais onze intervalos correspondem a valores constantes. A trajetória vertical tem início a partir de $t = 14$. A expressão completa por partes é apresentada por:

$$z_d(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 14 \\ P_z(t - 14), & 14 < t < 18 \\ 0.18, & 18 \leq t \leq 22 \\ P_z(4 - (t - 22)), & 22 < t < 26 \\ 0, & 26 \leq t \leq 30 \\ P_z(t - 30), & 30 < t < 34 \\ 0.18, & 34 \leq t \leq 38 \\ P_z(4 - (t - 38)), & 38 < t < 42 \\ 0, & 42 \leq t \leq 46 \\ P_z(t - 46), & 46 < t < 50 \\ 0.18, & 50 \leq t \leq 54 \\ P_z(4 - (t - 54)), & 54 < t < 58 \\ 0, & 58 \leq t \leq 62 \\ P_z(t - 62), & 62 < t < 66 \\ 0.18, & 66 \leq t \leq 70 \\ P_z(4 - (t - 70)), & 70 < t < 74 \\ 0, & 74 \leq t \leq 78 \\ P_z(t - 78), & 78 < t < 82 \\ 0.18, & 82 \leq t \leq 86 \\ P_z(4 - (t - 86)), & 86 < t < 90 \\ 0, & t \geq 90 \end{cases} \quad (30)$$

A Tabela 15 apresenta os polinômios de 7º grau utilizados para o equacionamento da posição desejada nos eixos X, Y e Z. Cada expressão representa a variável de posição em função do tempo, conforme definida no planejamento de trajetória, respeitando as condições de contorno impostas para garantir suavidade nos deslocamentos do robô. Observa-se que, para os polinômios $P_8(t)$ e $P_{11}(t)$, a função torna-se constante, uma vez que todos os coeficientes dos termos de ordem superior são nulos, restando apenas o termo independente, indicando que, nos respectivos intervalos de tempo em que os polinômios são utilizados, o robô permanece em posição fixa, conforme previsto na trajetória planejada.

Tabela 15 – Polinômios de 7º grau para o equacionamento da posição deseja em X, Y e Z

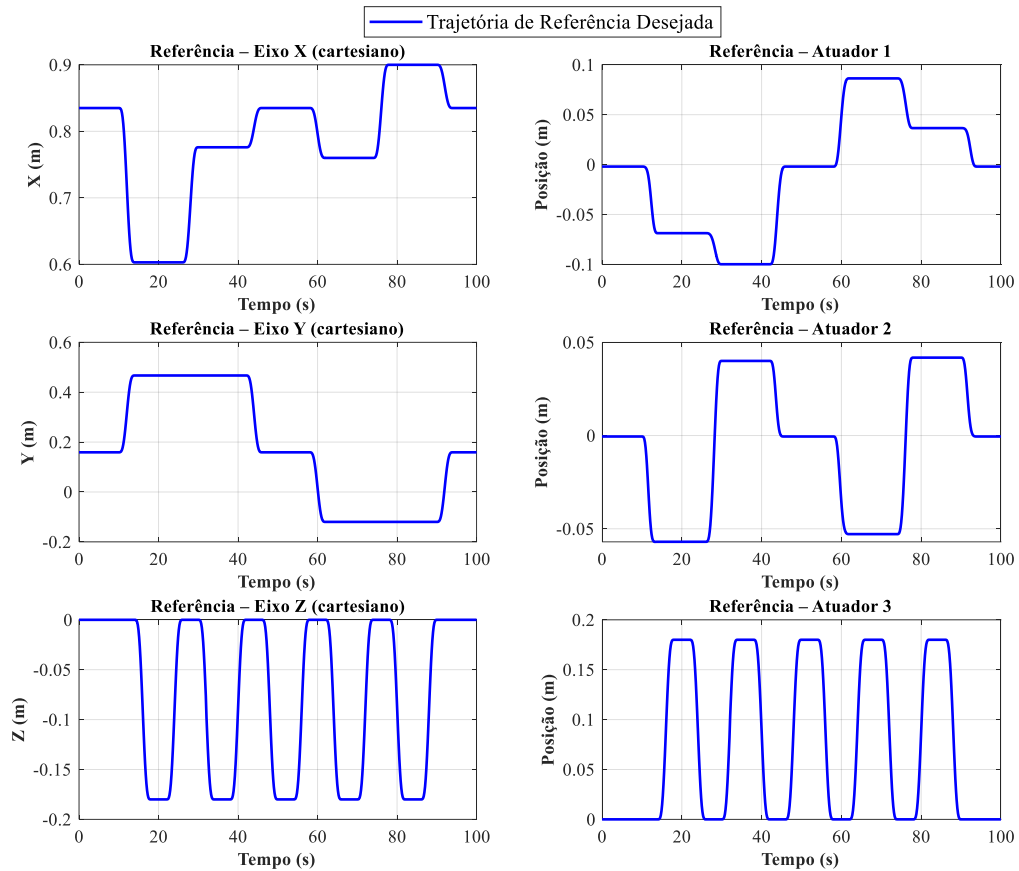
Polinômios de 7º Grau	
$P_1(t)$	$(2,832t^7 - 39,648t^6 + 190,313t^5 - 317,188t^4) \cdot 10^{-4} + 0,835$
$P_2(t)$	$(-2,112t^7 + 29,565t^6 - 141,914t^5 + 236.523t^4) \cdot 10^{-4} + 0,603$
$P_3(t)$	$(-0,720t^7 + 10,083t^6 - 48,398t^5 + 80,664t^4) \cdot 10^{-4} + 0,776$

$P_4(t)$	$(0,915t^7 - 12,817t^6 + 61,523t^5 - 102,539t^4) \cdot 10^{-4} + 0,835$
$P_5(t)$	$(-1,709t^7 + 23,926t^6 - 114,844t^5 + 191,406t^4) \cdot 10^{-4} + 0,760$
$P_6(t)$	$(0,709t^7 - 11,108t^6 + 53,320t^5 - 88,867t^4) \cdot 10^{-4} + 0,900$
$P_7(t)$	$(-3,760t^7 + 52,637t^6 - 252,656t^5 + 421t^4) \cdot 10^{-4} + 0,159$
$P_8(t)$	0,467
$P_9(t)$	$(3,760t^7 - 52,637t^6 + 252,656t^5 - 421t^4) \cdot 10^{-4} + 0,467$
$P_{10}(t)$	$(3,406t^7 - 47,681t^6 + 228,867t^5 - 381,445t^4) \cdot 10^{-4} + 0,159$
$P_{11}(t)$	-0,120
$P_{12}(t)$	$(3,406t^7 + 47,681t^6 - 228,867t^5 + 381,445t^4) \cdot 10^{-4} - 0,120$
$P_z(t)$	$(-2,1973t^7 + 30,762t^6 - 147,656t^5 + 246t^4) \cdot 10^{-4}$

Fonte: Autor (2025)

A trajetória polinomial de sétimo grau adotada é ilustrada na Figura 35, em que observa-se a definição dos deslocamentos no espaço cartesiano (x, y, z) e sua correspondente conversão para o espaço dos atuadores. Nos gráficos à esquerda são apresentadas as curvas de referência diretamente no espaço cartesiano, evidenciando os deslocamentos planejados para cada eixo. Já nos gráficos à direita observam-se as trajetórias correspondentes para os três atuadores, obtidas a partir da aplicação da cinemática inversa e do modelo de transmissão entre atuador e elo, convertendo os pontos no espaço tridimensional em deslocamentos que devem ser seguidos pelos cilindros hidráulicos e pneumático.

Figura 35 – Trajetória de referência polinomial para o deslocamento do robô.



Fonte: Autor (2025)

5.2.2 Trajetória Desejada do Tipo Rampa

A segunda abordagem adota trajetórias do tipo rampa, definida por segmentos lineares entre pares de pontos selecionados. Nesse caso, a posição varia com velocidade constante ao longo do tempo. Embora simples, esse perfil impõe maiores solicitações ao sistema, já que apresenta descontinuidades nas derivadas de ordem superior (aceleração e jerk). Assim, seu uso possibilita avaliar a resposta do robô diante de movimentos mais abruptos e com maior exigência dinâmica, servindo como contraponto à suavidade da trajetória polinomial.

A definição da trajetória de rampa segue a mesma sequência de pontos estabelecida na Tabela 14. Cada deslocamento entre pontos é representado por uma função linear no intervalo de tempo correspondente, enquanto os períodos de permanência em cada posição são descritos por segmentos de valor constante.

A Equação (31) apresenta a função por partes do eixo X, composta por seis segmentos de rampa e sete trechos constantes.

$$x_d(t) = \begin{cases} 0.835, & 0 \leq t \leq 10 \\ 0.835 + \frac{0.603 - 0.835}{4}(t - 10), & 10 < t < 14 \\ 0.603, & 14 \leq t \leq 26 \\ 0.603 + \frac{0.776 - 0.603}{4}(t - 26), & 26 < t < 30 \\ 0.776, & 30 \leq t \leq 42 \\ 0.776 + \frac{0.835 - 0.776}{4}(t - 42), & 42 < t < 46 \\ 0.835, & 46 \leq t \leq 58 \\ 0.835 + \frac{0.760 - 0.835}{4}(t - 58), & 58 < t < 62 \\ 0.760, & 62 \leq t \leq 74 \\ 0.760 + \frac{0.900 - 0.760}{4}(t - 74), & 74 < t < 78 \\ 0.900, & 78 \leq t \leq 90 \\ 0.900 + \frac{0.835 - 0.900}{4}(t - 90), & 90 < t < 94 \\ 0.835, & t \geq 94 \end{cases} \quad (31)$$

A equação correspondente ao eixo Y (Equação (32)) segue a mesma estrutura, alternando entre valores fixos e rampas de transição entre os pontos, isto é:

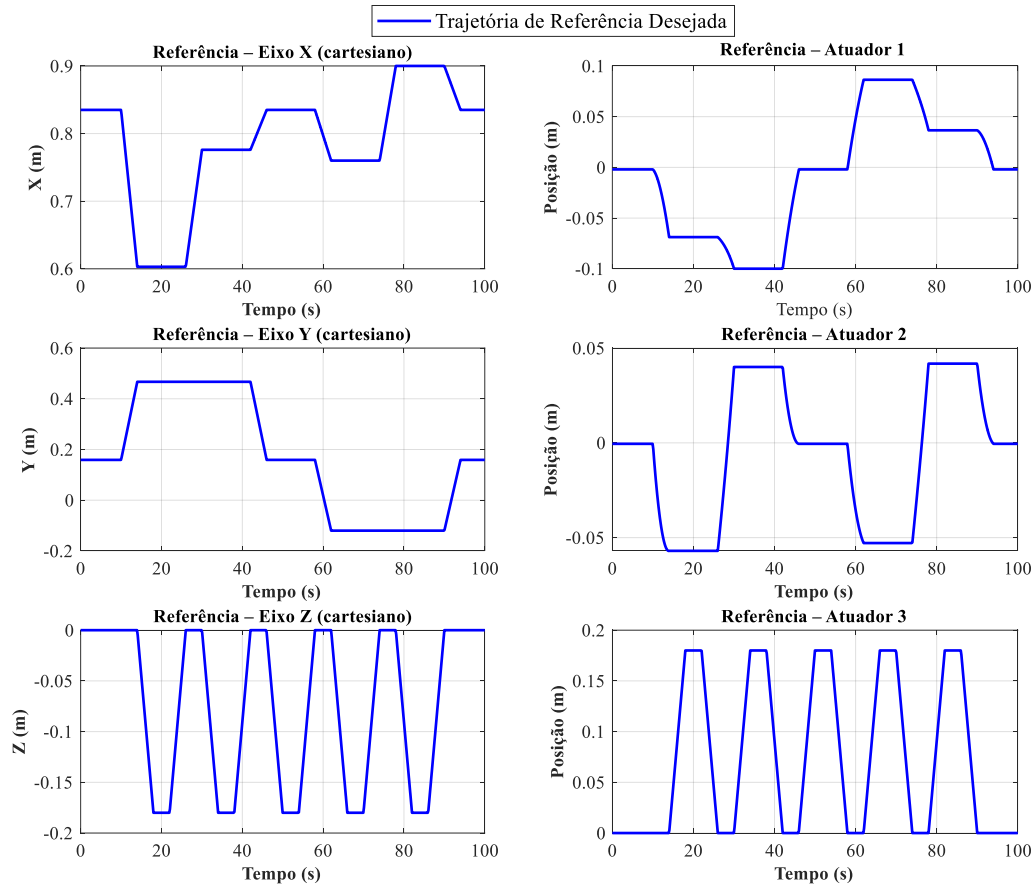
$$y_d(t) = \begin{cases} 0.159, & 0 \leq t \leq 10 \\ 0.159 + \frac{0.467 - 0.159}{4}(t - 10), & 10 < t < 14 \\ 0.467, & 14 \leq t \leq 42 \\ 0.467 + \frac{0.159 - 0.467}{4}(t - 42), & 42 < t < 46 \\ 0.159, & 46 \leq t \leq 58 \\ 0.159 + \frac{-0.120 - 0.159}{4}(t - 58), & 58 < t < 62 \\ -0.120, & 62 \leq t \leq 74 \\ -0.120 + \frac{0.159 + 0.120}{4}(t - 90), & 90 < t < 94 \\ 0.159, & t \geq 94 \end{cases} \quad (32)$$

Para o eixo Z (Equação (33)), o perfil alterna entre trechos constantes e rampas ascendentes e descendentes que simulam a inserção e retirada da sonda no interior da massa de grãos, tal que:

$$z_d(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 14 \\ \frac{0.18}{4}(t - 14), & 14 < t < 18 \\ 0.18, & 18 \leq t \leq 22 \\ 0.18 + \frac{0 - 0.18}{4}(t - 22), & 22 < t < 26 \\ 0, & 26 \leq t \leq 30 \\ \frac{0.18}{4}(t - 30), & 30 < t < 34 \\ 0.18, & 34 \leq t \leq 38 \\ 0.18 + \frac{0 - 0.18}{4}(t - 46), & 38 < t < 42 \\ 0, & 42 \leq t \leq 46 \\ \frac{0.18}{4}(t - 46), & 46 < t < 50 \\ 0.18, & 50 \leq t \leq 54 \\ 0.18 + \frac{0 - 0.18}{4}(t - 54), & 54 < t < 58 \\ 0, & 58 \leq t \leq 62 \\ \frac{0.18}{4}(t - 62), & 62 < t < 66 \\ 0.18, & 66 \leq t \leq 70 \\ 0.18 + \frac{0 - 0.18}{4}(t - 70), & 70 < t < 74 \\ 0, & 74 \leq t \leq 78 \\ \frac{0.18}{4}(t - 78), & 78 < t < 82 \\ 0.18, & 82 \leq t \leq 86 \\ 0.18 + \frac{0 - 0.18}{4}(t - 86), & 86 < t < 90 \\ 0, & t \geq 90 \end{cases} \quad (33)$$

A Figura 36 apresenta a trajetória de referência do tipo rampa definida, bem como os deslocamentos correspondentes no espaço dos atuadores obtidos após a aplicação da cinemática inversa e da relação de transmissão entre atuador e elo.

Figura 36 – Trajetória de referência em rampa para o deslocamento do robô.



Fonte: Autor (2025)

Observa-se nessa Figura 36 que, embora os perfis nas coordenadas cartesianas sejam compostos por segmentos lineares típicos de uma trajetória do tipo rampa, os gráficos à direita, que representam os deslocamentos dos atuadores, não exibem rampas lineares entre os pontos. Esse comportamento não-linear nos deslocamentos dos atuadores é resultado direto das transformações impostas pela cinemática inversa do robô SCARA, a qual apresenta natureza intrinsecamente não-linear. Mesmo que os pontos no espaço cartesiano estejam distribuídos linearmente no tempo, as equações trigonométricas envolvidas no cálculo dos ângulos articulares geram perfis com curvaturas.

5.3 GANHOS DO CONTROLADOR E CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA A REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Utilizou-se a pressão de suprimento em 30 bar no circuito hidráulico e 4 bar no circuito pneumático. Esses valores foram ajustados para assegurar uma diferença de pressão adequada

entre a linha de suprimento e as câmaras dos cilindros, mantendo as válvulas operando em uma faixa de abertura entre 15% e 25%. Pressões de suprimento excessivamente elevadas, quando comparadas às exigências de carga do robô, podem levar a uma operação muito próxima da região de zona morta das válvulas, intensificando os efeitos de não linearidades indesejadas, como a variação do coeficiente de vazão e o impacto dos vazamentos internos (RODRIGUES *et al.*, 2003).

Os sinais de posição dos atuadores e de pressão nas câmaras são obtidos por sensores com saída analógica, conforme descrito na Seção 3.3. Devido à presença de ruídos provocados por interferências ambientais e pela necessidade de derivação numérica dos sinais para obtenção de velocidade e aceleração, é necessária a aplicação de filtros passa-baixa de primeira ordem, com objetivo de suavizar os sinais e melhorar a qualidade de leitura.

A função de transferência dos filtros é expressa por (34):

$$D(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \quad (34)$$

em que ω_f representa a frequência angular de corte definida para cada sinal, conforme apresentado na Tabela 16. A determinação da frequência de corte deve equilibrar a redução dos ruídos com a preservação da dinâmica real dos sinais, uma vez que ambos os fatores influenciam os ganhos dos controladores (PEREIRA, 2006).

Tabela 16 – Valores utilizados para frequência angular de corte dos filtros.

Sinais	Posição dos <i>Encoders</i>	Posição do Atuador 3	Velocidade	Aceleração	Pressão nas Câmaras dos Cilindros
Frequência de Corte ω_f (rad/s)	50	50	30	30	30

Fonte: Autor (2025)

Configurou-se o tempo de amostragem dos sinais em 1,2 ms, representando o menor intervalo no qual o *hardware* de controle consegue executar as leis de controle e fornecer sinais de saída sem apresentar falhas.

Para todos os ensaios experimentais realizados neste trabalho, o ganho proporcional do controle é mantido constante. São realizados testes tanto com a aplicação da compensação da zona morta quanto sem sua utilização, de forma a avaliar sua influência no desempenho do

sistema. Nos ensaios com controle PI, apenas o ganho integrativo é ajustado, preservando-se o valor do ganho proporcional adotado.

Os ganhos de controle são definidos com base nos ensaios realizados com a trajetória de referência do tipo rampa, por representar a condição mais exigente para o sistema em termos de resposta dinâmica. Conforme a abordagem adotada por Pereira (2006), os valores dos ganhos são limitados pelo nível de ruído presente no sinal de controle. Busca-se uma solução de compromisso entre a minimização do erro de posição e a preservação de baixos níveis de ruído no sinal de controle.

A Tabela 17 apresenta os parâmetros utilizados no controlador e na estratégia de compensação da zona morta.

Tabela 17 – Valores dos ganhos do controlador e parâmetros da compensação da zona morta da válvula.

Atuador	Ganho Proporcional (Kp)	Ganho Integrativo (Ki)	Limites da Zona Morta (zme e zmd)	Largura de Compensação lc_i
(1)	170	20	-1 e 1	0.4
(2)	180	20	-1 e 1	0.4
(3)	270	30	-0.4 e 0.4	0.2

Fonte: Autor (2025)

Os parâmetros de compensação da zona morta dos atuadores 1 e 2 foram obtidos a partir dos estudos de Valdiero (2005) e Machado (2010), para o atuador 3 foi ajustada com base nos ensaios experimentais realizados no robô durante a aplicação das trajetórias. Na prática, a tensão de controle aplicada à válvula pneumática utilizada varia de 0 a 10 V. No entanto, essa faixa foi reescalada para uma faixa simétrica de -10 a 10 V, com o objetivo de uniformizar a aplicação da compensação da zona morta em relação às válvulas proporcionais hidráulicas.

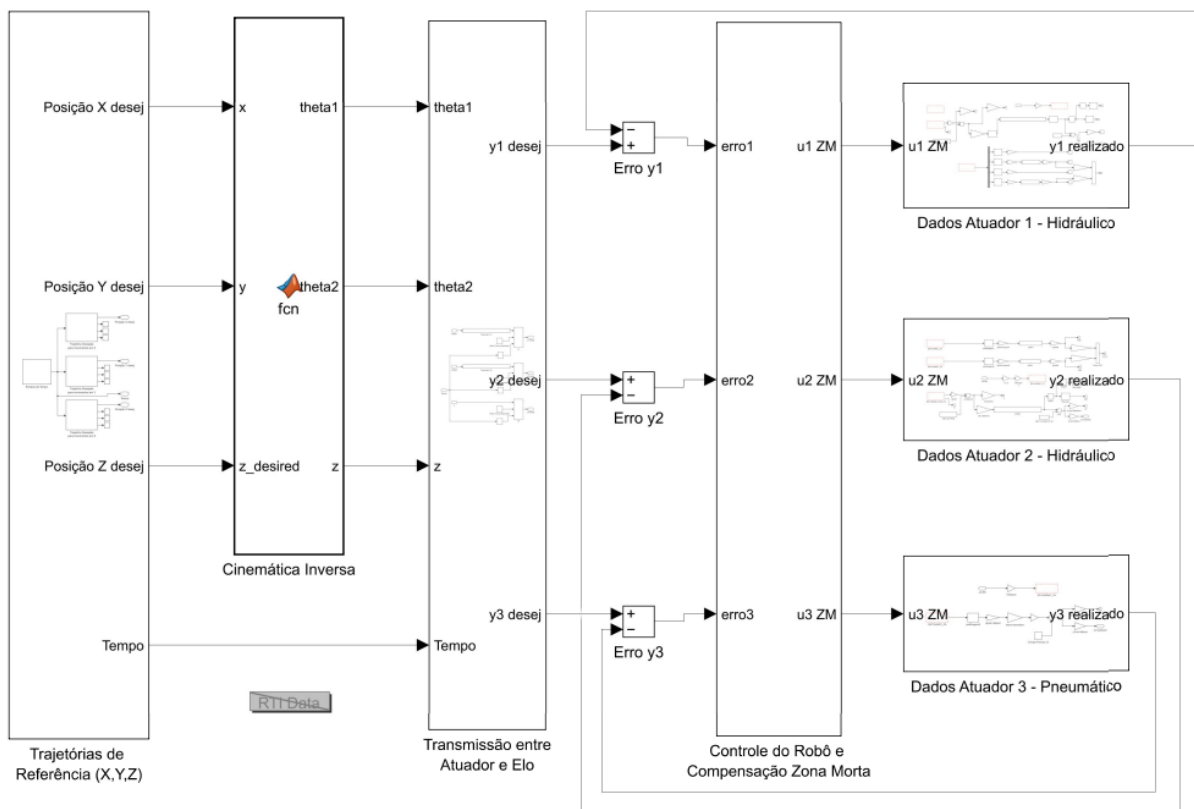
Os valores de $lc_{1,2} = 0,4$ e $lc_3 = 0,2$, denominados largura de chaveamento da compensação, foram escolhidos para regular a região da suavização linear da compensação em torno da origem do sinal de controle. Essa suavização evita comutação abrupta quando o sinal se aproxima de zero. Valores reduzidos de lc_i tornam o sistema mais suscetível a oscilações induzidas por ruídos, enquanto valores excessivamente altos reduzem essas oscilações, mas comprometem a eficácia da compensação da zona morta e o desempenho do sistema como um todo (MACHADO, 2010).

5.4 IMPLEMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DO ROBÔ AGRÍCOLA

A implementação e a aquisição de dados de toda bancada experimental foram realizadas por meio de diagramas de blocos desenvolvido no *Software MATLAB/Simulink*, posteriormente compilado e executado em tempo real no *software ControlDesk*, integrado à plataforma dSPACE 1104. A resolução do sistema de equações diferenciais foi realizada por meio do método de integração de Runge-Kutta, adotando-se um passo de 1×10^{-5} segundos.

O diagrama de blocos implementado no *Simulink*, conforme apresenta a Figura 37, contempla desde a geração das trajetórias de referência até o envio dos sinais de controle às válvulas e a aquisição dos sinais provenientes dos sensores de posição e pressão.

Figura 37 – Diagrama de blocos para aquisição de dados e controle do protótipo.



Fonte: Autor (2025)

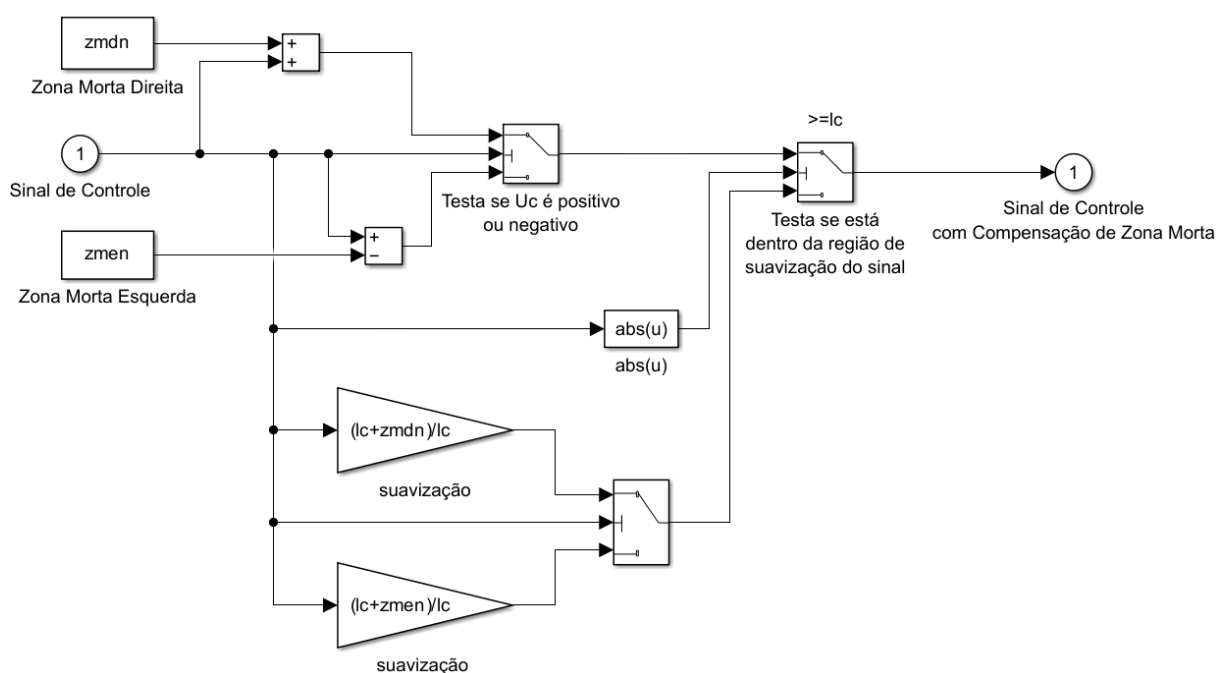
O primeiro bloco do diagrama corresponde à geração das trajetórias de referência no espaço cartesiano, detalhadas no capítulo 5.2. O bloco de cinemática inversa recebe essa trajetória em coordenadas cartesianas e calcula os ângulos das juntas de revolução (θ_1 e θ_2), além da posição linear da junta prismática.

Após essa etapa, o bloco de transmissão entre atuador e elo utiliza as equações geométricas do mecanismo para relacionar os ângulos das juntas aos deslocamentos lineares dos atuadores hidráulicos, resultando na posição necessária de cada cilindro para que os elos alcancem as posições desejadas ao longo da trajetória. Com isso, as relações matemáticas do sistema convertem a trajetória cartesiana planejada nas posições requeridas para cada atuador.

A comparação entre as posições desejadas e as posições realizadas permite calcular o erro de posição de cada atuador, o qual constitui a entrada do controlador.

Após a aplicação da ação de controle, o sinal gerado é encaminhado para um bloco de compensação da zona morta e, em seguida, é enviado às válvulas, resultando no acionamento dos atuadores. O diagrama de blocos do esquema de compensação é apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Diagrama de blocos do esquema de compensação de zona morta.



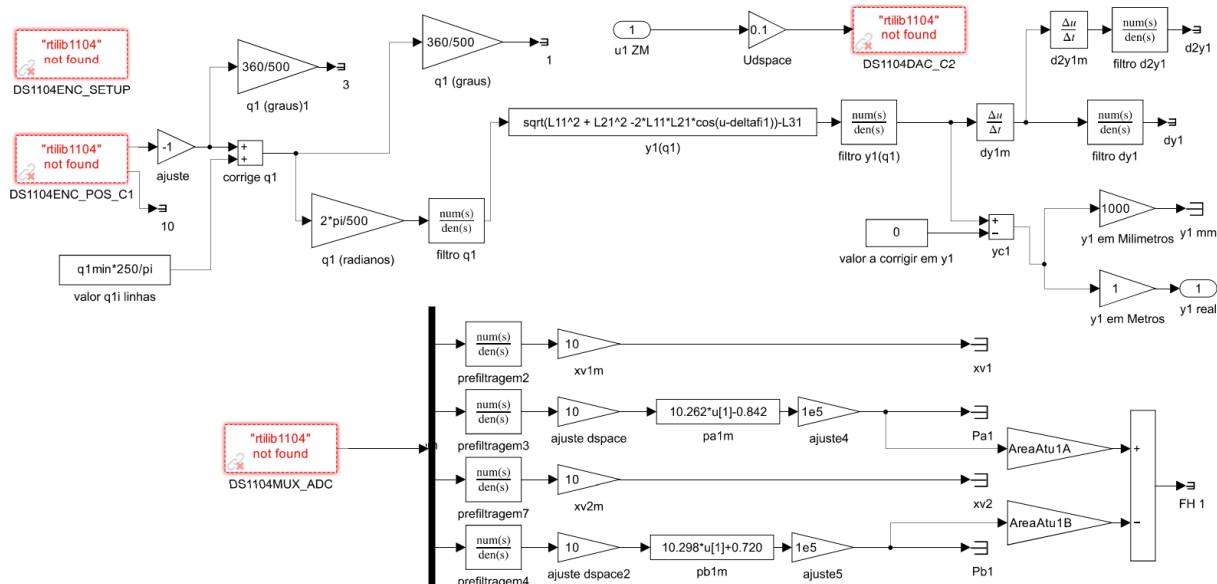
Fonte: Autor (2025)

Os três blocos da Figura 37, denominados Dados Atuador 1, Dados Atuador 2 e Dados Atuador 3, são responsáveis por executar duas funções principais:

- Conversão dos sinais elétricos de controle, calculados pelo controlador em comandos de tensão compatíveis com as válvulas proporcionais e com a servoválvula pneumática;
- Aquisição dos sinais de posição e pressão de cada atuador.

A Figura 39 apresenta a estrutura do bloco denominado Dados Atuador 1, que corresponde à interface entre o sistema de controle e o primeiro atuador.

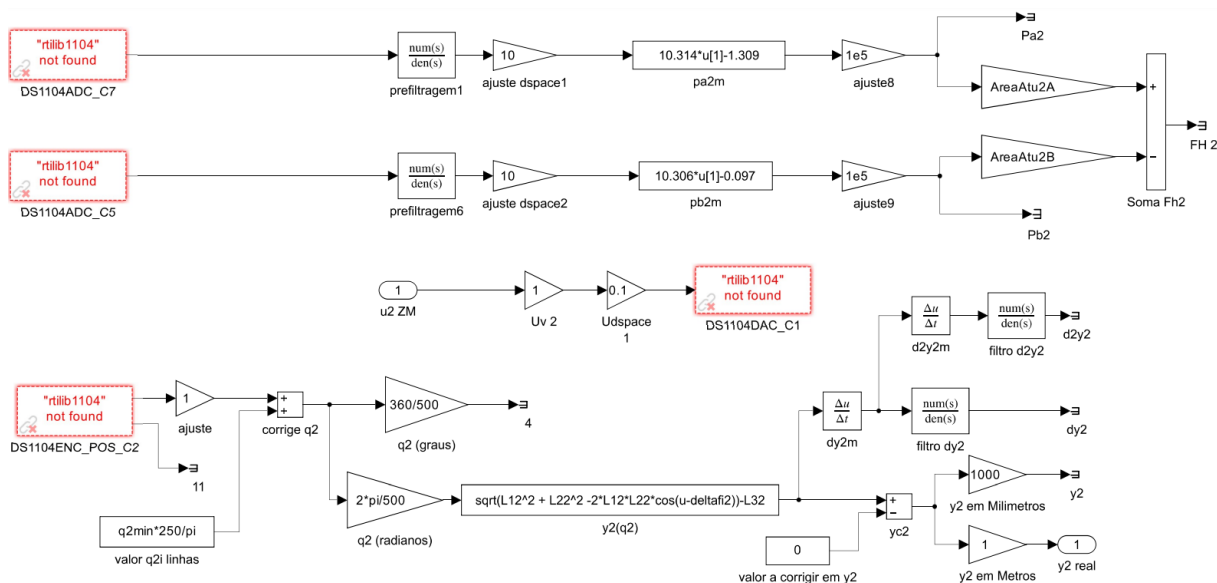
Figura 39 – Diagrama de blocos para aquisição de dados do atuador 1.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 40 demonstra a estrutura do bloco denominado Dados Atuador 2, que corresponde à interface entre o sistema de controle e o segundo atuador.

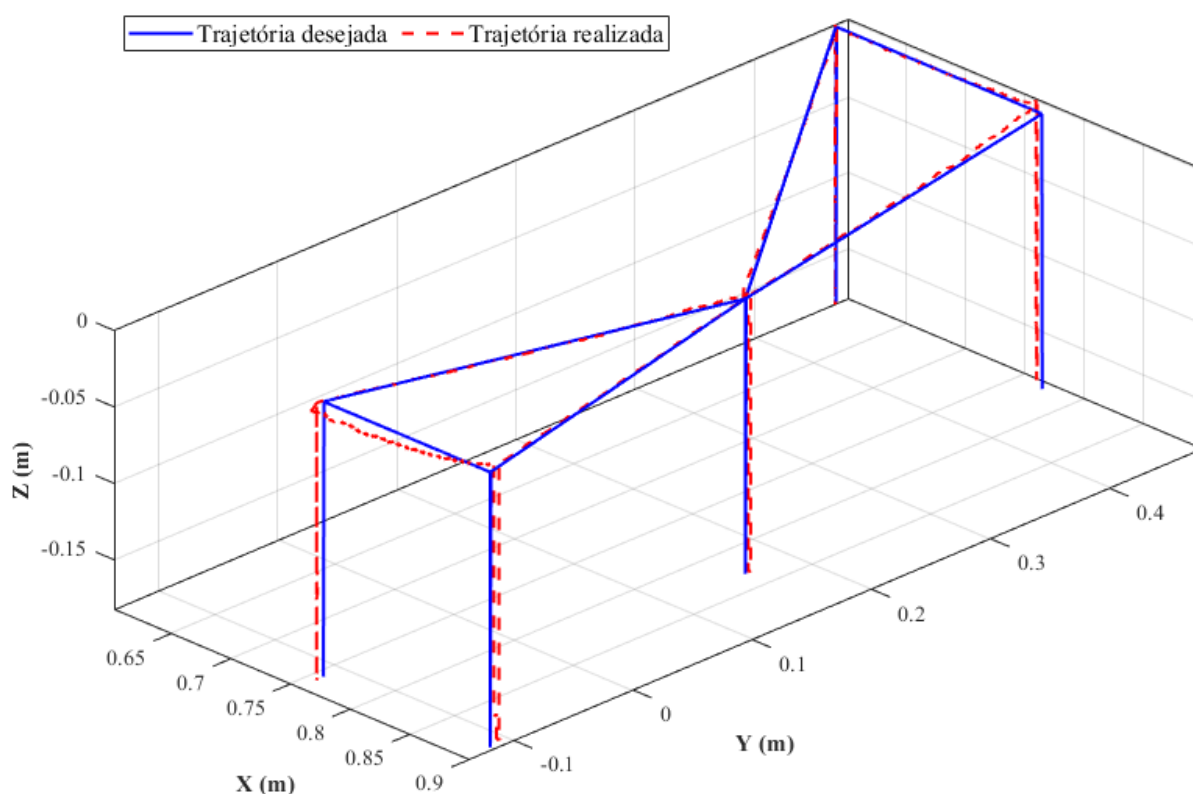
Figura 40 – Diagrama de blocos para aquisição de dados do atuador 2.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 42 apresenta a trajetória desejada no espaço tridimensional e a trajetória realizada pelo robô durante a execução da tarefa de posicionamento. Observa-se uma aderência satisfatória entre as duas curvas ao longo de todo o percurso, evidenciando que o controle PI com compensação da zona morta é capaz de conduzir o efetuador do robô nos pontos desejados dentro da faixa aceitável de precisão para a aplicação, considerando que, em operações de amostragem de grãos, desvios inferiores a aproximadamente 0,02 m não comprometem a inserção da sonda na massa de grãos nem comprometem a análise da amostra.

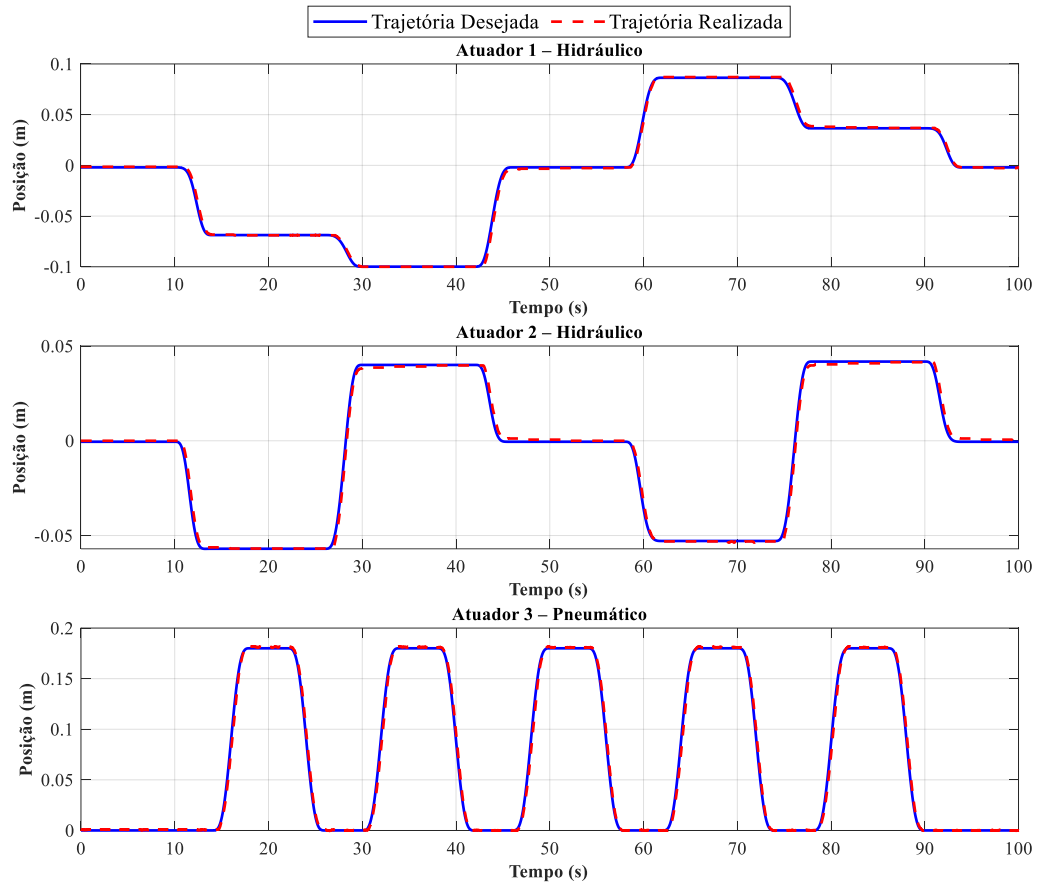
Figura 42 – Trajetória de referência e realizada no espaço tridimensional.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 43 mostra os deslocamentos desejados e realizados pelos três atuadores ao longo do tempo de experimento de 100 segundos. Observa-se que, para todos os atuadores, o controle de posição é preciso, sem oscilações ou variações abruptas que comprometam a estabilidade, independente do deslocamento executado ao longo do tempo.

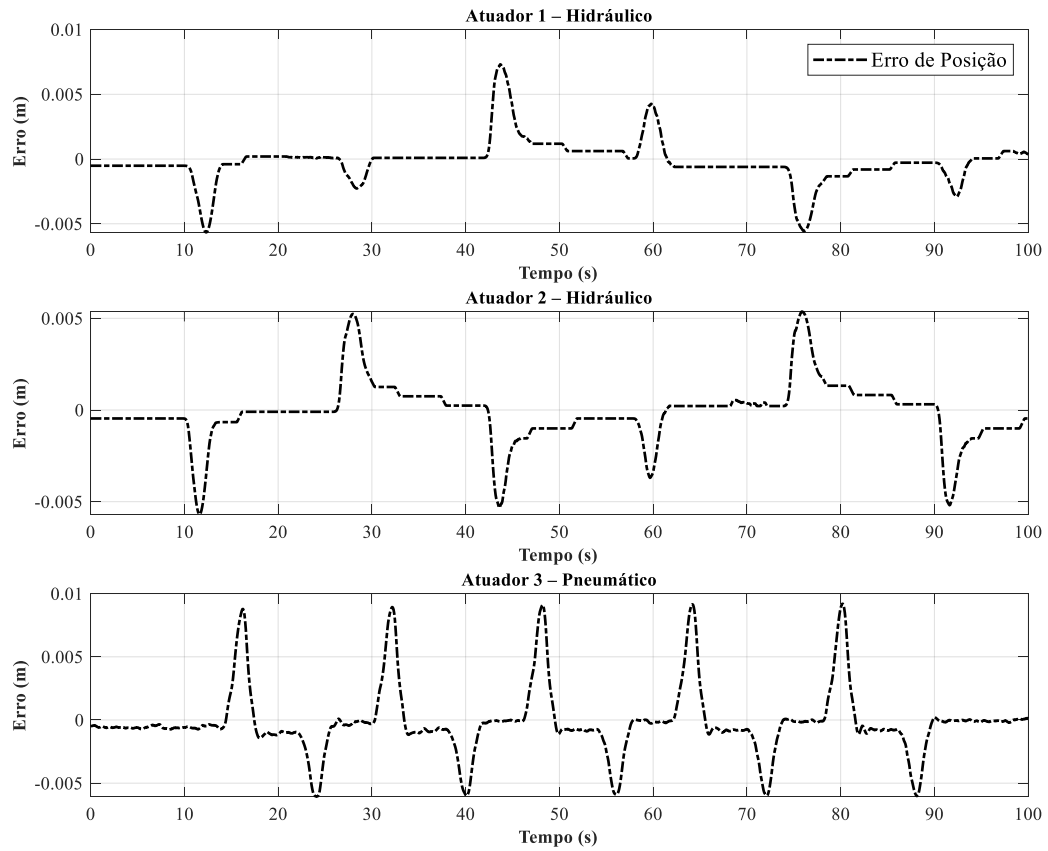
Figura 43 – Posição dos atuadores ao longo do tempo de experimento.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 44 apresenta o erro de posição para os três atuadores ao longo do tempo de experimento. Percebe-se que os picos maiores de erro ocorrem, predominantemente, durante os regimes transientes. Para o Atuador 1, o erro máximo registrado atinge 7×10^{-3} m, ocorrendo na região de maior deslocamento do atuador, e mantendo-se abaixo de $5,5 \times 10^{-3}$ m nos demais intervalos. O Atuador 2 exibe desempenho ainda mais estável, com erro de posição sempre inferior a 6×10^{-3} m. No caso do Atuador 3, o erro máximo registrado é de 8×10^{-3} m no avanço e 6×10^{-3} m no recuo. Em regime permanente, os três atuadores apresentam erro próximo a 1×10^{-3} m na maior parte do tempo.

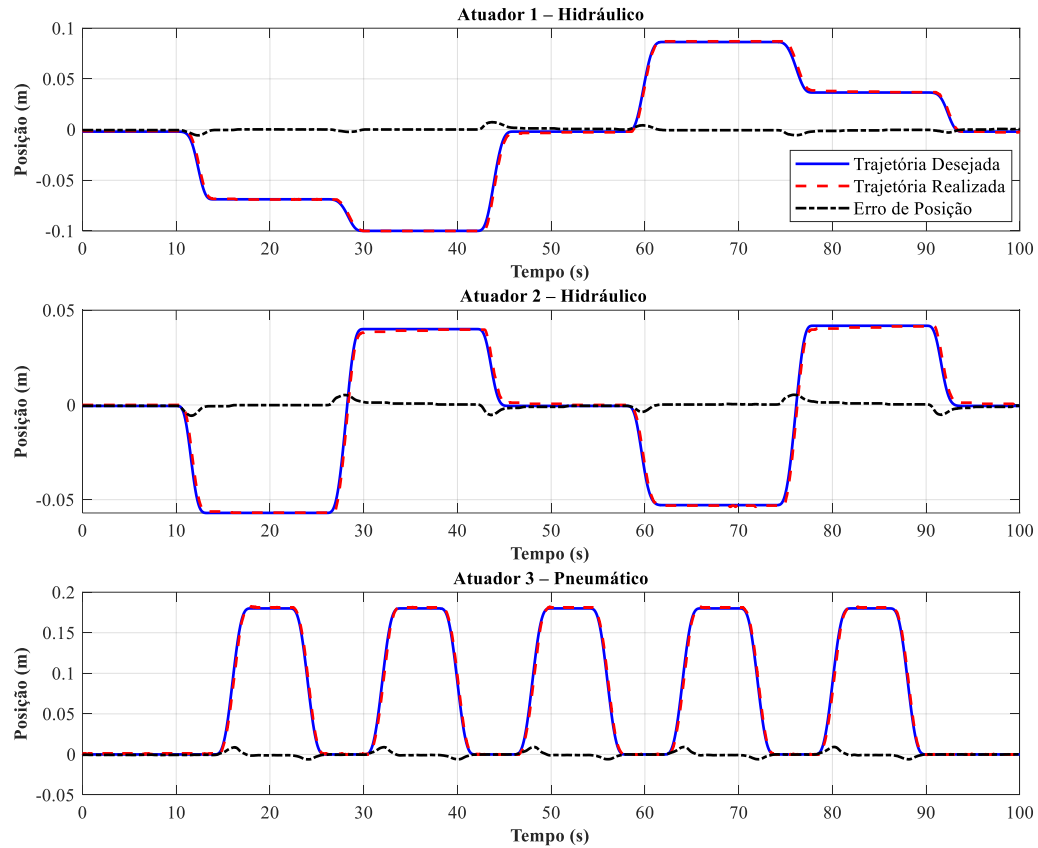
Figura 44 – Erro de posição dos atuadores ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2025)

De forma complementar, a Figura 45 apresenta, em um único gráfico, a posição desejada, a posição realizada e o erro de posição para cada atuador. Essa representação facilita a avaliação da precisão do sistema de controle e permite verificar uma magnitude de erro reduzida em relação ao deslocamento total dos atuadores.

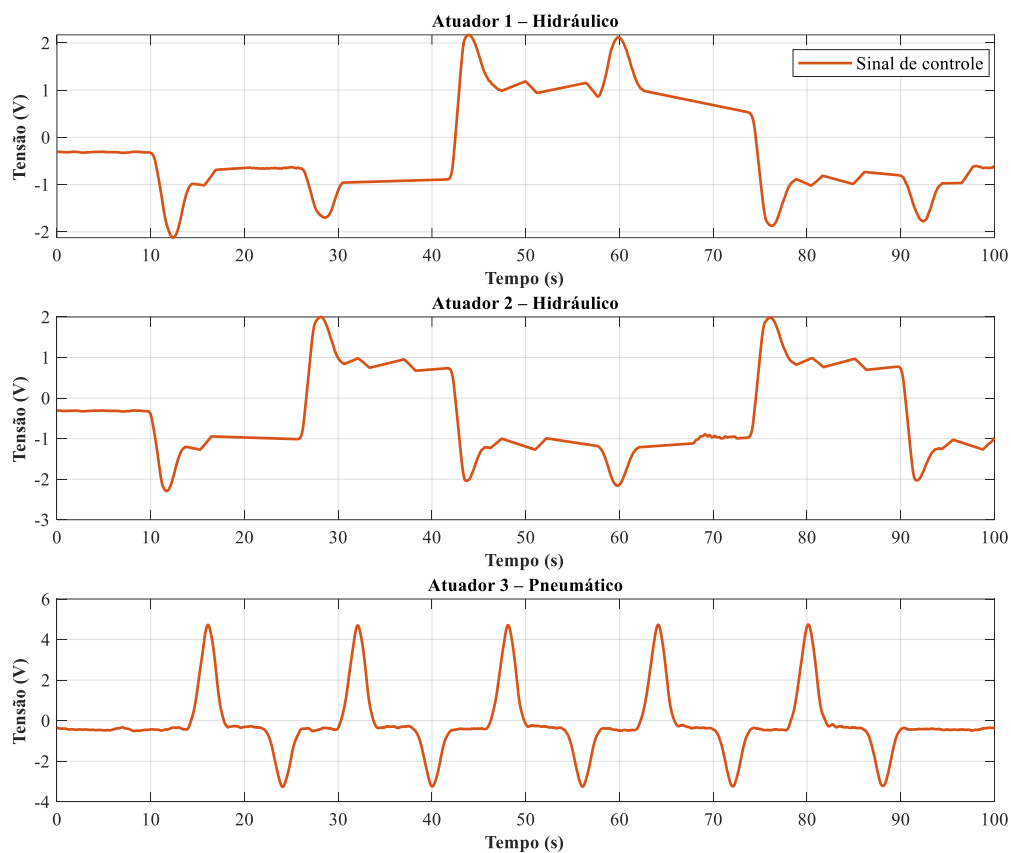
Figura 45 – Trajetória desejada, trajetória realizada e erro de posição dos atuadores.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 46 apresenta os sinais de controle registrados durante os ensaios experimentais, aplicados às válvulas hidráulicas e pneumática do robô. Nota-se que os sinais não apresentam oscilações ou ruídos significativos, reflexo do ajuste adequado dos ganhos proporcional e integrativo, os quais foram definidos com o objetivo de minimizar os erros de posição sem comprometer a suavidade do movimento.

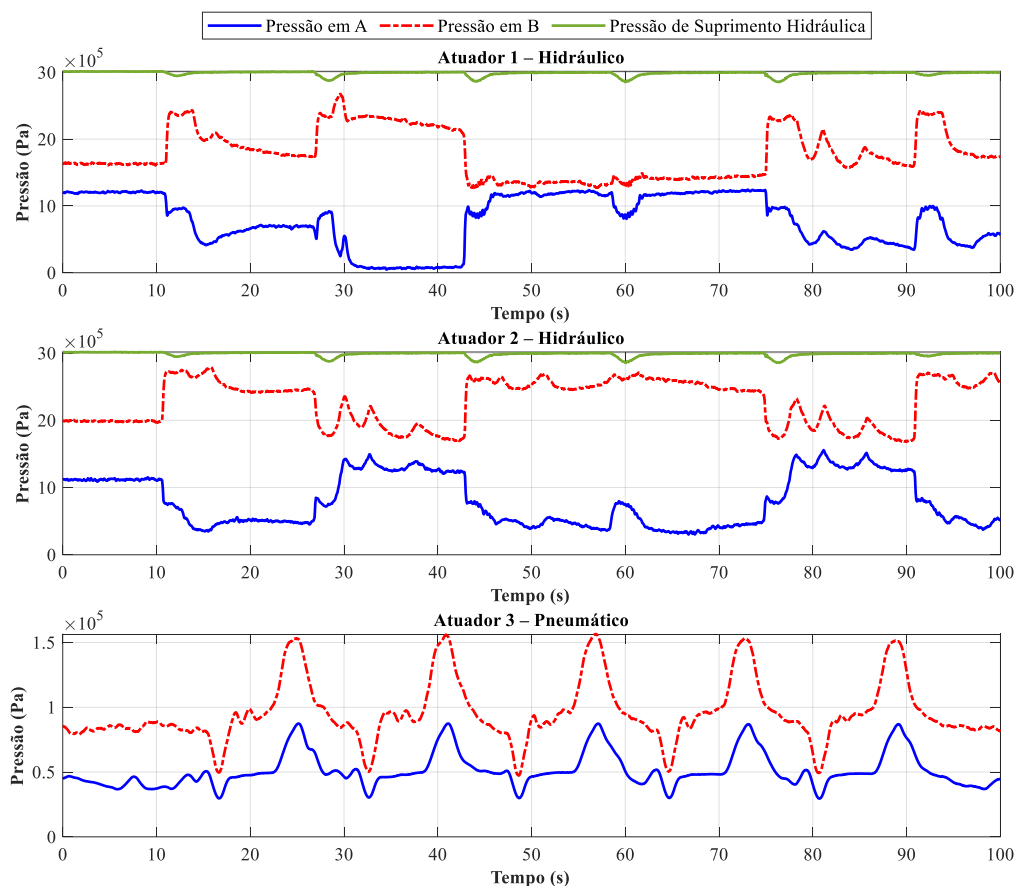
Figura 46 – Sinal de Controle das válvulas ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2025)

Adicionalmente à análise da posição, do erro e dos sinais das válvulas, a Figura 47 apresenta as pressões nas câmaras A e B dos atuadores ao longo do experimento.

Figura 47 – Pressões nas câmaras A e B dos cilindros.

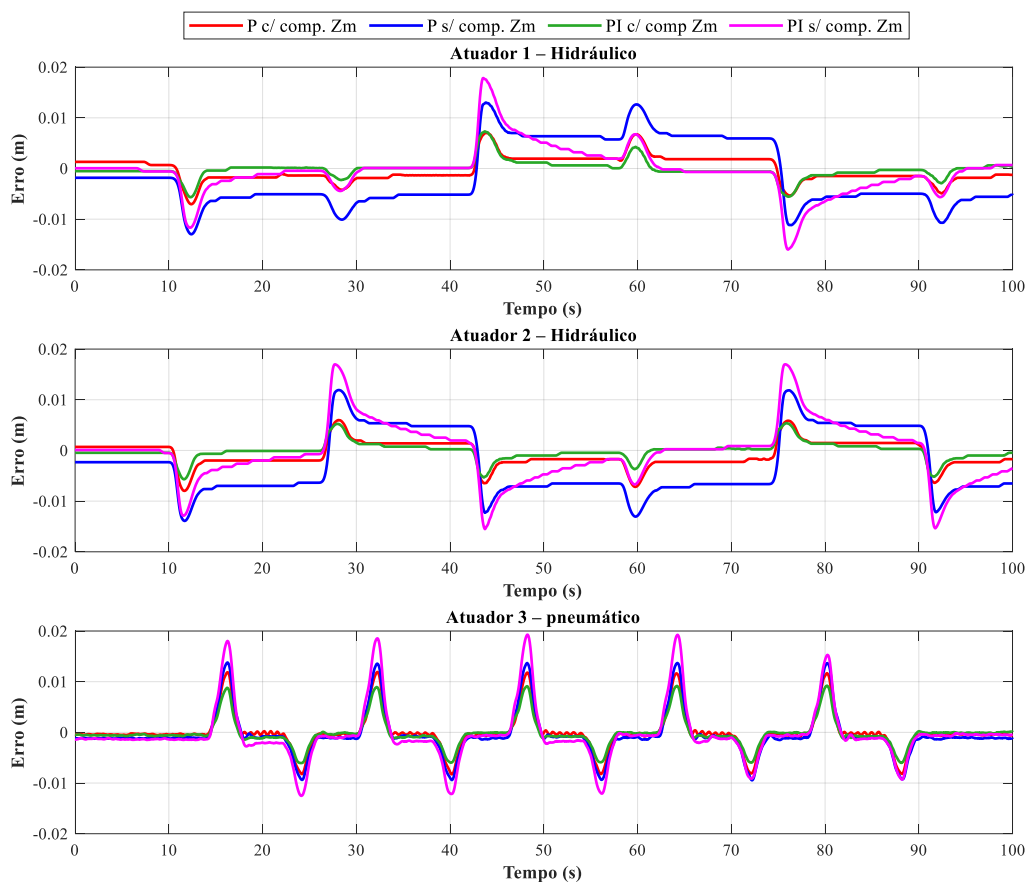


Fonte: Autor (2025)

Com o objetivo de avaliar a influência das estratégias de controle no rastreamento da trajetória de referência, realizam-se ensaios com os controladores proporcional (P) e proporcional-integrativo (PI), ambos com e sem compensação da zona morta, seguindo os parâmetros dados no Item 5.3.

A Figura 48 apresenta o erro de posição ao longo do tempo para cada atuador. A estratégia PI com compensação da zona morta (linha verde) resulta nos menores valores de erro em todos os atuadores, tanto em regime transiente quanto permanente. A ausência da compensação (linha azul e linha rosa) compromete significativamente a precisão. O controle proporcional com compensação (linha vermelha) apresenta desempenho intermediário, porém com erro considerável em regime permanente.

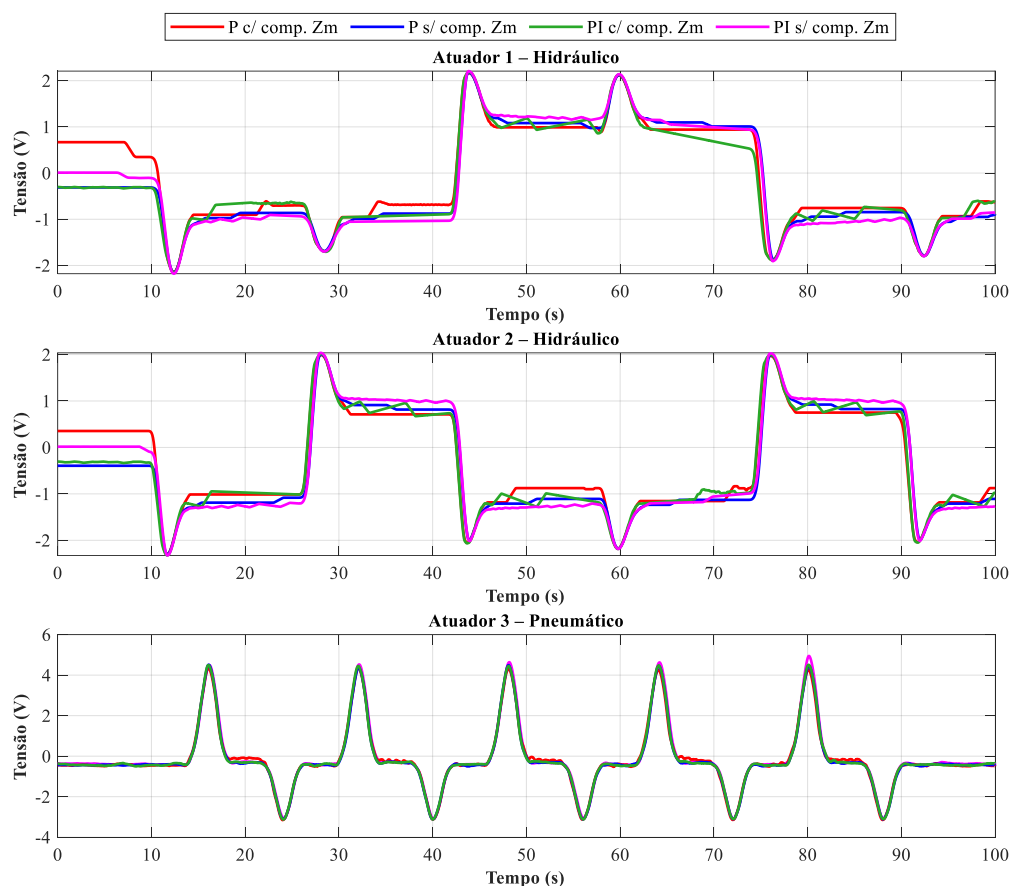
Figura 48 – Comparação dos erros de posição entre as estratégias de controle para referência polinomial.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 49 mostra os sinais de controle aplicados às válvulas. Tais sinais apresentam comportamentos similares entre as diferentes estratégias, com pequenas variações de amplitude. No entanto, nas estratégias que incluem a ação integrativa, nota-se a atuação contínua das válvulas para reduzir o erro em regime permanente.

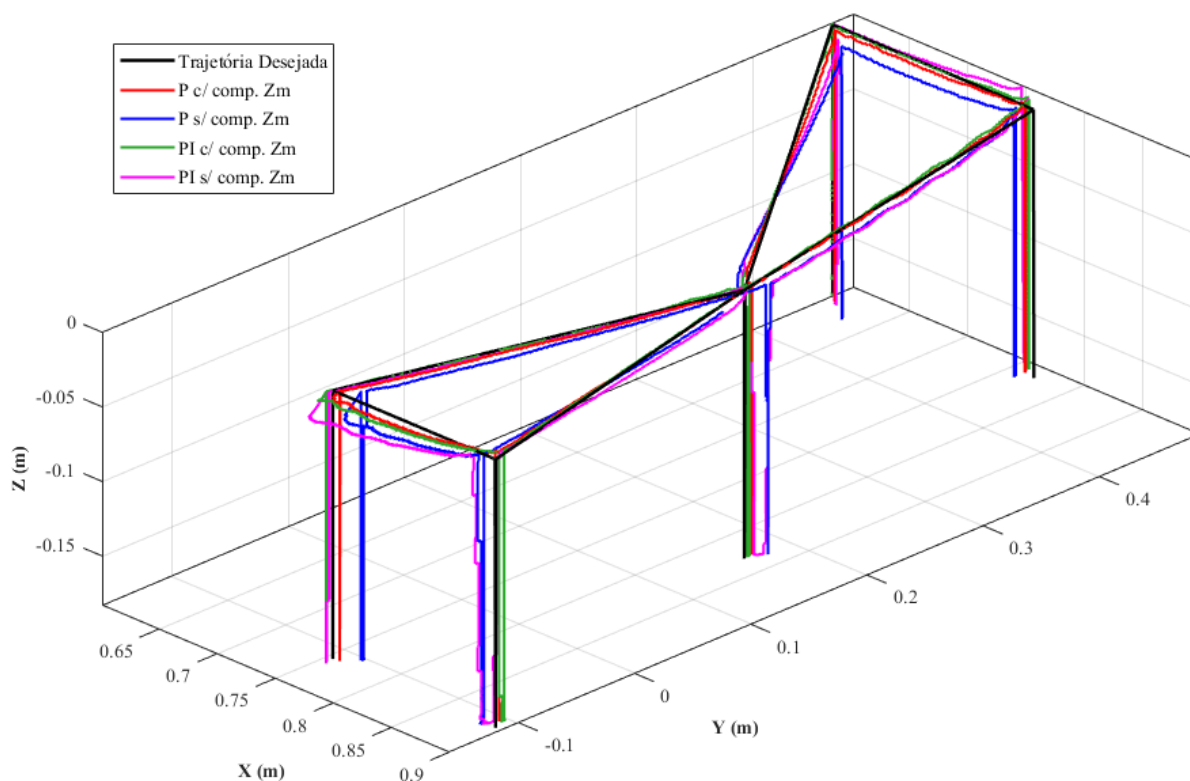
Figura 49 – Comparação dos sinais de controle das válvulas nas quatro estratégias de controle para referência polinomial.



Fonte: Autor (2025)

Como já observado, a estratégia PI com compensação da zona morta alcança o rastreamento mais preciso da trajetória desejada. O controle Proporcional (P), também com a compensação da zona morta, igualmente demonstra um desempenho satisfatório no controle de posição. Em contrapartida, os maiores desvios no seguimento da trajetória ocorrem com as estratégias sem a compensação da zona morta. Essas diferenças de desempenho entre as estratégias de controle são ilustradas na Figura 50.

Figura 50 – Comparação das trajetórias realizadas no espaço tridimensional para referência polinomial.



Fonte: Autor (2025)

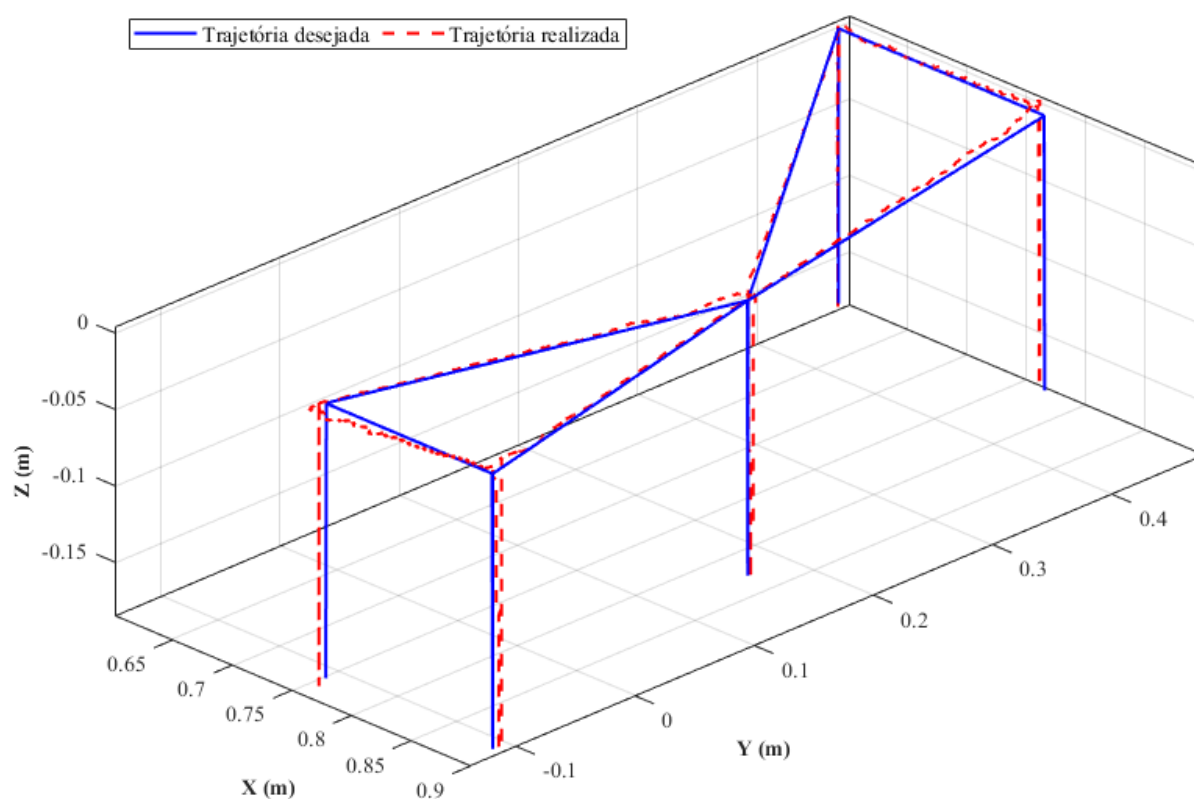
A seguir, apresenta-se a avaliação do desempenho do robô utilizando a trajetória de referência do tipo rampa linear.

5.5.2 Resposta à Trajetória do Tipo Rampa

Adota-se a trajetória do tipo rampa com o propósito de submeter o sistema a uma variação linear de posição ao longo do tempo, o que impõe solicitações mais abruptas aos atuadores quando comparado a trajetória polinomial. Assim como para o caso anterior, o movimento é definido no espaço cartesiano (x, y, z) e, subsequentemente, convertido para o espaço dos atuadores, conforme descrito na Seção 5.2.

A Figura 51 apresenta a trajetória realizada no espaço tridimensional sob o controle PI com compensação da zona morta. Observa-se que a trajetória obtida na prática acompanha de forma consistente a trajetória de referência, confirmando a eficácia da estratégia de controle.

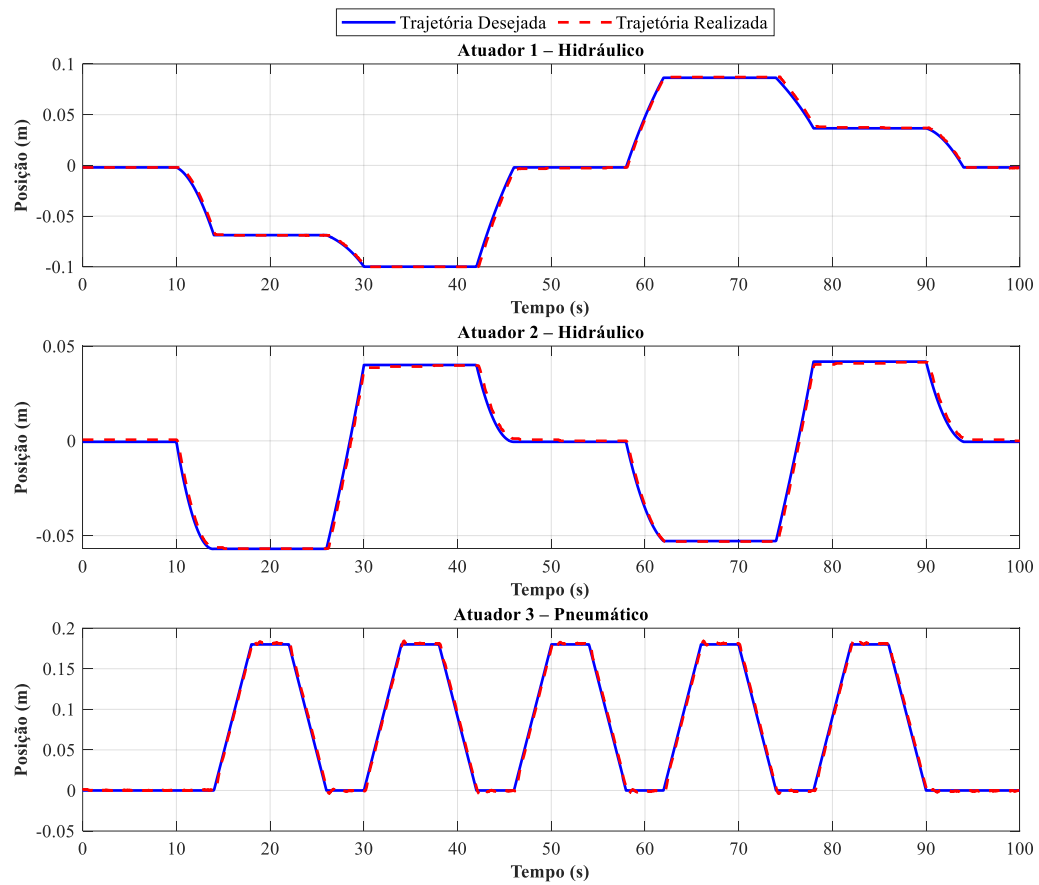
Figura 51 – Trajetória desejada e realizada pelo robô no espaço tridimensional com referência do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

Os deslocamentos desejados e os realizados pelos atuadores ao longo do experimento de 100 segundos são apresentados na Figura 52. Nota-se que o sistema acompanha adequadamente as referências impostas nos três atuadores, com respostas estáveis, ausência de oscilações e transições bem definidas entre os trechos da trajetória.

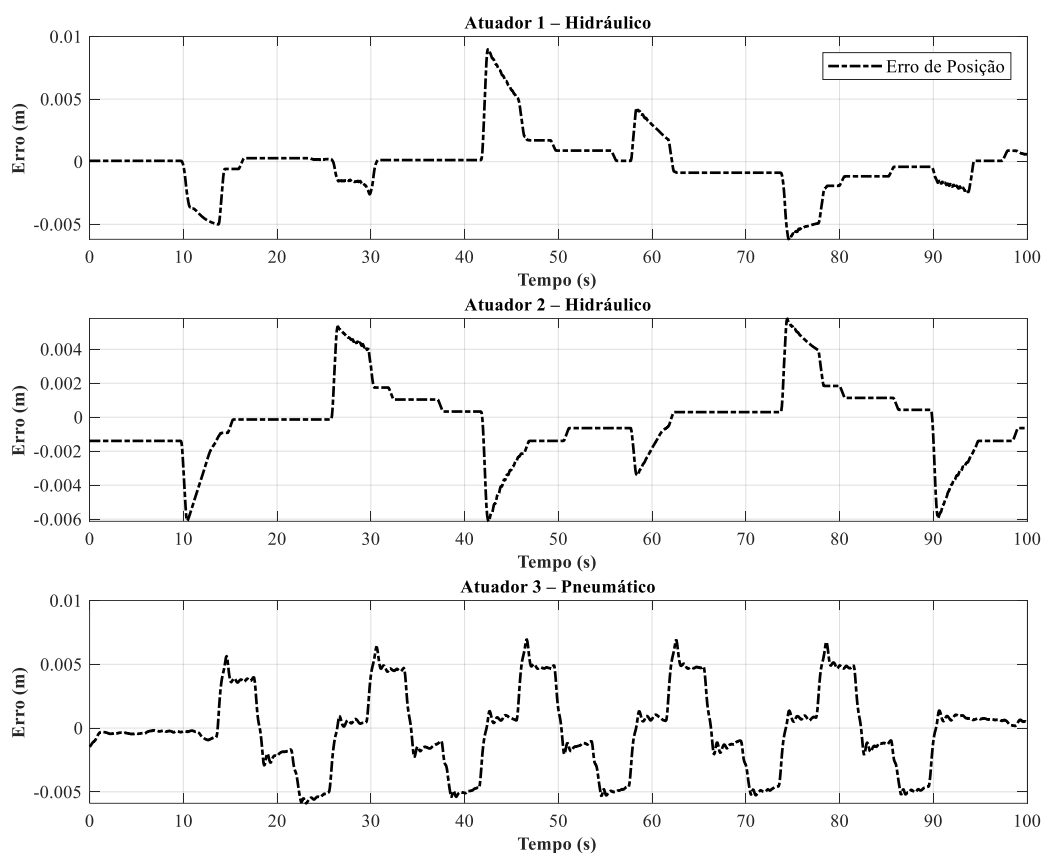
Figura 52 – Posição dos atuadores ao longo do tempo para trajetória do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

O erro de posição de cada atuador é apresentado na Figura 53. Os desvios permanecem, em sua maioria, inferiores a 7×10^{-3} m, concentrados nos momentos de transição entre pontos. O erro em regime permanente situa-se abaixo de $1,5 \times 10^{-3}$ m.

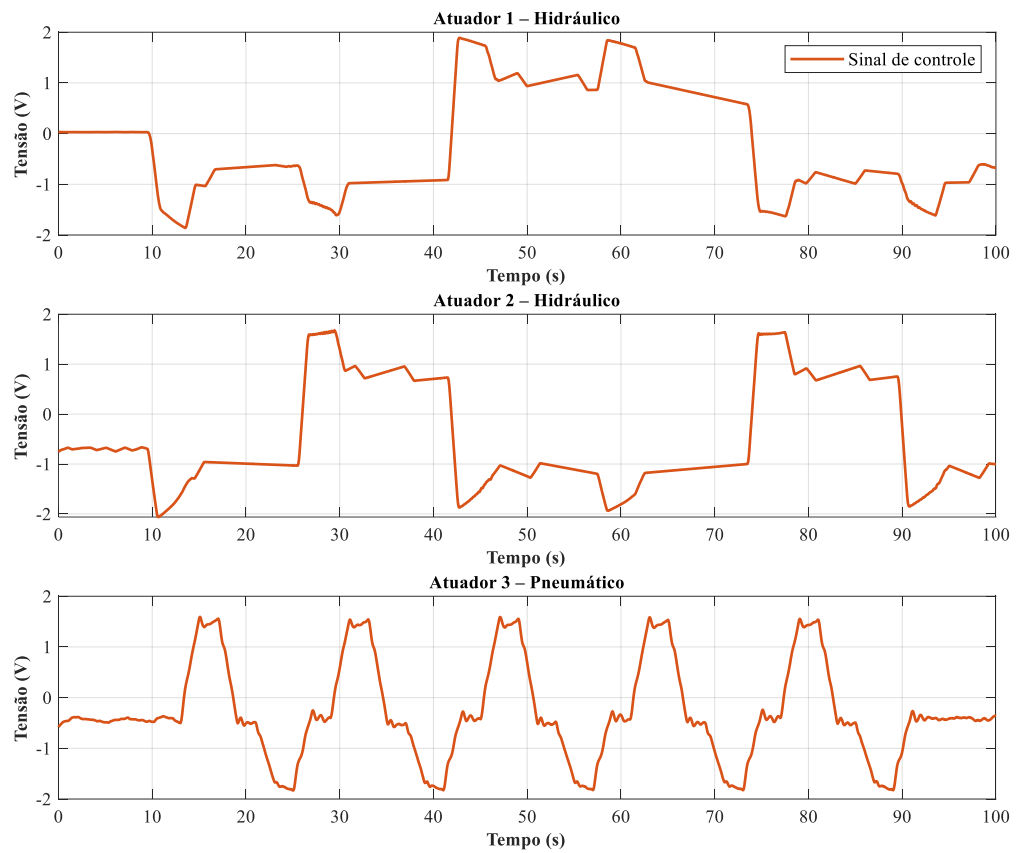
Figura 53 – Erro de posição dos atuadores ao longo do tempo para trajetória do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

Os sinais de controle aplicados às válvulas para a trajetória do tipo rampa, mostrados na Figura 54, apresentam um perfil menos suavizado. Este comportamento é consistente com a natureza da trajetória, a qual demanda respostas rápidas do sistema de acionamento.

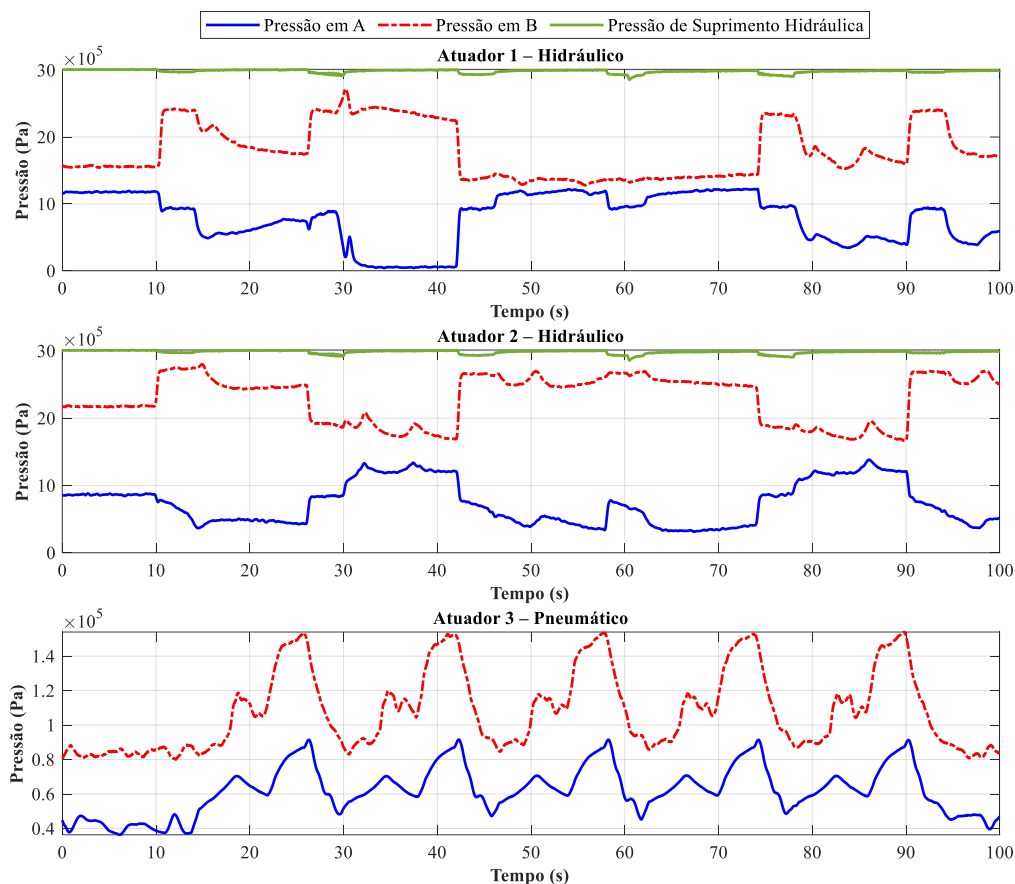
Figura 54 – Sinal de controle das válvulas para trajetória do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 55 apresenta as pressões medidas nas câmaras A e B dos três atuadores e a pressão de suprimento hidráulica durante a execução da trajetória do tipo rampa.

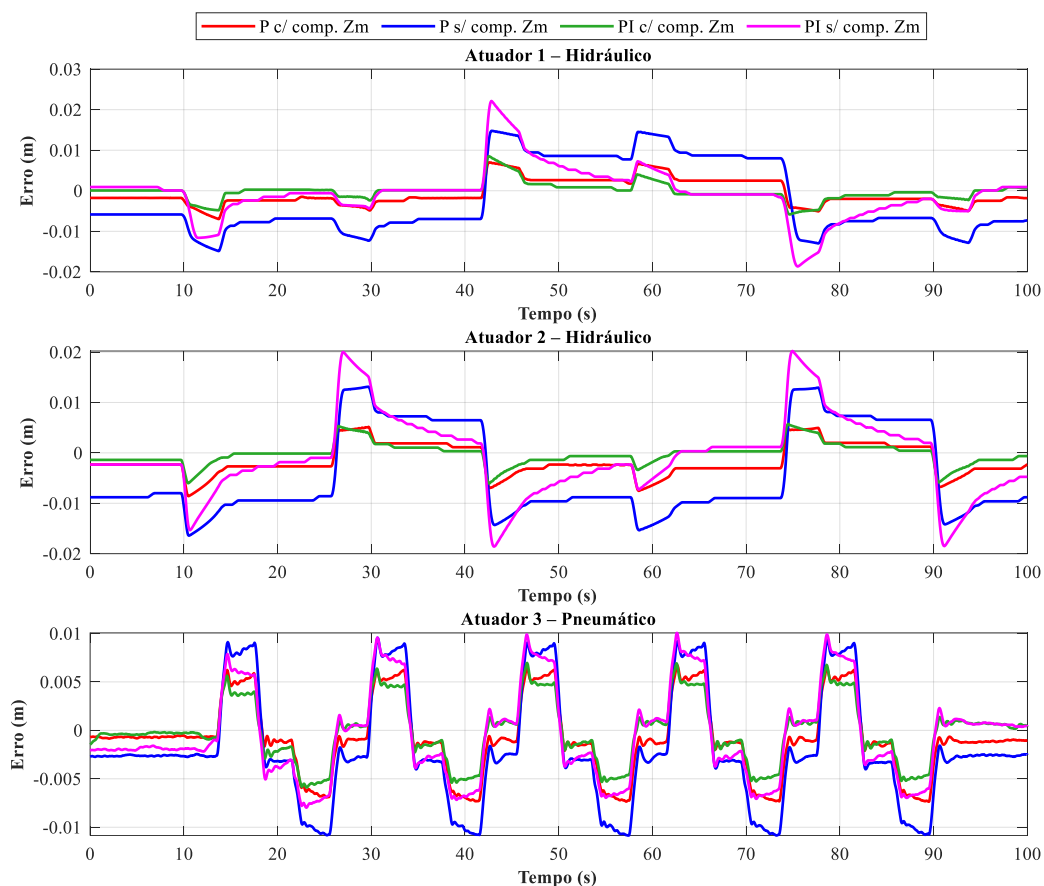
Figura 55 – Pressão nas câmaras A e B e de suprimento para trajetória do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

O erro de posição dos três atuadores para a trajetória do tipo rampa, sob as quatro estratégias de controle, é apresentado na Figura 56. Confirmando a tendência observada com a trajetória polinomial, o controle PI com compensação da zona morta apresenta o menor erro geral. As estratégias sem compensação, por outro lado, continuam apresentando os picos de erro mais elevados, sobretudo nas inversões de movimento. Para o atuador 1 e 2, o controle proporcional sem compensação resulta em um erro de regime permanente da ordem de 10×10^{-3} m. Já o controle PI sem compensação, embora reduza o erro final, exibe picos transientes que atingem até 20×10^{-3} m.

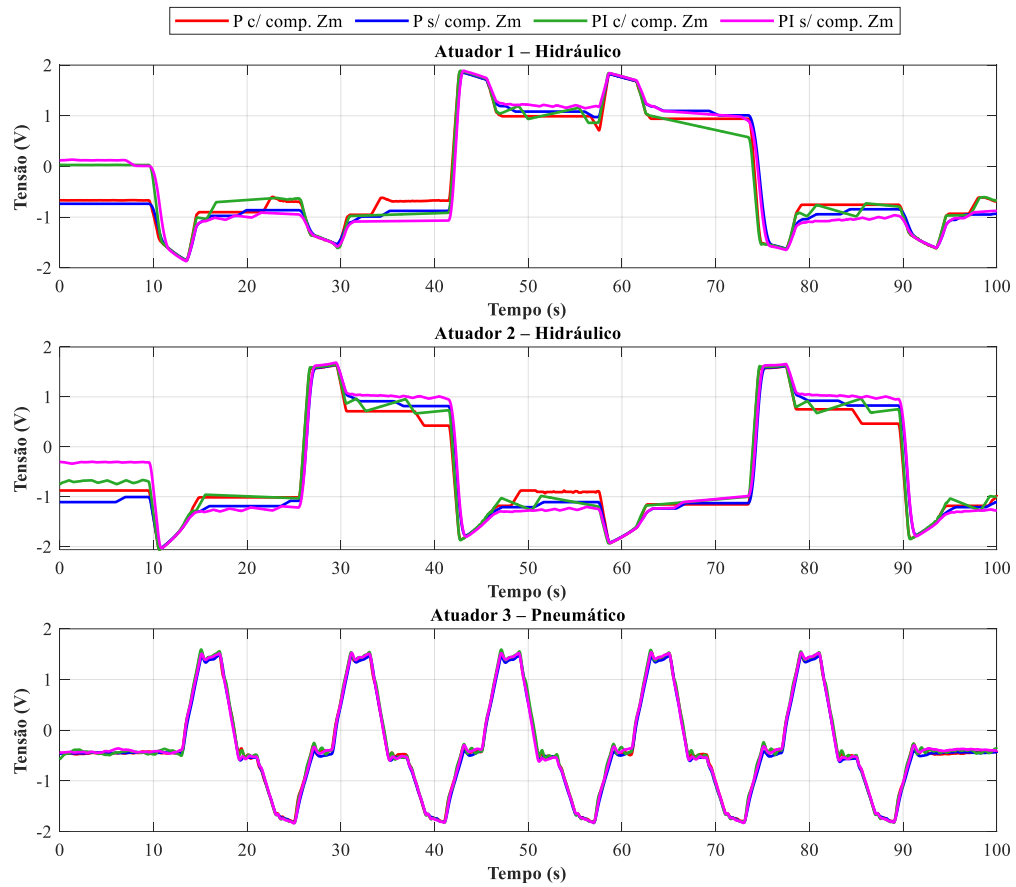
Figura 56 – Erro de posição dos atuadores para a trajetória rampa considerando as diferentes estratégias de controle.



Fonte: Autor (2025)

Os perfis de tensão dos sinais de controle para as quatro estratégias investigadas, conforme ilustrados na Figura 57, demonstram uma semelhança geral. As diferenças sutis identificadas entre esses perfis estão associadas à compensação da zona morta e à presença da ação integrativa no controle.

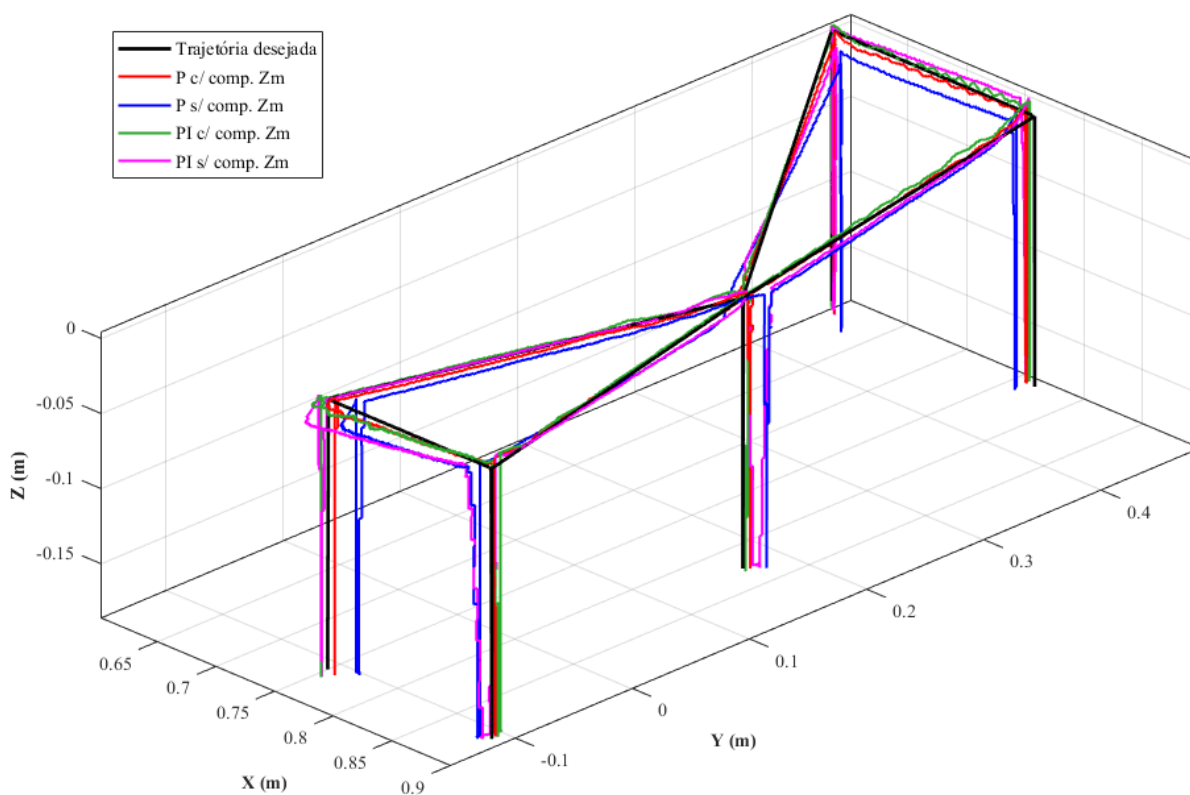
Figura 57 – Sinais de controle aplicados às válvulas para a trajetória rampa considerando as diferentes estratégias de controle.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 58 apresenta as trajetórias realizadas no espaço tridimensional, considerando as diferentes estratégias de controle. Conforme já demonstrado pela análise de erro dos atuadores, esta representação tridimensional torna os desvios em relação à trajetória desejada mais perceptíveis, especialmente nas regiões de transição do movimento.

Figura 58 – Trajetórias realizadas no espaço tridimensional para a referência rampa considerando as diferentes estratégias de controle.



Fonte: Autor (2025)

A seguir, apresenta-se uma comparação direta entre o desempenho do robô ao seguir a trajetória polinomial de sétimo grau e a trajetória rampa, com o objetivo de avaliar a resposta do sistema frente aos dois diferentes perfis de referência.

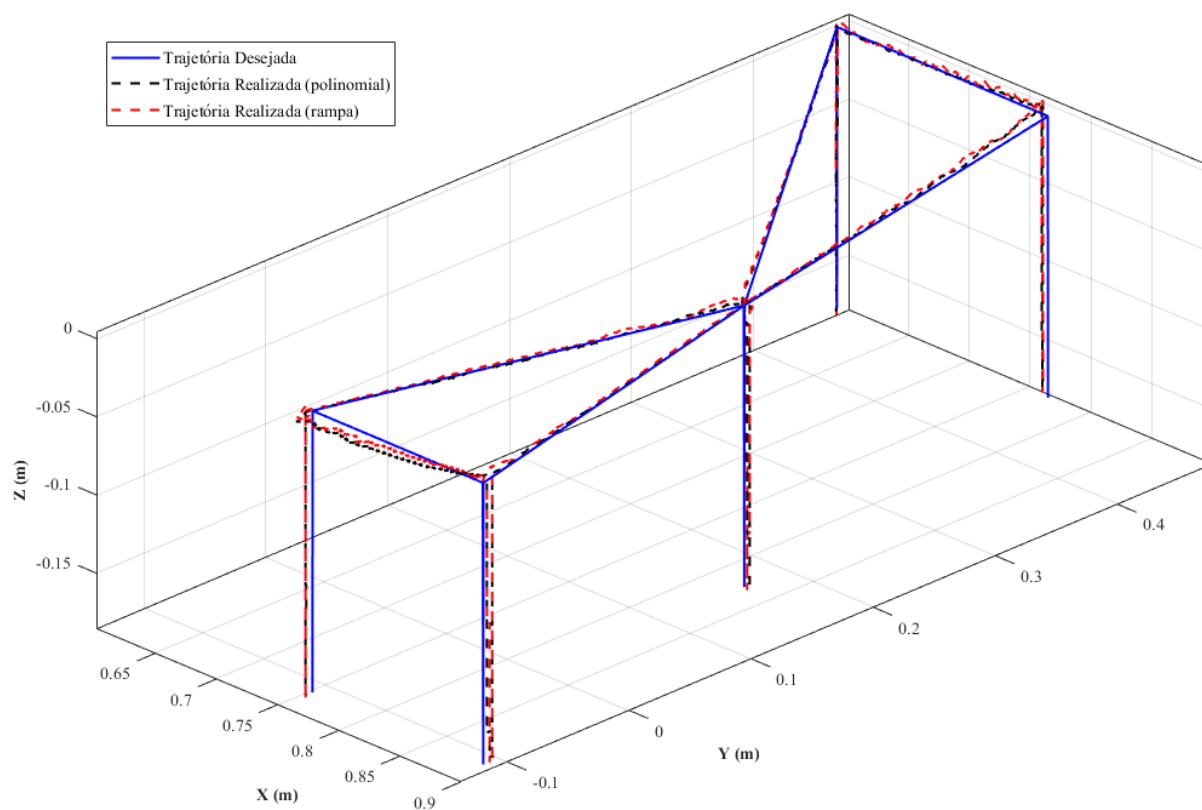
5.5.3 Análise Comparativa entre as Trajetórias Polinomial e Rampa

Esta seção compara o desempenho do robô agrícola ao seguir as duas referências adotadas. Ambas as trajetórias foram definidas para seguir os mesmos pontos no espaço de trabalho e executadas com a mesma estratégia e ganhos de controle: controlador proporcional-integrativo (PI) com compensação da zona morta das válvulas.

A comparação entre as trajetórias polinomial e de rampa no espaço tridimensional, ilustrada na Figura 59, apresenta diferenças no desempenho de seguimento. A trajetória polinomial produz um movimento mais contínuo e com maior fidelidade à referência. Por outro lado, a trajetória de rampa, embora também siga o percurso geral de forma satisfatória,

apresenta desvios mais evidentes, particularmente nas regiões de partida e chegada, no qual ocorrem variações abruptas de velocidade.

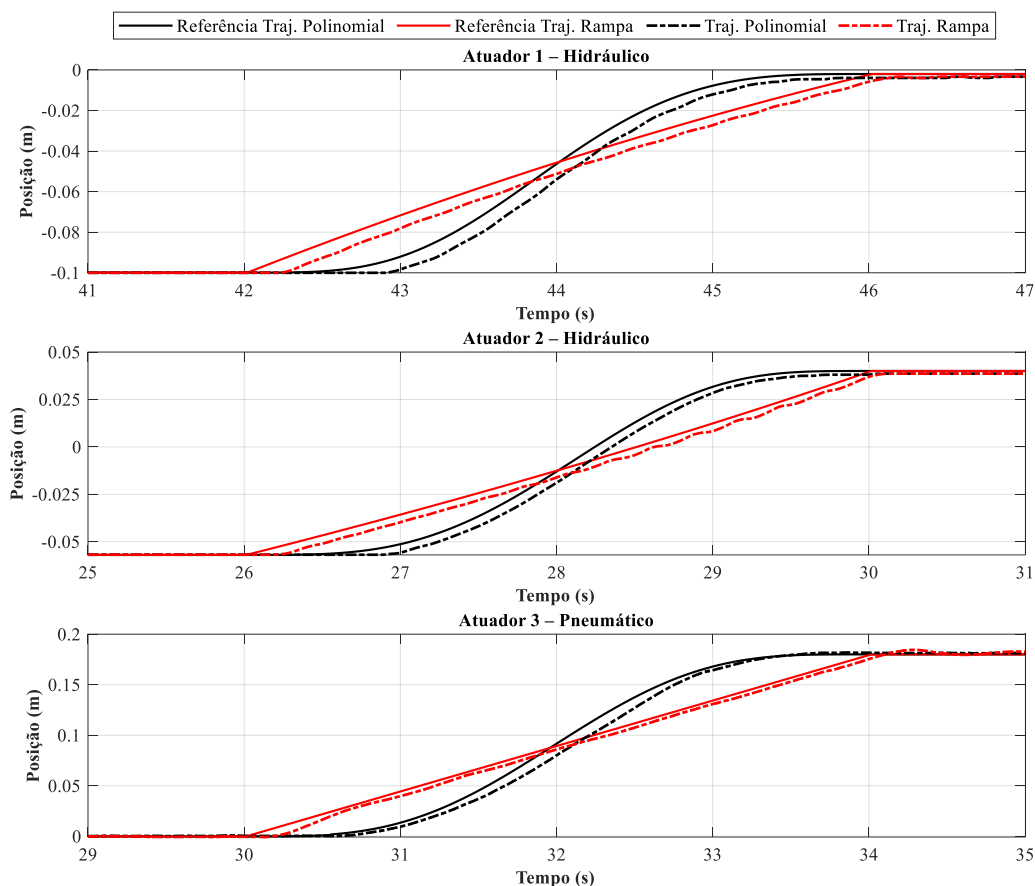
Figura 59 – Comparação entre as trajetórias no espaço tridimensional.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 60 detalha um trecho específico das trajetórias realizadas para cada atuador. Os intervalos destacados correspondem a um segmento de transição entre dois pontos de coleta, escolhido por representar o maior deslocamento realizado em um único movimento entre posições sucessivas. Nessa condição, ambos os perfis de referência iniciam e finalizam o deslocamento nos mesmos instantes. O perfil polinomial apresenta partidas e chegadas mais suavizadas, com inclinação progressiva, enquanto o perfil de rampa exibe transições mais bruscas e inclinação constante entre os pontos.

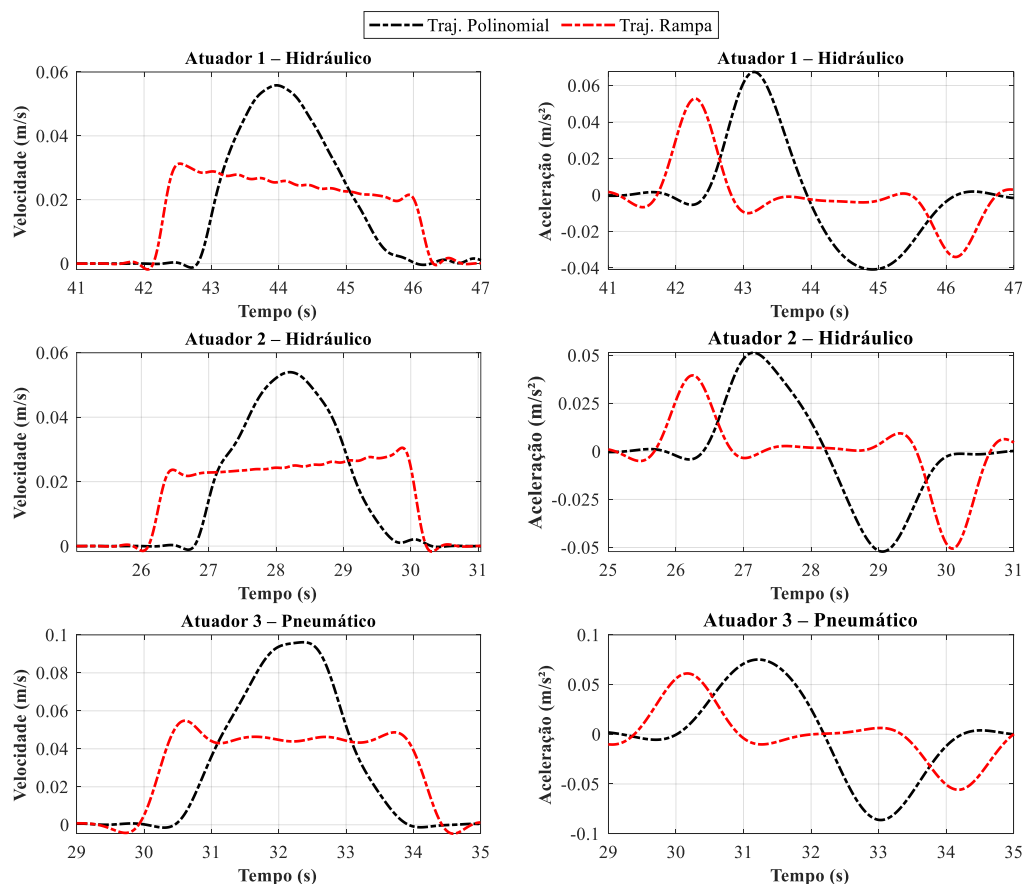
Figura 60 – Comparação das trajetórias para um determinado intervalo de tempo.



Fonte: Autor (2025)

Os perfis de velocidade e aceleração dos três atuadores, correspondentes aos intervalos de transição detalhados na Figura 60, são apresentados na Figura 61. Para a trajetória polinomial, a velocidade dos atuadores varia de forma suave, com crescimento e redução progressivos, o que caracteriza um perfil contínuo sem descontinuidades. Em contrapartida, a trajetória rampa exibe trechos de velocidade quase constante, com transições rápidas nos instantes de partida e parada. Com relação à aceleração, o perfil polinomial apresenta variações contínuas e suavizadas, enquanto a trajetória rampa gera picos de aceleração localizados nos momentos de início e término do movimento.

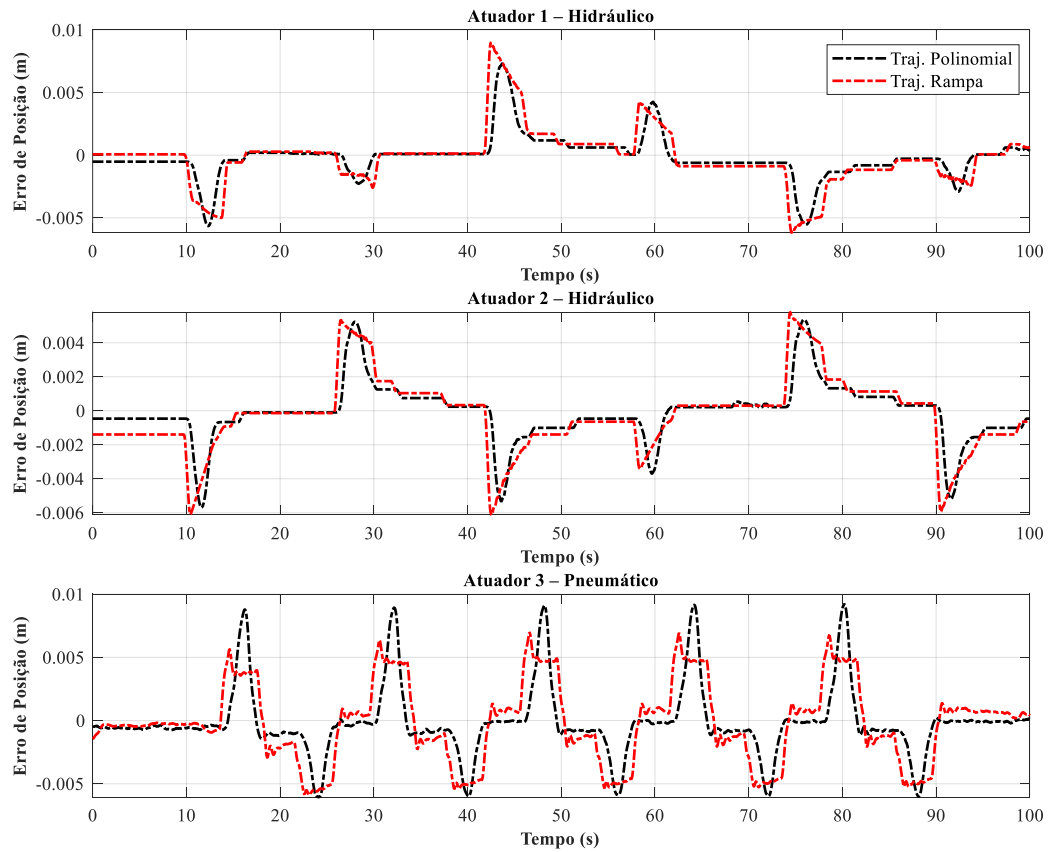
Figura 61 – Perfis de velocidade e aceleração dos atuadores nos intervalos determinados.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 62 apresenta a comparação do erro de rastreamento para os três atuadores durante a execução das trajetórias de referência polinomial e rampa. Nos atuadores hidráulicos, a trajetória polinomial gera picos de erro em regime transiente menores, enquanto os erros em regime permanente são similares para ambas as trajetórias. Para o atuador pneumático, inversamente, a trajetória polinomial acarreta picos de erro transiente maiores, atribuídos às maiores velocidades exigidas em comparação com a trajetória de rampa, que, por sua vez, apresenta menores picos de erros.

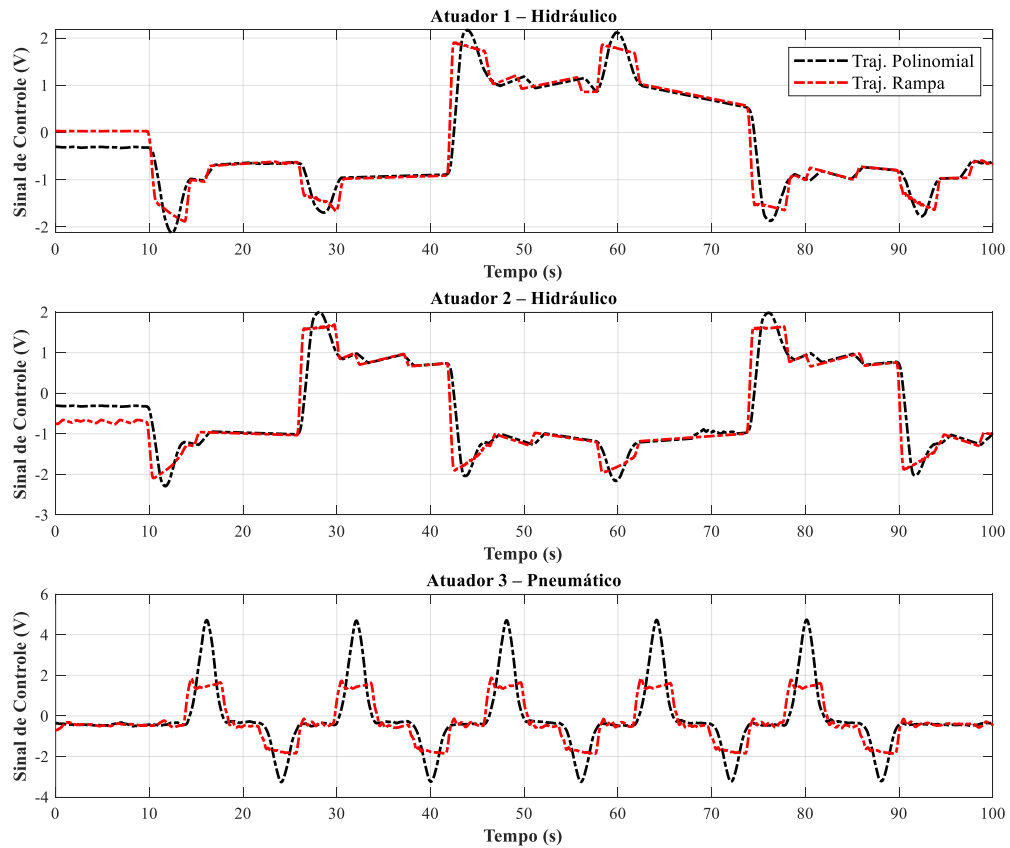
Figura 62 – Comparação do erro de posição entre as trajetórias polinomial e do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 63 apresenta os sinais de controle aplicados às válvulas dos três atuadores para as trajetórias polinomial e rampa.

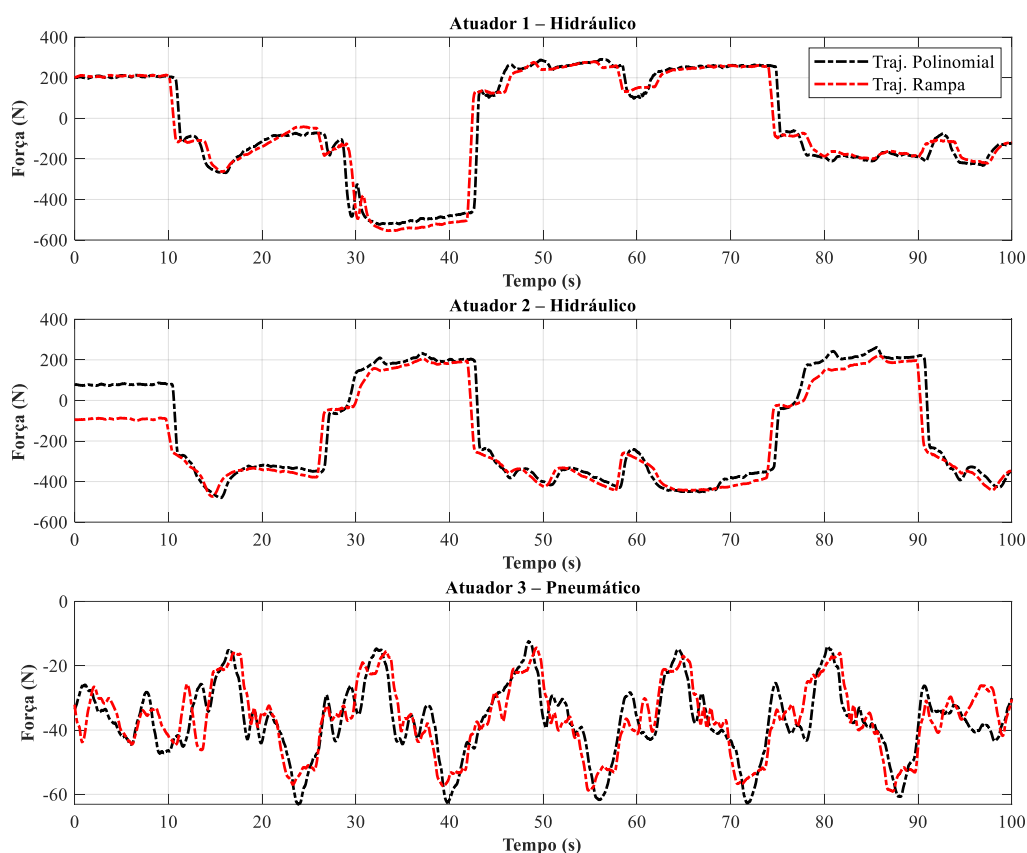
Figura 63 – Comparação dos sinais de controle para as trajetórias polinomial e do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 64 apresenta a comparação das forças estimadas nos três atuadores durante o rastreamento das trajetórias polinomial e rampa. Observa-se que as forças resultantes são muito próximas entre as duas trajetórias.

Figura 64 – Comparação das forças nos atuadores para as trajetórias polinomial e do tipo rampa.



Fonte: Autor (2025)

5.5.4 Avaliação da Repetibilidade do Robô

De acordo com a norma ISO 9283:1998 (ISO, 1998) ainda vigente e confirmada em 2021 como referência internacional para testes de performance de manipuladores industriais, a repetibilidade é definida como a variação da posição atingida pelo efetuador final em sucessivas execuções da mesma tarefa de posicionamento sob condições operacionais constantes. Essa definição expressa a variação apresentada pelo robô ao tentar repetir o mesmo ponto. A repetibilidade de posição (RP_l) corresponde ao raio de uma esfera definida em torno do baricentro formado pelas posições alcançadas durante as repetições, sendo estimada com base na média das distâncias entre cada ponto e esse centro, juntamente com o desvio padrão. A metodologia utilizada e as equações encontram-se no Apêndice F.

Para a aplicação proposta nesta dissertação, a repetibilidade refere-se à capacidade do robô em conduzir a suposta sonda coletora de grãos aos pontos pré-definidos de maneira consistente ao longo dos repetidos ciclos de amostragem nas unidades armazenadoras. Essa

análise permite verificar se o sistema é capaz de realizar as operações durante um período de safra.

A avaliação da repetibilidade do robô agrícola segue os fundamentos da norma ISO 9283:1998, com adaptações voltadas a aplicação proposta. Em vez de aplicar integralmente o protocolo normativo, que estabelece movimentos sobre um cubo de ensaio com posições padronizadas (WEIDLICH, 2006), adotou-se uma metodologia experimental baseada em repetir a trajetória planejada para o posicionamento da sonda coletora. Para isso, foram realizadas dez repetições consecutivas da trajetória polinomial, consideradas como amostras de 1 a 10. A análise concentrou-se em sete posições específicas do efetuador final ao longo do percurso da trajetória: 20 s, 28 s, 36 s, 52 s, 66 s, 84 s e 96 s. Destes, seis momentos correspondem a condições de regime permanente, e um instante (28 s) foi selecionado em condição de regime transiente.

A Tabela 18 apresenta os resultados da repetibilidade que o robô apresentou para o efetuador final nos sete instantes da trajetória planejada. O maior valor obtido de repetibilidade de posição (RP_l) foi de $14,381 \times 10^{-3}$ m no instante de 84 s, estando associado a um erro médio de posicionamento (AP_m) de $14,308 \times 10^{-3}$ m em relação à referência, indicando maior imprecisão dentre os instantes analisados. O menor valor de RP_l foi de $6,875 \times 10^{-3}$ m no instante de 66 s, apresentando baixa dispersão (S_{AP_p}) e maior consistência na repetição da posição.

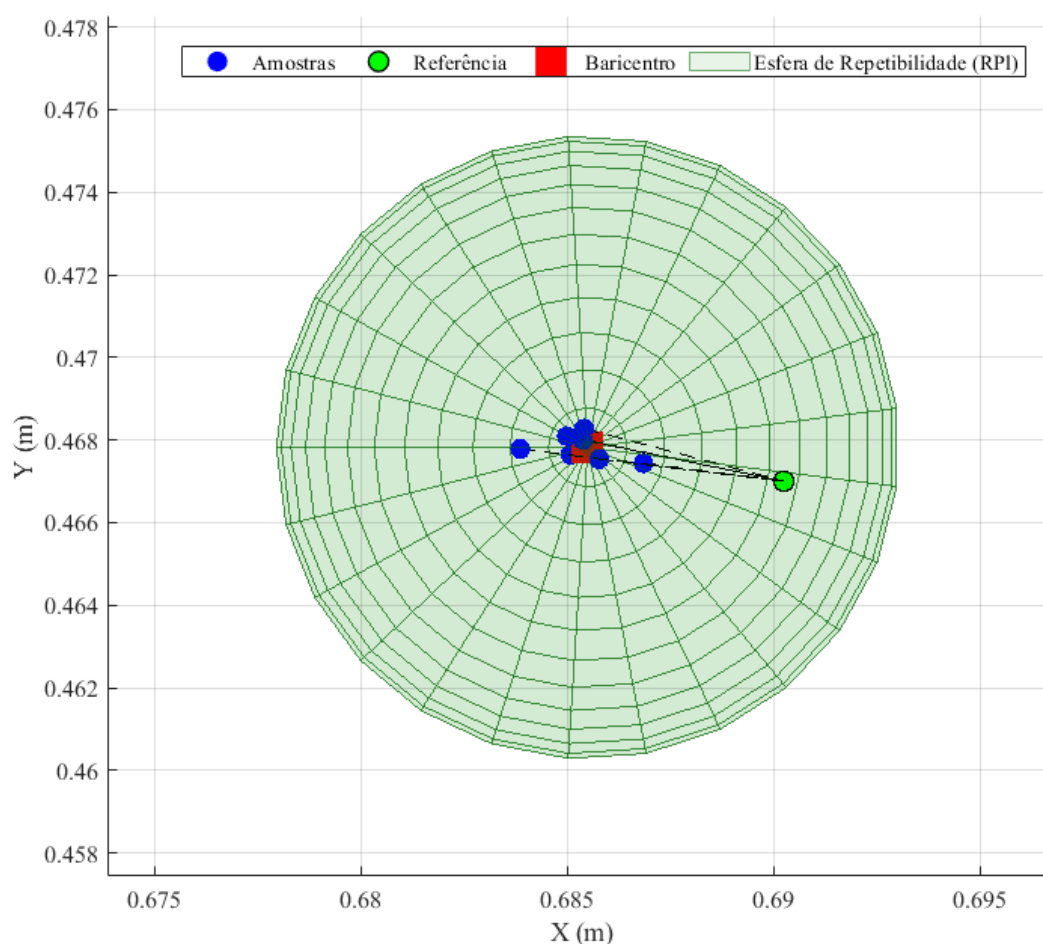
Tabela 18 – Resultados da repetibilidade posicional do efetuador final em sete instantes da trajetória planejada.

Tempo (s)	AP_x (mm)	AP_y (mm)	AP_z (mm)	AP_m (mm)	S_{AP_p} (mm)	RP_l (mm)
20	-7,832	-0,435	2,050	8,169	1,172	11,684
28	4,753	-0,821	-0,217	4,852	0,902	7,558
26	6,224	-9,566	1,910	11,572	0,038	11,683
52	-5,313	-5,048	2,059	7,613	0,042	7,739
66	-5,428	2,541	2,770	6,605	0,090	6,875
84	-2,361	-13,987	1,868	14,308	0,024	14,381
96	-5,527	-4,818	-0,282	7,367	0,067	7,569

Fonte: Autor (2025)

A Figura 65 apresenta a repetibilidade do efetuador final no plano XY no instante de 28 segundos, destacando as 10 amostras registradas, o ponto de referência e o baricentro das posições atingidas. As linhas tracejadas indicam a distância de cada amostra em relação à referência, representando a acurácia posicional. Nota-se uma dispersão maior ao longo do eixo X, porém sem tendência sistemática ou deslocamento persistente. A distribuição das amostras em torno do baricentro ocorre de forma equilibrada, e todos os pontos permanecem dentro da faixa estatística esperada, demonstrando boa repetibilidade no plano XY, que é o mais crítico para o posicionamento correto da sonda durante a coleta.

Figura 65 – Projeção bidimensional (XY) das posições amostradas, posição de referência, baricentro e esfera de repetibilidade no instante de 28 segundos.

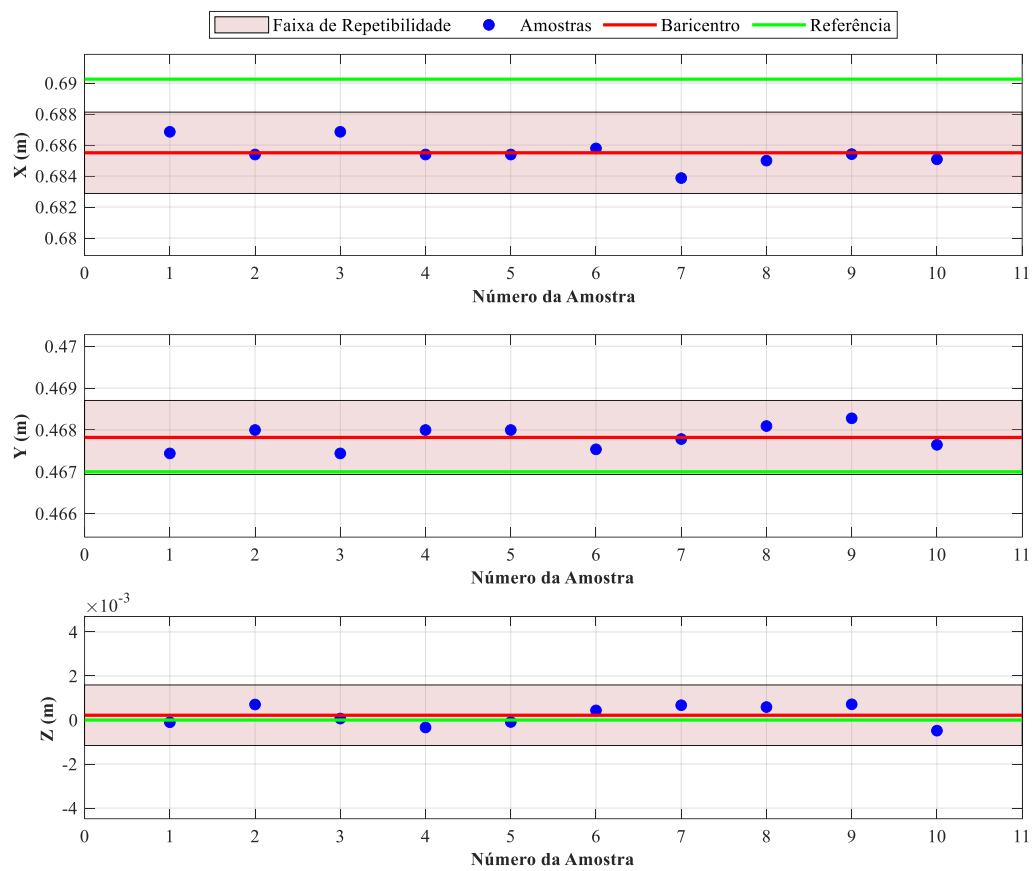


Fonte: Autor (2025)

A Figura 66 complementa a análise da repetibilidade ao detalhar a distribuição das amostras obtidas nos eixos X, Y e Z para o instante de 28 segundos. Os dados são apresentados individualmente por eixo, permitindo observar a variação das posições ao longo das dez

repetições. Verifica-se que, apesar da maior dispersão ocorrer no eixo X ($\pm 5 \times 10^{-3}$ m), os valores se mantêm agrupados em torno do baricentro e dentro da faixa delimitada pela repetibilidade calculada. Nos eixos Y e Z, a variação entre as amostras é ainda mais reduzida ($\pm 2 \times 10^{-3}$ m), reforçando a estabilidade do sistema ao longo dos ciclos. A proximidade entre o baricentro e a referência em todos os eixos confirma a confiabilidade do robô em manter seu desempenho mesmo sob repetições sucessivas.

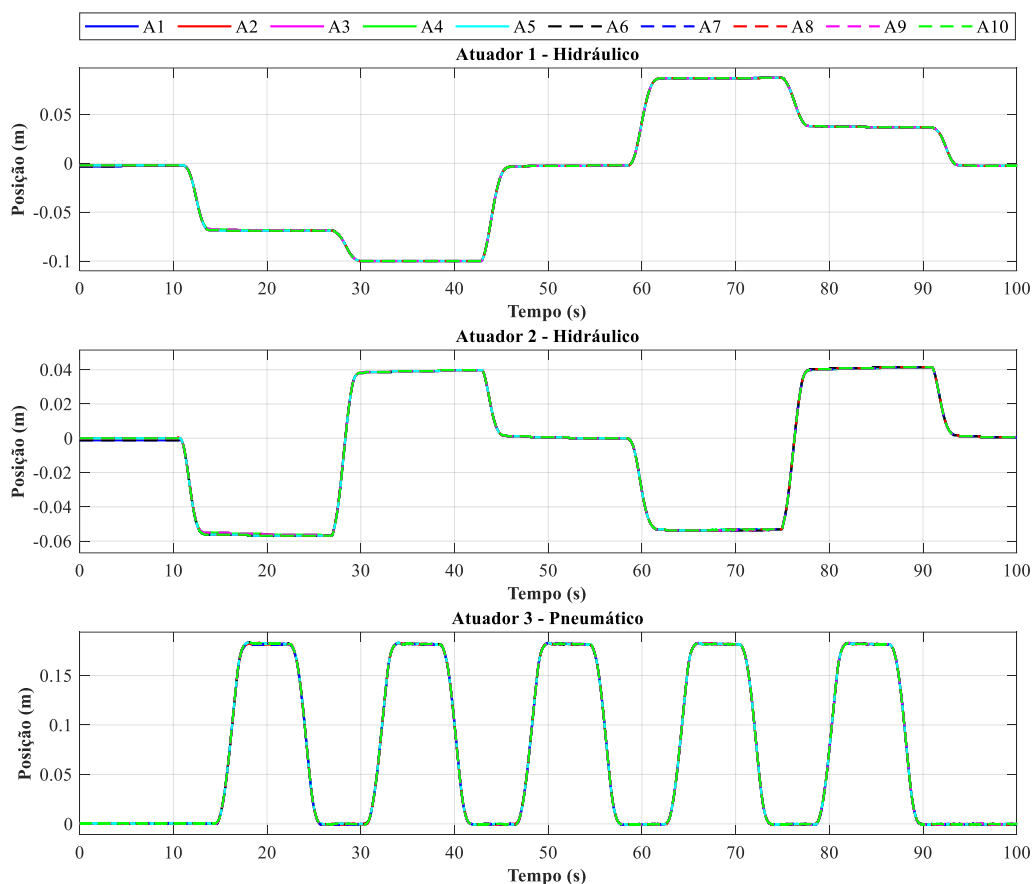
Figura 66 – Dispersão das posições atingidas pelo efetuador final nos eixos X, Y e Z no instante de 28 segundos para as 10 repetições.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 67 apresenta a posição dos três atuadores ao longo da trajetória polinomial durante as dez repetições. As curvas obtidas em cada repetição coincidem em praticamente todos os instantes, sem variações perceptíveis, o que evidencia a consistência dos deslocamentos no espaço dos atuadores.

Figura 67 – Posição dos atuadores ao longo das 10 repetições da trajetória polinomial.



Fonte: Autor (2025)

A seguir, apresentam-se as discussões referentes aos resultados obtidos na validação do robô proposto como prova de conceito para o posicionamento automatizado de uma sonda coletora de amostras de grãos.

5.6 DISCUSSÕES

Neste capítulo, foram discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios em laboratório realizados com o robô. A análise contempla o desempenho do sistema em relação às trajetórias de referência aplicadas, a resposta dos atuadores hidráulicos e pneumático, e os efeitos das diferentes estratégias de controle avaliadas.

Observa-se que o robô apresenta uma ampla área de alcance no plano XY, resultado dos deslocamentos angulares promovidos pelas juntas 1 e 2, mesmo sendo acionadas por atuadores lineares, o que confere versatilidade ao sistema para operações de posicionamento e tarefas do tipo pega-e-posiciona (*pick-and-place*).

O tempo total para execução dos ensaios experimentais que simulam a coleta de amostras de grãos em cinco pontos distintos foi de 100 segundos. Este intervalo compreende a saída da posição inicial, a realização sequencial das coletas e o retorno à posição de origem, demonstrando que o sistema é capaz de executar o ciclo de trabalho com rapidez e precisão. Tal desempenho indica viabilidade prática para operações repetitivas de coleta de amostras em ambientes agrícolas.

Os resultados obtidos para o controle de posição indicam um desempenho satisfatório frente às exigências impostas. Considerando o contexto de coleta de amostras em caminhos graneleiros, variações de posicionamento na ordem de 1 a 2 centímetros não comprometem a representatividade da amostra, pois a densidade e a homogeneidade do material tendem a se manter em regiões próximas. Os desvios mais expressivos foram observados durante os regimes transitórios entre os pontos, o que é esperado devido à dinâmica do sistema e às características do acionamento. Em regime permanente, com os atuadores estabilizados na posição de coleta, os erros observados foram mínimos e adequados à aplicação proposta.

A compensação da zona morta das válvulas melhorou significativamente o desempenho do sistema, com redução do erro de posição e otimização da resposta nas transições. Sem essa compensação, observam-se perda de precisão e maiores oscilações, principalmente nas inversões de sentido. Entre as estratégias estudadas, aquelas que não utilizam a compensação da zona morta apresentaram os piores resultados, tanto para a trajetória polinomial quanto para a de rampa.

A avaliação da repetibilidade demonstrou que o robô é capaz de repetir os movimentos com baixa dispersão entre as posições alcançadas pelo efetuador final nos pontos analisados. Para aplicações industriais repetitivas, a repetibilidade é frequentemente mais relevante que a precisão absoluta, pois desvios constantes podem ser compensados no sistema de controle ou antecipados. Um robô com boa repetibilidade garante previsibilidade no comportamento e confiabilidade nas operações.

6 CONCLUSÃO

A coleta de amostras na recepção, uma etapa determinante para o controle de qualidade dos grãos em unidades armazenadoras, fornece dados que direcionam as decisões sobre secagem, limpeza e armazenagem. Contudo, os métodos manuais ou convencionais apresentam baixa repetibilidade, dependência da habilidade do operador para a escolha dos pontos de coleta e exposição a condições insalubres, como poeira, ruído e vibrações, comprometendo tanto a segurança do operador quanto a representatividade da amostra obtida. Com o objetivo de superar tais limitações, esta dissertação propôs e validou experimentalmente uma solução robotizada para essa tarefa, demonstrando como a automação pode contribuir para a padronização do processo e reduzir a dependência da intervenção humana.

Nesta solução, o robô SCARA, avaliado como prova de conceito, demonstrou desempenho compatível com operações que exigem robustez e repetibilidade. Os resultados obtidos confirmam o desempenho satisfatório do sistema e reforçam sua viabilidade técnica para a automação da tarefa. O tempo de execução dos ciclos mostrou-se adequado para aplicações em cenários com alta demandas.

Atenderam-se plenamente os objetivos estabelecidos, que incluíram o desenvolvimento do modelo cinemático direto e inverso, a implementação de uma estratégia de controle de posição com compensação da zona morta nas válvulas e a realização de testes experimentais com trajetórias do tipo polinomial de sétimo grau e rampa linear.

As contribuições desta dissertação concentram-se na proposição e na validação experimental de uma solução robótica capaz de automatizar o posicionamento de uma sonda coletora de amostras de grãos, buscando responder a uma necessidade prática observada nas operações de pós-colheita. A pesquisa avança ao demonstrar, por meio de testes em ambiente controlado, que é possível integrar atuadores hidráulicos e pneumáticos em uma arquitetura robótica funcional e adaptada ao contexto agrícola. Por se tratar de um problema ainda pouco explorado na literatura e com poucas alternativas disponíveis no mercado, este trabalho oferece fundamentos técnicos que podem apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias para a automação da coleta de amostras durante a recepção de grãos em unidades armazenadoras.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para o aprimoramento do sistema desenvolvido para o posicionamento da sonda coletora de amostras de grãos, recomendam-se estudos complementares com foco nas seguintes direções:

- **Implementação funcional da sonda coletora:** Incorporar uma sonda real para coleta de grãos e realizar testes operacionais que envolvam a extração de amostras em ambientes controlados, como sobre um caixote contendo grãos, aproximando as condições do protótipo às operações em campo.
- **Controle integrado via CLP:** Substituir o sistema de controle atual baseado na dSPACE 1104 por um Controlador Lógico Programável (CLP) e *softwares* industriais correlatos, visando à automação completa do protótipo e adequação às condições operacionais encontradas em unidades armazenadoras.
- **Implementação de tecnologias de visão computacional e inteligência artificial embarcada:** Integrar sistemas de visão computacional e algoritmos de inteligência artificial embarcada para aprimorar a identificação dos pontos de coleta, adaptando o posicionamento da sonda em tempo real e aumentando a autonomia e eficiência do robô em operações dinâmicas e variáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALSHAMASIN, M. S.; IONESCU, F.; AL-KASASBEH, R. T. **Kinematic modeling and simulation of a SCARA robot by using solid dynamics and verification by MATLAB/Simulink.** *European Journal of Scientific Research*, n. 37, v. 3, p. 388-405, 2009. ISSN 1450-216X.
- ANDRIGHETTO, P. L.; VALDIERO, A. C.; BAVARESCO, D. **Dead zone compensation in pneumatic servo systems.** In: *ABCM Symposium Series In Mechatronics*, 3., 2008, Rio de Janeiro. *Anais....* Rio de Janeiro: ABCM, 2008. p. 501-509.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11161:2016 – Grãos — Procedimentos de amostragem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 15 p.
- AUGUSTYNEK, K.; URBÁS, A. **Comparison of bristles' friction models in dynamics analysis of spatial linkages.** *Mechanics Research Communications*, 2017. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2017.01.003.
- BAAL, E. **Recomendações para projeto de unidades de beneficiamento e armazenagem de grãos com enfoque em segurança do trabalho.** 2013. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.
- BAAL, E.; CERETTA, A. G.; ARCOS, R. A. G.; FAVERO JUNIOR, J. L.; BORTOLAIA, L. A.; VALDIERO, A. C. **Desafios e oportunidades na área de ensino de engenharia, automação e pós-colheita de grãos: estudo de caso de máquina de limpeza.** *Revista Foco, [S. l.]*, v. 17, n. 6, p. e5351, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n6-039. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/5351>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- BAAL, E.; GUIMARÃES DE SOUZA, I. V. B.; BORTOLAIA, L. A.; ZACHI, A. R. L.; VALDIERO, A. C. **Desafios e oportunidades para o ensino de engenharia em um laboratório interdisciplinar na área de automação e pós-colheita.** In: *Congresso Brasileiro De Educação Em Engenharia – Cobenge*, 51., 2023, Rio de Janeiro.
- BARRIENTOS, A.; PEÑIN, L. F.; BALAGUER, C.; ARACIL, R. **Fundamentals of Robotics: Theory and Applications.** Dordrecht: Springer, 2007.
- BEATER, P. **Pneumatic drives: system design, modelling and control.** Berlin: Springer, 2007.
- BEHNEN, V. L. **Modelagem matemática de um robô SCARA com acionamento pneumático e identificação experimental das principais não linearidades.** 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2017. Disponível em: <http://bibliodigital.unijui.edu.br/handle/123456789/4406>. Acesso em: 21 jan. 2024.
- BERGAMASCHI, P. R.; SARAMAGO, S. F. P.; NOGUEIRA, A. C. **An optimal design of 3R manipulators with prescribed workspace.** In: *International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics – Musme*, 2., 2005, Uberlândia. p. 140-158.

BESSA, C. D. R. **Estratégia de controle com compensação dos efeitos do tempo morto aplicada a sistemas de ordem superior**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22565>. Acesso em: 12 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Entra em vigor a Instrução Normativa Mapa nº 14, que trata das espécies vegetais introduzidas no território nacional**. Brasília, DF: MAPA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/entra-em-vigor-a-instrucao-normativa-mapa-ndeg-14-que-trata-das-especies-vegetais-introduzidas-no-territorio-nacional>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução Contran nº 994, de 15 de junho de 2023** – Altera a Resolução Contran nº 882/2021. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 jun. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao9942023.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CANADIAN GRAIN COMMISSION. **Guide to taking a representative sample**. Winnipeg: Canadian Grain Commission, 2019. Disponível em: <https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-quality/sampling-grain/guide-taking-representative-sample/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

CANUDAS-DE-WIT, C.; OLSSON, H.; ÅSTRÖM, K. J.; LISCHINSKY, P. **A new model for the control of systems with friction**. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 40, n. 3, p. 419-425, 1995. DOI: 10.1109/9.376053.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Portal CNA Brasil**. Brasília, DF: CNA, 2024. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/>. Acesso em: 5 fev. 2025.

CECCARELLI, M. **Fundamentals of mechanics of robotic manipulation**. Cham: Springer, 2011. (Mechanisms and Machine Science; 112)

CERETTA, A. G.; BAAL, E.; DE NEGRI, V. J.; KAMPHORST, E.; SOUZA, S.; VALDIERO, A. C.; SANDIN, V. **Estado da arte da mecanização da coleta de grãos na recepção de unidades de armazenagem**. *Di@logus*, v. 13, n. 3, p. 45-58, 2024. DOI: 10.33053/dilogus.v13i3.1193

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Instruções para amostragem de grãos**. Série Armazenagem, v. 1, n. 1. Brasília, DF: Conab, 2015. 32 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: segundo levantamento, safra 2023/24**. Brasília, DF: Conab, nov. 2023. 111 p.

CROPLIFE BRASIL. **O Brasil leva para o mundo uma rica produção agrícola**. São Paulo: CropLife Brasil, 2022. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/exportacao-producao-agricola-brasil/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

DESTRO, M. C. **Análise de condições operacionais críticas em posicionadores eletro-hidráulicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

DE NEGRI, V. J. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Controle e Automação: Parte III – Sistemas Hidráulicos para Controle**. Florianópolis, 2001. 62 p. (Certificado de Registro ou Averbação número 328.561, Livro 602, Folha 221. Escritório de Direitos Autorais. Rio de Janeiro, 11 de Agosto de 2004).

DE NEGRI, V. J. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Controle e Automação: Parte II – Sistemas Pneumáticos para Automação**. Florianópolis, 2001. 73 p. (Certificado de Registro ou Averbação número 328.561, Livro 602, Folha 221. Escritório de Direitos Autorais. Rio de Janeiro, 11 de Agosto de 2004).

DUPONT, P.; ARMSTRONG, B.; HAYWARD, V. **Elasto-plastic friction model: contact compliance and stiction**. In: *American Control Conference*, 2000, Chicago. IEEE, 2000. p. 1072-1077.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Trajetória da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 2 jul. 2023.

EIFERT, E. da C. **Pós-colheita**. Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pos-producao/pos-colheita>. Acesso em: 04 mar. 2024.

ENDLER, L. **Uma solução para economia de ar comprimido em sistemas de controle de posição pneumáticos**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995. 662 p.

FREITAS, M. C. M. **A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola**. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1-12, 2011. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrarias/a%20cultura%20da%20soja.pdf>. Acesso em: 03 abril. 2024.

FIEGENBAUM, A. **Adaptação e implementação de controle em um robô gantry acionado pneumaticamente**. 2016. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2016. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/80f90aaa-026a-4ffc-a806-66039963e302>. Acesso em: 12 jun. 2025.

FLORES, P. M. **Modelagem matemática de um protótipo de atuador pneumático de cabo autoguiado**. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2018. Disponível em: <https://www.unijui.edu.br/estude/mestrado-e-doutorado/destaques-do-mestrado-e-doutorado/244-modelagem-matematica/29841-mestrado-em-modelagem-matematica-realiza-defesa-de-dissertacao-no-campus-panambi>. Acesso em: 12 jan. 2024.

FURST, F. L.; DE NEGRI, V. J. **Projeto de sistemas hidráulicos de controle de posição**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 125 p. (Apostila). Disponível em: <https://laship.ufsc.br/site/documentos/apostilas/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

JUNIOR, C. A. C. **Desenvolvimento de um robô pneumático de 5 graus de liberdade com controlador não linear com compensação de atrito**. 2014. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GERVINI, V. I. **Modelagem e controle de um servoposicionador pneumático via redes neurais**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/110080>. Acesso em: 26 ago. 2024.

GOERGEN, R. **Modelagem matemática de uma bancada robotizada para reabilitação física com acionamento pneumático e controle de força**. 2021. 195 f. Tese (Doutorado em Modelagem Matemática) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2021. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/1519d193-f550-4ec5-8608-194e43a71987>. Acesso em: 9 jun. 2024.

GONELI, A. L. D. **Novas tecnologias aplicadas à pós-colheita para mitigação de perdas qualitativas e quantitativas**. In: *Perdas em transporte e armazenagem de grãos*. Brasília: Embrapa, 2021. p. 75-93.

GRASSI, M. V. **Desenvolvimento e aplicação de um sistema de visão para robô industrial de manipulação**. 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HACKENHAAR, N. M.; HACKENHAAR, C.; ABREU, Y. V. D. **Robotic in agriculture**. *Interações* (Campo Grande), v. 16, n. 1, p. 119-129, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/Pbb7RB3wzTypx6GH4fYKMFQ/?lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2024.

HUANG, C.; CAI, D.; WANG, W.; LI, J.; YANG, Z. **Development of an automatic control system for a hydraulic pruning robot**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 214, art. 108329, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal — PAM 2019: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INAMASU, R. Y.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P. **Agricultura de precisão e agricultura digital**. *TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, n. 20, p. 17-36, jul./dez. 2019. DOI: 10.23925/1984-3585.2019i20p17-36.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1219-1:2012**, Fluid power systems and components, Graphic symbols and circuit diagrams, Part 1: Graphical symbols. Geneva: ISO, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6358-1:2013**, Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids - Part 1: General rules and test methods for steady-state flow. Geneva: ISO, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9283:1998**, Manipulating industrial robots, Performance criteria and related test methods. Geneva: ISO, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8373:2021**, Robotics, Vocabulary. Geneva: ISO, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 24333:2009**, Cereals and cereal products, Sampling. Geneva: ISO, 2009.

JUNG, E.-J.; KIM, J. H.; JIN, M. **Kinematic analysis of hydraulic manipulators for a disaster response robot**. In: *International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (Urai)*, 14., 2017, Jeju. IEEE, 2017. p. 208-209. DOI: 10.1109/URAI.2017.7992714.

KOIVUMÄKI, J.; ZHU, W.-H.; MATTILA, J. **Energy-efficient and high-precision control of hydraulic robots**. *Control Engineering Practice*, v. 85, p. 176-193, 2019. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.12.013.

LOCATELI, C. C. **Modelagem e desenvolvimento de um sistema de controle de posição pneumático com acionamento por válvulas on/off**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. **Armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Bio Geneziz, 2002. p. 117-155.

LUCHE, G. B. **Otimização de trajetórias em relação ao tempo em manipulador hidráulico**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MACHADO, C. L. D. E. **Controlador em cascata com adaptação de parâmetros para robôs hidráulicos**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MACHADO, L. B. **Concepção de um mecanismo autoalinhante para estufas agrícolas robotizadas**. 2022. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/240990>. Acesso em: 29 set. 2023.

MARQUES, B. de A. **Considerações ambientais e exergéticas na fase de pós-colheita de grãos: estudo de caso do Estado do Paraná**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MELLO, M. S. V. **Desempenho e melhorias em robô manipulador**. 2016. Trabalho de Graduação (Engenharia de Controle e Automação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MERRITT, H. E. **Hydraulic control systems**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1967. 358 p.

MIOTTO, F. E. M. **Modelagem matemática da dinâmica do atrito e sua aplicação no controle ótimo de um atuador hidráulico**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

NASA. **Technology Readiness Levels (TRL)**. National Aeronautics and Space Administration, 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 5ª edição, Editora Pearson, Prentice-Hall, 2011.

PARK, C.; HAN, S.; DOH, M.; *et al.* **Object inserting operation with admittance control of a 4-DOF hydraulic manipulator with rotary vane actuators**. In: *International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 19., 2022. p. 82-87.

PEREIRA, P. I. I. **Análise teórico-experimental de controladores para sistemas hidráulicos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88367>. Acesso em: 24 nov. 2024.

PÖRSCH, M. R. M. H. **Modelagem matemática de um robô pneumático do tipo gantry para aplicações agrícolas em estufas**. 2020. Tese (Doutorado em Modelagem Matemática) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2020. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/c350afe8-5679-4736-92bb-f7438a5cb356>. Acesso em: 18 set. 2024.

QUIRINO, J. R. **Avaliação de equipamentos e preparo de amostras para classificação de grãos de soja**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) — Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2017.

RICHTER, R. R. M. **Modelagem matemática e controle de posição de um atuador linear acionado pneumaticamente**. 2013. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013. Disponível em: <http://www.simmer.unijui.edu.br/Dissertacoes/Dissertação%20Rozimerli%20Raquel%20Milbeir%20Richter.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2025.

RITTER, C. S. **Modelagem matemática das características não lineares de atuadores pneumáticos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/16267/14949>. Acesso em: 12 jul. 2024.

RODRIGUES, L. A. H.; DE NEGRI, V. J.; VALDIERO, A. C. **Principais parâmetros de válvulas direcionais proporcionais aplicadas em sistemas hidráulicos de controle**. *Revista de Automação e Tecnologia da Informação*, Florianópolis, v. 2, n. 2, p. 85-90, 2003.

ROMANO, V. F. **Robótica industrial**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004. Disponível em: <https://aima.cs.berkeley.edu/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

SANTOS, C. da S. dos. **Modelagem matemática de um robô pneumático com dois graus de liberdade**. 2014. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — UNIJUÍ, Ijuí, 2014.

SARMANHO JUNIOR, Carlos Arthur Carvalho. **Desenvolvimento de um robô pneumático de 5 graus de liberdade com controlador não linear com compensação de atrito**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/110046>. Acesso em: 08 dez 2024.

SAUR. **Coletor de amostras de cereais 180°**. Panambi-RS: Saur Equipamentos S.A., 2024. Disponível em: <https://www.saur.com.br/pt/agricola/coletores-de-amostras/coletor-de-amostras-de-cereais-180>. Acesso em: 05 fev. 2024.

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Grãos: armazenamento de milho, soja, feijão e café**. Brasília: Senar, 2018.

SERVITECH EXPRESS. **Grain sampling probe DV Stork Rail**. 2024. Disponível em: <https://www.servitechexpres.ro/en/grain-processing/sonda-pentru-prelevare-cereale-dv-stork-rail/>. Acesso em: 25 mar. 2024.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modeling and control of robot manipulators**. New York: McGraw-Hill, 1996.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Robotics: modelling, planning and control**. London: Springer, 2010.

SILVA, J. L. N. **Projeto e realização de controle fuzzy para manipulador industrial tipo SCARA e sua avaliação de desempenho à luz da norma ISO 9283**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Teleinformática) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SPONG, Mark W.; HUTCHINSON, Seth; VIDYASAGAR, Mathukumalli. **Robot modeling and control**. New York: Wiley, 2006.

SUZUMORI, K.; FAUDZI, A. A. **Trends in hydraulic actuators and components in legged and tough robots: a review**. *Advanced Robotics*, v. 32, n. 9, p. 458-476, 2018.

SZPAK, R. **Análise teórico-experimental do comportamento das pressões em posicionadores hidráulicos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

TOUT POUR LE GRAIN. **Tout pour le Grain**. 2024. Disponível em: <https://www.toutpourlegrain.fr/fr/>. Acesso em: 12 fev. 2024.

VALDIERO, A. C.; **Controle de robôs hidráulicos com compensação de atrito**. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

VALDIERO, A. C. **Modelagem matemática de robôs hidráulicos**. Ijuí: Editora Unijuí, 2012.

VALDIERO, A. C. **Projeto e implementação de controladores para atuadores hidráulicos**. Relatório de pesquisa. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Robótica, 2001.

VALDIERO, A. C.; CERETTA, A. G.; CARVALHO, B. K. S.; BAAL, E.; GÓMEZ ARCOS, R. A. **Oportunidades e desafios para a robotização da coleta de amostras de grãos**. In: *Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC*, Brasília, 2024. 10 p.

VALDIERO, A. C.; RASIA, L. A. **Gestão de projetos de pesquisa e desenvolvimento de produtos mecatrônicos**. In: *Desafios em engenharia industrial*. 1 ed. Ijuí: UNIJUÍ, 2016, v.1, p. 89-106.

VIGOLO, V. **Estudo teórico-experimental para auxílio no dimensionamento de sistemas de atuação pneumáticos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://lship.ufsc.br/site/2018-estudo-teorico-experimental-para-auxilio-no-dimensionamento-de-sistema-de-atuacao-pneumaticos/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

VON LINSINGEN, I.; AMARAL, A. R. **Fundamentos de termociência**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2016. 310 p.

WEIDLICH, G. H. **Desenvolvimento e aplicação de um dispositivo para análise de exatidão e repetitividade em robôs industriais**. 2006. Trabalho acadêmico — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

WHITAKER, T. B.; SLATE, A. B.; DOKO, M. B.; MAESTRONI, B. M.; CANNAVAN, A. **Sampling procedures to detect mycotoxins in agricultural commodities**. Dordrecht: Springer, 2011. 58 p.

APÊNDICE A – MODELAGEM CINEMÁTICA DO ROBÔ SCARA

Este apêndice apresenta o desenvolvimento completo da modelagem cinemática do manipulador robótico utilizado nesta pesquisa. O robô possui três graus de liberdade, organizados segundo a arquitetura RRP, com duas juntas de revolução e uma junta prismática.

A.1 PARÂMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

A modelagem cinemática começa com a definição dos parâmetros de Denavit-Hartenberg, que relacionam os sistemas de coordenadas de cada elo por meio de quatro variáveis: θ_i , d_i , a_i e α_i . A Tabela A.1 apresenta os parâmetros adotados para o robô.

Tabela A.1 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô SCARA.

Elo (i)	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	$d_1 = 0$	$a_1 = l_1 = 0,5 \text{ m}$	$\alpha_1 = 0$
2	θ_2	$d_1 = 0$	$a_2 = l_2 = 0,56 \text{ m}$	$\alpha_2 = 0$
3	0	$0 \leq d_3 \leq 0,2 \text{ m}$	0	$\alpha_3 = 0$

Fonte: Autor (2025)

A.2 MATRIZES DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEA

A construção das matrizes de transformação homogêneas permite representar a posição e a orientação de cada elo em relação ao anterior, considerando as rotações e translações associadas aos parâmetros de Denavit-Hartenberg. A multiplicação dessas matrizes fornece a posição do efetuador final no espaço cartesiano em função das variáveis articulares, permitindo a análise da configuração do robô para diferentes valores de θ_1 , θ_2 e d_3 . A matriz de transformação homogênea (A.1), conforme a convenção de Denavit-Hartenberg é dada por:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (\text{A.1})$$

A primeira matriz de transformação homogênea, A_1 (A.2), estabelece a relação entre o sistema de coordenadas da base e o primeiro elo. Essa matriz é determinada pelos parâmetros θ_1 , d_1 , a_1 e α_1 , em que θ_1 representa a rotação da primeira junta, $d_1 = 0$ indica a ausência de deslocamento linear, $a_1 = l_1$ corresponde ao comprimento do elo e $\alpha_1 = 0$ define a ausência de rotação entre os elos no plano (x, y) . Portanto, a matriz A_1 é:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & l_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & l_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (\text{A.2})$$

A matriz de transformação seguinte, A_2 (A.3), define a relação entre o primeiro e o segundo elo. Os parâmetros utilizados são θ_2 , d_2 , a_2 e α_2 , sendo θ_2 o ângulo de rotação da junta, $d_2 = 0$ a translação nula, $a_2 = l_2$ o comprimento do elo e $\alpha_2 = 0$ a ausência de inclinação angular. A matriz de transformação para o segundo elo é:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & l_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (\text{A.3})$$

A matriz A_3 (A.4) representa a transformação associada à junta prismática, que é responsável pelo deslocamento linear do efetuador ao longo do eixo z . Como essa junta não possui rotação associada, sua matriz de transformação é definida por:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (\text{A.4})$$

A.3 CINEMÁTICA DIRETA

A matriz de transformação total T_0^3 , que descreve a posição e orientação do efetuador final em relação a base, é obtida por meio da multiplicação entre as três matrizes (A_1 , A_2 e A_3), conforme a Equação (A.5):

$$T_0^3 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (\text{A.5})$$

O resultado da multiplicação é apresentado na em (A.6), que representa a matriz de transformação total.

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (\text{A.6})$$

A última coluna da matriz T_0^3 fornece as Equações (A.7), (A.8) e (A.9), que descrevem a posição (x, y, z) do efetuador final no espaço cartesiano.

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{A.7})$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{A.8})$$

$$z = -d_3 \quad (\text{A.9})$$

A.4 CINEMÁTICA INVERSA

A cinemática inversa consiste em determinar os valores das variáveis articulares θ_1 , θ_2 e d_3 a partir de uma posição desejada do efetuador (x, y, z) . d_3 é definido diretamente pela Equação (A.10).

$$d_3 = -z_d \quad (\text{A.10})$$

A determinação dos ângulos θ_1 e θ_2 exige, primeiramente, o cálculo da distância r , que corresponde à projeção do efetuador no plano (x, y) . Essa distância representa o segmento de reta entre a origem do manipulador e o ponto (x_d, y_d) , sendo obtida pela Equação (A.11):

$$r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (\text{A.11})$$

Para que a posição desejada seja atingível, essa distância deve estar dentro do alcance do robô, ou seja, $r \leq l_1 + l_2$. Caso essa condição não seja satisfeita, o ponto desejado está fora da área de trabalho, impossibilitando a obtenção de uma solução real para os ângulos articulares.

O cálculo de θ_2 utiliza a Lei dos Cossenos, que relaciona os comprimentos dos elos e a distância r . Aplicando essa relação ao triângulo formado pelos elos do robô e o ponto (x_d, y_d) , obtém-se a Equação (A.12):

$$\cos(\theta_2) = \frac{r^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (\text{A.12})$$

O valor de θ_2 é então determinado por (A.13):

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right) \quad (\text{A.13})$$

O ângulo θ_1 é obtido a partir da soma de dois componentes geométricos dados pelas Equações (A.14) e (A.15):

- **Ângulo ϕ :** Ângulo entre o eixo x e o vetor que conecta a origem ao ponto (x_d, y_d) :

$$\phi = \text{atan2}(y_d, x_d) \quad (\text{A.14})$$

- **Ângulo α :** Ângulo interno do triângulo formado pelos elos e o ponto (x_d, y_d) , calculado por:

$$\alpha = \text{atan2}(l_2 \sin(\theta_2), l_1 + l_2 \cos(\theta_2)) \quad (\text{A.15})$$

Assim, o ângulo θ_1 é determinado pela diferença entre ϕ e α . Dessa forma, a Equação (A.16) define θ_1 é expressa por:

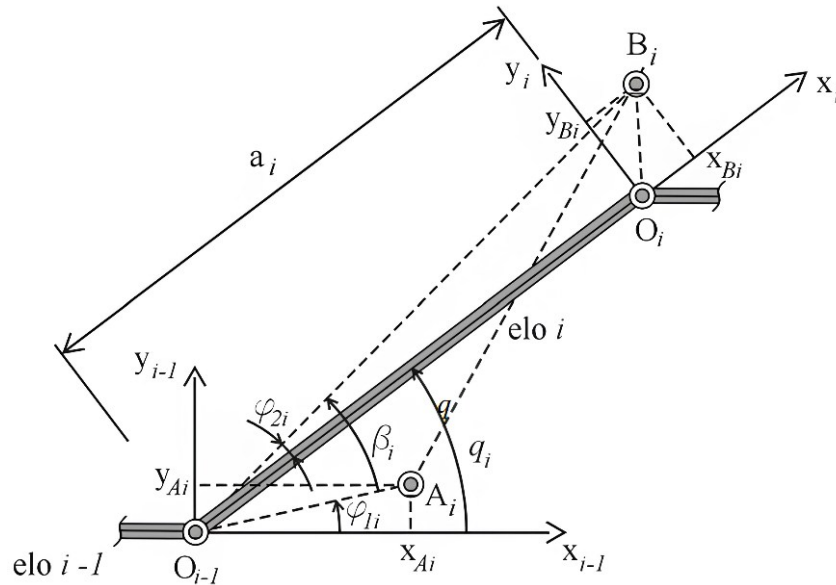
$$\theta_1 = \text{atan2}(y_d, x_d) - \text{atan2}(l_2 \sin(\theta_2), l_1 + l_2 \cos(\theta_2)) \quad (\text{A.16})$$

Com a obtenção de θ_1 , θ_2 e d_3 , define-se a cinemática inversa, estabelecendo a relação entre a posição desejada do efetuador e os parâmetros articulares necessários para que o robô alcance essa posição no espaço de trabalho.

B.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

A Figura B.2 ilustra a localização geométrica dos pontos A_i e B_i em relação ao sistema de coordenadas de Denavit-Hartenberg, possibilitando a dedução das equações de transmissão.

Figura B.2 – Localização do atuador i em relação ao elo anterior e ao elo acionado.



Fonte: Valdiero (2005)

Com base nisto, observa-se que os ângulos φ_1 e φ_2 são características geométricas constantes para um robô. O ângulo φ_{1i} refere-se à inclinação entre o eixo x_{i-1} e o segmento $\overline{O_{i-1}A_i}$, enquanto o ângulo φ_{2i} se relaciona com a inclinação entre os eixos x_i e o segmento $\overline{O_{i-1}B_i}$. Esses ângulos são definidos pelas Equações (B.1) e (B.2).

$$\varphi_{1i} = \arctan2\left(\frac{y_{Ai}}{x_{Ai}}\right) \quad (B.1)$$

$$\varphi_{2i} = \arctan2\left(\frac{y_{Bi}}{a_i + x_{Bi}}\right) \quad (B.2)$$

As coordenadas (x_{Ai}, y_{Ai}) e (x_{Bi}, y_{Bi}) correspondem à definição da posição do atuador i e são calculadas para qualquer posição do robô. A distância a_i representa a distância normal entre os eixos das juntas. Além disso, a interpretação da Tabela B.1 pode ser associada à Equação (B.3) a qual:

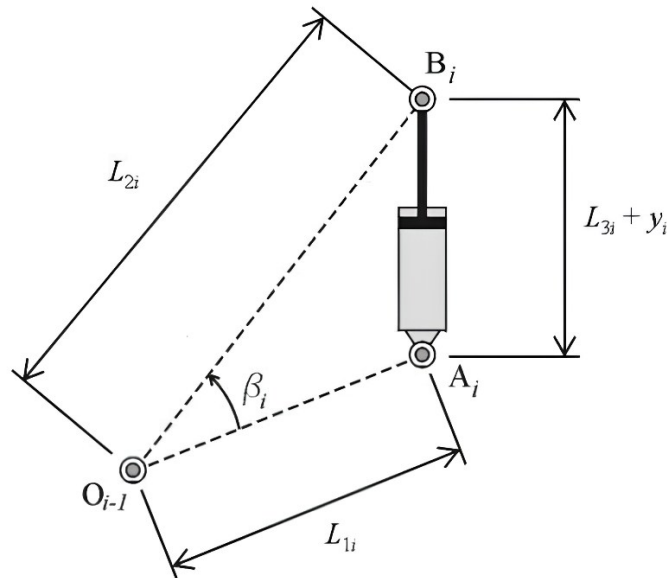
$$\beta_i = q_i + \varphi_{2i} - \varphi_{1i} = q_i - (\varphi_{2i} - \varphi_{1i}) = q_i - \Delta\varphi_i \quad (\text{B.3})$$

no qual β_i é o ângulo formado pelos segmentos $\overline{O_{i-1}A_i}$ e $\overline{O_{i-1}B_i}$. A variável da junta (q_i) segue a convenção Denavit-Hartenberg. Além disso, o parâmetro construtivo $\Delta\varphi_i$ é determinado por meio de uma subtração entre os valores específicos de cada configuração.

B.3 LEI DOS COSSENOS E FUNÇÃO DE TRANSMISSÃO

Com base na geometria da Figura B.3, no qual é representado o triângulo formado pelos pontos O_{i-1} , A_i e B_i ,

Figura B.3 – Triângulo formado pelos pontos O_{i-1} , A_i e B_i .



Fonte: Valdiero (2005)

A partir da lei dos cossenos, aplicada ao triângulo na dedução geométrica, chega-se diretamente à função expressa na Equação (B.4).

$$f_{q \rightarrow y}(q_i) = \sqrt{L_{1i}^2 + L_{2i}^2 - 2|L_{1i}||L_{2i}|\cos(q_i - \Delta\varphi_i)} - L_{3i} \quad (\text{B.4})$$

Os parâmetros L_{1i} , L_{2i} e $\Delta\varphi_i$ são definidos pelas Equações (B.5), (B.6) e (B.7), que fornecem as relações matemáticas necessárias para a análise.

$$L_{1i} = \overline{O_{i-1}A_i} = \sqrt{x_{Ai}^2 + y_{Ai}^2} \quad (\text{B.5})$$

$$L_{2i} = \overline{O_{i-1}B_i} = \sqrt{(a_i + x_{Bi})^2 + y_{Bi}^2} \quad (\text{B.6})$$

$$\Delta\varphi_i = \varphi_{1i} - \varphi_{2i} \quad (\text{B.7})$$

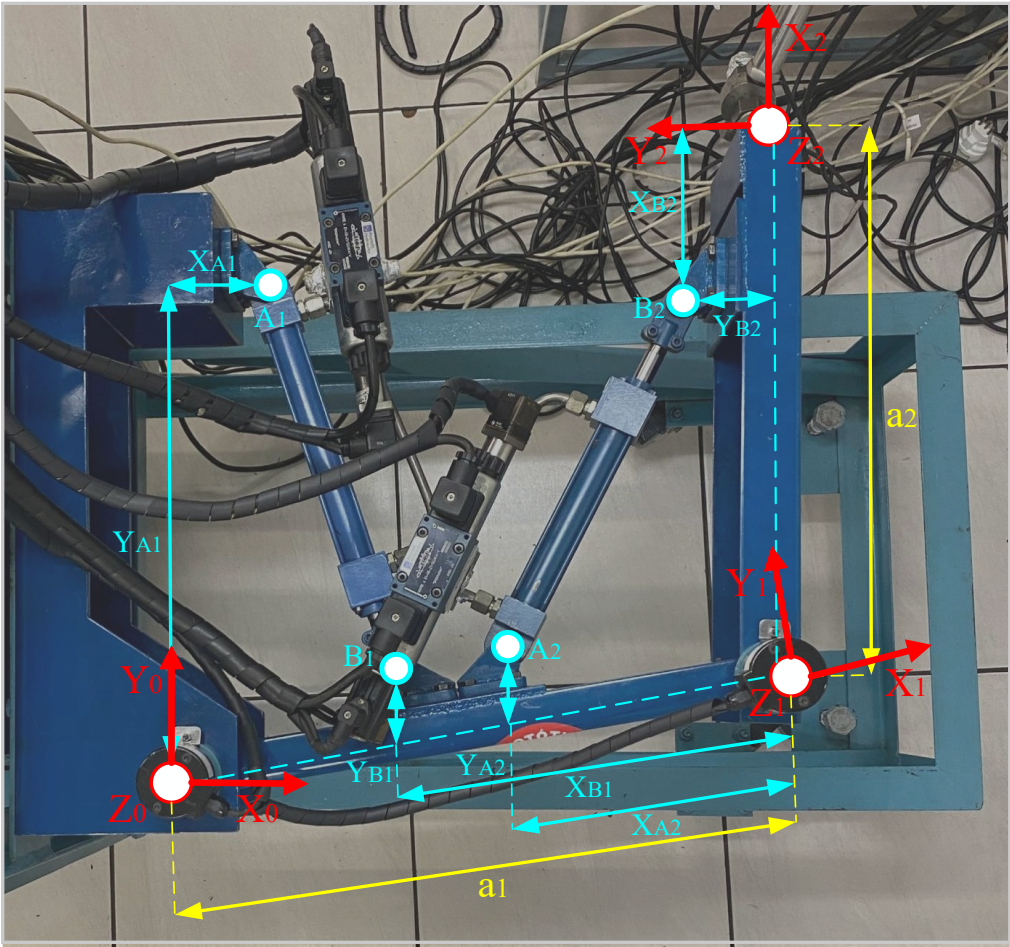
O parâmetro L_{3i} representa o comprimento do atuador, ou seja, é o segmento $\overline{A_iB_i}$ em uma posição do atuador linear no qual o deslocamento y_i é convencionado como nulo. Pode-se convencionar que $y_i = 0$ corresponda à metade do curso total do atuador. Dessa forma, ao definir o ponto central do deslocamento, fica mais fácil calcular o comportamento do atuador ao longo de seu curso, considerando que ele pode variar igualmente para os dois lados a partir dessa posição central.

Com base na equação deduzida a partir do triângulo, obtém-se uma relação direta entre a variação do comprimento do atuador e a variação correspondente no deslocamento da junta, expressa pela Equação (B.8):

$$\frac{\partial y_1}{\partial q_1} = \bar{J}_i = \frac{L_{1i}L_{2i}\sin(q_i - \Delta\varphi_i)}{\sqrt{L_{1i}^2 + L_{2i}^2 - 2L_{1i}L_{2i}\cos(q_i - \Delta\varphi_i)}} \quad (\text{B.8})$$

em que a função $\bar{J}_i$ estabelece a relação entre a velocidade $\dot{y}_i$ do êmbolo do atuador i e a taxa de variação das juntas, $\dot{q}_i$, com base nos parâmetros construtivos e na coordenada da junta. Essa equação permite a construção da matriz Jacobiana do atuador, para analisar o comportamento dinâmico do sistema. Os parâmetros e valores são apresentados na Tabela B.1 e ilustrados na Figura B.4. A terceira junta do robô, por ser prismática, não é considerada nessa análise.

Figura B.4 – Vista do mecanismo do manipulador com a indicação dos parâmetros de localização dos atuadores de acordo com D-H.



Fonte: Autor (2024)

Tabela B.1 – Parâmetros de localização dos atuadores em relação à estrutura do manipulador robótico.

Parâmetros	Atuador 1	Atuador 2
Posição do ponto A_i	$X_{A1} = 0,094$ $Y_{A1} = 0,040$	$X_{A2} = 0,188$ $Y_{A2} = 0,066$
Posição do ponto B_i	$X_{B1} = 0,300$ $Y_{B1} = 0,066$	$X_{B2} = 0,115$ $Y_{B2} = 0,071$
Distância entre os pontos A_i e B_i para o êmbolo posicionado no meio do curso	$L_{31} = 0,470$	$L_{32} = 0,405$

Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

APÊNDICE C – MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE ATUAÇÃO HIDRÁULICO

Este apêndice apresenta a dedução detalhada do modelo dinâmico que descreve o comportamento de um sistema de atuação hidráulico composto por uma válvula direcional proporcional assimétrica e um cilindro hidráulico assimétrico, conforme aplicado ao manipulador robótico desenvolvido neste trabalho. A modelagem foi baseada nas abordagens propostas por Valdiero (2005, 2012), Szpak (2008), Muraro (2010), Destro (2014) e Furst e De Negri (2002), com o objetivo de representar a dinâmica do sistema de forma precisa.

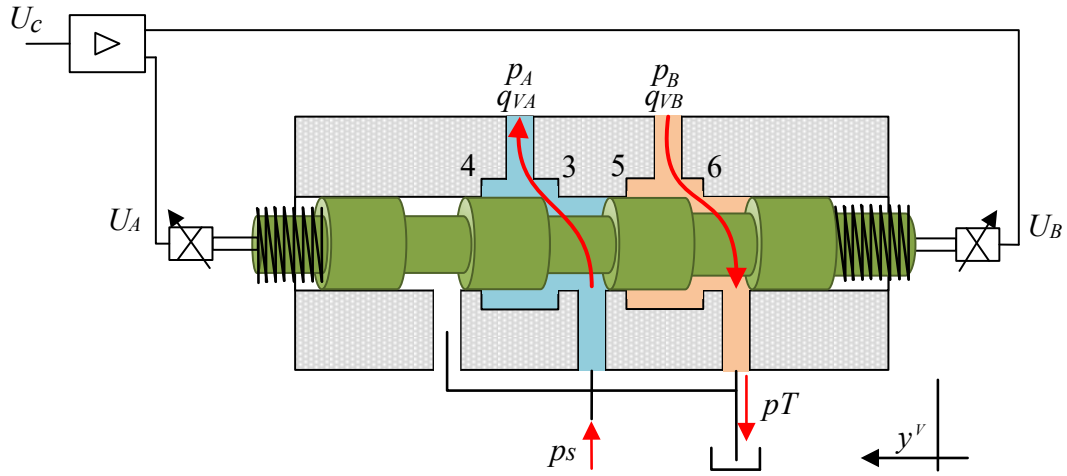
Segundo Valdiero (2012) em um sistema hidráulico, o fluido é fornecido por uma Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico (UPCH), responsável por manter a pressão e a vazão dentro dos parâmetros estabelecidos. A aplicação de uma tensão de controle (U_c) nos solenoides proporcionais da válvula provoca o deslocamento do carretel (y^V), abrindo passagens que direcionam o fluido para uma câmara do cilindro, enquanto o fluido da outra câmara retorna ao reservatório. A diferença de pressão entre as câmaras gera uma força que move a haste cilindro, resultando no deslocamento (y^A).

O modelo não-linear da válvula direcional proporcional assimétrica descreve o comportamento da válvula no controle da vazão de fluido, enquanto o modelo não-linear do cilindro hidráulico assimétrico trata da conversão dessa vazão em movimento linear da haste, levando em conta as dinâmicas de pressão e forças atuantes.

C.1 MODELO NÃO-LINEAR DA VÁLVULA DIRECIONAL PROPORCIONAL ASSIMÉTRICA HIDRÁULICA

A dinâmica da válvula é modelada por meio de duas equações: uma que descreve a dinâmica de segunda ordem entre a tensão de entrada e o deslocamento do carretel, e outra que representa a vazão nos orifícios, obtida através da equação de Bernoulli (PEREIRA, 2006). A Figura C.1 apresenta um desenho esquemático do carretel da válvula de 4 vias, no qual estão indicados os principais termos das equações da modelagem matemática.

Figura C.1 – Desenho esquemático do carretel da válvula de 4 vias.



Fonte: Adaptado de Szpak (2008)

Os esforços necessários para movimentar o carretel da válvula incluem vencer forças inerciais, atrito entre o carretel e a válvula, molas de centralização e forças devido ao escoamento do fluido pelos orifícios e câmaras da válvula (DE NEGRI, 2001). Esses fatores influenciam a dinâmica de posicionamento do carretel, porém, é possível simplificar o modelo utilizando um sistema de segunda ordem, caracterizado pelos parâmetros de frequência natural e razão de amortecimento (MURARO, 2010). A Equação (C.1) representa a dinâmica de segunda ordem do carretel da válvula.

$$K_{RP} \cdot U_c = \frac{1}{(\omega_n^V)^2} \cdot \frac{d^2 y^V}{dt^2} + \frac{2\xi^V}{\omega_n^V} \cdot \frac{dy^V}{dt} + y^V \quad (C.1)$$

em que o termo K_{RP} representa o ganho em regime permanente do carretel, y^V é a posição do carretel, ω_n^V é a frequência natural não amortecida da válvula, ξ^V é a razão de amortecimento adimensional da válvula, e U_c corresponde ao sinal de comando aplicado à válvula.

Isolando y^V e dividindo por $(\omega_n^V)^2$ tem-se (C.2):

$$y^V = \frac{K_{RP}}{\left(\frac{1}{(\omega_n^V)^2} s^2 + \frac{2\xi^V}{\omega_n^V} s + 1 \right)} \cdot U_c \quad (C.2)$$

Os parâmetros ξ^V e ω_n^V podem ser obtidos diretamente em catálogos de fabricantes, com base na curva de resposta da válvula para entradas em degrau ou a partir do gráfico de resposta em frequência, como no gráfico de Bode.

Pereira (2006) avaliou o comportamento do sistema com e sem a consideração da dinâmica da válvula. Os resultados indicaram que a inclusão dessa dinâmica influencia diretamente na resposta do sistema, resultando em maior amortecimento, aumento do tempo de subida e de acomodação. O autor justificou esse comportamento pelo fato de que, em seu caso, a frequência natural da válvula era menor do que a do cilindro. Se a dinâmica da válvula for desconsiderada, assume-se que ao aplicar um sinal de tensão à válvula, o carretel se desloca de forma instantânea, sem considerar os atrasos ou a inércia do sistema, o que não reflete a realidade observada.

Para representar a equação de vazão em orifícios utiliza-se a equação de Bernoulli, detalhada em Valdiero (2001; 2005), que estabelece a conservação da energia ao longo de um escoamento, permitindo a conversão entre as energias cinética, de pressão e potencial. Esta equação é não-linear e pode ser aplicada no estudo de válvulas de controle. Nessas válvulas, os orifícios que regulam a vazão de fluido são definidos pelo deslocamento do carretel, movendo os ressalto em relação aos seus respectivos pórticos (SZPAK, 2008). Com isto, a vazão é expressa conforme a Equação (C.3) (MERRITT, 1967; DE NEGRI, 2001):

$$qv = Cd \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (C.3)$$

em que Cd é o coeficiente de descarga e A_0 representa a área do orifício.

Portando, a vazão para $y^V \geq 0$ é expressa pelas equações:

$$q_{VA} = cd \cdot A_3 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_s - p_A)} - Cd \cdot A_4 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_A - p_t)} \quad (C.4)$$

$$q_{VB} = cd \cdot A_6 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_B - p_t)} - Cd \cdot A_5 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_s - p_B)} \quad (C.5)$$

e para $y^V \leq 0$:

$$q_{VA} = cd.A_4.\sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_A - p_t)} - Cd.A_3.\sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_s - p_A)} \quad (C.6)$$

$$q_{VB} = cd.A_5.\sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_s - p_B)} - Cd.A_6.\sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_B - p_t)} \quad (C.7)$$

em que q_{VA} é a vazão na saída da válvula na via A; q_{VB} é a vazão na saída da válvula na via B, $A_{i(i=1,2,3...)}^V$ representa a área dos orifícios de passagem da válvula, ρ é a massa específica do fluido, p_s é a pressão de suprimento, p_A é a pressão na linha A da válvula, p_B é a pressão na linha B e p_t é a pressão de retorno.

No entanto, De Negri (2001) destaca a dificuldade de utilizar estas equações para representar a vazão em um orifício de controle, pois os parâmetros Cd e A_i são difíceis de obter, muitas vezes exigindo o desmonte da válvula. Furst (2001) propõe uma solução para esse problema, sugerindo o uso de equações na qual a vazão nos orifícios da válvula pode ser representada a partir de parâmetros encontrados em dados e curvas de catálogo. Utilizando os dados de queda de pressão total e vazão nominal, é possível determinar o valor do coeficiente de vazão com as equações a seguir:

$$q_{VCn} = Kv.\sqrt{\Delta p_{Tn}} \quad (C.8)$$

$$Kv = \frac{q_{VCn}}{\sqrt{\Delta p_{Tn}}} \quad (C.9)$$

em que q_{VCn} representa a vazão nominal na válvula, K_v é o coeficiente de vazão total da válvula e Δp_{Tn} corresponde à diferença de pressão total nominal aplicada à válvula.

Pereira (2006) orienta que se deve prestar atenção à forma como a queda de pressão na válvula é definida no catálogo, pois pode corresponder à queda de pressão total na válvula (P-A e P-B ou P-B e A-T) ou à queda de pressão parcial (P-A ou B-T ou P-B ou A-T). O coeficiente Kv é válido para uma diferença de pressão total na válvula (Δp_T). Se o catálogo apresentar dados para uma diferença de pressão parcial (Δp_p), utiliza-se o coeficiente de vazão parcial (Kv_p) (FURST, 2001).

$$q_{VCn} = Kv \cdot \frac{U_c}{U_n} \sqrt{\Delta p_{Tn}} = Kv_p \cdot \frac{U_c}{U_n} \cdot \sqrt{\Delta p_p} \quad (C.10)$$

Com o intuito de melhor representatividade e desempenho do modelo matemático não-linear do atuador hidráulico, é considerado a equação capaz de descrever a vazão e o vazamento interno na válvula. Portanto, para $y^A \geq 0$ tem-se:

$$q_{VA} = q_{V3} - q_{V4} \quad (C.11)$$

$$q_{VA} = \left(K_{VA} \cdot \frac{U_c}{U_{cn}} + K_{VinA} \right) \cdot \sqrt{p_S - p_A} - K_{VinA} \sqrt{p_A - p_T} \quad (C.12)$$

$$q_{VB} = q_{V6} - q_{V5} \quad (C.13)$$

$$q_{VB} = \left(K_{VB} \cdot \frac{U_c}{U_{cn}} + K_{VinB} \right) \cdot \sqrt{p_B - p_T} - K_{VinB} \sqrt{p_S - p_B} \quad (C.14)$$

e para $y^A < 0$ tem-se:

$$q_{VA} = -q_{V4} + q_{V3} \quad (C.15)$$

$$q_{VA} = -\left(K_{VA} \cdot \frac{|U_c|}{U_{cn}} + K_{VinA} \right) \cdot \sqrt{p_A - p_T} + K_{VinA} \sqrt{p_S - p_A} \quad (C.16)$$

$$q_{VB} = -q_{V5} + q_{V6} \quad (C.17)$$

$$q_{VB} = -\left(K_{VB} \cdot \frac{|U_c|}{U_{cn}} + K_{VinB} \right) \cdot \sqrt{p_S - p_B} + K_{VinB} \sqrt{p_B - p_T} \quad (C.18)$$

em que K_{VA} e K_{VB} são os coeficientes de vazão parcial nas vias A e B da válvula, respectivamente; U_{cn} é a tensão nominal de operação; K_{VinA} e K_{VinB} representam os coeficientes de vazamento interno nas vias A e B da válvula, respectivamente.

C.2 MODELO NÃO-LINEAR DO CILINDRO HIDRÁULICO ASSIMÉTRICO

Os cilindros hidráulicos, também chamados de atuadores lineares, são os componentes responsáveis por executar o trabalho útil, produzindo movimento linear. Na modelagem do cilindro hidráulico, duas equações fundamentais são utilizadas: a equação do movimento (2ª Lei de Newton), que descreve a relação entre força, massa e aceleração, e a equação da continuidade, derivada do princípio de conservação da massa, que garante que a quantidade de fluido que entra e sai do cilindro seja consistentemente balanceada ao longo do tempo (FURST e DE NEGRI, 2002).

De forma geral, a movimentação do êmbolo do cilindro ocorre quando a força hidráulica, resultante da diferença de pressão nas câmaras A e B, supera a soma das forças de inércia, atrito, mola e pré-carga (MURARO, 2009). Assim, a equação do movimento do cilindro hidráulico é expressa conforme a Equação (C.19):

$$(p_A \cdot A_A) - (p_B \cdot A_B) = M_t \cdot \frac{d^2 y^A}{dt^2} + Kx \cdot y^A + F_g + F_{atr} + F_{prec} \quad (C.19)$$

na qual $(p_A \cdot A_A)$ representa a força gerada pela pressão p_A na área da câmara A, e $(p_B \cdot A_B)$ é a força correspondente na câmara B; F_g é a força gravitacional; F_{atr} corresponde à força de atrito no cilindro e nas guias da bancada; F_{prec} é a força da carga aplicada; Kx é a constante elástica da mola; M_t é a massa total do sistema.

A equação (C.19) apresentada anteriormente pode ser reescrita na forma da Equação (C.20) abaixo, com o objetivo de expressar a aceleração do sistema, dada por $\frac{d^2 y^A}{dt^2}$, que resulta da aplicação de uma força hidráulica ($F_H = p_A \cdot A_A - p_B \cdot A_B$) gerada pelo balanço de pressões nas câmaras do cilindro. É desprezada a força da gravitacional e a constante elástica da mola, visto que não há atuação dos mesmos sobre que o sistema em estudo.

$$\frac{d^2 y^A}{dt^2} = \frac{1}{M_t} ((p_A \cdot A_A) - (p_B \cdot A_B) - F_{atr} - F_{prec}) \quad (C.20)$$

A vazão que entra no cilindro é dada pela equação da continuidade (FURST e DE NEGRI, 2002). A Equação (C.21) estabelece que a diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída em um determinado volume de controle (V_C) é igual à taxa de variação do volume ao

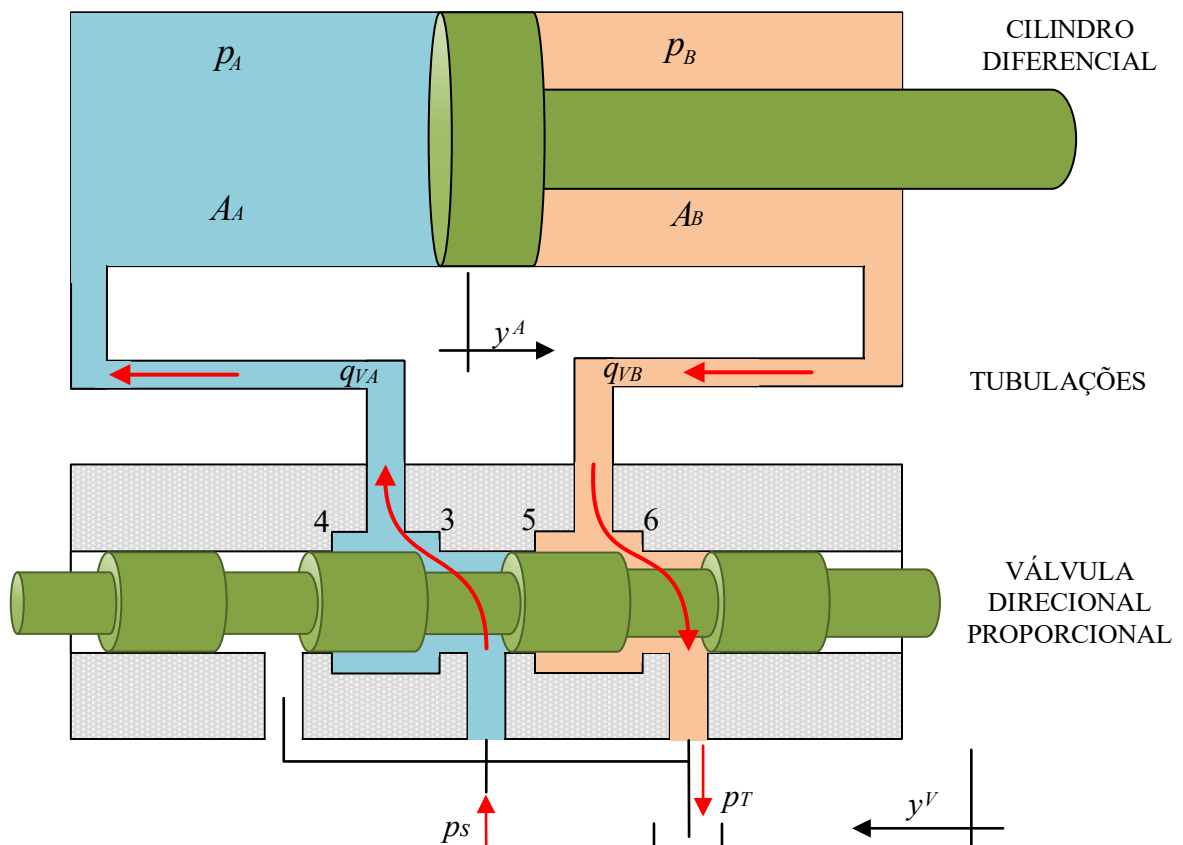
longo do tempo, acrescida da parte correspondente à expansão ou compressão do fluido dentro desse volume de controle.

$$q_{V1} - q_{V2} = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (C.21)$$

O módulo de elasticidade (β) compensa o efeito da pressão na variação da massa específica do fluido. No entanto, em muitas situações práticas, utiliza-se o módulo de elasticidade efetivo (β_e), pois ele leva em conta a variação da massa específica, a dilatação das tubulações e paredes do cilindro, e a presença de ar no fluido hidráulico.

Conforme demonstra a Figura C.2, para o caso do cilindro assimétrico, as vazões q_{VA} e q_{VB} não serão iguais em regime permanente, uma vez que suas áreas A_A e A_B são diferentes (SZPAK, 2008).

Figura C.2 – Representação do atuador hidráulico.



Fonte: Adaptado de Valdiero (2005)

As Equações (C.22) e (C.23) descrevem a vazão na câmara A e B do cilindro, composta por uma componente relacionada à velocidade (variação do volume), outra devido à compressibilidade e uma terceira devido ao vazamento interno.

$$q_{VA} = q_{vin} + \frac{dV_A}{dt} + \frac{V_A}{\beta_e} \frac{dp_A}{dt} \quad (C.22)$$

$$q_{VB} = q_{vin} + \frac{dV_B}{dt} - \frac{V_B}{\beta_e} \frac{dp_B}{dt} \quad (C.23)$$

Os volumes das câmaras, V_A e V_B , são dados em função dos volumes iniciais V_{A0} e V_{B0} , que já incluem os volumes das tubulações conectadas às saídas da válvula. Além disso, os volumes também consideram os volumes adicionais gerados pelo deslocamento y^A do êmbolo em relação à posição inicial de referência, resultando nas expressões (C.24) e (C.25):

$$V_A = V_{A0} + A_A \cdot y^A \quad (C.24)$$

$$V_B = V_{B0} - A_B \cdot y^A \quad (C.25)$$

O vazamento interno q_{vin} pode ser desprezado porque, normalmente, é muito pequeno quando comparado à vazão que entra no cilindro (SZPAK, 2008). A vazão de entrada na câmara A do cilindro é dada por (C.26) e isolando em função da derivada da pressão obtêm-se (C.27), portanto:

$$q_{VA} = A_A \frac{dy^A}{dt} + \frac{V_{A0} + A_A \cdot y^A}{\beta_e} \cdot \frac{dp_A}{dt} \quad (C.26)$$

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{\beta_e}{V_{A0} + A_A \cdot y^A} \left(-A_A \frac{dy^A}{dt} + q_{VA} \right) \quad (C.27)$$

E a vazão de saída da câmara B do cilindro é dada por (C.28), que isolando em função da derivada da pressão têm-se (C.29):

$$q_{VB} = A_B \frac{dy^A}{dt} - \frac{V_{B0} - A_B \cdot y^A}{\beta_e} \cdot \frac{dp_B}{dt} \quad (\text{C.28})$$

$$\frac{dp_B}{dt} = \frac{\beta_e}{V_{B0} - A_B \cdot y^A} \left(A_B \frac{dy^A}{dt} - q_{VB} \right) \quad (\text{C.29})$$

APÊNDICE D – MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE ATUAÇÃO PNEUMÁTICO

Este apêndice apresenta a modelagem matemática detalhada do sistema de atuação pneumático para o robô. O modelo é baseado nas leis fundamentais da física, com simplificações adotadas de acordo com a literatura técnica, utilizadas e apresentadas em Endler (2014), Goergen (2021), Vigolo (2018), Ritter (2010), entre outros. As equações deduzidas descrevem os principais fenômenos não-lineares associados à válvula proporcional e ao cilindro pneumático.

D.1 MODELO DA SERVOVÁLVULA PNEUMÁTICA

Para Beater (2007 *apud* VIGOLO, 2018), a modelagem de válvulas direcionais pneumáticas deve ser realizada de forma detalhada, incluindo parâmetros como características do solenoide, massa e atrito do carretel, volumes internos e propriedades dos orifícios de passagem do ar comprimido. No entanto, muitos desses parâmetros são difíceis de determinar e frequentemente não são fornecidos pelos fabricantes (VIGOLO, 2018). Nesse contexto, Beater (2007) propôs um modelo simplificado que utiliza apenas quatro parâmetros: dois relacionados à dinâmica do carretel (constantes de tempo) e dois ligados ao escoamento de ar comprimido pelos orifícios da válvula.

Assim como realizado no estudo de Vigolo (2018), para sistemas em que a frequência natural da válvula é significativamente superior à frequência natural do atuador pneumático (como ocorre no caso estudado), a dinâmica do carretel pode ser desconsiderada. Dessa forma, a modelagem é reduzida ao comportamento do escoamento de ar comprimido pelos orifícios.

O escoamento de ar comprimido em sistemas pneumáticos pode ser modelado a partir das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, assumindo-se um regime isentrópico, a partir de um reservatório de grande capacidade e passa por um orifício arredondado (PRITCHARD, 2011; BEATER, 2007). Nessa abordagem, a vazão mássica é calculada pela Equação (D.1):

$$q_m = A_0 p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \left\{ \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (D.1)$$

na qual A_0 é a área do orifício, p_1 e p_2 são as pressões a montante e jusante, respectivamente, R é a constante universal dos gases, T_1 é a temperatura absoluta a montante e γ é a razão dos calores específicos do gás.

A determinação prática dos parâmetros da Equação (D.1) apresenta desafios significativos. Para lidar com essas dificuldades, a norma ISO 6358-1:2013 (ISO, 2013) propõe um modelo simplificado baseado em dois parâmetros: condutância sônica (C) e razão de pressão crítica (b). A equação da vazão mássica através de um orifício, adotada pela norma, é:

$$q_m = \begin{cases} p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b} \right)^2} & \text{para } \frac{p_2}{p_1} > b \\ p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} & \text{para } \frac{p_2}{p_1} \leq b \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

nesta equação, C é a condutância sônica do componente pneumático, ρ_0 é a massa específica do ar nas condições de referência, T_0 e T_1 são as temperaturas de referência e a montante, respectivamente, e b é a razão de pressão crítica.

As condições de referência adotadas pela ISO 6358, segundo Vigolo (2018), são:

- Temperatura: $T_0 = 293,15$ K;
- Pressão: $P_0 = 100$ kPa;
- Densidade: $\rho_0 = 1,185$ kg/m³;
- Umidade relativa: 65%;
- Constante dos gases: $R = 288$ J/kg.K.

Conforme Endler (2014), a Equação (D.2) que descreve a vazão mássica é válida quando os orifícios estão totalmente abertos. Para situações em que uma válvula proporcional opera em aberturas parciais, ou seja, quando a tensão de referência aplicada é inferior à tensão máxima, é necessário incluir na equação o efeito da abertura relativa (A_{re}).

Incluindo a abertura relativa (A_{re}) na equação têm-se:

$$q_m = \begin{cases} A_{re} p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b} \right)^2} & \text{para } \frac{p_2}{p_1} > b \\ A_{re} p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} & \text{para } \frac{p_2}{p_1} \leq b \end{cases} \quad (D.3)$$

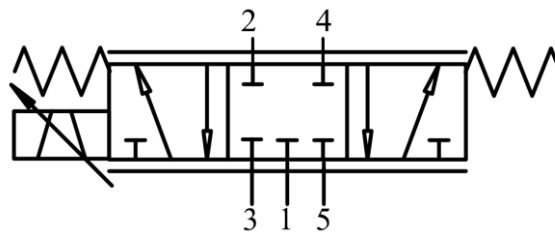
A relação entre a abertura relativa (A_{re}) e a tensão aplicada à válvula proporcional pode ser determinada por meio de experimentos ou consultando informações disponíveis em catálogos de fabricantes. Para simplificar essa relação, utiliza-se uma constante de proporcionalidade entre ambas (K_U).

$$A_{re} = K_U U_{zm} \quad (D.4)$$

Essa formulação já inclui o efeito da zona morta presente na válvula, permitindo que o modelo descreva de forma mais fiel o comportamento dinâmico do sistema em condições reais de operação.

A Figura D.1 apresenta o desenho esquemático da válvula proporcional pneumática, com cinco portas numeradas conforme a norma: porta 1 (suprimento), portas 2 e 4 (vias de trabalho, conectadas às câmaras B e A do cilindro, respectivamente) e portas 3 e 5 (exaustões para o ambiente). Quando a válvula é acionada por uma tensão de comando positiva, o ar comprimido flui da porta 1 para a porta 4, alimentando a câmara A, enquanto o ar da câmara B é exaurido da porta 2 para a porta 3. Inversamente, quando a válvula é acionada por uma tensão negativa, o ar flui da porta 1 para a porta 2, pressurizando a câmara B, e o ar da câmara A é liberado da porta 4 para a porta 5 (ENDLER, 2014).

Figura D.1 – Desenho esquemático referente à válvula proporcional.



Fonte: Endler (2014)

Entretanto, conforme destacado por Locateli (2011), há situações em que o sentido da vazão pode se inverter em relação à tendência imposta pela tensão de comando, especialmente durante operações com altas cargas ou elevadas velocidades de deslocamento. Dessa forma, torna-se necessário considerar a modelagem da vazão mássica do ar nos dois sentidos de escoamento, ou seja, tanto no sentido da porta 4 para a porta 1, porta 3 para porta 2, porta 2 para porta 1, assim como da porta 5 para a porta 4.

Com isso, a aplicação da Equação (D.3) permite obter dois conjuntos de quatro equações que descrevem as vazões mássicas q_{mA} e q_{mB} nos diferentes sentidos de escoamento através dos orifícios da válvula proporcional.

$$q_{mA} = \begin{cases} U_{zm} K_U C p_A \rho_0 w \left(\frac{p_T}{p_A} \right), & \text{se } U_{zm} < 0 \text{ e } \frac{p_T}{p_A} \leq 1 \\ U_{zm} K_U C p_T \rho_0 w \left(\frac{p_A}{p_T} \right), & \text{se } U_{zm} < 0 \text{ e } \frac{p_T}{p_A} > 1 \\ U_{zm} K_U C p_s \rho_0 w \left(\frac{p_A}{p_s} \right), & \text{se } U_{zm} \geq 0 \text{ e } \frac{p_A}{p_s} \leq 1 \\ U_{zm} K_U C p_A \rho_0 w \left(\frac{p_s}{p_A} \right), & \text{se } U_{zm} \geq 0 \text{ e } \frac{p_A}{p_s} > 1 \end{cases} \quad (D.5)$$

e

$$q_{mB} = \begin{cases} U_{zm} K_U C p_s \rho_0 w \left(\frac{p_B}{p_s} \right), & \text{se } U_{zm} < 0 \text{ e } \frac{p_B}{p_s} \leq 1 \\ U_{zm} K_U C p_B \rho_0 w \left(\frac{p_s}{p_B} \right), & \text{se } U_{zm} < 0 \text{ e } \frac{p_B}{p_s} > 1 \\ U_{zm} K_U C p_B \rho_0 w \left(\frac{p_T}{p_B} \right), & \text{se } U_{zm} \geq 0 \text{ e } \frac{p_T}{p_B} \leq 1 \\ U_{zm} K_U C p_T \rho_0 w \left(\frac{p_B}{p_T} \right), & \text{se } U_{zm} \geq 0 \text{ e } \frac{p_T}{p_B} > 1 \end{cases} \quad (D.6)$$

D.2 MODELO DO CILINDRO PNEUMÁTICO ASSIMÉTRICO

A equação do movimento, derivada da aplicação da segunda lei de Newton ao conjunto formado pelo êmbolo e pela haste, é utilizada para realizar o balanço das forças que atuam no cilindro. Para o robô em estudo, a equação é expressa conforme a Equação (D.7).

$$p_A A_A - p_B A_B - F_{atr} + F_g = M \frac{d^2 y^A}{dt^2} \quad (D.7)$$

na qual F_{atr} é a força de atrito, F_g é a força da gravidade, e M é a massa total do conjunto haste, êmbolo e a carga em movimento.

O comportamento das pressões em um atuador pneumático é descrito pela aplicação da equação da continuidade em um volume de controle (VON LINSINGEN, 2016; VIGOLO, 2018). O princípio da conservação da massa em um volume de controle, no qual ocorre a passagem do fluido, é descrito por Fox e McDonald (1995), conforme expresso na Equação (D.8).

$$q_{m1} - q_{m2} = \frac{p}{RT} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{RT\gamma} \frac{dp}{dt} \quad (D.8)$$

em que q_{m1} representa a vazão mássica na entrada do volume de controle, q_{m2} é a vazão mássica na saída do volume de controle, V é o volume de controle, T corresponde à temperatura do volume de controle, $\gamma = C_p/C_v$ é a relação entre os calores específicos do gás, e R é a constante universal dos gases.

Desprezando os possíveis vazamentos e considerando a vazão mássica das câmaras A e B, assim como em Endler (2014), obtém-se as Equações (D.9) e (D.10).

$$q_{mA} = \frac{p_A}{RT_A} \frac{dV_A}{dt} + \frac{V_A}{RT_A\gamma} \frac{dp_A}{dt} \quad (D.9)$$

$$q_{mB} = -\frac{p_B}{RT_B} \frac{dV_B}{dt} - \frac{V_B}{RT_B\gamma} \frac{dp_B}{dt} \quad (D.10)$$

O volume total nas câmaras A e B do atuador pneumático é descrito pelas expressões (D.11) e (D.12).

$$V_A = V_{A0} + A_A y^A \quad (D.11)$$

$$V_B = V_{B0} + A_B (L - y^A) \quad (D.12)$$

em que V_{A0} e V_{B0} são os volumes mortos de ar na tubulação e nas extremidades das câmaras A e B, respectivamente, y^A é a posição do sistema de atuação, e L representa o curso total do

atuador. A taxa de variação desses volumes é $\dot{V}_A = A_A \dot{y}$ e $\dot{V}_B = -A_B \dot{y}$, no qual $\dot{y}$ é a velocidade do atuador. A temperatura do gás nas câmaras A e B do atuador foram consideradas iguais, assim $T_A = T_B = T$.

Ao substituir esses termos e isolar as variações de pressão, obtêm-se as Equações (D.13) e (D.14).

$$\dot{p}_A = -\frac{A_A \dot{y} \gamma}{V_{A0} + A_A y^A} p_A + \frac{RT \gamma}{V_{A0} + A_A y^A} q_{mA} \quad (\text{D.13})$$

$$\dot{p}_B = \frac{A_B \dot{y} \gamma}{V_{B0} + A_B (L - y^A)} p_B - \frac{RT \gamma}{V_{B0} + A_B (L - y^A)} q_{mB} \quad (\text{D.14})$$

APÊNDICE E – MODELO DE ATRITO DINÂMICO

O atrito representa uma das principais não linearidades presentes em sistemas de atuação hidráulicos e pneumáticos. Para Flores (2018), em aplicações que envolvem movimento relativo entre duas superfícies em contato direto, os efeitos do atrito devem ser considerados, uma vez que ele influencia significativamente o comportamento dinâmico e o desempenho do sistema. Esse fenômeno gera dificuldades nas tarefas de controle de posição, seguimento de trajetória e no desempenho em movimentos ponto a ponto. Além disso, o atrito contribui para a dissipação de energia, o que resulta em uma redução no rendimento mecânico do atuador (VIGOLO, 2018).

A força de atrito apresenta diversas componentes com comportamento dinâmico, como o atrito estático, o atrito de Coulomb, o atrito viscoso, o atrito de arraste, o efeito Stribeck, além da memória de atrito e dos deslocamentos associados ao pré-deslizamento. Para tal finalidade, estabelecem-se inicialmente as principais características do atrito, para então discutir-se a formulação de um modelo dinâmico capaz de representar, de forma conjunta, esses diferentes comportamentos em um sistema mecânico.

O atrito estático (*stiction*) manifesta-se quando a velocidade relativa entre as superfícies é nula, resistindo ao início do movimento com intensidade equivalente à força aplicada $u(t)$, até alcançar um valor máximo denominada força de atrito estático F_s , sendo descrito conforme a Equação (E.1), segundo Valdiero (2012).

$$F_{estático}(t) = \begin{cases} u(t), & \text{se } |u(t)| < F_s \\ F_s \delta(\dot{y}(t)) \text{sgn}(u(t)), & \text{se } |u(t)| \geq F_s \end{cases} \quad (\text{E.1})$$

no qual $\dot{y}(t)$ é a velocidade e $\delta(\dot{y}(t))$ é a função impulso dada por (5.2):

$$\delta(\dot{y}(t)) = \begin{cases} 1, & \text{se } \dot{y}(t) = 0 \\ 0, & \text{se } \dot{y}(t) \neq 0 \end{cases} \quad (\text{E.2})$$

O atrito de Coulomb (ou atrito seco) é caracterizado por se opor ao movimento relativo entre superfícies em contato, sendo proporcional à força normal e independente da área de contato (PORSCH, 2020). Pode ser expresso pela Equação (E.3):

$$F_{Coulomb}(t) = F_c \operatorname{sgn}(\dot{y}(t)) \quad (\text{E.3})$$

em que F_c é o atrito de Coulomb que é independente da velocidade relativa $\dot{y}(t)$.

O atrito viscoso é diretamente proporcional à velocidade relativa entre as superfícies em contato e é comumente associado a condições de lubrificação satisfatórias. Esse tipo de atrito é descrito pela Equação (E.4):

$$F_{viscoso}(t) = B\dot{y}(t) \quad (\text{E.4})$$

no qual B representa o coeficiente de amortecimento viscoso.

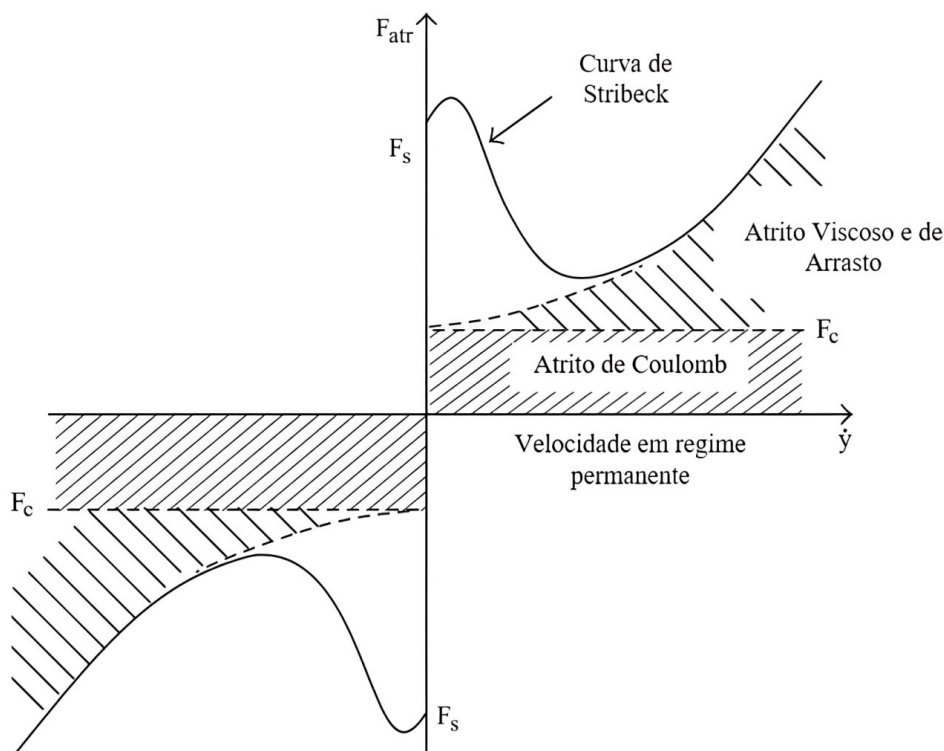
O atrito de arraste é resultante da resistência imposta por um fluido ao movimento de um corpo em seu interior, sendo predominante em regimes de escoamento turbulento. Sua magnitude é proporcional ao quadrado da velocidade relativa, conforme expressa a Equação (E.5):

$$F_{arraste}(t) = C_d(\dot{y}(t))^2 \operatorname{sgn}(\dot{y}(t)) \quad (\text{E.5})$$

em que C_d é o coeficiente de arraste. Esse componente é relevante em altas velocidades, mas em baixas velocidades seu efeito é geralmente desprezível.

Segundo Valdiero (2012), a combinação das expressões que descrevem o atrito estático, o atrito de Coulomb, o atrito viscoso ou de arraste e o efeito de Stribeck resulta em uma função não linear. Essa função representa o comportamento da força de atrito em regime permanente, conforme ilustrado na Figura E.1, que reúne as diferentes características do atrito ao longo da variação da velocidade relativa.

Figura E.1 – Características combinadas da força de atrito em regime permanente.

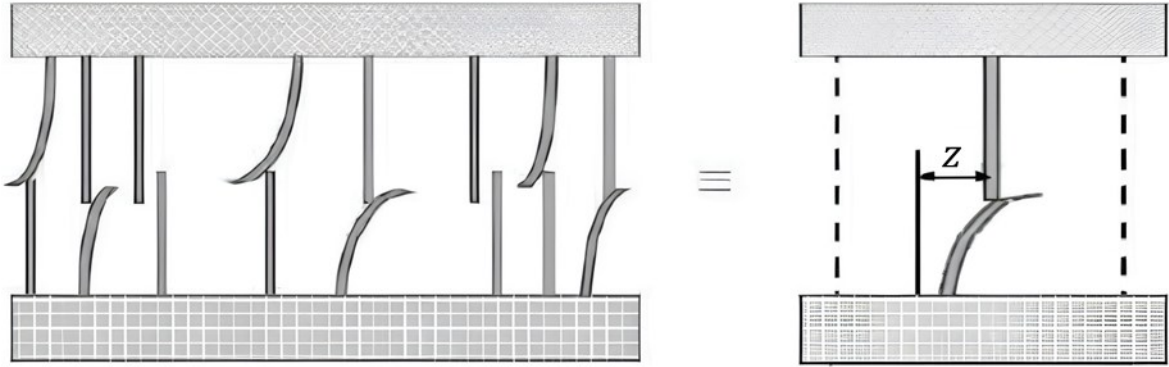


Fonte: Valdiero *et al.* (2025)

O modelo matemático adotado para representar o atrito dinâmico é o modelo LuGre, originalmente proposto por Canudas-de-Wit *et al.* (1995), que descreve o atrito com base nas microdeformações que ocorrem entre superfícies em contato, frequentemente associadas à rugosidade dessas superfícies. De acordo com Augustynek *et al.* (2017), esse modelo apresenta um comportamento próximo do real em experimentos. Na literatura, sua aplicação é recorrente em estudos voltados à modelagem de sistemas hidráulicos e pneumáticos, como nos trabalhos de Valdiero (2005), Santos (2014), Behnen (2017), Vigolo (2018), Pörsch (2020), entre outros.

Nesse modelo, as superfícies em contato são analisadas em escala microscópica, no qual cada uma é representada como um corpo rígido composto por cerdas elásticas. Quando uma força tangencial é aplicada, essas cerdas se defletem como molas, caracterizando a região de pré-deslizamento. À medida que a força aplicada aumenta, as cerdas acabam cedendo, entrando no regime de deslizamento, momento em que o atrito é definido pela força média de deflexão dessas cerdas (CANUDAS DE WIT *et al.*, 1995). Na Figura E.2 é possível observar, no desenho representativo, as microdeformações médias das rugosidades presentes entre duas superfícies em contato.

Figura E.2 – Representação do contato entre duas superfícies na região de interação.



Fonte: Miotto (2009)

No modelo de atrito LuGre, a força de atrito é composta por três parcelas: uma proporcional à deformação média das microestruturas ($\sigma_0 z$), outra proporcional à taxa de variação da deformação ($\sigma_1 \frac{dz}{dt}$), e uma última correspondente ao atrito viscoso ($\sigma_2 \dot{y}$).

Desta forma, a equação da força de atrito entre as superfícies é dada pela Equação (E.6):

$$F_{atr} = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{y} \quad (E.6)$$

no qual, como descrito em Valdiero (2005), σ_0 é o coeficiente de rigidez associado às deformações microscópicas entre as superfícies em contato, z é um estado interno não mensurável que descreve a deformação média ocorrendo entre as superfícies, σ_1 representa o coeficiente de amortecimento relacionado à taxa de variação de z , σ_2 (também denotado como B) é o coeficiente de amortecimento viscoso, e $\dot{y}$ é a velocidade relativa entre as superfícies.

Para dinâmica das microdeformações z , das superfícies de contato, têm-se a Equação (E.7):

$$\frac{dz}{dt} = \dot{y} - \alpha(z, \dot{y}) \frac{\sigma_0}{g_{ss}(\dot{y})} |\dot{y}| z \quad (E.7)$$

sendo $g_{ss}(\dot{y})$ uma função positiva que descreve parte das características do atrito em regime permanente, definida pela Equação (E.8):

$$g_{ss}(\dot{y}) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{y}}{\dot{y}_s}\right)^2} \quad (E.8)$$

em que F_c é o atrito de Coulomb, F_s representa o atrito estático, e $\dot{y}_s$ é a velocidade característica de *Stribeck*.

Segundo Behnen (2017), O efeito de Stribeck refere-se à redução da força de atrito à medida que a velocidade relativa entre as superfícies aumenta, partindo do valor máximo correspondente ao atrito estático até atingir um regime de atrito viscoso. Essa transição define a chamada curva de Stribeck, caracterizada pelo comportamento não linear do atrito nos trechos de baixa velocidade da curva F_{atr} versus $\dot{y}$, no qual a inclinação é negativa.

A função $\alpha(z, \dot{y})$ é usada para representar o regime de atrito estático em velocidades baixíssimas (DUPONT ET AL., 2000, VALDIERO, 2005). A representação matemática dessa função é dada pelas Equações (E.9) e (E.10).

$$\alpha(z, \dot{y}) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & \text{se } |z| \leq z_{ba} \\ 0 < \frac{1}{2} \text{sen} \left(\pi \frac{z - ((Z_{max}(\dot{y}) + z_{ba})/2)}{Z_{max}(\dot{y}) - z_{ba}} \right) < 1, & \text{se } z_{ba} < |z| < z_{max}(\dot{y}) \\ 1, & \text{se } |z| \geq z_{max}(\dot{y}) \\ 0, & \text{se } \text{sgn}(\dot{y}) \neq \text{sgn}(z) \end{array} \right\} \quad (\text{E.9})$$

$$0 < z_{ba} < z_{max}(\dot{y}) = \frac{g_{ss}(\dot{y})}{\sigma_0} \text{ para } \forall v \in R \quad (\text{E.10})$$

O deslocamento de separação z_{ba} representa a condição em que todos os movimentos na interface de atrito se restringem a deslocamentos elásticos, isto é, para valores de $|z| \leq z_{ba}$. Por outro lado, z_{max} corresponde ao valor máximo que as deformações microscópicas podem alcançar, sendo diretamente influenciado pela velocidade

Ao considerar a dinâmica das microdeformações, conforme modelada pela Equação (E.9), observa-se que, em regime permanente, a velocidade $\dot{y}$ permanece constante, de modo que $\alpha(z, \dot{y}) = 1$ e $\dot{z} = 0$ (SANTOS, 2014). Dessa forma, o estado interno z pode ser descrito pela equação (E.11), que representa o equilíbrio entre as forças elásticas e viscosas atuantes na interface de atrito.

$$z_{ss} = \frac{\dot{y}}{|\dot{y}|} \frac{g_{ss}(\dot{y})}{\sigma_0} = \text{sgn}(\dot{y}) \frac{(F_c + (F_s - F_c)e^{-(\dot{y}/\dot{y}_s)^2})}{\sigma_0} \quad (\text{E.11})$$

Ao substituir a equação (E.11) na Equação (E.6), que descreve a força de atrito, obtém-se a expressão final para a força de atrito em regime permanente (E.12).

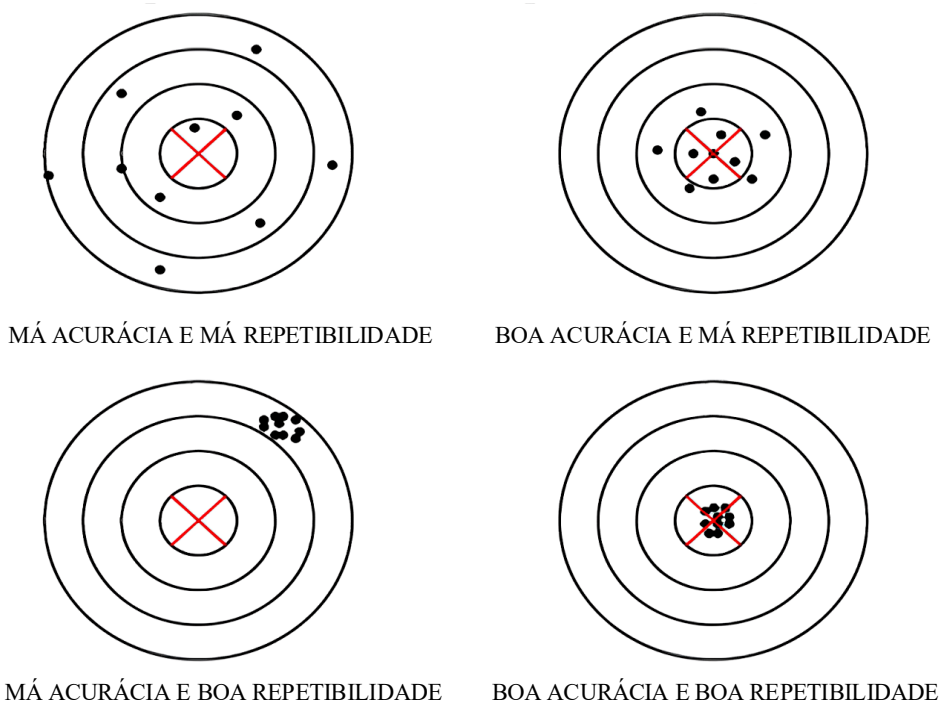
$$F_{atr,ss} = \sigma_0 z_{ss} + \sigma_1 \cdot 0 + \sigma_2 \dot{y} = \operatorname{sgn}(\dot{y}) \left(F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{y}}{\dot{y}_s}\right)^2} \right) + \sigma_2 \dot{y} \quad (\text{E.12})$$

APÊNDICE F – EQUAÇÕES UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE DO ROBÔ

Este apêndice apresenta o equacionamento matemático utilizado para a estimativa da repetibilidade de posição do robô. A abordagem adotada considera a variação espacial das posições atingidas pelo efetuador final ao longo de diversas repetições, permitindo a quantificação estatística do desvio em torno do baricentro. Para a determinação da repetibilidade, adota-se as equações propostas pela norma ISO 9283 (1998), também utilizadas em Weidlich (2006), Mello (2016) e Silva (2016). Dois parâmetros principais são utilizados na avaliação: a acurácia de posição (ou também exatidão) (AP_p) e a repetibilidade de posição (RP_l). Para isto, calcula-se também a acurácia média (AP_m) e o desvio padrão (S_{AP_p}).

A Figura F.1 ilustra, de forma conceitual, diferentes cenários de desempenho quanto à acurácia e à repetibilidade.

Figura F.1 – Representação dos conceitos de acurácia e repetibilidade para 10 repetições.



Fonte: Adaptado de Silva (2016)

A acurácia de posição individual (AP_p) é definida com a distância entre a posição desejada (comandada) e a posição atingida durante uma repetição. Essa acurácia é calculada

para cada amostra individual e expressa o erro de rastreamento em relação ao ponto de referência. A acurácia de posição é dada pela Equação (F.1):

$$AP_p = \sqrt{AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2} \quad (F.1)$$

no qual:

$$AP_x = X_d - X_r; \quad AP_y = Y_d - Y_r; \quad AP_z = Z_d - Z_r \quad (F.2)$$

sendo X_d , Y_d e Z_d as coordenadas da posição de referência, e X_r , Y_r , Z_r as coordenadas da posição atingida das amostras.

Após o cálculo da acurácia em cada repetição, determina-se a média aritmética da acurácia de posição para o conjunto de repetições, representando o erro médio do sistema ao tentar atingir o ponto de referência, conforme a Equação (F.3):

$$AP_m = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n AP_p \quad (F.3)$$

Na sequência, calcula-se o desvio padrão da acurácia de posição (S_{AP_p}), que expressa a dispersão dos erros de posicionamento em relação à média, utilizando a Equação (F.4):

$$S_{AP_p} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{p=1}^n (AP_p - AP_m)^2} \quad (F.4)$$

Finalmente, a repetibilidade de posição (RP_l), é obtida considerando três vezes o desvio padrão, somado à acurácia média, para garantir que 99,73% dos pontos estejam abrangidos (assumindo uma distribuição normal), conforme a Equação (F.5):

$$RP_l = AP_m + 3 \cdot S_{AP_p} \quad (F.5)$$

APÊNDICE G – REGISTRO EM VÍDEO DO ROBÔ AGRÍCOLA

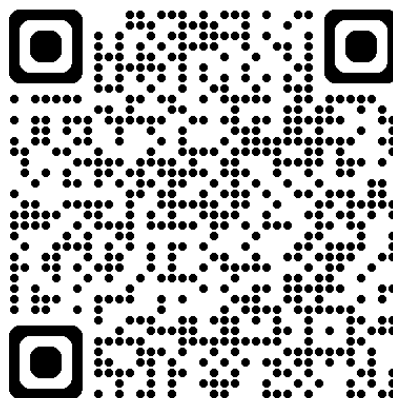
Apresenta-se neste apêndice o registro audiovisual das etapas de desenvolvimento e validação experimental do robô agrícola. O vídeo foi produzido durante a fase de montagem e testes realizados na bancada experimental do LASHIP/UFSC, documentando a evolução do sistema desde sua configuração inicial até a versão final adotada nesta dissertação.

O registro inicia-se com a filmagem do robô em sua configuração antropomórfica original, utilizada em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa, evidenciando a estrutura de dois graus de liberdade com acionamento hidráulico. Em seguida, é mostrada a etapa de modificação estrutural que resultou na configuração RRP, com a adição do terceiro grau de liberdade pneumático responsável pelos deslocamentos verticais. Na sequência, o vídeo apresenta o robô em funcionamento completo, realizando movimentos coordenados em seus três eixos sob controle em tempo real.

Também são exibidas as interfaces utilizadas na plataforma dSPACE/ControlDesk, nas quais é possível observar a aquisição e monitoramento dos sinais de posição, pressão e controle dos atuadores durante os testes. Esse material complementa os resultados experimentais apresentados ao longo desta dissertação, oferecendo uma visão prática da implementação física e do desempenho operacional do robô em bancada.

O vídeo está disponível para acesso no link abaixo ou via código QR (Figura G.1), permitindo a visualização do funcionamento do sistema e da infraestrutura de testes.

Figura G.1 – Código QR para acesso ao vídeo demonstrativo da bancada experimental e funcionamento do robô agrícola.



<https://youtu.be/6B3ByTOa4zY>

Fonte: Autor (2025)