

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

HIGOR BARBOSA SANTOS

**CONTROLE INTELIGENTE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE PARA
UM ROBÔ ESCALADOR COM RODAS DIRECIONÁVEIS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2016

HIGOR BARBOSA SANTOS

**CONTROLE INTELIGENTE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE PARA
UM ROBÔ ESCALADOR COM RODAS DIRECIONÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientadora: Prof. Dra. Lúcia Valéria Ramos de Arruda

Coorientador: Prof. Dr. André Schneider de Oliveira

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237con
2016 Santos, Higor Barbosa
Controle inteligente de posição e velocidade para um robô escador
com rodas direcionáveis / Higor Barbosa Santos.-- 2016.
91 f. : il. ; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Pa-
raná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática
Industrial, Curitiba, 2016
Bibliografia: f. 87-90

1. Robôs – Sistemas de controle. 2. Robôs autônomos. 3. Robôs
móveis. 4. Lógica difusa. 5. Robôs – Sistemas de controle. 6. Robôs –
Simulação. 7. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Arruda, Lúcia Valé-
ria Ramos de. II. Oliveira, André Schneider de. III. Universidade Tecno-
lógica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação Nº. _____

Controle Inteligente de Posição e Velocidade para um Robô Escalador com Rodas Direcionáveis.

por

Higor Barbosa Santos

Orientador: Prof^a. Dr^a. Lúcia Valéria Ramos de Arruda (UTFPR)

Coorientador: Prof. Dr. André Schneider de Oliveira (UTFPR)

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 13:30h do dia 21 de outubro 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof^a. Dr^a. Lúcia Valéria Ramos de Arruda
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Flavio Tonidandel
(FEI)

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

"A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa"

Dedico este trabalho aos meus pais, Pedro e Suely, que sempre me ajudaram e sem eles não seria o que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Pedro e Suely, pelo amor incondicional, apoio e incentivo que sempre me deram.

Agradeço à minha família, pelo incentivo e apoio.

Agradeço à minha orientadora professora Dra. Lúcia Valéria Ramos de Arruda e ao meu coorientador professor Dr. André Schneider de Oliveira, pela orientação, paciência, dedicação e apoio.

Este trabalho teve apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCTI do Programa de Formação de Recursos Humanos da PETROBRAS - PRH10-UTFPR e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



PETROBRAS



*"A persistência é o caminho do êxito."
Charles Chaplin*

RESUMO

SANTOS, Higor B. CONTROLE INTELIGENTE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE PARA UM ROBÔ ESCALADOR COM RODAS DIRECIONÁVEIS. 91 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta um controle inteligente de posição e velocidade para um robô escalador desenvolvido para realizar inspeções em vasos de pressões. O robô escalador possui rodas direcionáveis e magnéticas, o que o torna similar a um robô omnidirecional em virtude da sua alta manobrabilidade. O controle inteligente de velocidade proposto utiliza o chaveamento de controladores Fuzzy de acordo com o movimento a ser realizado, que permitem a utilização de todo o potencial de movimentação do robô respeitando as restrições impostas pelo modelo dinâmico e pela adesão magnética. Também foi projetado um controlador de posição em cascata com o de velocidade para a verificação da capacidade de navegação do robô em um ambiente 2D. Testes simulados e experimentais são aplicados para a validação das técnicas de controle implementadas e são apresentados ao final do trabalho.

Palavras-chave: robô escalador, inspeção, controlador inteligente, rodas magnéticas e direcionáveis

ABSTRACT

SANTOS, Higor B. INTELLIGENT CONTROL POSITION AND VELOCITY FOR A CLIMBER ROBOT WITH STEERABLE WHEELS. 91 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This work presents an intelligent control of position and velocity to a climber robot developed to perform inspections of pressure vessels. The climber robot has steerable and magnetic wheels, which makes it similar to an omnidirectional robot due to its high maneuverability. The intelligent velocity control proposed uses the switching Fuzzy controllers according to the movement to be performed, which allow the use of all the robot's movement potential respecting the constraints imposed by the dynamic model and magnetic adhesion. Also, a position controller was developed in cascade with the speed controller to verify the navigation capability of the robot in a 2D environment. Simulated and experimental tests are applied for validation of control techniques implemented and they're presented at the end of this work.

Keywords: climber robot, inspection, intelligent controller, magnetic and steerable wheels

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Tanques de Armazenamento.	19
FIGURA 1.2 – Inspetor fazendo rapel para inspecionar o tanque.	19
FIGURA 1.3 – Robô omnidirecional de transporte de cargas.	21
FIGURA 1.4 – Exemplos de planejamento de trajetória.	22
FIGURA 2.1 – Esquema de controle de robôs móveis adaptado de Siegwart e Nourbakhsh (2004).	26
FIGURA 2.2 – Robô escalador com mecanismo de adesão magnética para inspeção de embarcações marítimas.	27
FIGURA 2.3 – Robô escalador com mecanismo de adesão magnética para inspeção de tanques cilíndricos.	28
FIGURA 2.4 – Robô escalador teleoperado.	28
FIGURA 2.5 – Robô escalador omnidirecional magnético.	29
FIGURA 2.6 – Restrição de Deslizamento Lateral.	30
FIGURA 2.7 – Restrição de Rolagem.	30
FIGURA 2.8 – Exemplos da disposição do ICR de um carro e bicicleta.	32
FIGURA 2.9 – Robô Autônomo de Inspeção 2 (AIR-2).	32
FIGURA 2.10 – Robô Autônomo de Inspeção 1 (AIR-1).	32
FIGURA 2.11 – Topologia do AIR-2.	33
FIGURA 2.12 – Vista explodida da roda desenvolvida por Rovani (2013).	34
FIGURA 2.13 – Ajustes mecânicos do AIR-2.	34
FIGURA 2.14 – Sistema de cambagem das rodas magnéticas.	35
FIGURA 2.15 – Alinhamento mecânico do AIR-2 para o movimento linear dentro e fora da esfera.	36
FIGURA 2.16 – Alinhamento mecânico do AIR-2 para o movimento de orientação dentro e fora da esfera.	36
FIGURA 2.17 – Comparação entre a roda omnidirecional e a direcionável do AIR-2.	37
FIGURA 3.1 – Robô AIR-2 no plano cartesiano.	40
FIGURA 3.2 – Controlador Inteligente de Velocidade do AIR-2.	41
FIGURA 3.3 – Direções dos movimentos (setas sobre o AIR-2) que podem ser realizadas pelo Controlador Fuzzy do Movimento Linear.	42
FIGURA 3.4 – Controlador Fuzzy do Movimento Linear do AIR-2.	43
FIGURA 3.5 – Funções de associação para o Controlador Fuzzy Brushless do (a) erro e a variação do erro e (b) incremento da velocidade.	44
FIGURA 3.6 – Funções de associação para o Controlador Fuzzy do Servo do (a) erro e a variação do erro e (b) ângulo de incremento para o Movimento Linear.	45
FIGURA 3.7 – Controlador Fuzzy do Movimento de Orientação do AIR-2.	46
FIGURA 3.8 – Controlador Fuzzy do Movimento Livre do AIR-2.	47
FIGURA 3.9 – Funções de associação para o Controlador Fuzzy do Servo do (a) erro e a variação do erro e (b) ângulo de incremento para o Movimento Livre.	48
FIGURA 3.10 – Controle em cascata do AIR-2.	48
FIGURA 3.11 – Controlador de Posição do AIR-2.	49
FIGURA 4.1 – AIR-2 virtual.	51

FIGURA 4.2 – Diagrama de interação entre os nós e tópicos do controle inteligente do AIR-2 virtual.	53
FIGURA 4.3 – Árvore de Transformações do AIR-2 virtual.	54
FIGURA 4.4 – Tanque esférico modelado no simulador V-REP.	55
FIGURA 4.5 – Ângulos diferentes da trajetória executada durante o experimento de escalada.	56
FIGURA 4.6 – Gráfico das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento de escalada. ..	56
FIGURA 4.7 – Gráfico da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento de escalada.	57
FIGURA 4.8 – Gráfico do Erro das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento de escalada.	57
FIGURA 4.9 – Gráfico do Erro da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento de escalada.	57
FIGURA 4.10 – Trajetória do AIR-2 no tanque esférico durante a experimentação virtual.	58
FIGURA 4.11 – Gráfico das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.	59
FIGURA 4.12 – Gráfico da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.	59
FIGURA 4.13 – Gráfico do Erro das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.	60
FIGURA 4.14 – Gráfico do Erro da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.	60
FIGURA 5.1 – Protótipo do AIR-2 desenvolvido por Rosa e Gnoatto (2015).	62
FIGURA 5.2 – Protótipo do AIR-2.	62
FIGURA 5.3 – Diagrama dos componentes eletroeletrônicos do protótipo.	63
FIGURA 5.4 – Diagrama de interação entre os nós do controle do AIR-2.	64
FIGURA 5.5 – Árvore de transformações entre os sistemas de coordenadas.	66
FIGURA 5.6 – Vista superior do espaço utilizado para os experimentos práticos.	67
FIGURA 5.7 – Trajetória para o experimento do Controle Inteligente de Velocidade.	68
FIGURA 5.8 – Gráfico das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.	69
FIGURA 5.9 – Gráfico da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.	69
FIGURA 5.10 – Gráfico do Erro das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.	70
FIGURA 5.11 – Gráfico do Erro da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.	70
FIGURA 5.12 – Gráfico dos Motores Brushless.	70
FIGURA 5.13 – Gráfico dos Servo Motores.	71
FIGURA 5.14 – Gráfico das Posições x e y para o teste de repetibilidade.	72
FIGURA 5.15 – Gráfico do Erro da Posições x e y para o teste de repetibilidade.	72
FIGURA 5.16 – Trajetória para o experimento de repetibilidade do controle inteligente do AIR-2.	73
FIGURA 5.17 – Trajetória para o experimento de distância do controle inteligente do AIR-2.	74
FIGURA 5.18 – Gráfico das Posições x e y para o teste de distância.	75
FIGURA 5.19 – Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste de distância.	75
FIGURA 5.20 – Trajetória para o experimento com movimentos diferentes do controle inteligente do AIR-2.	76
FIGURA 5.21 – Gráfico das Posições x e y analisando movimentos diferentes.	77

FIGURA 5.22– Gráfico da Orientação θ analisando movimentos diferentes.	77
FIGURA 5.23– Gráfico do Erro das Posições x e y analisando movimentos diferentes. ...	77
FIGURA 5.24– Gráfico do Erro da Orientação θ analisando movimentos diferentes.	78
FIGURA 5.25– Trajetória para o experimento com prioridade para a posição do controle inteligente do AIR-2.	79
FIGURA 5.26– Gráfico da Orientação θ para o teste com prioridade para a posição.	79
FIGURA 5.27– Gráfico das Posições x e y para o teste com prioridade para a posição. ...	80
FIGURA 5.28– Gráfico do Erro da Orientação θ para o teste com prioridade para a posição. ...	80
FIGURA 5.29– Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste com prioridade para a posição.	81
FIGURA 5.30– Trajetória para o experimento com prioridade para a orientação do controle inteligente do AIR-2.	81
FIGURA 5.31– Gráfico das Posições x e y para o teste com prioridade para a orientação. .	82
FIGURA 5.32– Gráfico da Orientação θ para o teste com prioridade para a orientação. ...	82
FIGURA 5.33– Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste com prioridade para a orientação.	82
FIGURA 5.34– Gráfico do Erro da Orientação θ para o teste com prioridade para a orientação.	83
FIGURA A.1 – Diagrama completo do controle do AIR-2.	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Comparação entre AIR-2 e um robô omnidirecional.	37
TABELA 2	– Tabela Verdade do Controle Inteligente de Velocidade.	42
TABELA 3	– Tabela de regras.	45
TABELA 4	– Tópicos do ROS utilizados pelo controlador inteligente.	53
TABELA 5	– Explicação da estrutura lógica do controle inteligente.	65

LISTA DE SIGLAS

GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
END	Ensaio Não Destrutivo
GPS	<i>Global Positioning System</i> : Sistema Global de Posicionamento
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> : Filtro Estendido de Kalman
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> : Unidade de Medidas Inerciais
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i> : Detecção e Telemetria por Luz
ICR	<i>Instantaneous Center of Rotation</i> : Centro Instantâneo de Rotação
AIR-1	<i>Autonomous Inspection Robot 1</i> : Robô Autônomo de Inspeção 1
AIR-2	<i>Autonomous Inspection Robot 2</i> : Robô Autônomo de Inspeção 2
V-REP	<i>Virtual Robot Experimentation Platform</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i> : Sistema Operacional para Robôs
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i> : Lógica Transistor-Transistor

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_M	grau de manobrabilidade
δ_m	grau de mobilidade
δ_s	grau de dirigibilidade
kgf	Quilograma-força, unidade de medida de força
\dot{x}_R	velocidade linear no eixo x do robô
\dot{y}_R	velocidade linear no eixo y do robô
$\dot{\theta}_R$	velocidade angular no eixo z do robô
$\dot{\phi}_R$	velocidade angular dos servo motores do robô
x_R	posição no eixo x do robô
y_R	posição no eixo y do robô
θ_R	orientação do robô
\dot{x}_G	velocidade linear desejada no eixo x do robô
\dot{y}_G	velocidade linear desejada no eixo y do robô
$\dot{\theta}_G$	velocidade angular desejada no eixo z do robô
ξ_G	vetor de entrada para o controlador inteligente de velocidade
ϕ_1	ângulo da roda 1
ϕ_2	ângulo da roda 2
ϕ_3	ângulo da roda 3
ϕ_4	ângulo da roda 4
e_ω	erro de velocidade dos motores sem escovas
ce_ω	variação do erro da velocidade dos motores sem escovas
e_ϕ	erro do ângulo dos servo motores
ce_ϕ	variação do erro do ângulo dos servo motores
ξ_G	vetor de entrada para o controlador de posição
x_G	posição desejada no eixo x do robô
y_G	posição desejada no eixo y do robô
θ_G	orientação desejada do robô

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 TEMA	18
1.2 PROBLEMA	20
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo Geral	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2 INSPEÇÃO POR ROBÔS	24
2.1 ESTADO DA ARTE	24
2.1.1 Robôs de Inspeção	27
2.2 REQUISITOS DA ADESÃO MAGNÉTICA	29
2.3 ANÁLISE DE MANOBRABILIDADE	31
2.4 ROBÔ AUTÔNOMO DE INSPEÇÃO 2	31
2.4.1 Sistema de adesão magnética e Estabilidade Mecânica	34
2.4.2 Manobrabilidade	37
3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE INTELIGENTE	39
3.1 CONTROLE INTELIGENTE DE VELOCIDADE	39
3.1.1 Controle Fuzzy do Movimento Linear	42
3.1.2 Controle Fuzzy do Movimento de Orientação	45
3.1.3 Controle Fuzzy do Movimento Livre	46
3.2 CONTROLE DE POSIÇÃO	48
4 EXPERIMENTAÇÃO VIRTUAL EM VASOS DE PRESSÃO	51
4.1 ROBÔ DE INSPEÇÃO VIRTUAL	51
4.1.1 <i>Robot Operating System - ROS</i>	52
4.1.2 Nós e Tópicos	52
4.1.3 Transformações	54
4.2 VASO DE PRESSÃO VIRTUAL	54
4.3 EXPERIMENTAÇÃO VIRTUAL	55
4.3.1 Experimento de escalada	55
4.3.2 Experimento com todos os movimentos possíveis	58
5 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE	61
5.1 PROTÓTIPO AIR-2	61
5.1.1 Estrutura Mecânica	61
5.1.2 Estrutura Eletrônica	62
5.1.3 Estrutura Lógica	63
5.2 EXPERIMENTOS	67
5.2.1 Controle Inteligente de Velocidade	67
5.2.2 Repetibilidade do Controle de Posição	71
5.2.3 Distância do Controle de Posição	74
5.2.4 Controle de Posição analisando movimentos diferentes	75
5.2.5 Alteração de Prioridade do Controle Inteligente de Posição e Velocidade	78

5.3 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS	83
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6.1 CONCLUSÃO	84
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87
Anexo A – DIAGRAMA COMPLETO DO CONTROLE DO AIR-2	91

1 INTRODUÇÃO

A integridade dos tanques de armazenamento de petróleo e seus derivados é algo de extrema importância na indústria petroquímica, uma vez que a ausência de manutenções regulares pode trazer tanto prejuízos materiais e/ou ambientais, bem como, risco para o operador. Neste capítulo será discutida a necessidade de inspeções em tanques, que determinam por sua vez a indispensabilidade de manutenção, as principais características de um robô escalador para realizar tais inspeções e serão definidos os objetivos desta dissertação.

1.1 TEMA

Tanques de armazenamento são estruturas utilizadas para armazenar fluidos. Os fluidos mais comuns são petróleo e seus derivados, produtos químicos, resíduos diversos, misturas e água. As características do fluido armazenado, tais como volatilidade, inflamabilidade, temperatura e pressão de armazenamento são fatores cruciais para a escolha de tanque a ser utilizado em uma instalação industrial. Basicamente, há dois tipos de tanques: atmosféricos (Fig. 1.1a) e vasos de pressão (Fig. 1.1b). Os tanques atmosféricos são, comumente, utilizados para armazenar líquidos não pressurizados, devido ao seu formato mais frequente e por simplificação eles serão denominados neste trabalho de *tanques cilíndricos*. Os vasos de pressão, tradicionalmente, armazenam fluidos sob alta pressão, como por exemplo, o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e serão nomeados de *tanques esféricos*.

Os tanques de armazenamento necessitam de inspeções regulares, tanto interna quanto externamente, pois é imprescindível identificar o quanto antes falhas em suas estruturas, tais como fendas, corrosões, degradações do material e defeitos de soldagem, a fim de determinar a necessidade de manutenção e assim se evitar possíveis acidentes.

O método tradicional de inspeção interna demanda que o tanque esteja totalmente vazio e limpo. Portanto, o produto contido no tanque deverá ser estocado temporariamente em um outro tanque. Após a retirada do produto, os seus resíduos deverão também ser removidos. Na etapa de remoção dos resíduos é utilizada água e rolos para melhorar a higienização. Em



(a) Tanque cilíndrico.



(b) Tanque esférico.

Figura 1.1: Tanques de Armazenamento.

seguida, exaustores podem ser utilizados para eliminar os gases existentes no tanque. Todas essas precauções são necessárias a fim de evitar a exposição dos inspetores a substâncias tóxicas durante a inspeção (TOOLBOXES, 2016).

A existência de lugares de difícil acesso na superfície do tanque torna a inspeção externa uma atividade mais complexa que a interna. Por exemplo, pode ser necessário fazer rapel para inspecionar determinada parte do tanque, como pode ser visto na Fig. 1.2. Portanto, a tarefa torna-se cansativa e demorada, podendo gerar ainda incertezas quanto a varredura completa do tanque. Dessa forma, o emprego de robôs móveis para inspeção é uma importante ferramenta na melhoria da qualidade do processo de inspeção (em termos de custos, tempo, precisão e repetibilidade).

**Figura 1.2:** Inspetor fazendo rapel para inspecionar o tanque.

Comumente, a inspeção é feita por Ensaios Não Destrutivos (END), utilizando ultrassom, para detectar anormalidades na estrutura. Entretanto, a inspeção dos tanques de

armazenamento é uma tarefa lenta, visto que na maioria das vezes estas estruturas são grandes, e o inspetor deverá percorrer toda a superfície do tanque com o equipamento de ultrassom, que tem alcance limitado de inspeção.

1.2 PROBLEMA

Os robôs escaldadores apresentam uma crescente importância na área de manutenção e inspeção. Eles são desenvolvidos para navegar verticalmente nas mais diversas estruturas. Dependendo da aplicação, os robôs escaldadores possuem características específicas que lhe garantem uma melhor navegação de acordo com o seu princípio de locomoção e adesão. Por exemplo, Alkalla et al. (2015) desenvolveram um robô escaldador para inspeção de vasos de pressões que utiliza dois princípios de adesão em conjunto (magnético e pneumático). Enquanto, Pan et al. (2015) apresentam um robô com sistema de sucção para inspecionar usinas nucleares.

Além do sistema de locomoção e adesão, três características importantes devem ser levadas em consideração durante o projeto de um robô escaldador: *estabilidade*, *manobrabilidade* e *controlabilidade* (SIEGWART; NOURBAKHSI, 2004). Tradicionalmente, a estabilidade (estática e dinâmica) do robô requer no mínimo 3 rodas, desde que o centro de gravidade do robô esteja contido dentro do triângulo formado pelos três pontos de apoio das rodas. A estabilidade pode ser melhorada com adição de novas rodas, no entanto se o número de apoios for superior a 3, será necessário a implementação de uma suspensão para garantir o contato de todas as rodas em terrenos irregulares. A estabilidade também pode ser alcançada em robôs com uma (NUKULWUTHIOPAS et al., 2002) ou duas rodas (SUN; GAN, 2010), desde que se implemente uma estratégia de controle mais complexa ou mantenha-se o centro de gravidade abaixo do eixo das duas rodas. A fim de evitar-se ambiguidades com a estabilidade relacionada ao controle, será adotado o termo *estabilidade mecânica* para definir a estabilidade do robô.

Garantindo a estabilidade mecânica do robô, cada roda também contribui para o seu movimento (*manobrabilidade*), mas ao mesmo tempo impõe restrições (*controlabilidade*). Portanto, a manobrabilidade e controlabilidade são inversamente proporcionais. Por exemplo, a combinação da atuação e direção em uma roda aumenta a complexidade e acrescenta erros de posicionamento. Isso pode ser visto nos robôs omnidirecionais, que possuem a máxima manobrabilidade em ambientes 2D e podem se mover em qualquer direção independente da sua orientação. Sendo necessário desenvolver uma estratégia de controle que diminua os erros (escorregamento e derrapagem) gerados pela alta manobrabilidade, principalmente durante a

aceleração e desaceleração do robô. Um exemplo de robô omnidirecional pode ser visto na Fig. 1.3.



Figura 1.3: Robô omnidirecional de transporte de cargas.

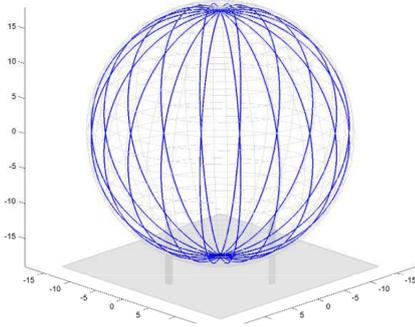
Fonte: Röhrig et al. (2010).

Portanto, Jamali et al. (2013) propõem um controlador inteligente para um robô omnidirecional equipado com 3 rodas omnidirecionais. Devido à dificuldade de providenciar analiticamente o modelo dinâmico incluindo o deslizamento do robô, o trabalho desenvolve um controle utilizando lógica Fuzzy baseado nos modos fundamentais de movimento do robô. Apesar da grande manobrabilidade dos robôs omnidirecionais, é necessário ainda desenvolver uma suspensão que garanta a estabilidade mecânica.

Uma alternativa a topologia omnidirecional é a adotada por Lam et al. (2010). Eles apresentam um robô com quatro rodas independentes e direcionáveis, a adoção dessa topologia garante um mesmo desempenho de movimentação em terrenos irregulares. Neste trabalho, o controle implementado atua como ligação virtual entre cada roda para minimizar o escorregamento do robô, que é resultado do desalinhamento de suas rodas. Por sua vez, Elferik e Imran (2015) expõem um controle adaptativo de imersão e invariância para um robô móvel com rodas direcionáveis para seguimento de trajetória.

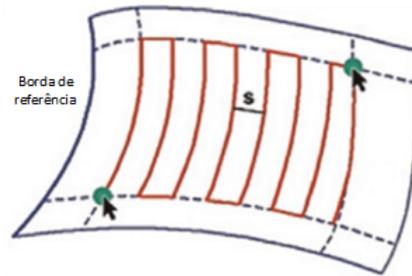
De um modo geral, o controle de um robô escalador deverá permitir o seguimento de trajetórias para a inspeção de tanques esféricos. Ao percorrer a superfície do tanque, deve-se garantir que a mesma seja totalmente inspecionada pelo equipamento instalado no robô, através de movimentos precisos e suaves. As trajetórias exemplificadas na Figura 1.4a possuem movimentos suaves, mas podem haver casos em que ocorram movimentos bruscos ou curvaturas pequenas, como pode ser visto na Figura 1.4b. Em vista disso, é necessário desenvolver uma estratégia de controle que usufrua toda a manobrabilidade e estabilidade mecânica fornecida pelo robô, levando em consideração as restrições impostas pelo modelo dinâmico e pela adesão

à superfície do tanque.



(a) Planejamento de trajetória de um robô para inspeção de um tanque.

Fonte: Espinoza (2014)



(b) Planejamento de trajetória para inspeção de uma superfície curva.

Fonte: Adaptado de Mineo et al. (2016)

Figura 1.4: Exemplos de planejamento de trajetória.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta dissertação é projetar uma estratégia de controle de posição, orientação e velocidades para um robô de inspeção, de forma que ele possa navegar internamente em tanques esféricos de GLP, de maneira precisa e suave, explorando a sua manobrabilidade.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo principal traçou-se objetivos específicos:

1. Analisar as topologias de robôs de inspeção existentes na literatura, as estratégias de controle empregadas e definir os principais requisitos;
2. Projetar e desenvolver uma estratégia de controle inteligente que permita a movimentação em ambientes tridimensionais, considerando o sistema de adesão magnética;
3. Incorporar a estratégia de controle em um robô real através de um sistema embarcado, interagindo com os atuadores e as fontes de sensoriamento;
4. Validar a estratégia de controle em ambiente simulado e em situações reais.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos. No segundo capítulo apresenta-se um estudo de robôs móveis e aspectos importantes na inspeção de estruturas. O terceiro capítulo discute uma estratégia de controle inteligente que permite o seguimento de trajetória em esferas de GLP de um robô com adesão magnética. O quarto capítulo apresenta o sistema operacional utilizado na programação do robô, a modelagem do robô de inspeção em um simulador 3D e os experimentos simulados do controle inteligente. O quinto capítulo apresenta a realização de experimentos práticos com o intuito de validar a estratégia de controle proposta pelo trabalho. E por último, o sexto capítulo apresenta as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 INSPEÇÃO POR ROBÔS

A relevância dos robôs móveis tem aumentado nos últimos tempos, principalmente, na substituição de mão-de-obra humana em ambientes insalubres e/ou que forneçam alguma periculosidade. Por exemplo, na inspeção de tanques esféricos de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), o inspetor fica exposto às substâncias tóxicas, além de ser um ambiente altamente explosivo. Portanto, além de melhorar a qualidade do processo de inspeção, os robôs de inspeção tornam o trabalho dos inspetores mais seguro. Neste capítulo será discutida a inspeção por robôs, bem como, os seus requisitos e alguns tipos de robôs utilizados em tarefas de inspeção.

2.1 ESTADO DA ARTE

Uma das características mais importantes para os robôs móveis é a capacidade de obter conhecimento sobre o ambiente em que se encontram, ou seja, a percepção do ambiente. Logo, o robô deve possuir mecanismos que monitorem sua interação com o ambiente. Basicamente, a percepção, em robótica, é a capacidade de extrair informações confiáveis do ambiente, a partir dos sensores, e interpretá-las de forma que o robô possa estimar a sua localização (SIEGWART; NOURBAKSH, 2004).

Segundo Siegwart e Nourbakhsh (2004) e Murphy (2000), os sensores podem ser classificados pelo tipo de informação adquirida do ambiente e pela energia utilizada. Quanto ao tipo de informação, os sensores são divididos em proprioceptivos, exteroceptivos e exproprioceptivos. Sensores proprioceptivos fornecem informações internas relativas ao robô, por exemplo, velocidade das rodas, nível de bateria. Já os exteroceptivos adquirem informações do ambiente do robô, tais como: luminosidade do ambiente, distâncias. Os sensores exproprioceptivos são a união dos dois anteriores, eles fornecem informações sobre o robô como um todo ou partes dele relativas ao ambiente, como por exemplo uma bússola.

Os sensores podem ser ativos ou passivos, segundo a energia utilizada na percepção. Os ativos necessitam emitir energia no ambiente para obter informações sobre ele, tendo como

exemplo um sensor ultrassônico e uma câmera 3D. Os sensores passivos dispõem apenas de informações disponibilizadas pelo ambiente, como por exemplo, temperatura e luminosidade do ambiente. Sendo assim, as características do ambiente afetam diretamente a escolha das fontes de percepção.

Na inspeção de tanques de armazenamento, a localização é uma tarefa crucial, visto que é necessário identificar os pontos que apresentam defeitos ou falhas para que, posteriormente, medidas corretivas possam ser tomadas. O interior dos tanques apresenta baixa luminosidade e poucos pontos de referência que podem auxiliar a localização. Os únicos pontos de referência existentes ali são os cordões de solda e tampas do tanque, o que torna a localização uma tarefa de difícil realização.

A capacidade de localização é o principal atributo para um robô móvel se locomover autonomamente. Há duas diferentes maneiras de se alcançar esse objetivo, uma delas é a através localização relativa (local). Na localização relativa a posição e orientação do robô são obtidas em relação ao seu estado (posição e orientação) inicial, *i.e.*, através do uso de sensores proprioceptivos, tradicionalmente denominada de odometria. Outra forma de localização é a absoluta (global), em que a posição é obtida em relação ao ambiente em que o robô se encontra, por exemplo, a posição fornecida por um GPS (sensores exteroceptivos).

A fim de se localizar corretamente, o robô necessita compreender as informações fornecidas pelos sistemas de sensoriamento. A odometria fornece uma localização relativa através da integração incremental do movimento do robô, tal como a posição/orientação obtida tradicionalmente através dos encoders dos motores (*dead reckoning*). Mas a integração de informação gera o acúmulo de erros proporcional à distância percorrida, tornando o posicionamento do robô incerto, ao longo de uma trajetória desenvolvida.

Dessa forma, a odometria por si só não é suficiente para ser usada como estimativa da localização do robô, já que, em geral, ela apresenta erros. Com o propósito de diminuir os erros na localização, geralmente, utiliza-se a fusão de diferentes sensores. Dentre as ferramentas utilizada para implementar a fusão de sensores, destaca-se o Filtro Estendido de Kalman (EKF). O filtro EKF é, basicamente, um algoritmo que atribui pesos de acordo com a precisão (covariância) de cada sensor, assim sendo, quanto mais preciso (menor covariância) o sensor for, o valor do seu peso será maior no valor da saída do filtro. Khatib et al. (2015) demonstraram a melhoria na localização pela utilização de um filtro EKF para fundir a odometria dos encoders, bússola, GPS e IMU em um robô móvel.

Escorregamento das rodas e flexibilidade na estrutura mecânica são alguns dos fatores que levam a erros na localização de um robô, Faisal et al. (2014) propõem um sistema baseado

em filtro EKF e um sensor infravermelho para estimar com precisão a posição e orientação de um robô móvel. Por sua vez, Song et al. (2016) apresentam a fusão de uma câmera RGB-D e um sensor LIDAR utilizando o filtro EKF para a localização de um alvo em movimento.

Na Figura 2.1, Siegwart e Nourbakhsh (2004) apresentam um esquema de controle para robôs móveis. Resumindo, as fontes de percepção fornecem a odometria para a localização do robô e mapeamento do ambiente. Com a construção do mapa, pode-se identificar obstáculos e planejar a trajetória que deverá ser percorrida. Então, o controle de movimento atuará sobre os atuadores que movem o robô de forma a garantir a trajetória planejada. Assim, volta-se ao início, a percepção fornece novas informações sobre o ambiente, que são repassadas para atualização da localização e construção do mapa do ambiente. Então, continua-se os passos seguintes do esquema de controle.

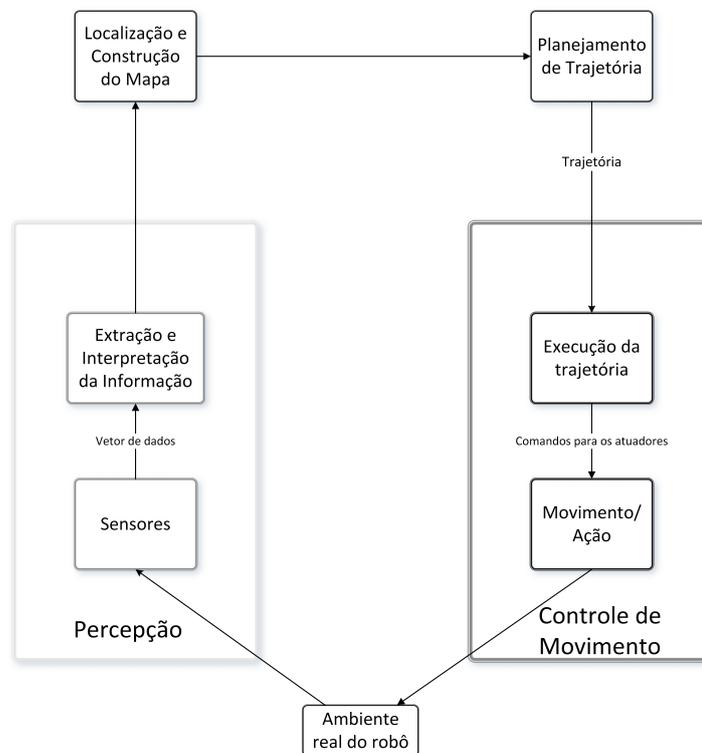


Figura 2.1: Esquema de controle de robôs móveis adaptado de Siegwart e Nourbakhsh (2004).

Fonte: Adaptado de Siegwart e Nourbakhsh (2004).

A partir do planejamento de trajetória, é necessário assegurar que o robô possa executar os movimentos que garantem o seguimento da trajetória. Dito isso, o grau de manobrabilidade é uma característica muito significativa, uma vez que isso implica na capacidade de seguir trajetórias. Portanto, quanto maior o grau de manobrabilidade de um robô, maior será a sua capacidade de se movimentar. Mas tudo tem um custo, a complexidade do controle é diretamente proporcional ao grau de manobrabilidade.

Outra característica importante durante a inspeção é a estabilidade mecânica do robô nos diversos tanques, levando em consideração a curvatura e espessura dos mesmos. O robô escalador deve possuir uma topologia mecânica e de adesão que permita-o navegar por toda a superfície metálica.

2.1.1 ROBÔS DE INSPEÇÃO

A utilização de robôs para inspeção torna o trabalho mais eficiente e reduz os custos operacionais, visto que minimiza a exposição dos trabalhadores a ambientes perigosos e/ou de difícil acesso. Os robôs de inspeção podem ser diferenciados pelo mecanismo de adesão e locomoção (SCHMIDT; BERNS, 2013). Quanto ao mecanismo de adesão pode-se citar: magnético, pneumático, mecânico, eletrostático e químico. Já quanto ao tipo de locomoção: braços/pernas, rodas, guia e esteira.

A inspeção por robôs é um assunto atual e vem sendo discutido na comunidade científica, como em Eich e Vögele (2011), onde é abordado um robô escalador magnético para inspecionar embarcações marítimas. Devido ao tamanho e capacidade de carga do robô, como pode ser visto na Fig. 2.2, a inspeção é feita por uma câmera que envia informações via wireless para uma estação de controle. Além de realizar o processamento das imagens, a estação controla todo o movimento do robô de inspeção. Desta forma, é uma solução inviável para inspeção de tanques cilíndricos, dado a sua capacidade de carga e em virtude disso apresentar apenas a vídeo inspeção.



Figura 2.2: Robô escalador com mecanismo de adesão magnética para inspeção de embarcações marítimas.

Fonte: Eich e Vögele (2011)

Com uma capacidade de carga maior, Kalra et al. (2006) apresentaram um robô escalador magnético para inspeção de tanques, onde o robô pode operar manualmente ou

automaticamente. Porém, a sua estrutura mecânica, mostrada na Figura 2.3, foi projetada para inspecionar apenas tanques cilíndricos, ou seja, torna-se inviável na inspeção de tanques esféricos, uma vez que curvatura do tanque não permite a sua locomoção.

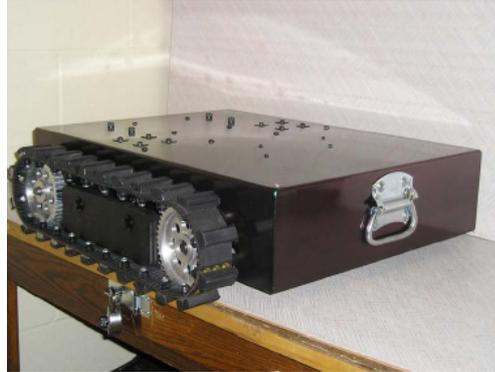


Figura 2.3: Robô escalador com mecanismo de adesão magnética para inspeção de tanques cilíndricos.

Fonte: Kalra et al. (2006)

San-Millan (2015) propôs um robô escalador teleoperado para inspeção de tanques de óleo, apresentado na Figura 2.4. O projeto proposto tinha como foco principal desenvolver uma roda magnética que reduzisse a massa total do robô, ao mesmo tempo que potencializava a adesão magnética do robô à superfície. O robô utiliza o sistema diferencial, apresentando duas rodas magnéticas e uma cauda passiva, para se locomover na superfície do tanque. Desse modo, possui baixa manobrabilidade e estabilidade mecânica para inspecionar.



Figura 2.4: Robô escalador teleoperado.

Fonte: San-Millan (2015).

Buscando melhorar a manobrabilidade e estabilidade mecânica dos robôs de inspeção, Tavakoli et al. (2013) propuseram um robô escalador omnidirecional, o *omniclimber*, para inspeção de estruturas planas/convexas ferromagnéticas (Fig. 2.5). O *omniclimber* possui uma grande manobrabilidade e adaptabilidade para diversas estruturas com diferentes curvaturas e

espessuras, mesmo com rodas omnidirecionais magnéticas. Além disso, as rodas magnéticas foram projetadas de forma que gerassem um baixo atrito com a superfície. O único problema é a capacidade de carga que o robô pode ser submetido. Em um dos testes feito pelo *omniclimber*, em uma estrutura de espessura 3mm, ele é capaz de carregar apenas 370g. Essa capacidade de carga deve ser dividida com o hardware de inspeção e outros possíveis sensores para navegação e localização do robô.

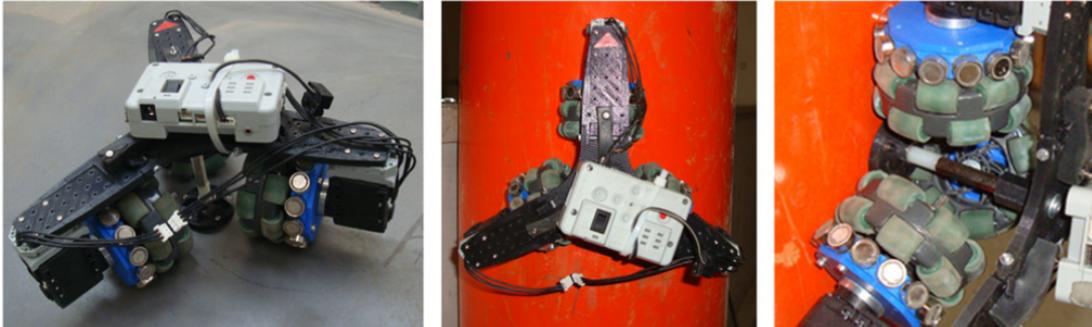


Figura 2.5: Robô escalador omnidirecional magnético.

Fonte: Tavakoli et al. (2013).

Dessa forma, é necessário definir uma topologia do robô para que ofereça uma grande manobrabilidade, possa se locomover na curvatura de uma esfera e com a capacidade de carga para levar o sistema de inspeção. Em busca de obter o mesmo grau de liberdade que rodas omnidirecionais, Oftadeh et al. (2013) utilizaram rodas independentes e direcionáveis, pois possuem melhor desempenho e capacidade de mover-se em terrenos acidentados do que rodas omnidirecionais. Porém, necessita-se que as mesmas façam com que o robô possa escalar a superfície metálica do tanque. Portanto, a estrutura mecânica de um robô para inspeção de tanques de GLP deve fornecer uma grande manobrabilidade, tornando o robô capaz de realizar variados movimentos, mas ao mesmo tempo deve garantir a sua adesão a superfície do tanque em todo a trajetória.

2.2 REQUISITOS DA ADESÃO MAGNÉTICA

A adesão magnética do robô escalador depende de muitos fatores. Entre eles estão: o fluxo magnético, a permeabilidade do material da estrutura, área de superfície e a distância entre a estrutura e o ímã (ROVANI, 2013). Por exemplo, a adesão magnética pode ser obtida através da utilização de rodas magnéticas, as quais permitem que um robô escalador mantenha contato (aderência) com uma superfície ferromagnética (KINDL et al., 2016). Outra forma de adesão possível é a utilização de um mecanismo magnético ajustável que não mantém contato

com a superfície (WU et al., 2013).

As rodas magnéticas devem obedecer a duas restrições impostas pelo seu modelo dinâmico, a fim de evitar erros na odometria e a redução da adesão do robô. A roda precisa manter-se perpendicular a superfície metálica para que o fluxo magnético seja na maior parte direcionado a criar máxima força de adesão possível entre a roda e a superfície (ROVANI, 2013). A primeira restrição é a de deslizamento lateral que implica na ausência de deslocamento no eixo z da roda, como pode ser visto na Fig. 2.6. Portanto, a roda deve movimentar-se somente na direção x do seu eixo.

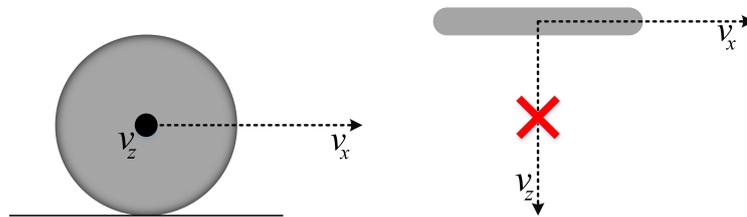


Figura 2.6: Restrição de Deslizamento Lateral.

Já a segunda restrição é a de rolagem, ela dita que a roda não pode patinar, isto é, a roda deve rolar puramente, demonstrada na Fig. 2.7. O escorregamento é praticamente nulo em rodas magnéticas devido ao atrito da roda e da aderência ocasionada pela adesão magnética. Sendo assim, a roda deve possuir velocidade linear v_x proporcional à sua velocidade angular ω_z , como é dado na equação 1.

$$v_x = r \cdot \omega_z \quad (1)$$

onde, r é o raio da roda.

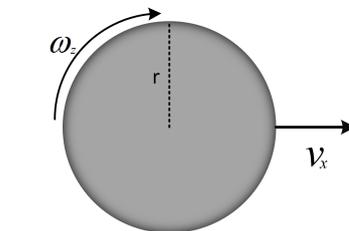


Figura 2.7: Restrição de Rolagem.

Outro fator importante encontrado na inspeção é a força da gravidade. A força gravitacional pode causar desprendimento das rodas (OLIVEIRA et al., 2012; ESPINOZA, 2014) e pode gerar erros na percepção (VEIGA, 2015). Outra condição que pode afetar a adesão, é quando a superfície do tanque apresenta irregularidades, sejam elas aparentes (*i.e.*,

cordões de solda) ou intrínsecas (bolhas de ar), que afetam o fluxo do campo magnético das rodas e, portanto, podem afetar a adesão do robô com a superfície.

A adesão magnética deve garantir aderência entre as rodas e a superfície do tanque durante toda a trajetória do robô, da mesma maneira que ela não deve restringir, de maneira significativa, a manobrabilidade e estabilidade mecânica do mesmo.

2.3 ANÁLISE DE MANOBRABILIDADE

A análise de manobrabilidade de um robô móvel é baseada em sua mobilidade e dirigibilidade (SIEGWART; NOURBAKSHSH, 2004). O grau de manobrabilidade (δ_M) é dado por (Eq. 2):

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s , \quad (2)$$

em que, δ_m é o grau de mobilidade e δ_s é o grau de dirigibilidade.

Basicamente, o grau de mobilidade é a liberdade de movimento de um robô. Portanto, a mobilidade está caracterizada por dois fatores: o tipo de rodas que possuem e sua disposição sobre uma topologia mecânica (SIEGWART; NOURBAKSHSH, 2004). Já o grau de dirigibilidade é o número de rodas centradas orientáveis que podem ser movidas independentemente para movimentar um robô (SIEGWART; NOURBAKSHSH, 2004). Resumindo, o grau de manobrabilidade representa os graus de liberdade de um robô, ou seja, a capacidade de posicionar livremente o Centro Instantâneo de Rotação (ICR). O ICR é a intersecção dos eixos das rodas de um robô e representa o raio da curvatura do movimento a ser executado de acordo com a disposição das rodas (SIEGWART; NOURBAKSHSH, 2004), exemplificado na Figura 2.8.

Há alguns anos vem sendo desenvolvido no LASCA (Laboratório de Automação e Sistema de Controle Avançado) um robô para inspeções em tanques de armazenamento. Sua topologia é voltada a melhorar a manobrabilidade e adesão magnética. É sobre esta plataforma que o presente trabalho se desenvolve.

2.4 ROBÔ AUTÔNOMO DE INSPEÇÃO 2

Nesta seção será apresentado o Robô Autônomo de Inspeção 2 (AIR-2), demonstrado na Figura 2.9. O AIR-2 está sendo desenvolvido no LASCA, que é um laboratório de pesquisas

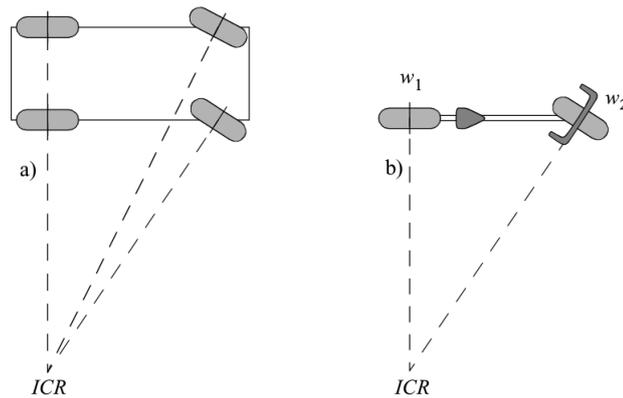


Figura 2.8: Exemplos da disposição do ICR de um carro e bicicleta.

Fonte: Siegwart e Nourbakhsh (2004).

nas áreas de automação, controle e otimização de sistemas da UTFPR.

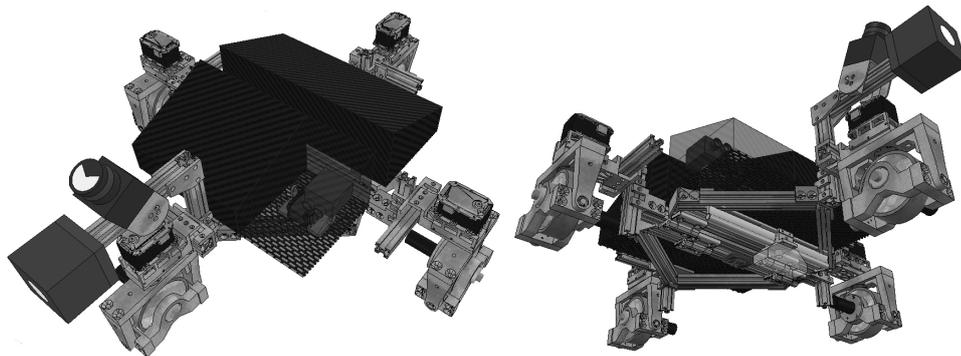


Figura 2.9: Robô Autônomo de Inspeção 2 (AIR-2).

O projeto de um robô de inspeção no LASCA já vem sendo desenvolvido há algum tempo. A primeira versão, o Robô Autônomo de Inspeção 1 (AIR-1), foi resultado dos trabalhos de Rovani (2013), Espinoza (2014) e Veiga (2015), é visto na Figura 2.10.

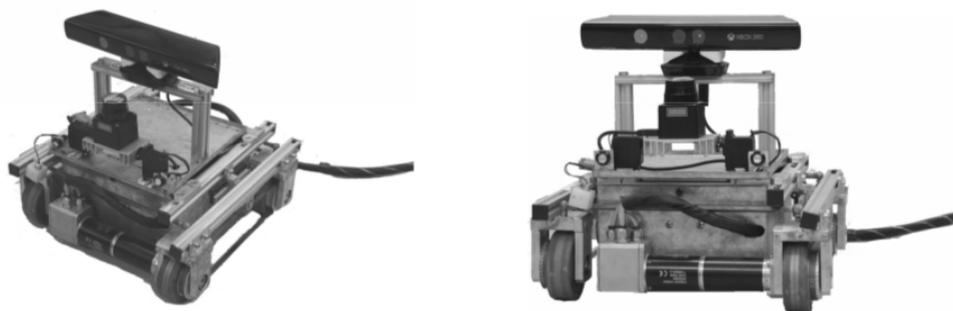


Figura 2.10: Robô Autônomo de Inspeção 1 (AIR-1).

Fonte: Veiga (2015).

O AIR-1 é um robô escalador com 4 rodas magnéticas, cada par de rodas possui uma correia dentada que é movida por um motor sem escovas (*brushless*). Ele movimentase utilizando o sistema diferencial, em que o robô locomove-se de acordo com a diferença de velocidade entre os dois pares de rodas. Mas devido ao seu sistema de locomoção, o AIR-1 possui baixa manobrabilidade e dificulta a tarefa de inspeção. Este problema é evidenciado pela adesão magnética que impossibilita a execução de movimentos rotacionais sem causar grande flexão na estrutura mecânica (VEIGA, 2015).

Dessa maneira, o AIR-2 (ROSA; GNOATTO, 2015) foi projetado para se ter uma melhor manobrabilidade sob superfícies metálicas. Ele é um robô escalador com quatro rodas magnéticas direcionáveis independentes. O AIR-2 apresenta 4 rodas devido as normas de seguranças exigidas para a inspeção de tanques, em que deve haver garantias de que o robô não tenha desprendimento durante a sua navegação. Se o robô tivesse apenas 3 rodas, ocorreria a redução da força total de adesão do robô, o que poderia causar uma queda em virtude da possibilidade de alguma roda se desprender (por exemplo, devido à diminuição do campo magnético da roda ao passar por um cordão de solda). O projeto das rodas magnéticas do AIR-1 (ROVANI, 2013) foi mantido para o AIR-2. Na Figura 2.11, pode ser visto a topologia do AIR-2. O robô de inspeção possui em cada roda um motor sem escovas e um servo motor. O motor sem escovas provê a movimentação do robô, enquanto o servo motor gera a direção do movimento.

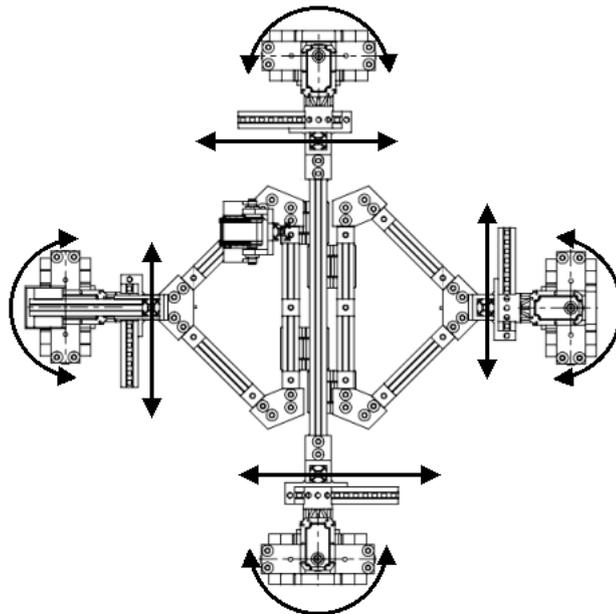


Figura 2.11: Topologia do AIR-2.

2.4.1 SISTEMA DE ADESÃO MAGNÉTICA E ESTABILIDADE MECÂNICA

As rodas magnéticas são compostas por dois ímãs anelares permanentes de $NdFeB$ (Neomídio-Ferro-Boro). Os ímãs são posicionados entre dois discos de aço SAE 1020 e fixados por parafusos (Figura 2.12). Tanto os discos de aço, quanto os parafusos foram escolhidos com baixa permeabilidade magnética. A baixa permeabilidade permite que o fluxo magnético percorra melhor a superfície metálica, garantindo uma maior força de adesão à superfície de, aproximadamente, $40kgf$ (ROVANI, 2013; ROSA; GNOATTO, 2015).

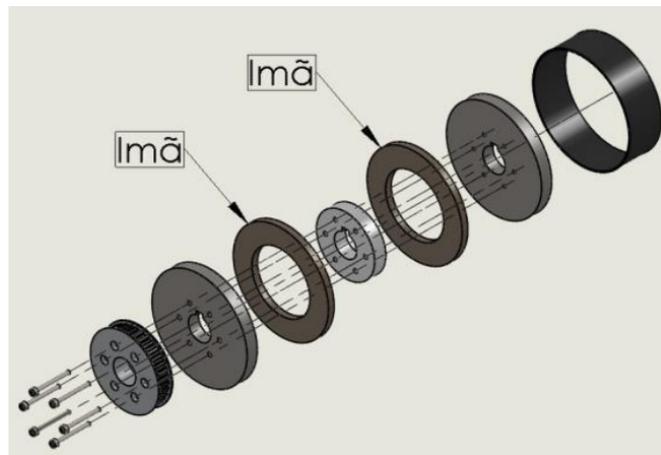


Figura 2.12: Vista explodida da roda desenvolvida por Rovani (2013).

Fonte: Rovani (2013).

O robô de inspeção foi concebido para garantir uma alta força de adesão a qualquer movimento ou quando ultrapassar um cordão de solda. Em virtude disso, há alguns ajustes mecânicos que o permite adaptar-se sobre a superfície do tanque.

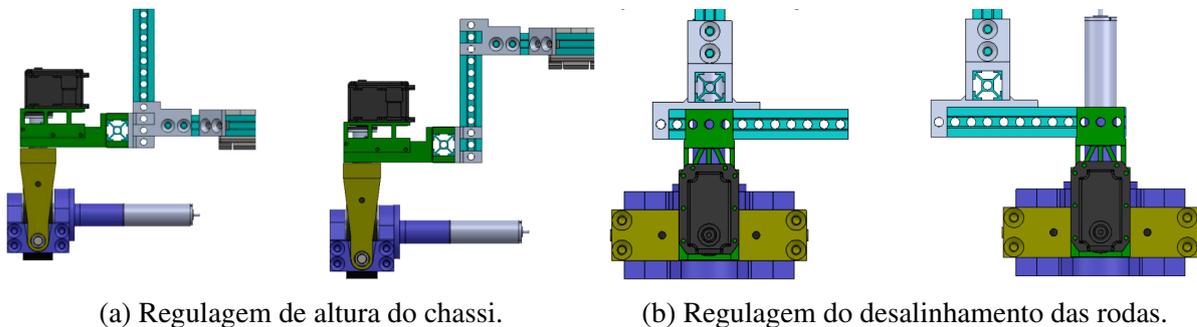


Figura 2.13: Ajustes mecânicos do AIR-2.

Fonte: Rosa e Gnoatto (2015).

O AIR-2 possui ajustes que regulam a altura do chassi (Fig. 2.13a) e o desalinhamento entre as rodas (Fig. 2.13b). A regulagem de altura permite que o robô se ajuste em tanques

com raios grandes ou outras estruturas com raios pequenos, como dutos. Já o ajuste de desalinhamento proporciona que duas rodas paralelas ao ultrapassar pequenos obstáculos (como os cordões do solda) não diminuam a adesão magnética ao mesmo tempo.

O ângulo máximo de cambagem das rodas (ângulo α visto na Fig. 2.14a) é de $10,8^\circ$, que garante que os motores sem escovas não toquem a superfície. A cambagem assegura que o robô trafegue em superfícies curvas ou planas e permite que as rodas ultrapassem cordões de soldas ou pequenos desníveis, demonstrado na Fig. 2.14b.

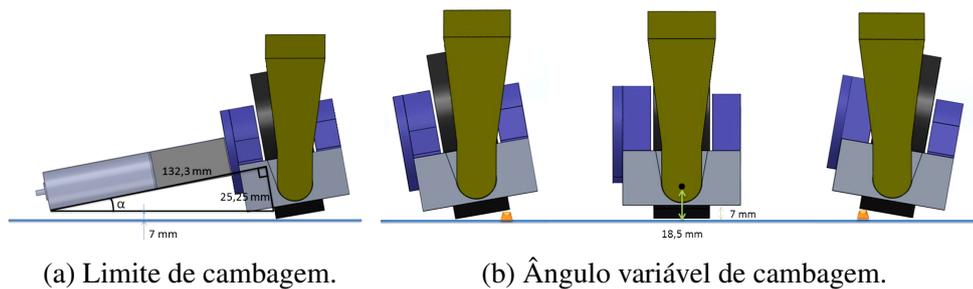


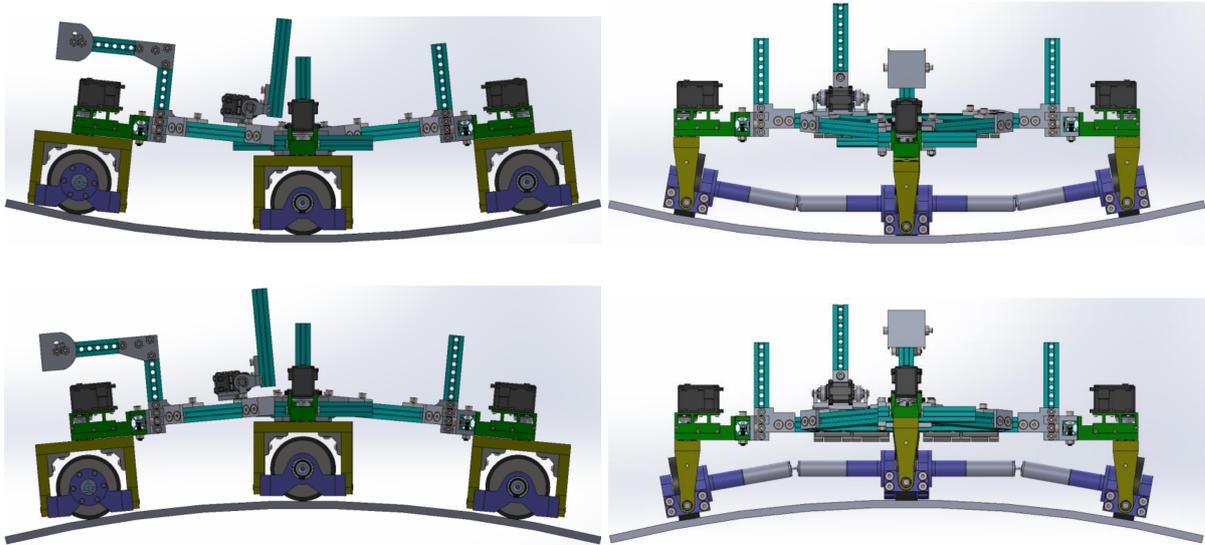
Figura 2.14: Sistema de cambagem das rodas magnéticas.

Fonte: Rosa e Gnoatto (2015).

Como pode ser visto na Figura 2.11, a topologia em losango bipartido e articulado do robô, auxiliada pela cambagem, garante que a força magnética exercida pelas rodas seja máxima, pois seja a superfície plana, cilíndrica ou esférica, as rodas sempre estarão normal à superfície de contato. A Fig. 2.15 apresenta o AIR-2 realizando movimento linear, nota-se que a estrutura mecânica permite que as rodas estejam perpendiculares a superfície. Desse modo, o fluxo magnético aumenta, melhorando a máxima adesão magnética. Além disso, as configurações mecânicas impedem que os motores sem escovas colidam entre si, ou seja, as rodas podem ser redirecionadas para qualquer ângulo que os motores não irão colidir.

Durante o movimento de orientação, visto na Fig. 2.16, as características da estrutura mecânica do robô também permitem que as rodas estejam perpendiculares à superfície, logo, a adesão magnética garantirá aderência do AIR-2 ao tanque.

Para avaliar os limites do AIR-2, foram realizados diversos ensaios e notou-se que o mesmo pode se movimentar em cilindros com raio mínimo de 1682mm de raio e em esferas com raio mínimo de 2090mm , vide (ROSA; GNOATTO, 2015) para maiores informações. A norma da Petrobras N-1281 afirma que o raio mínimo de uma esfera é 7300mm (PETROBRAS, 2011). Portanto, o valor mínimo de raio de uma esfera de GLP, que o robô AIR-2 pode se movimentar, está bem abaixo dos valores mínimos de curvatura dos reservatórios de petróleo e seus derivados. Mais detalhes sobre o projeto mecânico do robô, desenvolvimento das rodas e

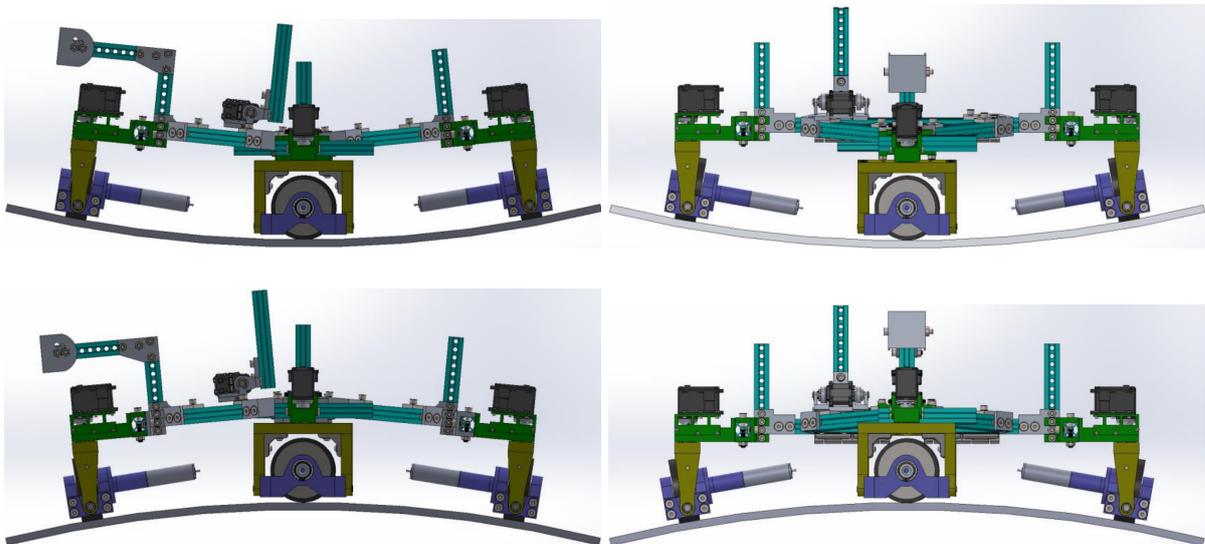


(a) Vista Lateral.

(b) Vista Frontal.

Figura 2.15: Alinhamento mecânico do AIR-2 para o movimento linear dentro e fora da esfera.

Fonte: Rosa e Gnoatto (2015).



(a) Vista Lateral.

(b) Vista Frontal.

Figura 2.16: Alinhamento mecânico do AIR-2 para o movimento de orientação dentro e fora da esfera.

Fonte: Rosa e Gnoatto (2015).

análise da força magnéticas podem ser encontradas em (ROSA; GNOATTO, 2015; ESPINOZA, 2014; ROVANI, 2013).

2.4.2 MANOBRABILIDADE

O AIR-2 foi projetado especialmente para ter manobrabilidade semelhante a um robô omnidirecional, mas devido o uso de rodas direcionáveis magnéticas não poderá haver movimento lateral (restrição de deslizamento lateral e de adesão magnética) sobre as rodas, como apresentado na Figura 2.17.

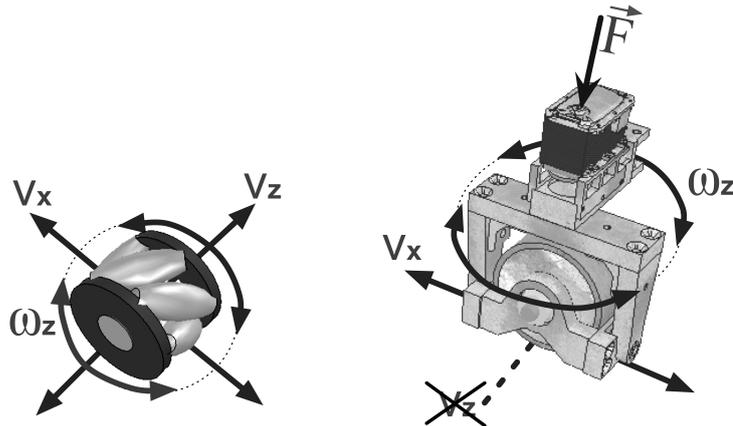


Figura 2.17: Comparação entre a roda omnidirecional e a direcionável do AIR-2.

A roda omnidirecional não é afetada pela restrição de deslizamento lateral, pois a sua construção permite que a roda se movimente nas direções de v_x e v_z respeitando a restrição de rolagem. Portanto, a roda omnidirecional pode se movimentar nas duas direções sem a necessidade de girar o seu eixo que é normal à superfície. Enquanto a roda direcionável é capaz de mover-se na direção de v_x , sendo necessário reorientar para poder se deslocar na direção de v_z . Assim, a principal diferença entre a roda omnidirecional e a roda proposta por Rovani (2013) é a necessidade ou não de reorientação da roda para movimentação no plano.

A Tabela 1 demonstra a comparação do grau de manobrabilidade entre o AIR-2 e um robô omnidirecional padrão.

Tabela 1: Comparação entre AIR-2 e um robô omnidirecional.

	Robô Omnidirecional Padrão	AIR-2
Mobilidade (δ_m)	3	1
Dirigibilidade (δ_s)	0	2
Manobrabilidade (δ_M)	3	3

Basicamente, o grau de mobilidade é obtido a partir da análise das restrições cinemáticas das rodas, como as rodas do robô omnidirecional não apresentam restrição de deslizamento lateral, ele possui o maior grau de mobilidade ($\delta_m = 3$). Já as rodas direcionáveis do AIR-2 possuem restrições cinemáticas, sendo assim, ele apresenta $\delta_m = 1$. Já o grau de

dirigibilidade é obtido com base no número de rodas orientáveis, portanto, o robô AIR-2 apresenta $\delta_s = 2$, uma vez que apresenta mais de duas rodas direcionáveis, enquanto o robô não apresenta nenhuma roda direcionável ($\delta_s = 0$). Vale ressaltar que os graus de manobrabilidade, mobilidade e dirigibilidade possuem limites: $1 \leq \delta_m \leq 3$, $0 \leq \delta_s \leq 2$ e $2 \leq \delta_M \leq 3$ (SIEGWART; NOURBAKHSI, 2004).

Dessa maneira, conclui-se que o AIR-2 possui o mesmo grau de manobrabilidade de um robô omnidirecional, com uma ressalva de que o omnidirecional pode se reorientar enquanto se movimenta. Enquanto, o AIR-2 não pode executar esse tipo de ação, devido à restrição imposta pela adesão magnética de deslizamento lateral. No entanto, essa restrição de movimento não afeta a inspeção do tanque e torna o AIR-2 apto para essa atividade, visto que pode-se realizar o mesmo movimento, mas em duas ações distintas.

Portanto, o AIR-2 cumpre com os requisitos de manobrabilidade, estabilidade mecânica e adesão magnética. Sendo necessário a implementação de uma estratégia de controle que permita a sua movimentação de acordo com a máxima manobrabilidade. Os próximos capítulos darão detalhes sobre a estratégia de controle proposta para o AIR-2.

3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE INTELIGENTE

Este capítulo apresenta uma proposta de controle inteligente implementada para o robô escalador AIR-2. O controlador inteligente é composto por vários subcontroladores, voltados para posição e velocidade, os quais serão discutidos individualmente. O controle proposto melhora a manobrabilidade do AIR-2 de modo que sejam respeitadas as restrições impostas pelo modelo dinâmico e pela adesão magnética.

3.1 CONTROLE INTELIGENTE DE VELOCIDADE

Apesar da alta manobrabilidade do AIR-2, o robô escalador está sujeito a restrições não-holonômicas, dado que as suas rodas não podem deslizar lateralmente em virtude da restrição de deslizamento lateral e da adesão magnética (FIGUEIREDO; JOTA, 2004). Um sistema é holonômico quando a restrição imposta ao modelo cinemático é integrável. Por outro lado, quando a restrição não é integrável, o sistema é dito não-holonômico (FIGUEIREDO; JOTA, 2004; GIORDANO et al., 2009; KECSKÉS et al., 2012).

Infelizmente, o controle de sistemas não-holonômicos não é uma tarefa fácil, mas desde que sejam controláveis e atingíveis, esses sistemas podem ser estabilizados (FIGUEIREDO; JOTA, 2004). Há algumas estratégias de controle para robôs não-holonômicos: planejamento de trajetórias, rastreamento de trajetórias, estabilização num ponto, controle híbrido e controle adaptativo (FIGUEIREDO; JOTA, 2004). Wang et al. (2004) utilizaram o rastreamento de trajetória, em que uma lei de controle é projetada para que o robô possa seguir uma trajetória calculada previamente. Yuan et al. (2001) propuseram um controlador de rastreamento de trajetória baseado na análise dinâmica do erro de um robô móvel e em um modelo dinâmico neural, enquanto, Yu et al. (2008) utilizaram um controlador Fuzzy adaptativo.

Dadas as características não-lineares do AIR-2, tais como as folgas dos servo motores e o sistema de cambagem, e a dificuldade na obtenção do modelo dinâmico do robô escalador, a modelagem dinâmica do robô escalador torna-se uma tarefa árdua. A solução proposta foi utilizar técnicas de "soft-computing" ou inteligência computacional, em especial os sistemas

Fuzzy, uma vez que essas técnicas proporcionam a implementação de um controlador sem a necessidade do conhecimento dos modelos cinemático e dinâmico do sistema (KARIM; ARDESTANI, 2016; LIU, 2009). Além do mais, o controle Fuzzy reduz a complexidade do controlador, minimiza as perturbações existentes no controle, facilita a incorporação do conhecimento sobre o comportamento do sistema a ser controlado e, também, facilita a incorporação de um grande número de entradas de controle. Portanto, o controlador do AIR-2 será implementado utilizando os princípios do controle Fuzzy, aproveitando-se principalmente da sua capacidade de abstração do modelo cinemático do sistema a ser controlado (MICHELS et al., 2006).

Antes de iniciar a discussão da estratégia de controle inteligente é necessário realizar a definição do sistema de referência do robô, como visto na Figura 3.1.

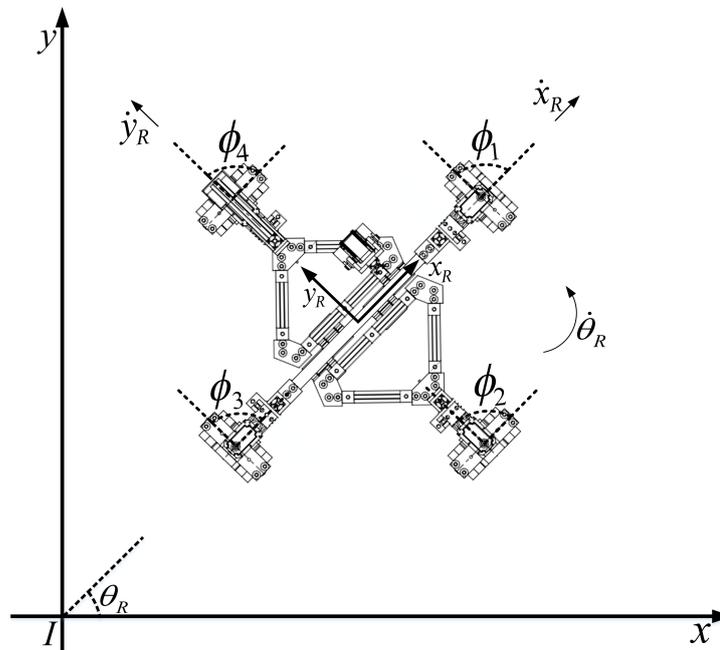


Figura 3.1: Robô AIR-2 no plano cartesiano.

As variáveis apresentadas na figura anterior, serão utilizadas no controle do robô AIR-2. As variáveis que apresentarem a letra 'R' subscrita (*robot* = robô) são em relação ao centro do robô, já as variáveis com a letra 'G' representam o objetivo (*goal*) ou referência do controlador implementado. Sendo assim, \dot{x}_R é a velocidade linear no eixo x do robô, \dot{y}_R é a velocidade linear no eixo y do robô, $\dot{\theta}_R$ é a velocidade angular do robô, ϕ_i é a ângulo da roda i ($i = 1..4$), $\dot{\phi}_R$ é a velocidade angular dos servo motores, x_R é a posição no eixo x do robô, y_R é a posição no eixo y do robô e θ_R é a orientação do robô.

Como já foi dito anteriormente, o AIR-2 foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a sua manobrabilidade e tenta se equiparar com um robô omnidirecional. Entretanto, devido às

restrições impostas pela adesão magnética, alguns movimentos precisam ser subdivididos em dois movimentos sequenciais, minimizando o escorregamento lateral das rodas. Desta maneira, respeitando as restrições de deslizamento lateral, de rolagem e de adesão magnética, o AIR-2 será controlado a partir da sua velocidade linear desejada (\dot{x}_G e \dot{y}_G) e da velocidade angular desejada $\dot{\theta}_G$, ou seja, a partir do vetor de entrada $\dot{\xi}_G$ do controle, como definido na Equação 3:

$$\dot{\xi}_G = \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta}_G \end{bmatrix} \quad (3)$$

Portanto, seja a entrada $\dot{\xi}_G$ do controle inteligente de velocidade, o controlador será subdividido em três movimentos possíveis: movimento linear (\dot{x}_G e \dot{y}_G), movimento de orientação ($\dot{\theta}_G$) e movimento livre (\dot{x}_G , \dot{y}_G e $\dot{\theta}_G$). O controlador inteligente de velocidade pode ser visto na Figura 3.2.

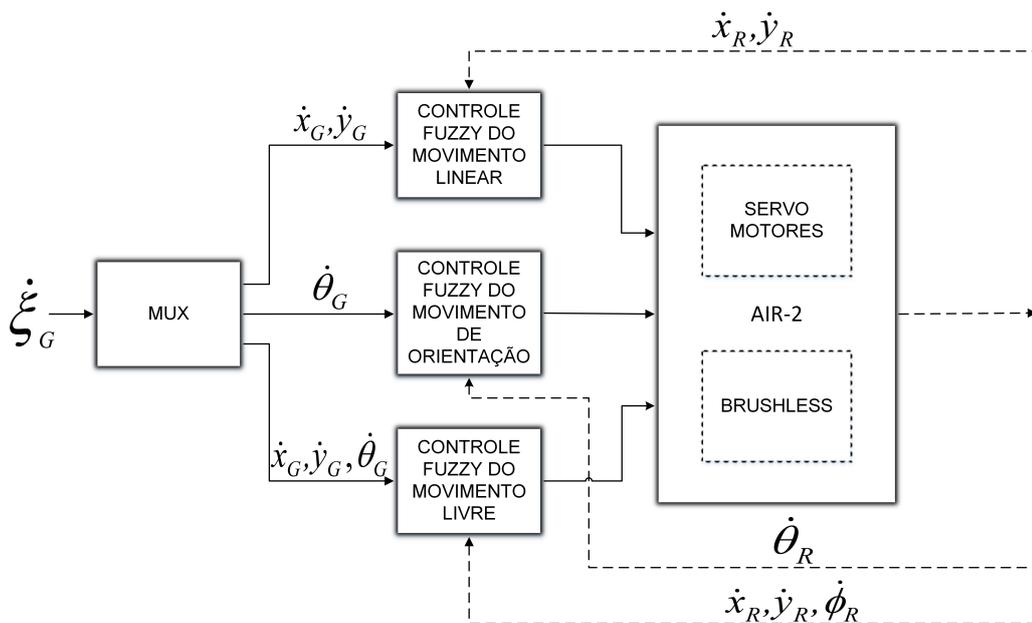


Figura 3.2: Controlador Inteligente de Velocidade do AIR-2.

A Tabela 2 exibe a tabela verdade para o Controle Inteligente de Velocidade, em que dependendo da entrada, o multiplexador (MUX) ativará um controlador de movimento em específico.

Sendo assim, se a entrada do controlador for apenas a velocidade linear, o controle de movimento linear será ativado. Se a entrada for a velocidade angular, então o controlador de movimento de orientação será selecionado. E quando houver as duas velocidades, linear e angular, o controle de movimento livre será ativado.

Tabela 2: Tabela Verdade do Controle Inteligente de Velocidade.

$\dot{\theta}_G$	\dot{y}_G	\dot{x}_G	Movimento Linear	Movimento de Orientação	Movimento Livre
0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1

Cada controlador de movimento acionará os oito motores do AIR-2, sendo que 4 são servo motores e os outros 4 são os motores sem escovas (*brushless*). Os servo motores serão controlados pela posição. Enquanto, os motores sem escovas serão controlados pela velocidade angular, de acordo com a velocidade linear desejada para o robô.

Em resumo, o controlador de cada motor será do tipo PD Fuzzy incremental seguindo o mesmo padrão de modelagem apresentado por Passino e Yurkovich (1998). Essencialmente, um controlador Fuzzy PD incremental possui duas entradas e uma saída, ou seja, um sistema MISO (*Multiple-Input Single-Output: Múltiplas Entradas e Saída Única*). As entradas são o erro e e a variação do erro ce (*change of error*), e a saída *output*. A principal vantagem do controlador PD Fuzzy é a redução dos sobressinais existentes no sistema a ser controlador. Uma vez que Passino e Yurkovich (1998) demonstraram a estabilidade do controlador PD Fuzzy através de Lyapunov, o controle inteligente de velocidade é estável.

3.1.1 CONTROLE FUZZY DO MOVIMENTO LINEAR

O controlador Fuzzy do movimento linear somente é acionado quando a entrada $\dot{\xi}_G$ possui as velocidades lineares \dot{x}_G e \dot{y}_G , sendo responsável por realizar os movimentos indicados pelas setas visualizadas na Figura 3.3.



Figura 3.3: Direções dos movimentos (setas sobre o AIR-2) que podem ser realizadas pelo Controlador Fuzzy do Movimento Linear.

Como apresentado pelas setas negras dispostas sobre o robô na Figura 3.3, o controlador do Movimento Linear permite que o AIR-2 possa se deslocar nas direções x , y ou a combinação das direções x e y . Logo, o movimento a ser executado por este controlador é gerado pelo vetor resultante entre as velocidades \dot{x}_G e \dot{y}_G .

Sendo assim, a entrada do controle só pode ser a velocidade linear \dot{x}_G e/ou \dot{y}_G . A Figura 3.4 demonstra em detalhes o controle Fuzzy do movimento linear.

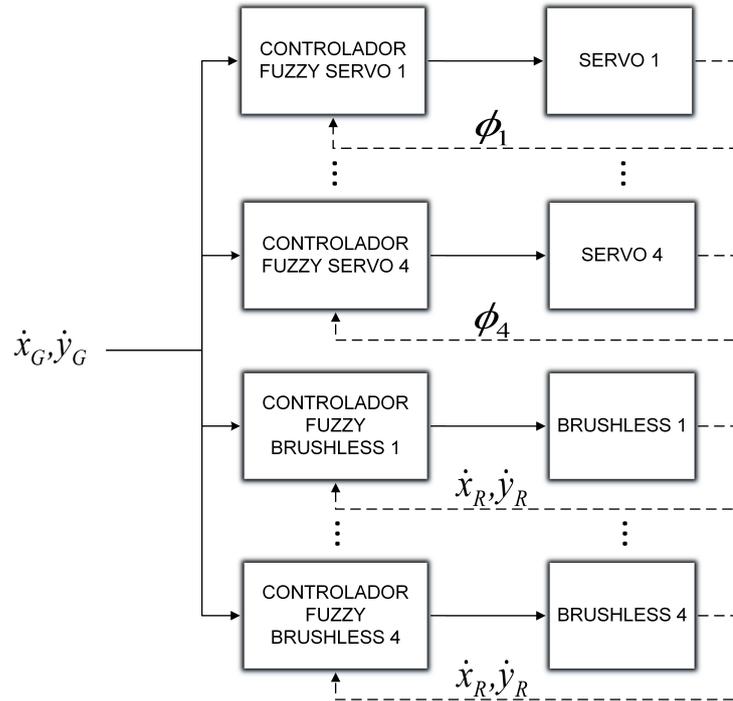


Figura 3.4: Controlador Fuzzy do Movimento Linear do AIR-2.

O controlador do movimento linear atua sobre os oito motores, sendo que cada motor possui um controlador Fuzzy. Assim, os servo motores são controlados de acordo com o ângulo ϕ_G formado pelas velocidades \dot{x}_G e \dot{y}_G , como ilustrado na Equação 4, enquanto que são realimentados pelos ângulos fornecidos pelos seus encoders (ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4).

$$\phi_G = \arctan\left(\frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G}\right) \quad (4)$$

Já os motores sem escovas são controlados pela norma euclidiana ω_G fornecida por \dot{x}_G e \dot{y}_G (Equação 5), ao passo que são realimentados pela norma euclidiana ω_R das velocidades lineares \dot{x}_R e \dot{y}_R do robô, definido na Equação 6. As velocidades lineares \dot{x}_R e \dot{y}_R são obtidas a partir da odometria das rodas do AIR-2.

$$\omega_G = \sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2} \quad (5)$$

$$\omega_R = \sqrt{\dot{x}_R^2 + \dot{y}_R^2} \quad (6)$$

Isto posto, definiu-se as entradas do controlador Fuzzy dos motores sem escovas como sendo o erro e_ω e a variação do erro da velocidade ce_ω , como apresentado pelas Equações 7 e 8. Ao passo que a saída *output* do controlador será o incremento da velocidade dos motores sem escovas.

$$e_\omega = \omega_G - \omega_R \quad (7)$$

$$ce_\omega = e_{\omega_{atual}} - e_{\omega_{anterior}} \quad (8)$$

Os limites de entrada e de saída do controlador foram estabelecidos levando em consideração a eficiência do robô durante a inspeção, dessa forma, ele deve mover-se em velocidades entre 0.1 e 0.2 m/s (SHEN et al., 2005). A entrada do controlador foi projetada como apresentado na Fig. 3.5a, ao mesmo tempo que a saída tal qual a Fig. 3.5b. Os graus de pertinência das entradas e da saída foram obtidos empiricamente para todos os controladores Fuzzy de movimentos do AIR-2.

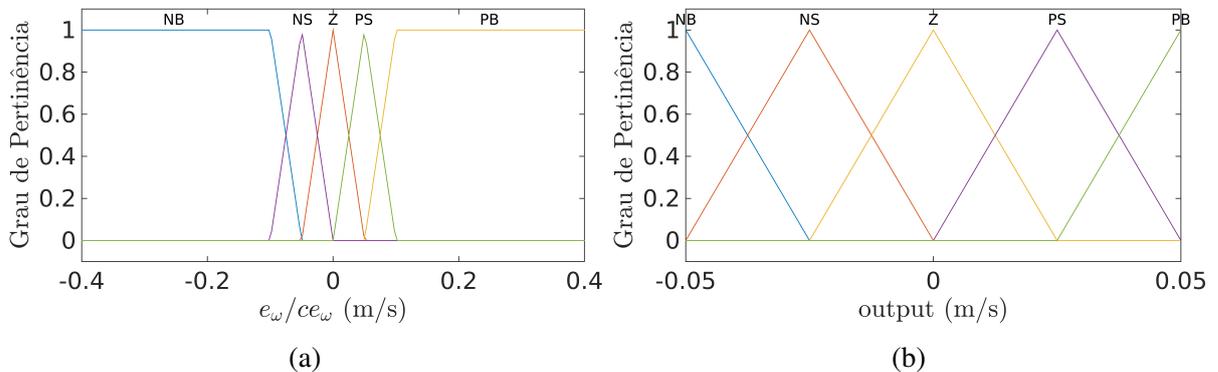


Figura 3.5: Funções de associação para o Controlador Fuzzy Brushless do (a) erro e a variação do erro e (b) incremento da velocidade.

As regras Fuzzy para o controlador do motor sem escovas são mostradas na Tabela 3. Os termos linguísticos utilizados pelas entradas e saída do controle são: NB (*Negative Big*: Negativo Grande), NS (*Negative Small*: Negativo Pequeno), Z (Zero), PS (*Positive Small*: Positivo Pequeno) e PB (*Positive Big*: Positivo Grande).

Já as entradas dos controlador Fuzzy dos servo motores são o erro e_ϕ e a variação do erro do ângulo ce_ϕ definidas, respectivamente, na Equação 9 e 10. A saída *output* é o

Tabela 3: Tabela de regras.

ce \ e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	PS	PS
NS	NB	NB	Z	PS	PB
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NB	NS	Z	PB	PB
PB	NS	NS	PS	PB	PB

incremento do ângulo demonstrada na Fig. 3.6b.

$$e_\phi = \phi_G - \phi_i^1 \quad (9)$$

$$ce_\phi = e_{\phi_{atual}} - e_{\phi_{anterior}} \quad (10)$$

As regras para o controlador dos servos são as mesmas apresentadas no controle Fuzzy dos motores sem escovas e suas funções de associação das entradas podem ser vistas na Figura 3.6a.

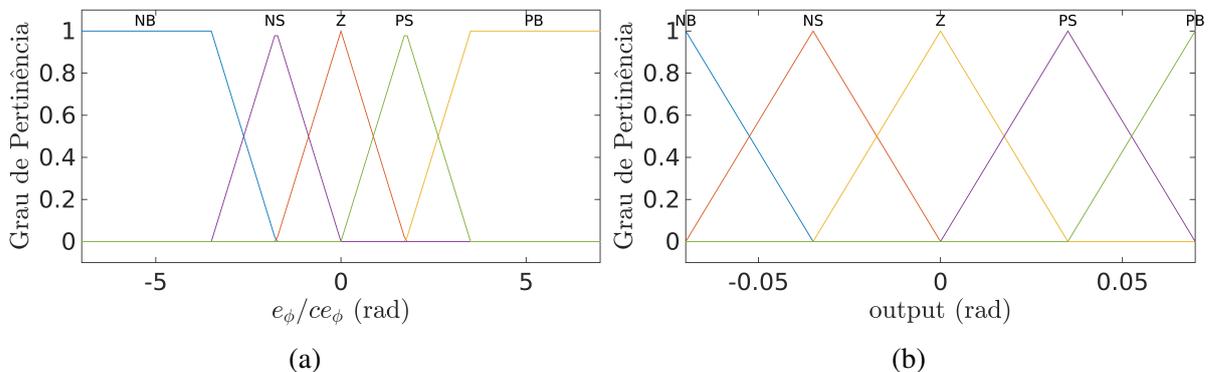


Figura 3.6: Funções de associação para o Controlador Fuzzy do Servo do (a) erro e a variação do erro e (b) ângulo de incremento para o Movimento Linear.

3.1.2 CONTROLE FUZZY DO MOVIMENTO DE ORIENTAÇÃO

O controlador Fuzzy do movimento de orientação atua somente quando a entrada do controle inteligente de velocidade é $\dot{\theta}_G$, portanto, como seu próprio nome diz, ele é utilizado na orientação do robô. Na Figura 3.7 pode ser visualizado em detalhes o controlador.

¹ $i \in \mathbb{Z}$, $i \in [1, 4]$ e representa o servo motor a ser controlado

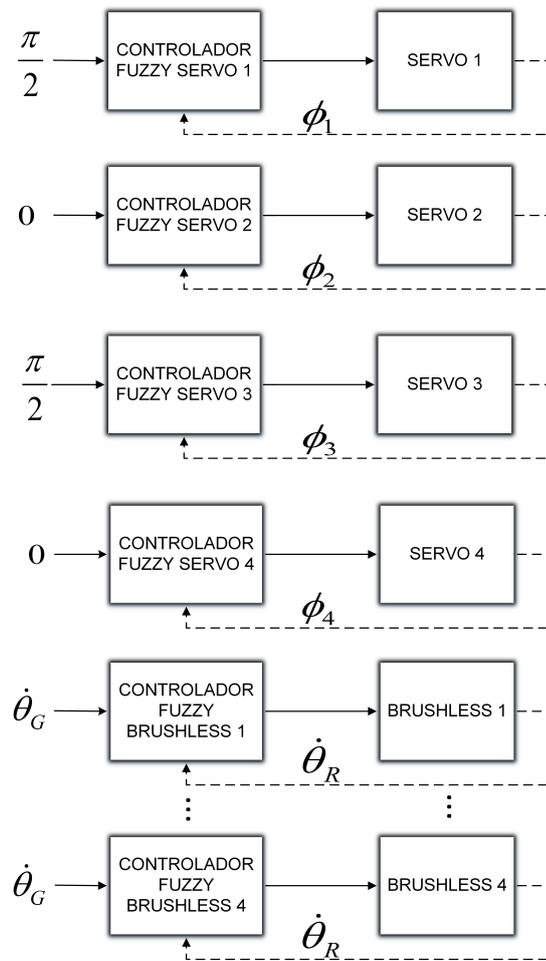


Figura 3.7: Controlador Fuzzy do Movimento de Orientação do AIR-2.

Para realizar o movimento de orientação, o AIR-2 necessita reorientar as suas rodas de forma que ele possa girar em torno do seu eixo z. Para isso, ele precisa parar completamente o robô, então reorientar as rodas 1 e 3 em 90° , e as rodas 2 e 4 em 0° . Assim, pode-se dar início ao movimento.

Para o controle de orientação, os controladores dos motores foram os mesmos utilizados do controle Fuzzy do movimento linear, com a diferença que os motores sem escovas farão o controle de suas velocidades de acordo com a velocidade angular $\dot{\theta}_G$ e serão realimentados pela velocidade angular $\dot{\theta}_R$. Enquanto, as entradas desejadas dos controladores dos servo motores foram definidos de acordo com a sua posição, como demonstrado na Fig. 3.7 e são realimentados pelos seus encoders.

3.1.3 CONTROLE FUZZY DO MOVIMENTO LIVRE

O controle Fuzzy de movimento livre consiste em movimentos com velocidade linear e angular, o que faz com que o AIR-2 execute movimentos curvilíneos. Existem 3 configurações

de entradas possíveis para esse movimento, a primeira seria a entrada ter apenas as velocidades \dot{x}_G e $\dot{\theta}_G$. A segunda possibilidade de entrada refere-se as velocidades \dot{y}_G e $\dot{\theta}_G$. E finalmente, a última possibilidade seria as 3 três velocidades \dot{x}_G , \dot{y}_G e $\dot{\theta}_G$. A Fig. 3.8 demonstra o controlador Fuzzy do movimento livre.

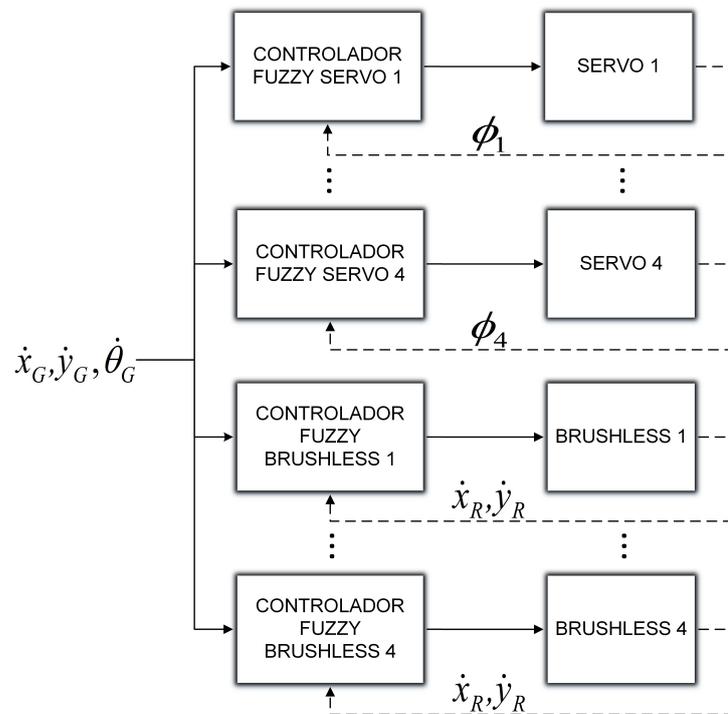


Figura 3.8: Controlador Fuzzy do Movimento Livre do AIR-2.

Nota-se que este controlador é muito parecido com o controlador utilizado no movimento linear, há apenas uma diferença em relação aos controladores dos servo motores. Como o AIR-2 não pode mover-se e reorientar ao mesmo tempo, ele precisa fazer em duas ações distintas. Portanto, a realimentação da velocidade angular será proveniente da velocidade angular dos servos.

A entrada dos controladores dos servo motores varia continuamente, pois a velocidade angular $\dot{\theta}_G$ é integrada e acumulada ao ângulo fornecido pelas velocidades \dot{x}_G e \dot{y}_G . Dito isso, o controle Fuzzy para os servo motores teve de ser adequado, assim utilizou-se dos mesmos limites e regras do controle Fuzzy para os movimentos linear e de orientação. Entretanto, as funções de associação de entrada foram mudadas. Para que o controlador obtivesse uma melhor resposta em relação a variação do ângulo desejado, estreitou-se as funções de associação centrais (NS, Z e PS) e aumentou-se as duas funções extremas (NB e PB), como pode ser visto na Fig. 3.9. As funções de associação da saída mantiveram-se as mesmas dos controladores dos movimentos linear e de orientação.

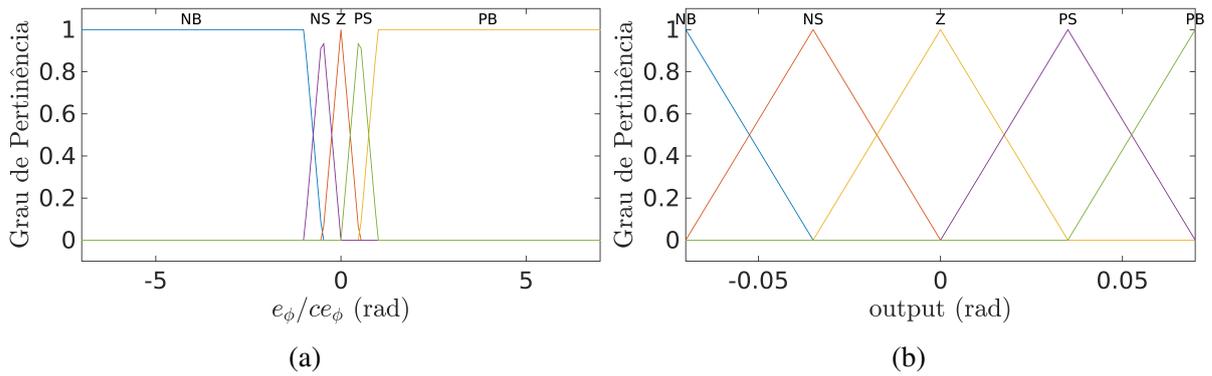


Figura 3.9: Funções de associação para o Controlador Fuzzy do Servo do (a) erro e a variação do erro e (b) ângulo de incremento para o Movimento Livre.

3.2 CONTROLE DE POSIÇÃO

Com o propósito de analisar-se a precisão dos movimentos do AIR-2, será desenvolvido um controlador de posição. A entrada do controle é definida pela Equação 11.

$$\xi_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \theta_G \end{bmatrix} \tag{11}$$

Onde ξ_G é o vetor de entrada do controle de posição, x_G é posição no eixo x desejada, y_G é posição no eixo y desejada e θ_G é orientação desejada. O controle de posição será colocado em cascata com o de velocidade, assim como na Fig. 3.10.

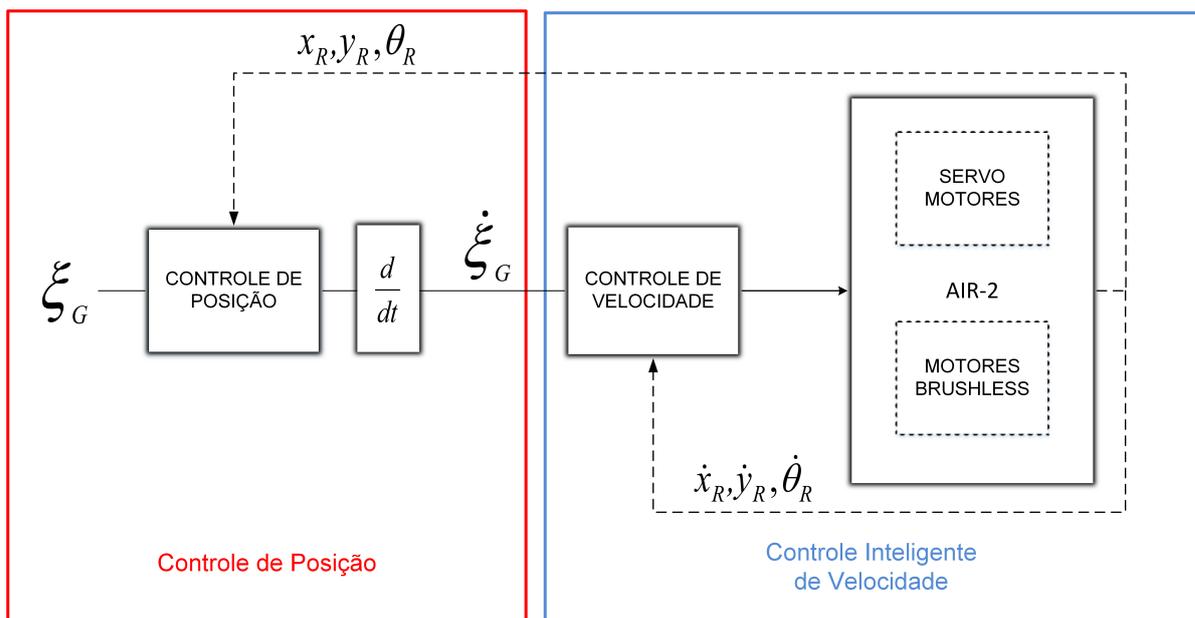


Figura 3.10: Controle em cascata do AIR-2.

O controle de posição atuará sobre a posição e orientação do robô, ele foi implementado utilizando um controlador proporcional. Seguindo a mesma lógica do controle inteligente de velocidade, a posição e orientação do AIR-2 serão controladas de forma independentes, uma vez que o robô realiza esse tipo de movimento em duas ações distintas. A Fig. 3.11 demonstra o controlador implementado.

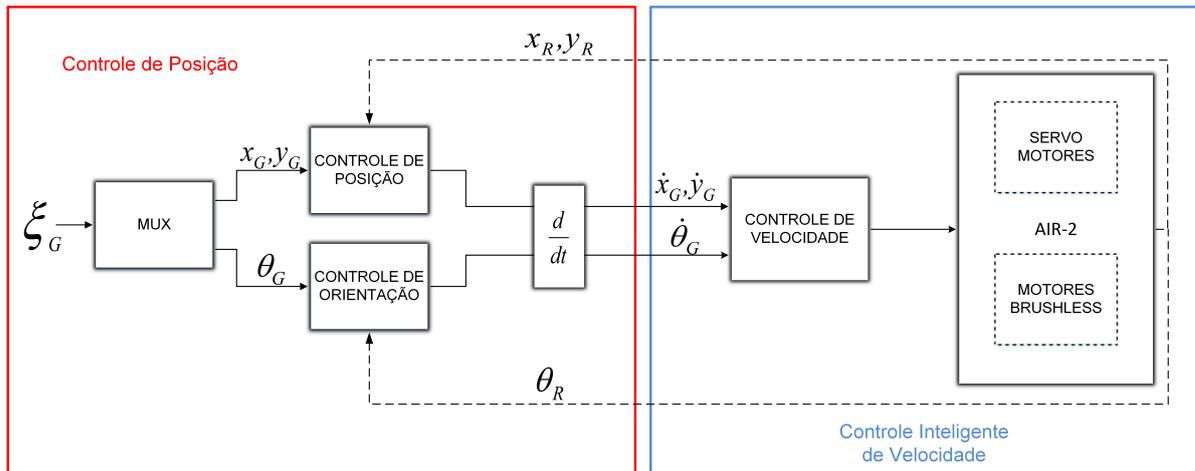


Figura 3.11: Controlador de Posição do AIR-2.

Seja o vetor de entrada ξ_G , tal como é exibido pela Eq. 12, o controlador possui uma chave seletora que conforme a prioridade escolhida, ativará o controle de posição ou de orientação em primeiro lugar.

$$\xi_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \theta_G \end{bmatrix} \quad (12)$$

Dessa forma, o AIR-2 executará o controle da posição na primeira ação, caso a prioridade seja a posição, e ao chegar ao ponto desejado será reorientado de acordo com a orientação desejada. Da mesma forma, pode ocorrer o contrário se a prioridade for a orientação, então o robô se reorientará e só então será movido até a posição desejada.

O controle de posição é realimentado pela orientação (θ_R) e posição (x_R e y_R) no plano do robô. Ele fornecerá a entrada ξ_G para o Controle Inteligente de Velocidade do robô de inspeção, a partir da derivada da sua saída, como definido pela Eq. 13. Entretanto, o controlador de posição ativará apenas os movimentos linear e de orientação. Dado que o movimento linear e livre são similares e o linear seria uma derivação do movimento livre, o controle de posição não proporcionará movimentos curvilíneos.

$$\dot{\xi}_G = \frac{d\xi_G}{dt} \quad (13)$$

Os próximos capítulos irão analisar a estratégia de controle inteligente proposto em dois cenários. O primeiro será um cenário virtual com a aplicação em ambientes tridimensionais, voltado à tarefa de inspeção dos tanques de armazenamento esféricos. O segundo experimento será em um protótipo real do robô de inspeção, onde será avaliado em detalhes o desempenho da estratégia de controle proposta.

4 EXPERIMENTAÇÃO VIRTUAL EM VASOS DE PRESSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados simulados do Controle Inteligente de Velocidade. Também será brevemente apresentado o *ROS*, que é o sistema operacional utilizado pelo controle do AIR-2, e o simulador de robôs *V-REP*, que foram utilizados na validação do controlador.

4.1 ROBÔ DE INSPEÇÃO VIRTUAL

Para a simulação dos experimentos do controlador inteligente de velocidade foi utilizado o *V-REP* (*Virtual Robot Experimentation Platform*), que é um simulador 3D de robôs baseado em uma arquitetura de controle distribuída, no qual cada modelo/objeto pode ser controlado individualmente através de um script incorporado ou até mesmo por um nó do *ROS* (*ROBOTICS*, 2016). Além disso, o simulador *V-REP* permite a modelagem de sistemas robóticos semelhante ao mundo real.

Na Figura 4.1 é demonstrado a modelagem virtual do robô AIR-2. O *V-REP* permite importar o projeto mecânico do robô, o que facilita a modelagem do sistema robótico virtual. A modelagem inclui toda a estrutura mecânica, motores, sensores e sistema de adesão do AIR-2 real.

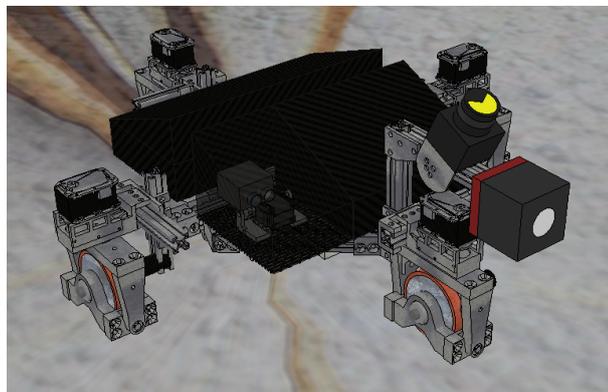


Figura 4.1: AIR-2 virtual.

O sistema de percepção utilizado pelo robô virtual é composto por 2 fontes. Uma IMU com 6 graus de liberdade, sendo eles um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio de 3 eixos. E por fim, os encoders que fornecem posição e velocidade dos motores.

A odometria do robô virtual foi obtida a partir das suas rodas e giroscópio, ou seja, as velocidades lineares \dot{x}_R e \dot{y}_R são geradas pela média das velocidades lineares \dot{x} e \dot{y} das rodas, enquanto a velocidade angular $\dot{\theta}_R$ é adquirida pela velocidade angular no eixo z do giroscópio.

4.1.1 ROBOT OPERATING SYSTEM - ROS

A programação do robô escalador foi desenvolvida no ROS (*Robot Operating System*), que é um Sistema Operacional para Robôs. O ROS é um *framework*¹ em código aberto, que fornece uma coleção de ferramentas e bibliotecas para simplificar o desenvolvimento de software para diversas plataformas robóticas (ROS, 2016). Em virtude da grande aceitação tanto na indústria quanto no meio acadêmico, o ROS foi empregado na programação do AIR-2, uma vez que ele oferece diversas ferramentas e bibliotecas compatíveis com os mais diversos sensores, atuadores e robôs.

O ROS possui alguns conceitos básicos: nós, tópicos, publicador e subscritor. Basicamente, os nós (*nodes*) são processos que comunicam entre si através do ROS. A comunicação entre processos (nós) é feita através de tópicos ("local" de compartilhamento de informações entre nós), em que um ou mais nós podem publicar informações, então chamados de publicadores (*publishers*). Os subscritores ou *subscribers* são nós que leem as informações disponíveis nos tópicos.

Além do ROS, foi utilizado uma biblioteca de lógica Fuzzy em código-aberto, a biblioteca *Fuzzylite*, para a implementação do controle inteligente do AIR-2. Essa biblioteca possui uma interface gráfica, *QtFuzzyLite 4*, que otimiza o processo de implementação de um controlador Fuzzy (RADA-VILELA, 2014).

4.1.2 NÓS E TÓPICOS

O controle do robô virtual foi desenvolvido de acordo com a estrutura de nós e tópicos fornecida pelo ROS. Sendo assim, a Figura 4.2 demonstra os principais tópicos e nós presentes no controlador inteligente.

¹“Um framework de desenvolvimento é uma 'base' de onde se pode desenvolver algo maior ou mais específico. É uma coleção de códigos-fonte, classes, funções, técnicas e metodologias que facilitam o desenvolvimento de novos softwares.” (MINETTO, 2007)

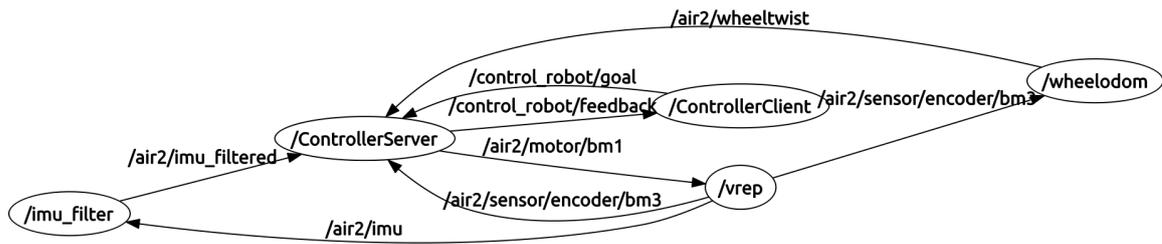


Figura 4.2: Diagrama de interação entre os nós e tópicos do controle inteligente do AIR-2 virtual.

Os nós presentes no controle inteligente do robô virtual são:

- *ControllerClient*: cliente do controlador inteligente de velocidade;
- *ControllerServer*: servidor do controlador inteligente de velocidade;
- *wheelodom*: faz o cálculo da odometria a partir das rodas;
- *vrep*: nó do simulador que fornece os dados de sensores e controla os motores do robô virtual;
- *imu_filter*: faz a filtragem dos dados enviados pelo acelerômetro e giroscópio.

Os nós, descritos acima, acessam as informações dos sensores e acionam os motores do AIR-2 através de tópicos, como pode ser visto pela Fig. 4.2. Os tópicos que são utilizados pelo controle inteligente são descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Tópicos do ROS utilizados pelo controlador inteligente.

Nome do Tópico	Descrição
/cmd_vel	recebe as velocidades desejadas do controlador inteligente de velocidade
/air2/wheeltwist	fornece a velocidade linear do robô virtual
/air2/sensor/encoder/bm1..4	fornece a velocidade angular e posição dos motores sem escovas
/air2/sensor/encoder/sm1..4	informa o ângulo e velocidade angular dos servo motores
/air2/motor/bm1..4	recebe a velocidade angular que os motores sem escovas devem ser submetidos
/air2/motor/sm1..4	recebe o ângulo que os servo motores devem ser submetidos
/air2/imu	fornece a aceleração linear e velocidade angular do robô virtual

4.1.3 TRANSFORMAÇÕES

Na robótica, há diferentes sistemas de coordenadas que podem ser utilizados na localização do robô, como os sensores, o centro de gravidade do robô e o espaço de trabalho do sistema robótico. Conseqüentemente, deve existir um elo entre os sistemas de coordenadas, o qual é realizado pelas transformações lineares.

As transformações lineares dos sistemas de coordenadas permitem que o sistema de sensoriamento do robô, bem como a sua própria referência, estejam em uma mesma referência. Diante disso, a Figura 4.3 demonstra a árvore de transformações do AIR-2 no simulador.

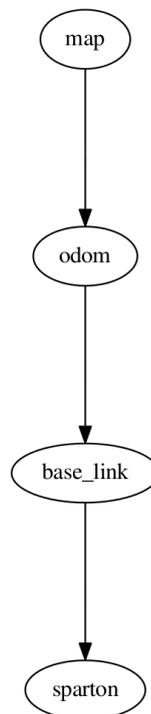


Figura 4.3: Árvore de Transformações do AIR-2 virtual.

A árvore de transformações indica as relações entre os sistemas de coordenadas existentes. Sendo assim, o sistema de coordenadas *map* diz respeito ao referencial do mapa criado pelo V-REP, indicando a referência para os demais sistemas de coordenadas. Já o *odom* é a localização inicial do robô, é a partir dessa referência que o robô se localiza, ou seja, gera a sua odometria. O *base_link* é o centro do robô, enquanto o *sparton* é o centro da IMU.

4.2 VASO DE PRESSÃO VIRTUAL

O vaso de pressão também foi modelado no V-REP, a Figura 4.4 demonstra a modelagem do tanque esférico no ambiente de simulação, ela foi projetada para ter as mesmas

características físicas de um tanque real. A interação entre o AIR-2 e o tanque GLP é semelhante ao mundo real, tendo os efeitos da força gravitacional, adesão magnética, atrito e colisões considerados durante a simulação.



Figura 4.4: Tanque esférico modelado no simulador V-REP.

As dimensões do tanque virtual estão muito próximas do real, sendo que o virtual apresenta um diâmetro de 12.3m, enquanto um tanque real pode ter, pelas normas da Petrobras, um diâmetro de 14.6 ou 18.25m (PETROBRAS, 2011).

4.3 EXPERIMENTAÇÃO VIRTUAL

Para a experimentação virtual do controlador inteligente foram realizados dois experimentos. O primeiro demonstra a capacidade de escalagem do robô AIR-2 em um tanque, enquanto o segundo avalia os 3 movimentos possíveis do Controle Inteligente de Velocidade.

4.3.1 EXPERIMENTO DE ESCALADA

Para avaliar a capacidade de escalada do AIR-2 foi realizado uma trajetória em que o robô subirá até a parte superior do tanque virtual e então ele se reorientará. A Figura 4.5

demonstra vários ângulos da trajetória percorrida (em amarelo).

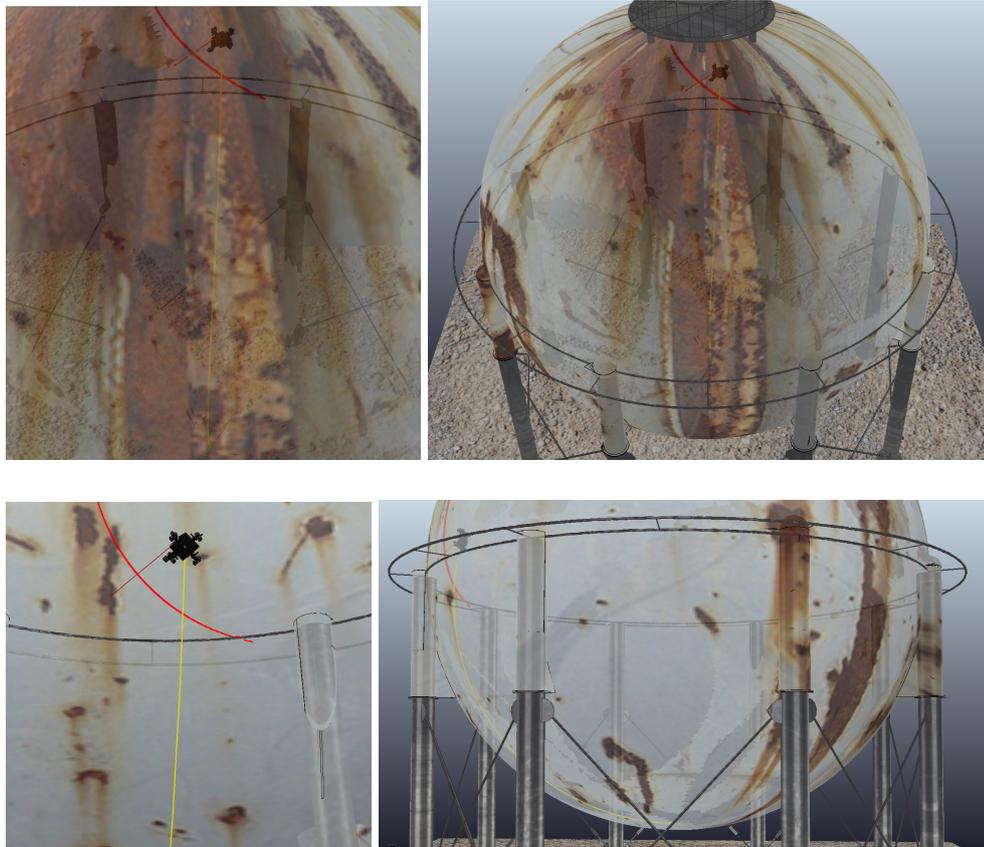


Figura 4.5: Ângulos diferentes da trajetória executada durante o experimento de escalada.

A resposta do Controlador Inteligente de Velocidade para o experimento de escalada pode ser vista nas Figuras 4.6 e 4.7.

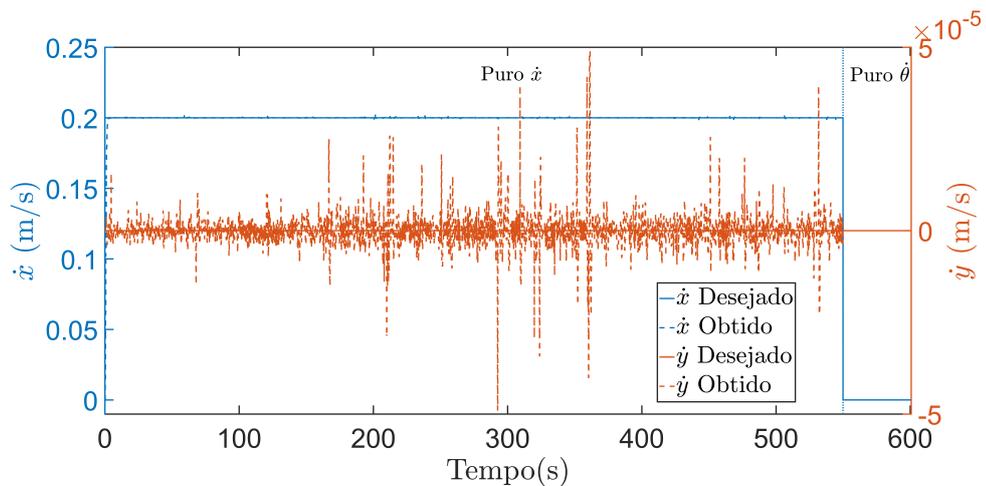


Figura 4.6: Gráfico das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento de escalada.

Nota-se que o controle possui uma boa resposta, além dos erros do controlador serem pequenos, como ilustrado pelas Fig. 4.8 e 4.9.

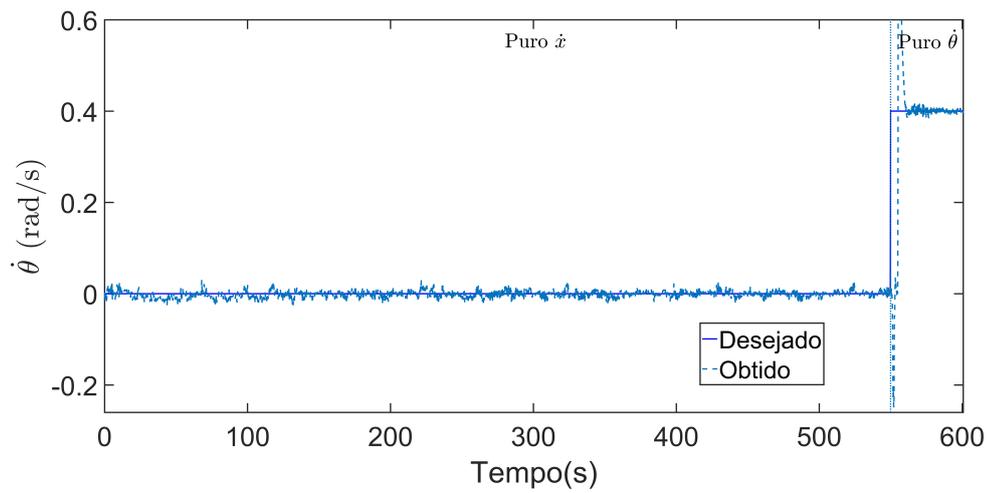


Figura 4.7: Gráfico da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento de escalada.

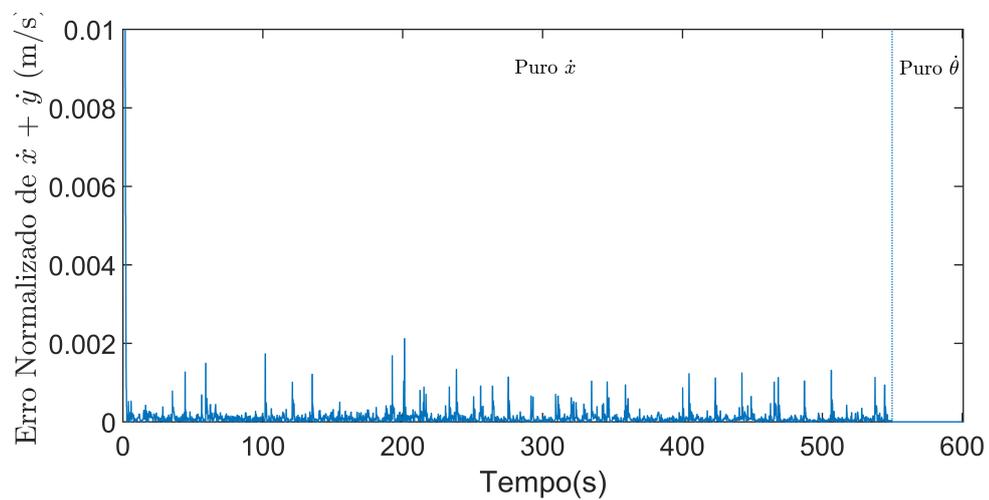


Figura 4.8: Gráfico do Erro das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento de escalada.

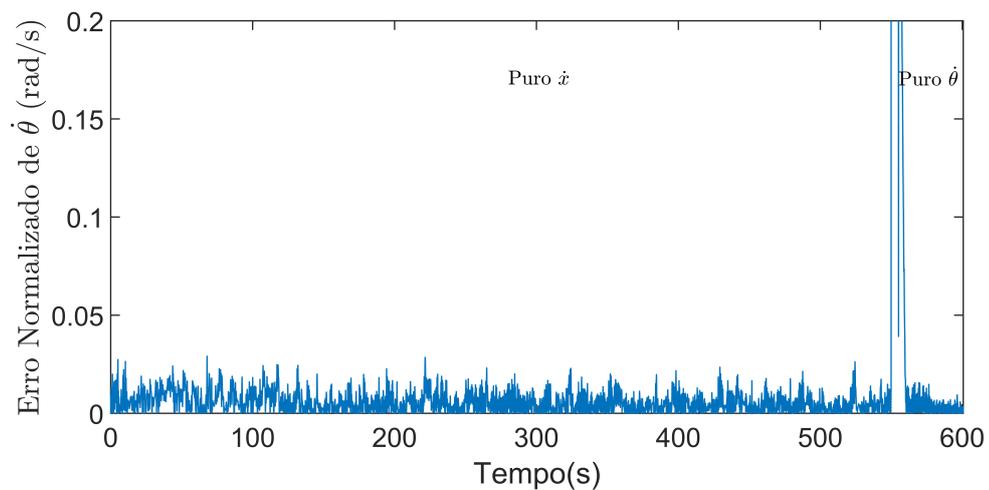


Figura 4.9: Gráfico do Erro da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento de escalada.

Dessa maneira, fica demonstrada a capacidade de escalagem do robô AIR-2 em

tanques de armazenamento. O próximo experimento avaliará com maiores detalhes o Controle Inteligente de Velocidade do robô escalador.

4.3.2 EXPERIMENTO COM TODOS OS MOVIMENTOS POSSÍVEIS

Para a validação virtual do Controle Inteligente de Velocidade foi realizado uma trajetória com 5 entradas diferentes. Através dessas entradas foi abrangido todos os movimentos possíveis que o AIR-2 pode ser submetido. Arbitrou-se o controle de velocidade no robô escalador, pois a maioria dos sistemas robóticos são controlados pela suas velocidades \dot{x} , \dot{y} e $\dot{\theta}$. Sendo assim, com o planejamento da trajetória no tanque e a capacidade de escalar superfícies metálicas, respeitando as limitações da estrutura mecânica, o AIR-2 pode navegar em ambientes 3D (tanques cilíndricos e esféricos). Dito isso, a Figura 4.10 exibe a trajetória executada pelo robô escalador no tanque de GLP.

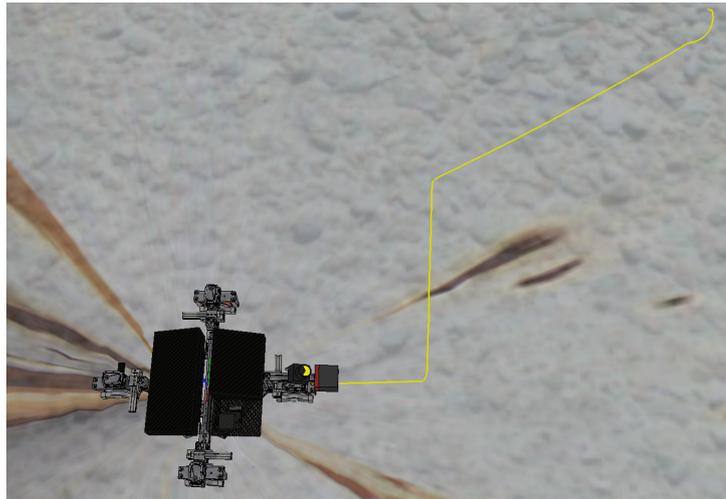


Figura 4.10: Trajetória do AIR-2 no tanque esférico durante a experimentação virtual.

No primeiro movimento, a entrada ξ_G possui apenas a velocidade linear \dot{x}_G , ao passo que a entrada do segundo movimento tem apenas a velocidade linear \dot{y}_G . O terceiro possui como entrada as velocidades lineares \dot{x}_G e \dot{y}_G . Já o quarto é o movimento livre com as velocidades \dot{x}_G e $\dot{\theta}_G$. E por fim, o movimento de orientação, portanto, a entrada é a velocidade angular $\dot{\theta}_G$.

Ao analisar a trajetória executada pelo robô de inspeção pode-se comprovar a sua capacidade de navegação em tanques esféricos, o seu sistema de adesão magnética garante que ele possa se movimentar por toda a superfície do tanque.

Evidenciado a capacidade de navegação do AIR-2, será necessário averiguar a resposta do controlador inteligente. Apesar dos sobressinais presentes na Figura 4.11, que são causados pela baixa frequência de amostragem (em torno de 8Hz) dos encoders dos motores e pela

modelagem do robô no simulador, as velocidades lineares \dot{x} e \dot{y} possuem uma boa resposta.

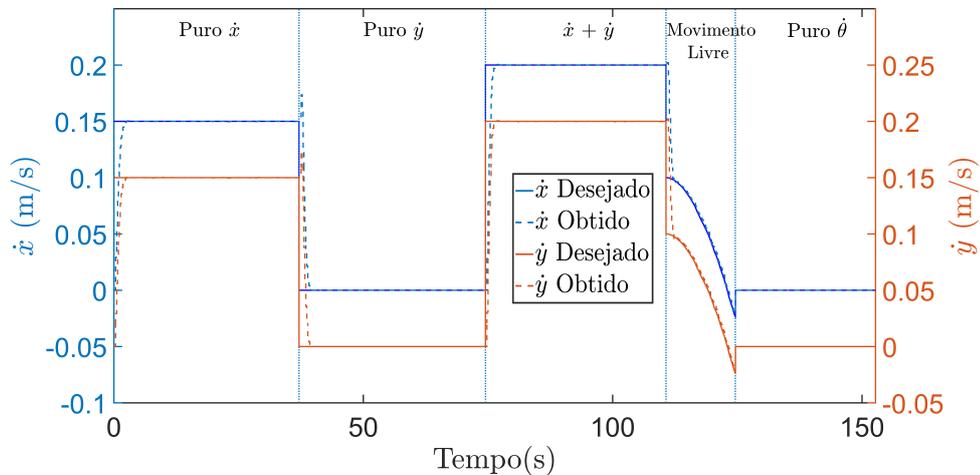


Figura 4.11: Gráfico das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.

Já a velocidade angular $\dot{\theta}$ possui uma resposta com uma pequena oscilação, em virtude dos dados fornecidos pela IMU simulada, que mesmo filtrados, possuem um ruído considerável. Além do mais, como ilustrado pela Fig. 4.12, o tempo de estabilização para o movimento de orientação é um pouco maior, já que o AIR-2 necessita parar completamente e depois reorientar as suas rodas. Só então, os motores sem escovas serão controlados de acordo com a velocidade angular desejada. Todavia, a velocidade $\dot{\theta}$ possui uma boa resposta.

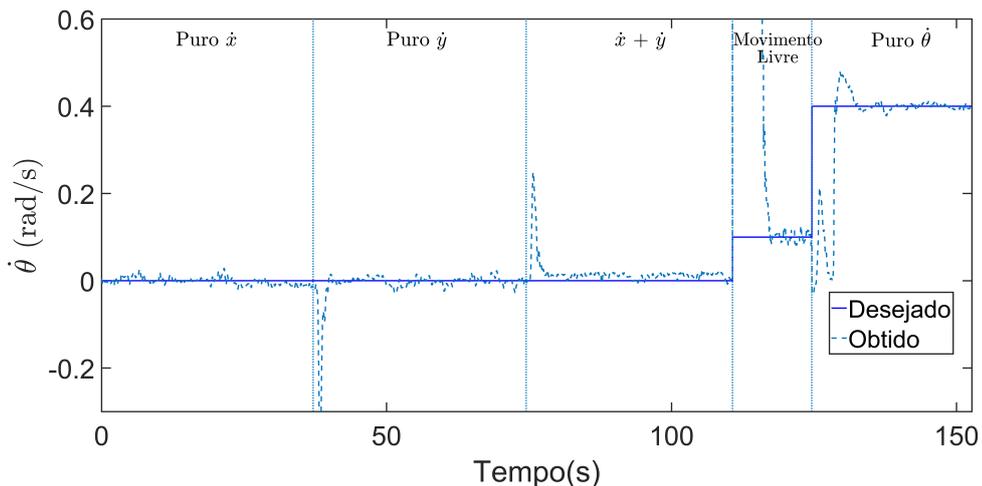


Figura 4.12: Gráfico da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os erros normalizados do controlador inteligente de velocidade do AIR-2. As velocidades lineares possuem um tempo de acomodação em torno de 2s, isso é causado pelo clock da simulação, que garante um grande atraso na

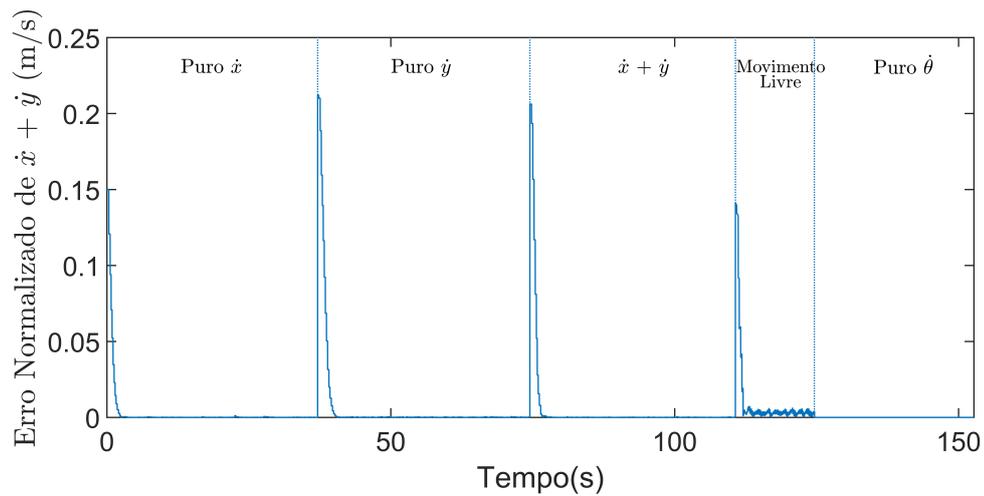


Figura 4.13: Gráfico do Erro das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.

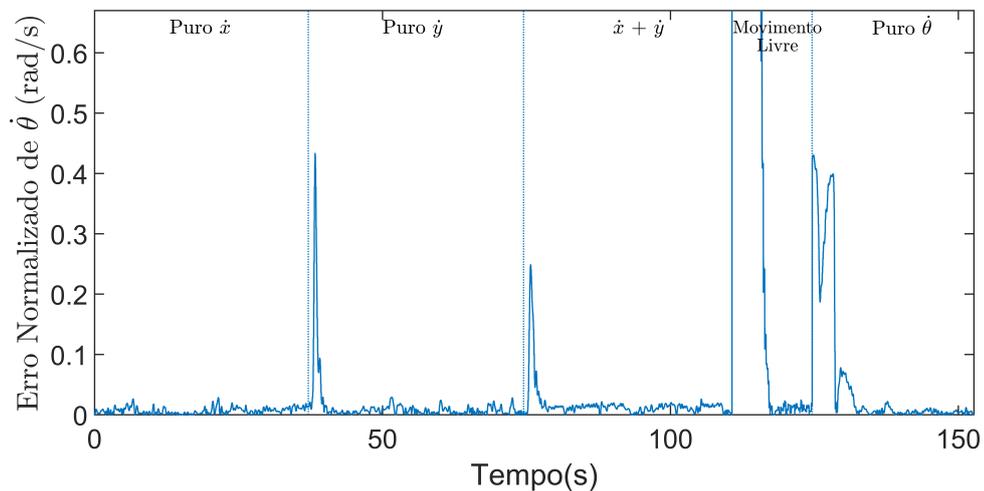


Figura 4.14: Gráfico do Erro da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento virtual do Controle Inteligente de Velocidade.

resposta dos motores, e pelas características da modelagem dos motores no simulador. Para a velocidade angular, o tempo de acomodação é um pouco maior durante o movimento livre e de orientação, em virtude das características dos movimentos: reorientação das rodas (movimento de orientação) e alternância dos ângulos dos servo motores (movimento livre).

Portanto, apesar dos erros presentes no controlador, sobressinais e atrasos, estes não têm um grande impacto na inspeção. Vale ressaltar que a velocidade de inspeção é baixa, o que garante uma navegação lenta e assim o controle inteligente de velocidade do AIR-2 assegura movimentos suaves e precisos, como pode ser comprovado pela Fig. 4.10.

5 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Este capítulo tem como propósito apresentar e discutir os resultados experimentais obtidos para validação do controlador inteligente de posição e velocidade do AIR-2. Para isto foram realizados alguns ensaios demonstrando toda a capacidade de manobrabilidade do robô de inspeção. Ademais, será apresentado o protótipo e ambiente utilizados durante os ensaios.

5.1 PROTÓTIPO AIR-2

Para a validação da estratégia de controle inteligente proposta foram realizados alguns ensaios práticos em um protótipo do AIR-2. Em virtude do processo licitatório e do tempo de fabricação do AIR-2 (em torno de 90 dias), foi necessário desenvolver um protótipo para a validação experimental deste trabalho a tempo da sua defesa. Nas subseções seguintes será apresentado toda a construção mecânica, componentes eletrônicos e a estrutura lógica do protótipo do AIR-2.

5.1.1 ESTRUTURA MECÂNICA

Com a intenção de otimizar o tempo na construção do robô, utilizou-se da estrutura mecânica de um protótipo fabricado por Rosa e Gnoatto (2015). A Fig. 5.1 demonstra o modelo original da estrutura mecânica.

Foram necessárias adaptações no projeto original para a instalação de toda a estrutura eletroeletrônica, conforme demonstrado na Figura 5.2. Dito isso, peças foram projetadas e impressas em um impressora 3D para o acoplamento entre os motores, chassis e garfo. Devido a ausência das rodas magnéticas e a validação da adesão magnética do robô nos trabalhos de Rovani (2013), Espinoza (2014) e Veiga (2015), as rodas magnéticas também foram substituídas por rodas impressas.



Figura 5.1: Protótipo do AIR-2 desenvolvido por Rosa e Gnoatto (2015).

Fonte: (ROSA; GNOATTO, 2015).



Figura 5.2: Protótipo do AIR-2.

5.1.2 ESTRUTURA ELETRÔNICA

Finalizado a instalação dos motores na estrutura mecânica do protótipo, realizou-se a montagem da estrutura eletrônica: controladores de tração dos motores sem escovas (*brushless*), alimentação para os motores, processador e seus periféricos, IMU e dentre outros cabos para a comunicação entre motores e processador. A Figura 5.3 mostra o diagrama de toda a estrutura eletroeletrônica que foi montada no protótipo.

O robô possui um cordão umbilical que provê alimentação aos motores/processador e uma rede Ethernet para comunicação com o protótipo. O processador do protótipo é indicado para ambientes industriais, com condições de temperatura de trabalho e robutez superiores aos computadores normais.

Cada roda possui um servo motor e um motor sem escovas, que são motores de alto desempenho. Os motores sem escovas possuem internamente controle de corrente, velocidade e posição. O processador tem acesso aos motores sem escovas através de uma comunicação USB com um dos seus controladores (vide Pereira et al. (2016) para maiores detalhes sobre o protocolo de comunicação USB). Por sua vez, os controladores são interligados por uma rede

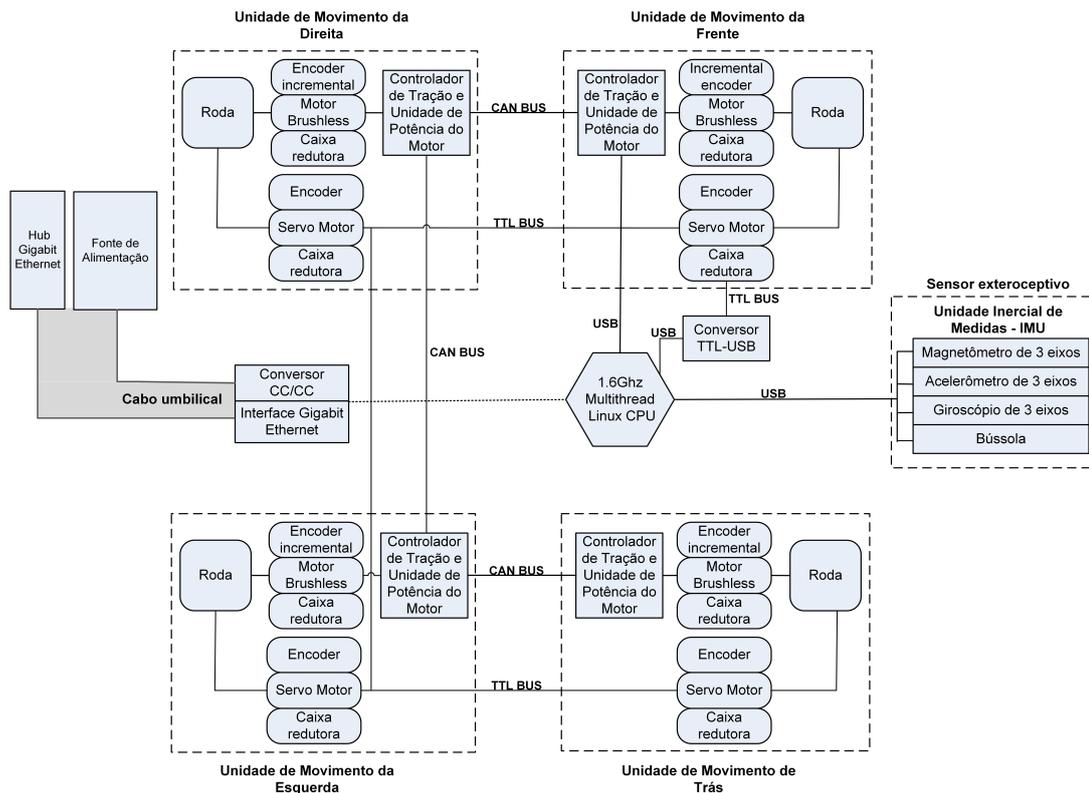


Figura 5.3: Diagrama dos componentes eletroeletrônicos do protótipo.

CAN¹ que permite o acesso individual a cada motor.

Da mesma forma, a comunicação entre processador e servo motores é feita via USB. Embora seja necessário um conversor TTL-USB², em virtude dos servos se interligarem por uma comunicação serial assíncrona *Half Duplex* (envio e recebimento de dados em um mesmo canal de comunicação).

Quanto a Unidade Inercial de Medidas ou IMU, ela apresenta 10 graus de liberdade: giroscópio de 3 eixos, acelerômetro de 3 eixos, magnetômetro de 3 eixos e uma bússola digital. A IMU fornece uma comunicação USB que é ligada ao processador para o envio e recebimento de dados.

5.1.3 ESTRUTURA LÓGICA

Uma vez que toda a estrutura mecânica e eletroeletrônica esteja montada, pode ser dado enfoque à lógica de controle do robô. Para isso, foi necessário instalar o sistema operacional Ubuntu 14.04 LTS no processador e logo depois o ROS. Então, pode-se instalar todos os pacotes

¹CAN ou *Controller Area Network* é um protocolo de comunicação serial síncrono que trabalha com o conceito de multi-mestre, em que os módulos que estão conectados na rede podem se tornar mestre ou escravo em momentos específicos (WORKSHOP, 2016).

²Converte a comunicação serial *Half Duplex* para o padrão do USB.

Tabela 5: Explicação da estrutura lógica do controle inteligente.

Tipo	Nome	Descrição
Nó	/tf_sparton	publica a transformação <i>sparton-base_link</i>
	/tf_robot	publica a transformação <i>base_link-odom</i>
	/PositionClient	é o cliente do controlador inteligente de posição. Responsável por receber a posição e orientação desejadas e enviá-las ao servidor do controle
	/PositionServer	é o servidor do controlador inteligente de posição. Responsável por executar preemptivamente o controle de posição e orientação do robô
	/wheelodom	responsável por fornecer a odometria a partir das rodas para o robô
	/dynamixel_manager	possui acesso direto aos servo motores, sendo responsável pelo envio e recebimento de suas informações
	/motors/NovoEpos	possui acesso direto aos motores sem escovas, sendo encarregado de enviar e receber as suas informações
	/ControllerClient	é o cliente do controlador inteligente de velocidade, portanto, é responsável em receber as velocidades desejadas e enviá-las ao servidor do controle
	/ControllerServer	é o servidor do controlador inteligente de velocidade, sendo assim, fica encarregado de executar preemptivamente o controle de velocidade do robô
	/bridge	intermedia a comunicação entre os servo motores e demais nós, pois há a necessidade de converter as informações de acordo com as especificações do nó que controla os servos
Tópico	/cmd_pos	recebe a posição e orientação desejadas para o controlador inteligente de posição
	/cmd_vel	recebe as velocidades desejadas ao controlador inteligente de velocidade
	/air2/wheelodom	fornece a posição do robô
	/air2/wheeltwist	fornece a velocidade linear do robô
	/air2/sensor/encoder/bm1..4	fornece a velocidade angular e posição dos motores sem escovas
	/air2/sensor/encoder/sm1..4	informa o ângulo e velocidade angular dos servo motores
	/air2/motor/bm1..4	recebe a velocidade angular que os motores sem escovas devem ser submetidos
	/air2/motor/sm1..4	recebe o ângulo que os servo motores devem ser submetidos
	/air2/imu/data	fornece a aceleração linear e velocidade angular do robô
/air2/imu/pose2D	fornece a orientação do robô	

Antes da execução do controle, é necessário garantir que a árvore de transformações entre os diferentes sistemas de coordenadas esteja de acordo, uma vez que o AIR-2 e a IMU devem ter uma mesma referência (*odom*). A Fig. 5.5 mostra a árvore de transformações do protótipo AIR-2. Seguindo as transformações de baixo para cima, é apresentado a transformação das coordenadas da IMU (*sparton*) para o centro de inércia do robô (*base_link*). Então é feita outra transformação do centro do AIR-2 para a referência da odometria (*odom*).

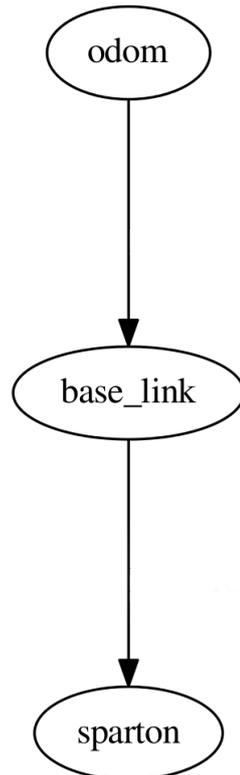


Figura 5.5: Árvore de transformações entre os sistemas de coordenadas.

A odometria do protótipo segue o mesmo padrão da utilizada pelo AIR-2 virtual, ou seja, as velocidades lineares \dot{x}_R e \dot{y}_R são geradas pela média das velocidades lineares \dot{x} e \dot{y} das rodas, ao passo que a velocidade angular $\dot{\theta}_R$ é adquirida pela velocidade angular em z fornecida pela IMU. Quanto as posições x_R e y_R , elas são obtidas pela integração no tempo das velocidades \dot{x}_R e \dot{y}_R . Já o orientação θ_R é fornecida pela IMU.

5.2 EXPERIMENTOS

Para a validação experimental da estratégia de controle inteligente, foram realizados 5 experimentos diferentes de modo que se pudesse avaliar a manobrabilidade do AIR-2. O primeiro experimento busca demonstrar individualmente os três diferentes movimentos possíveis que o AIR-2 pode executar: movimento linear (\dot{x} e/ou \dot{y}), de orientação ($\dot{\theta}$) e livre (\dot{x} e/ou \dot{y} e $\dot{\theta}$). Para os outros quatro experimentos, o controle inteligente de posição e velocidade foi empregado para avaliação da repetibilidade, observação do acúmulo de erros na posição devido à distância percorrida, avaliação de diferentes trajetórias e análise da alteração de prioridade entre posição e orientação do robô.

A fim de melhorar a visualização e entendimento dos experimentos, montou-se um ambiente de testes em um plano de dimensões 120x120cm, conforme demonstrado na Figura 5.6. Para auxiliar a aquisição de imagens durante os ensaios, foi instalado uma webcam com vista superior do plano.

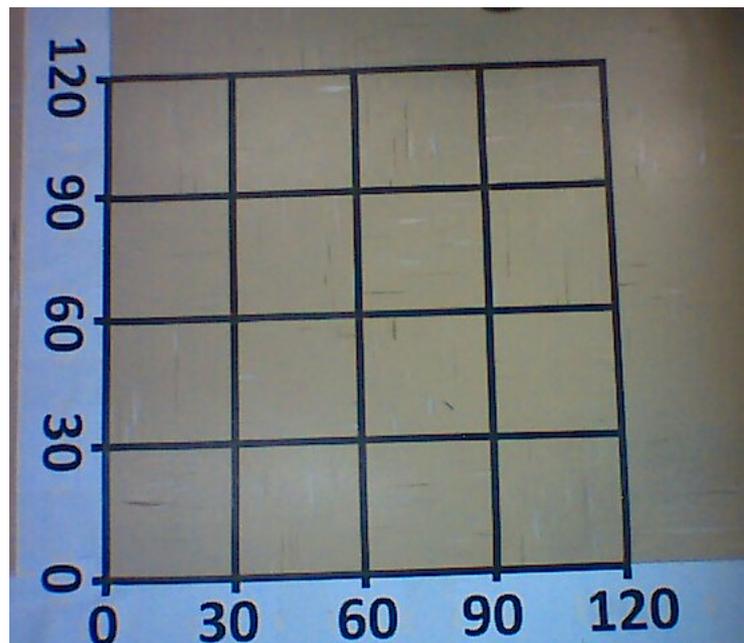


Figura 5.6: Vista superior do espaço utilizado para os experimentos práticos.

5.2.1 CONTROLE INTELIGENTE DE VELOCIDADE

Este experimento tem como objetivo avaliar em detalhes os três movimentos individualmente que o AIR-2 pode ser submetido. Para isso, o protótipo será controlado apenas pelo Controlador Inteligente de Velocidade. Ele será submetido a cinco estados diferentes, sejam eles: puramente \dot{x} , puramente \dot{y} , \dot{x} e \dot{y} , movimento livre ($\dot{x} + \dot{\theta}$) e, finalmente, puramente

$\dot{\theta}$. A Fig. 5.7 apresenta as principais posições da trajetória gerada a partir das entradas desejadas que o controlador de velocidade teve durante a trajetória.

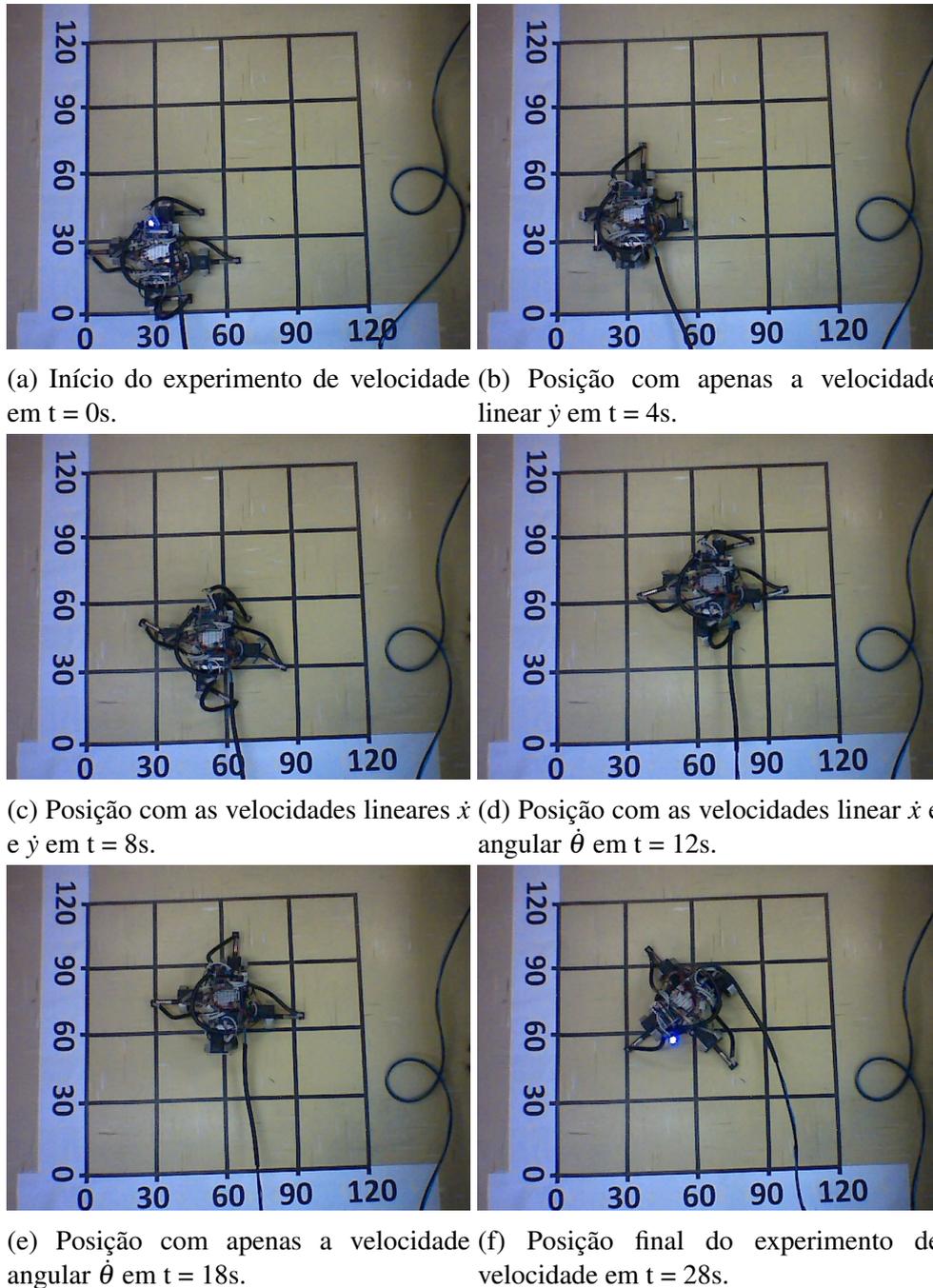


Figura 5.7: Trajetória para o experimento do Controle Inteligente de Velocidade.

Nas Figuras 5.8 e 5.9 pode-se analisar todos 5 estados no qual o protótipo foi submetido, analisando as velocidades \dot{x} , \dot{y} e $\dot{\theta}$, bem como os erros normalizados das velocidades lineares e angular (Fig. 5.10 e 5.11).

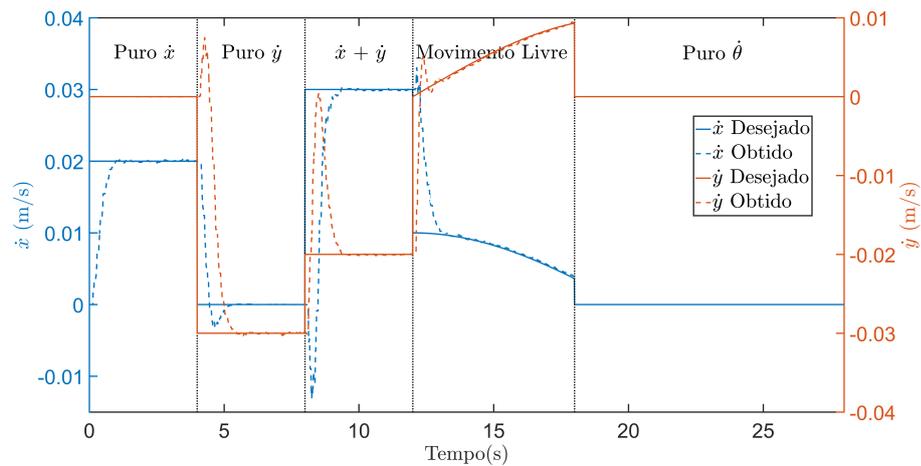


Figura 5.8: Gráfico das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.

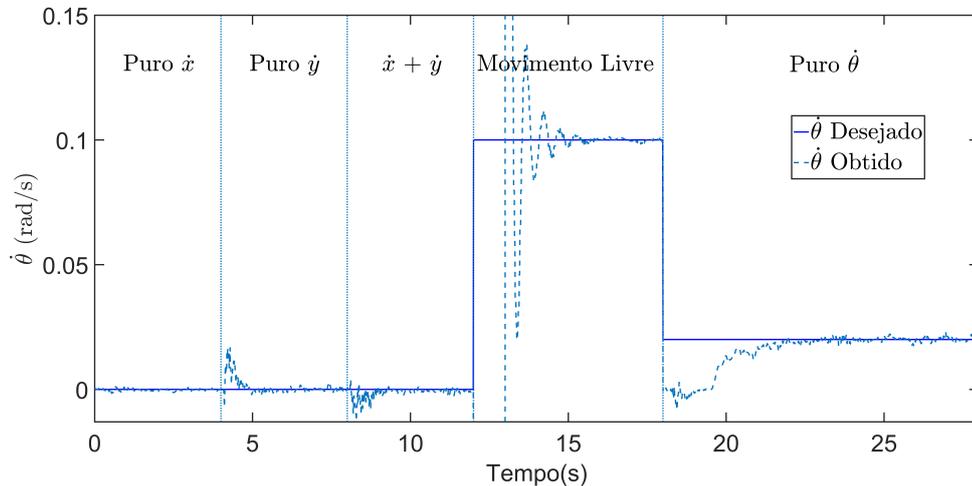


Figura 5.9: Gráfico da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.

Pelos resultados obtidos, as velocidades lineares possuem um pequeno tempo de acomodação, dado a dinâmica dos motores, como pode ser visto nas Figuras 5.12 e 5.13. Os sobressinais existentes são causados pelo tempo de resposta dos motores.

Já a velocidade angular, apesar de ter bons resultados, apresentou um desempenho menor nos movimentos de orientação e livre. No que diz respeito ao movimento de orientação, em consequência da necessidade da reorientação das rodas, $\dot{\theta}$ apresenta um tempo alto de acomodação. Quanto ao movimento livre, em virtude da variação do ângulo que os servos motores são submetidos, há um aumento no tempo de acomodação e é possível identificar um pequeno erro causado pela resolução dos servos, conforme Fig. 5.13.

Os erros normalizados do controlador podem ser vistos nas Fig. 5.10 e 5.11. O

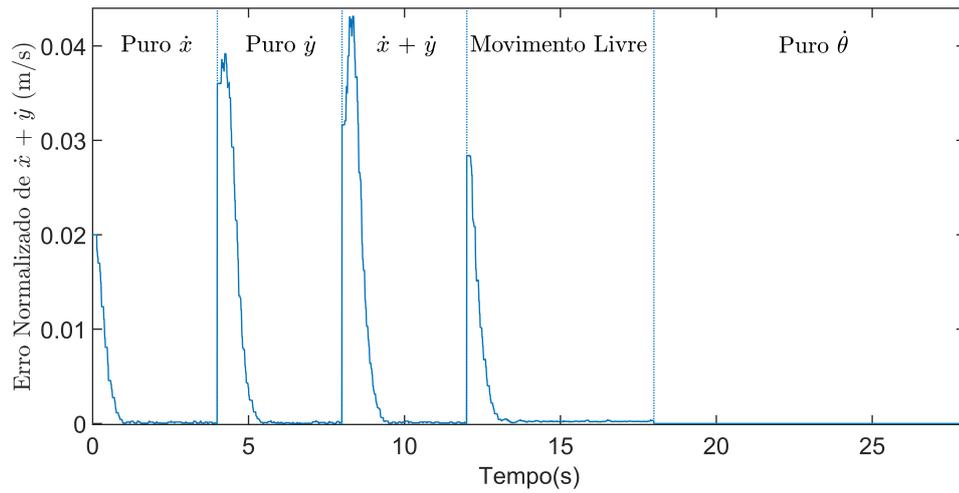


Figura 5.10: Gráfico do Erro das Velocidades Lineares \dot{x} e \dot{y} para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.

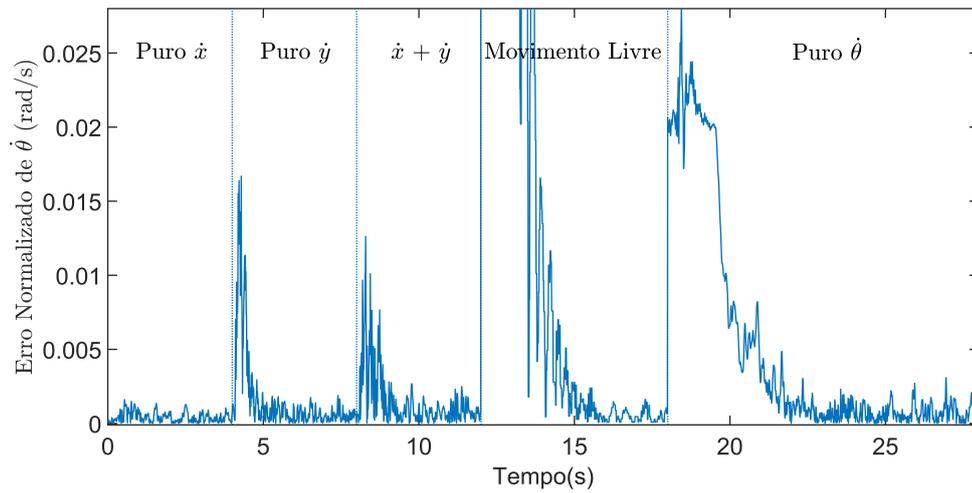


Figura 5.11: Gráfico do Erro da Velocidade Angular $\dot{\theta}$ para o experimento com o Controlador Inteligente de Velocidade.

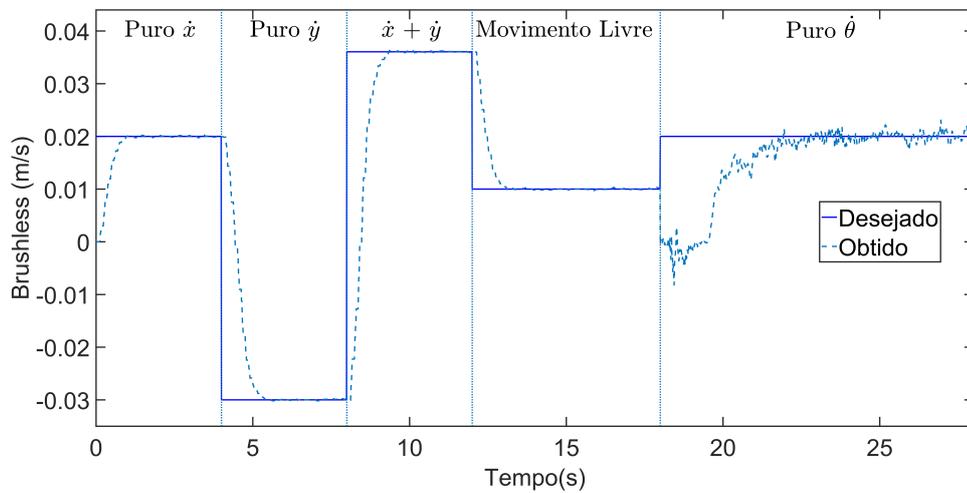


Figura 5.12: Gráfico dos Motores Brushless.

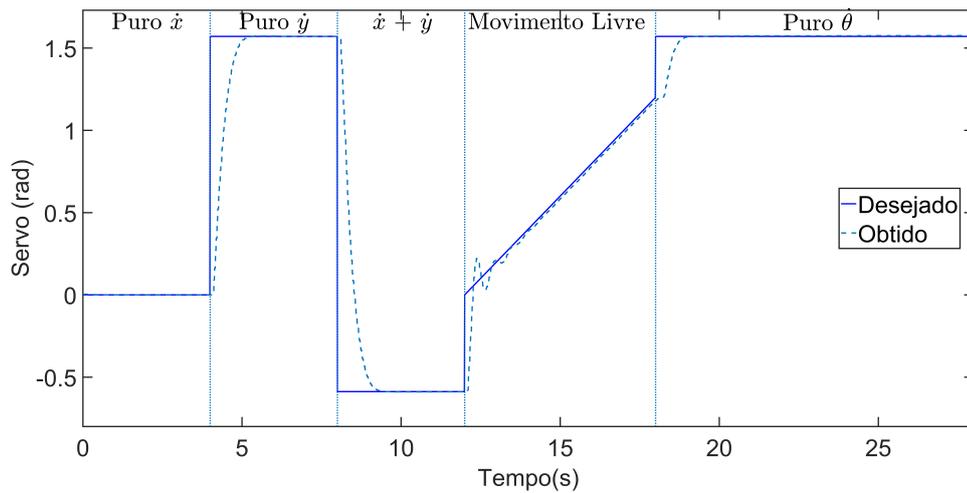


Figura 5.13: Gráfico dos Servo Motores.

controlador apresenta um erro pequeno para as velocidades lineares e angular, com uma ressalva que a angular demonstra um erro maior que as velocidades lineares, em razão do tempo de resposta dos motores, reorientação das rodas e resolução dos servos. Os sobressinais presentes em \dot{x} e \dot{y} juntamente com o atraso existente em $\dot{\theta}$ não causam problemas na inspeção, visto que o robô deve operar em baixas velocidades.

5.2.2 REPETIBILIDADE DO CONTROLE DE POSIÇÃO

Uma vez que o controle inteligente de velocidade está em acordo com as necessidades de inspeção, há a necessidade de um controle de posição para avaliação da exatidão dos movimentos do protótipo. Sendo assim, o robô foi submetido a uma repetição de posições pré-determinadas para avaliar o quão preciso ele pode se movimentar. Com a intenção de auxiliar os testes do controle inteligente de posição e velocidade, foi colocado um laser de cor lilás claro em sua carcaça, que servirá de referência e verificação visual da movimentação do robô. Também foi adicionado um laser verde claro para indicar o final da trajetória executada pelo AIR-2. Igualmente, os lasers serão utilizados nos próximos experimentos para a conferência visual da trajetória.

As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam os resultados deste experimento de repetibilidade. Inicialmente, o robô deve se locomover até 60cm em relação ao seu eixo x (Fig. 5.16b). Depois voltar a sua posição inicial (Fig. 5.16c), então retornar a posição demonstrada na Fig. 5.16c e posteriormente ao início novamente (Fig. 5.16e). A Figura 5.16a apresenta o início e fim da trajetória a ser executada durante o experimento.

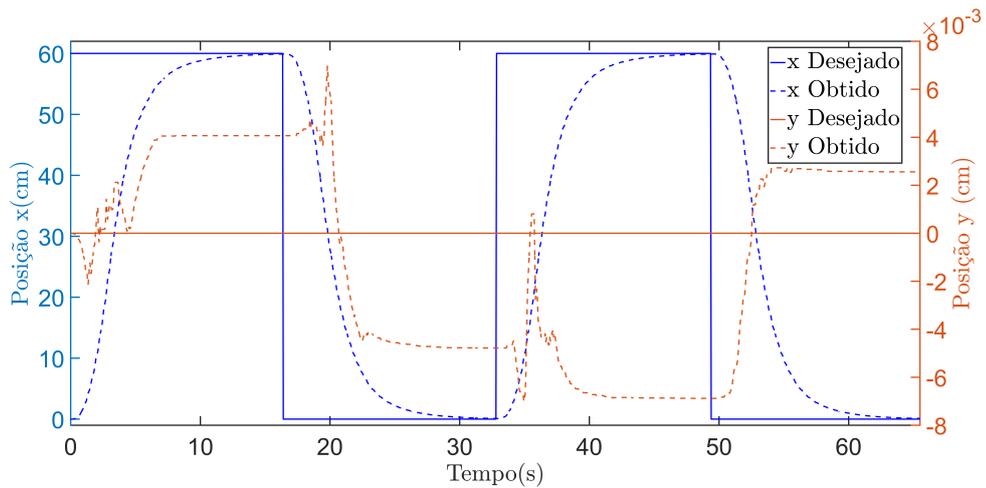


Figura 5.14: Gráfico das Posições x e y para o teste de repetibilidade.

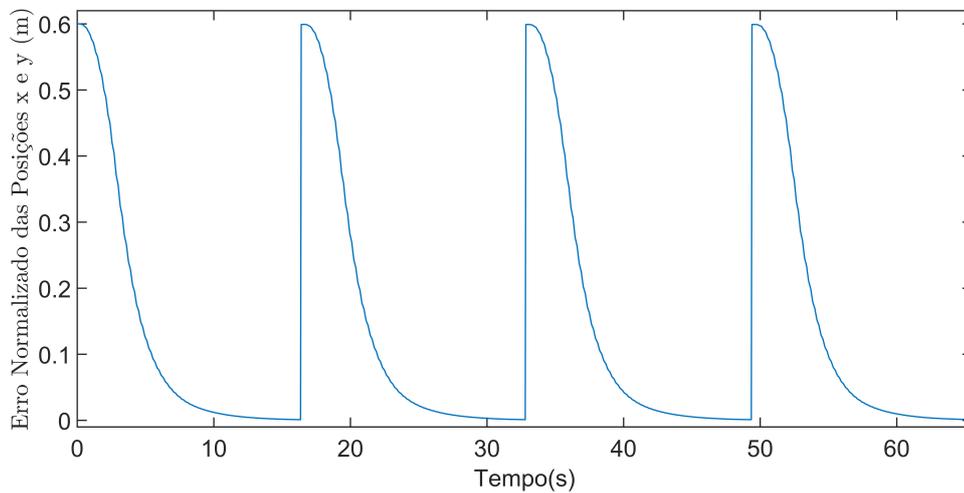
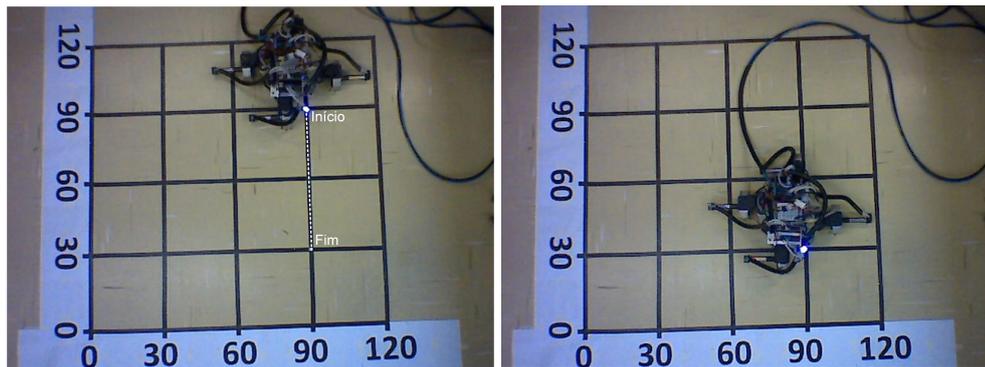


Figura 5.15: Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste de repetibilidade.

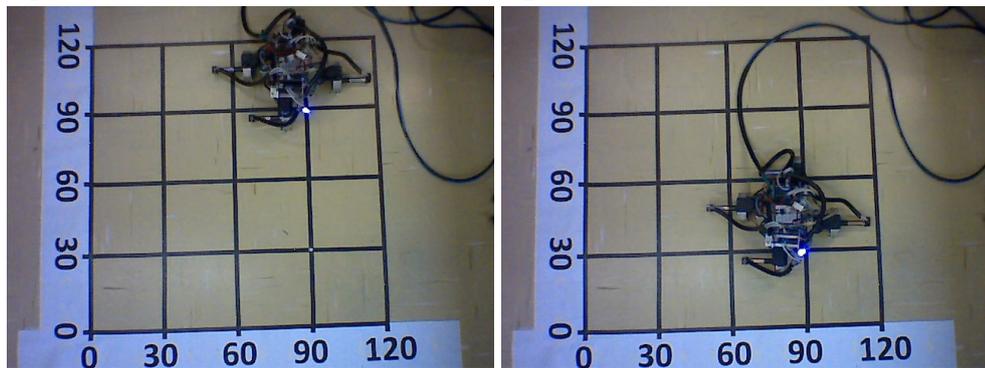
O controlador de posição permite que o protótipo tenha movimentos precisos, houve um erro em relação a y, mas ele é bem pequeno. Pela odometria, o erro é da ordem de $20\mu\text{m}$, já pelas Figuras 5.16b e 5.16d a discrepância é um pouco maior e pode ser melhor visualizada, algo em torno de 10mm. Mas ela continua pequena e é causada por vários fatores, um deles é a resolução dos servo motores ($0,088^\circ$). Outro fator que pode acarretar erros na posição, é a orientação inicial do robô em relação ao ambiente de testes.

Há um outro problema que foi identificado no protótipo, onde dois servos possuem uma folga, o que gera inconsistências no seu movimento. Além do mais, o protótipo está com a estrutura mecânica rígida, não há cambagem e muito menos há garantias que durante a execução da trajetória as rodas sempre permaneçam perpendiculares à superfície como no projeto.

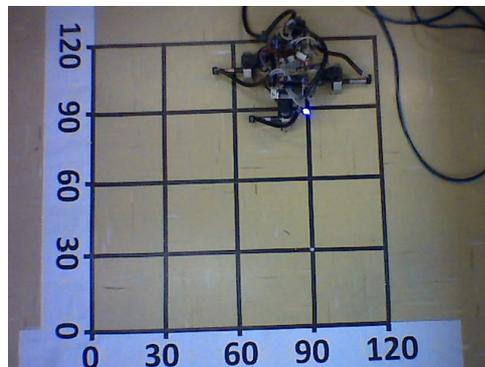
Um outro ponto a ser levado em consideração que pode acarretar erros de posição, é a odometria do protótipo. Apesar dos encoders dos motores brushless serem muito precisos,



(a) Início do experimento de repetibilidade em $t = 0s$. de (b) Posição 1 do experimento de repetibilidade em $t = 16.35s$.



(c) Posição 2 do experimento de repetibilidade em $t = 32.8s$. de (d) Posição 3 do experimento de repetibilidade em $t = 49.35s$.



(e) Posição final do experimento de repetibilidade em $t = 65.4s$.

Figura 5.16: Trajetória para o experimento de repetibilidade do controle inteligente do AIR-2.

ainda assim, eles apresentam o problema de acúmulo do erro de posição ao longo do tempo através da integração da velocidade do robô, também conhecido como *dead reckoning*. Isso pode se tornar um grande problema, visto que o acúmulo de erros é proporcional à distância percorrida.

Portanto, apesar da presença de alguns problemas, eles foram irrelevantes nesse teste em específico, demonstrando bons resultados quanto a repetibilidade de posições que o robô pode ser submetido.

5.2.3 DISTÂNCIA DO CONTROLE DE POSIÇÃO

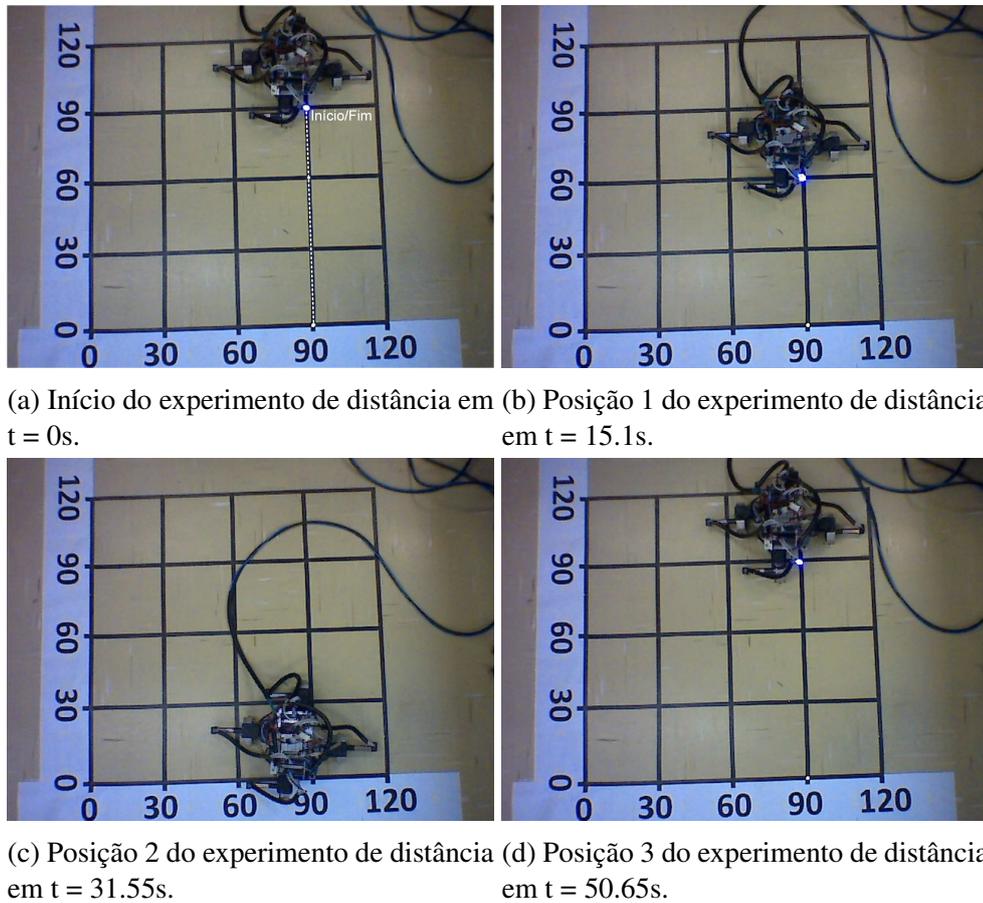


Figura 5.17: Trajetória para o experimento de distância do controle inteligente do AIR-2.

Após a identificação de algumas complicações que o protótipo está submetido, foi realizado um teste de distância para avaliar o quanto a geração da odometria a partir das rodas pode afetar os movimentos do robô.

Desta forma, como pode ser visto na Figura 5.17a, o AIR-2 realizará um trajetória em três posições diferentes. Primeiramente, ele deve ir até a posição demonstrada pela Fig. 5.17b, ao atingir a posição desejada, o protótipo deve mover-se até a posição 2 (Fig. 5.17c). E então retornar a sua posição inicial conforme a Figura 5.17d.

A partir da análise dos resultados demonstrados na Figura 5.18, averiguou-se que os erros de posição foram pequenos (Figura 5.19). No entanto, o problema de acúmulo de erros gerado pela odometria das rodas mostrou-se mais presente, já que a distância percorrida foi maior. Uma solução que minimizaria esse dilema, seria a fusão de sensores através de um Filtro de Kalman.

Observou-se que a trajetória executada pelo AIR-2 teve uma boa precisão, apesar do

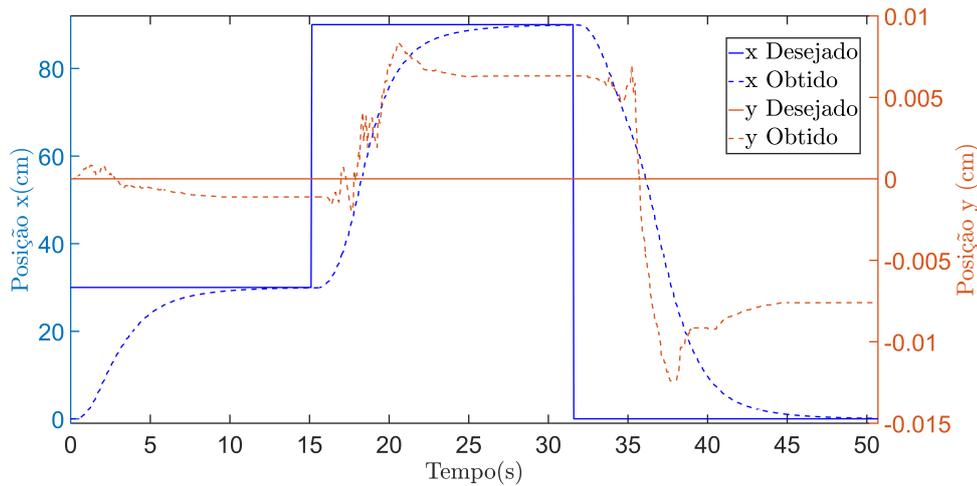


Figura 5.18: Gráfico das Posições x e y para o teste de distância.

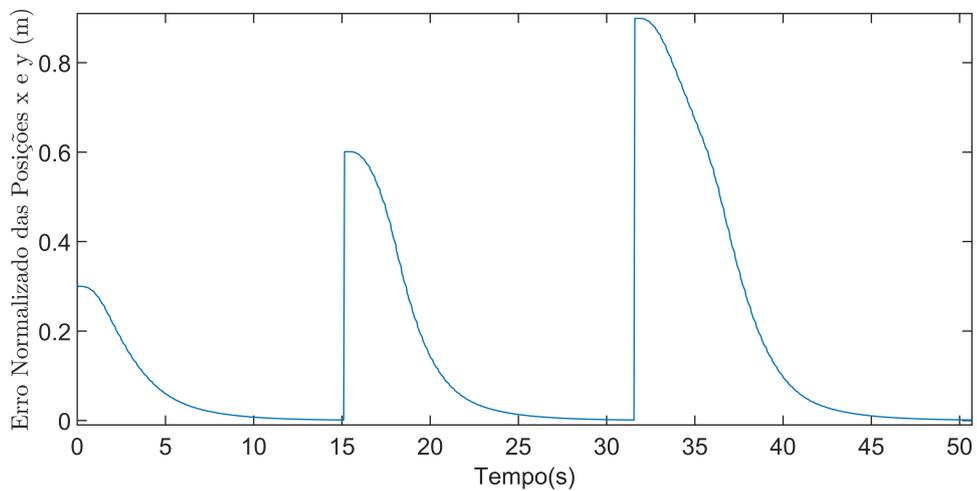


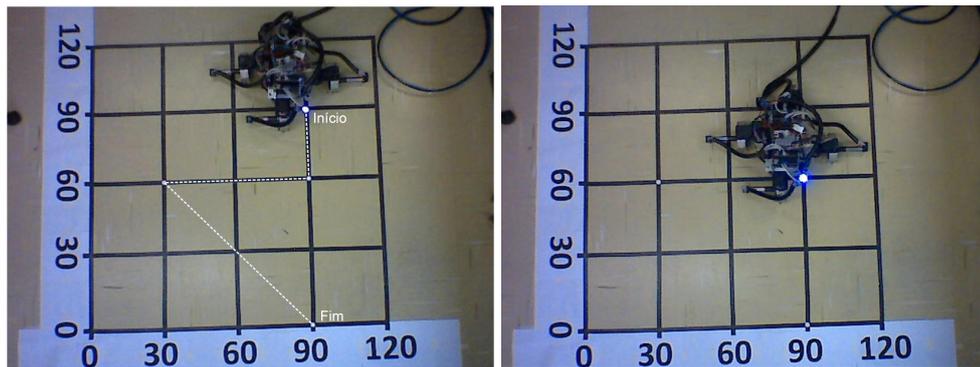
Figura 5.19: Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste de distância.

acúmulo de erros na posição ter aumentado em relação ao experimento anterior. Dado que o foco deste trabalho é o controle de velocidade, os pequenos erros de posição não representam um grande impacto sobre o Controlador Inteligente de Velocidade, já que a velocidade do robô não sofre de acúmulo de erros de posição.

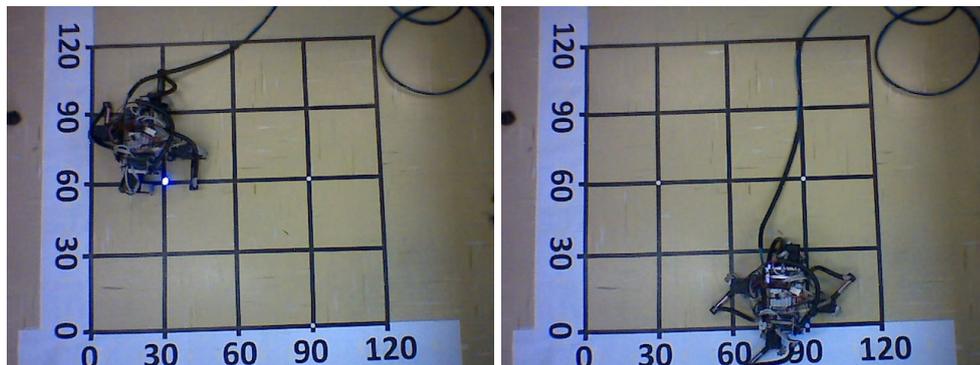
5.2.4 CONTROLE DE POSIÇÃO ANALISANDO MOVIMENTOS DIFERENTES

Com o propósito de avaliar os dois principais movimentos do AIR-2, movimento linear e de orientação, o robô foi submetido a 3 posições diferentes, conforme pode ser visto na previsão de trajetória demonstrada pela Fig. 5.20a. A trajetória é bem maior que os experimentos anteriores, portanto, os erros da odometria pelas rodas serão maiores neste teste.

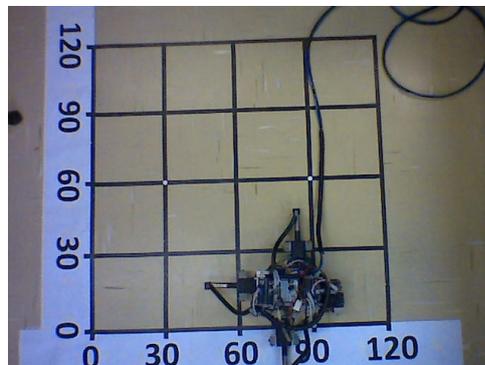
Inicialmente, o AIR-2 deveria andar até a posição (30cm, 0cm), ao alcançar essa posição ele teria de deslocar-se para a posição (30cm, -60cm) vista na Fig. 5.20c. Ao atingir



(a) Início do experimento com movimentos diferentes em $t = 0s$. (b) Posição 1 do experimento com movimentos diferentes em $t = 14s$.



(c) Posição 2 do experimento com movimentos diferentes em $t = 30.2s$. (d) Posição 3 do experimento com movimentos diferentes em $t = 43.1s$.



(e) Posição e orientação final do experimento com movimentos diferentes em $t = 129s$.

Figura 5.20: Trajetória para o experimento com movimentos diferentes do controle inteligente do AIR-2.

essa posição, o protótipo deveria se mover até a posição (90cm, 0cm) e então reorientar-se conforme a Fig. 5.20e.

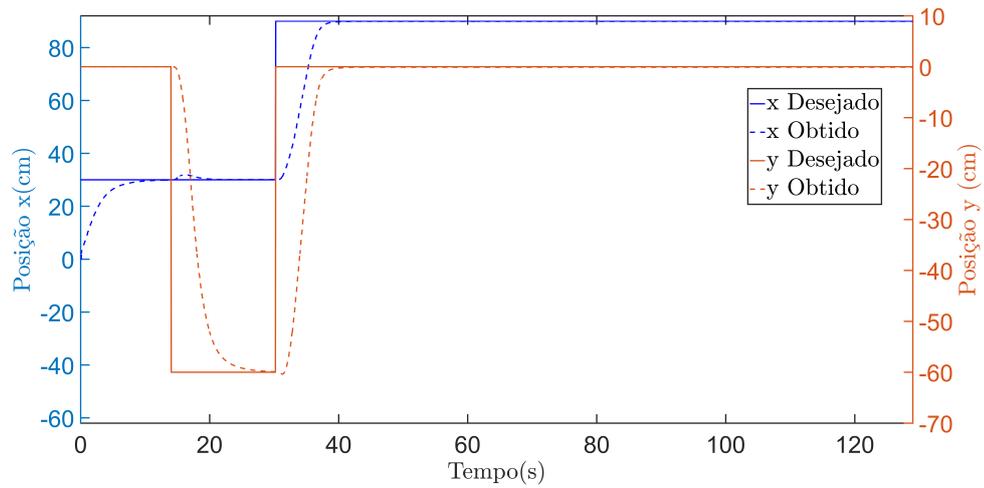


Figura 5.21: Gráfico das Posições x e y analisando movimentos diferentes.

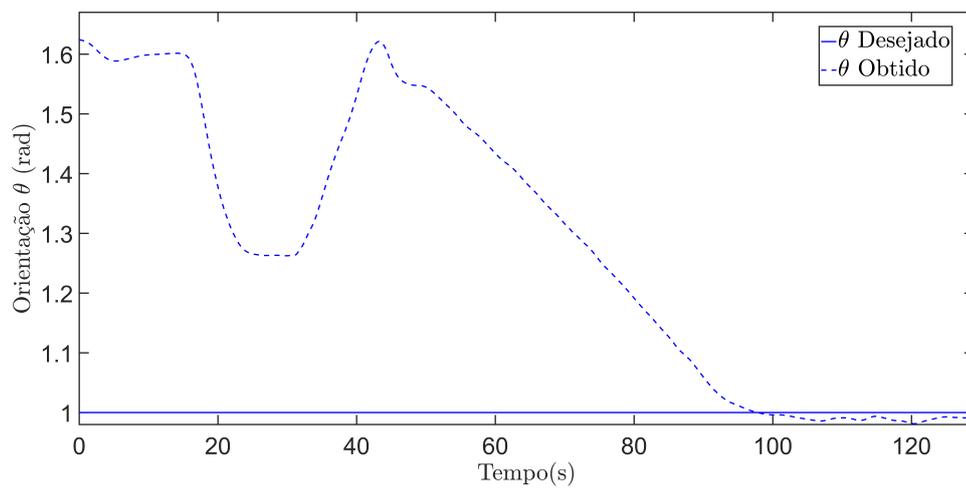


Figura 5.22: Gráfico da Orientação θ analisando movimentos diferentes.

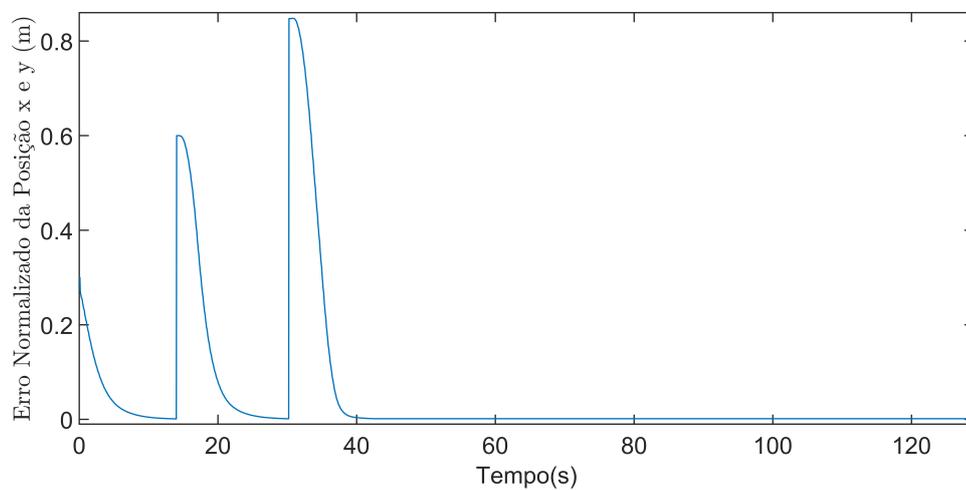


Figura 5.23: Gráfico do Erro das Posições x e y analisando movimentos diferentes.

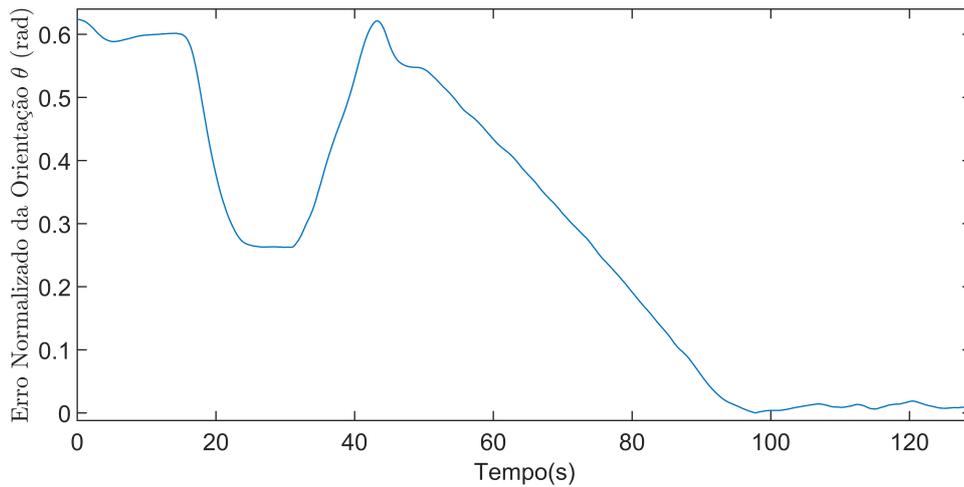
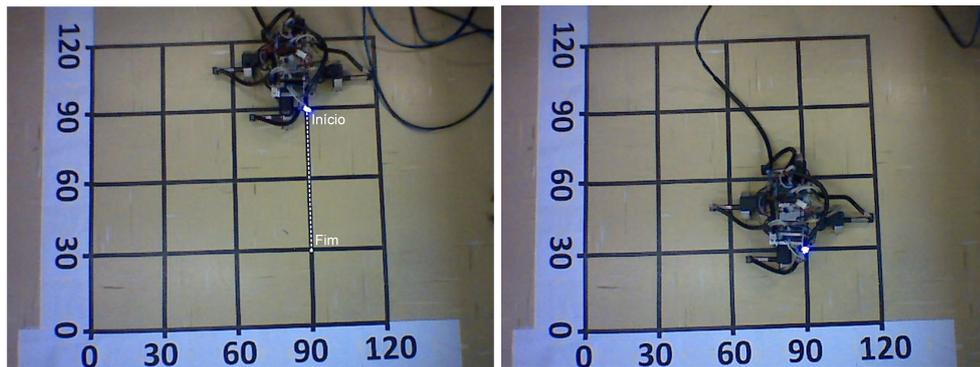


Figura 5.24: Gráfico do Erro da Orientação θ analisando movimentos diferentes.

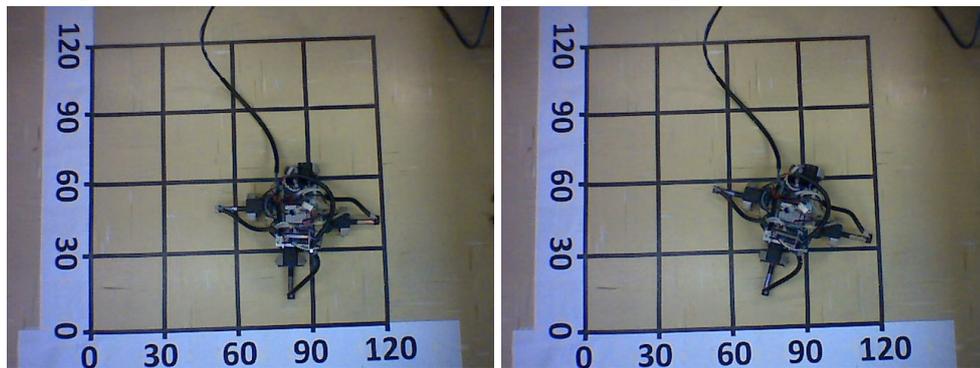
Este teste também apresentou bons resultados, como apresentado nas Fig. 5.21 e 5.22. Os erros obtidos na posição e orientação foram pequenos (Fig. 5.23 e 5.24). Como a distância percorrida aumentou em relação ao experimento anterior, o controle de posição apresentou um erro um pouco maior, em virtude da estimação da posição pela integração da velocidade (*dead reckoning*), distúrbio no ângulo de dois servo motores e imperfeições na estrutura mecânica que não permitem uma boa movimentação do protótipo.

5.2.5 ALTERAÇÃO DE PRIORIDADE DO CONTROLE INTELIGENTE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE

Visando averiguar os efeitos da alteração de prioridade entre a posição e orientação, realizou-se dois experimentos alterando a prioridade do controle inteligente de posição e velocidade do AIR-2. No primeiro teste, a prioridade será a posição, enquanto no segundo, a preferência será a orientação.



(a) Início do experimento tendo a posição como prioridade em $t = 0s$. (b) Posição final do experimento tendo a posição como prioridade em $t = 15s$.



(c) Movimento de orientação tendo a posição como prioridade em $t = 15.1s$. (d) Fim do experimento tendo a posição como prioridade em $t = 32.5s$.

Figura 5.25: Trajetória para o experimento com prioridade para a posição do controle inteligente do AIR-2.

Na Fig. 5.25a é possível visualizar a trajetória a ser seguida tendo a posição como prioridade. Percebe-se visualmente que o robô atingiu a posição desejada, os dois lasers estão concêntricos. Quanto a orientação, aparentemente está de acordo, uma vez que pela análise da Fig. 5.25d o robô está na diagonal, portanto, está em 45° (0.785 rad).

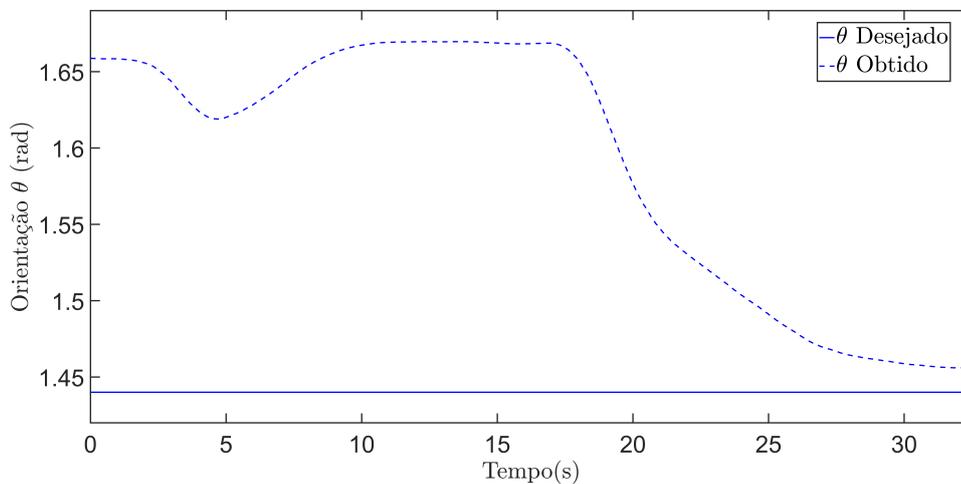


Figura 5.26: Gráfico da Orientação θ para o teste com prioridade para a posição.

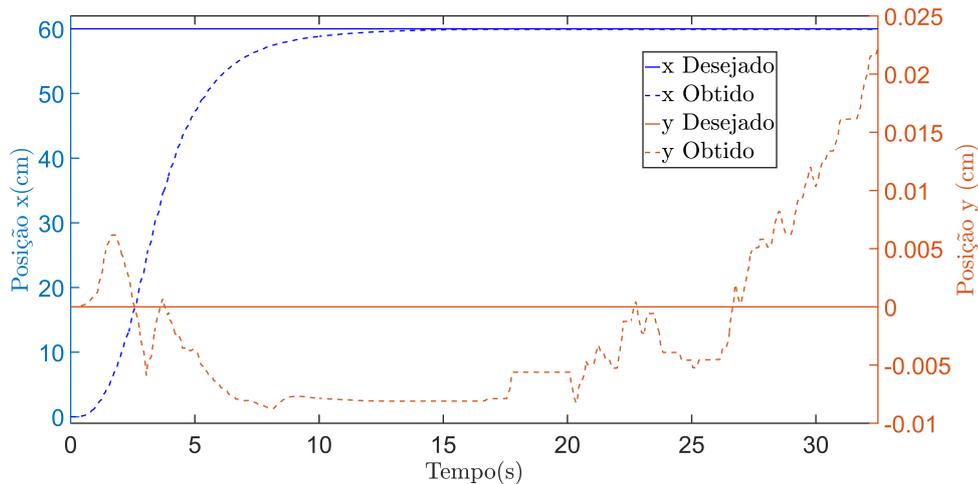


Figura 5.27: Gráfico das Posições x e y para o teste com prioridade para a posição.

Já pela Figura 5.26 e Figura 5.27, nota-se que a posição e orientação obtidas apresentaram erros pequenos. O erro na orientação (Fig. 5.28) foi da ordem 0.015 rad (0.88°), enquanto a posição foi na ordem de 30 μ m (Fig. 5.29).

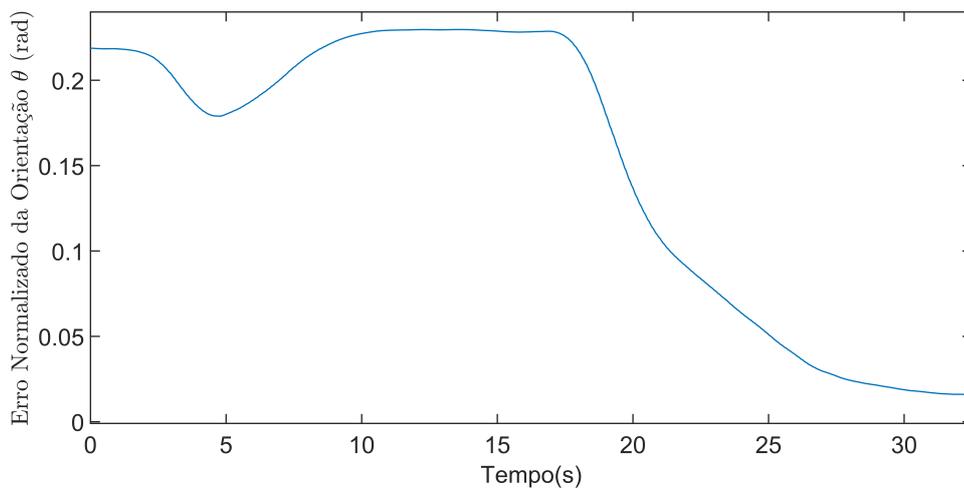


Figura 5.28: Gráfico do Erro da Orientação θ para o teste com prioridade para a posição.

Alterando-se a prioridade para a orientação, é possível notar um pequeno erro na posição final do AIR-2, demonstrado na Figura 5.30d. Isso é causado pela rigidez da estrutura mecânica, pois as rodas são forçadas no movimento de orientação e acabam deslocando-se em virtude do baixo atrito com a superfície, o que não aconteceria se houvesse o sistema de cambagem das rodas.

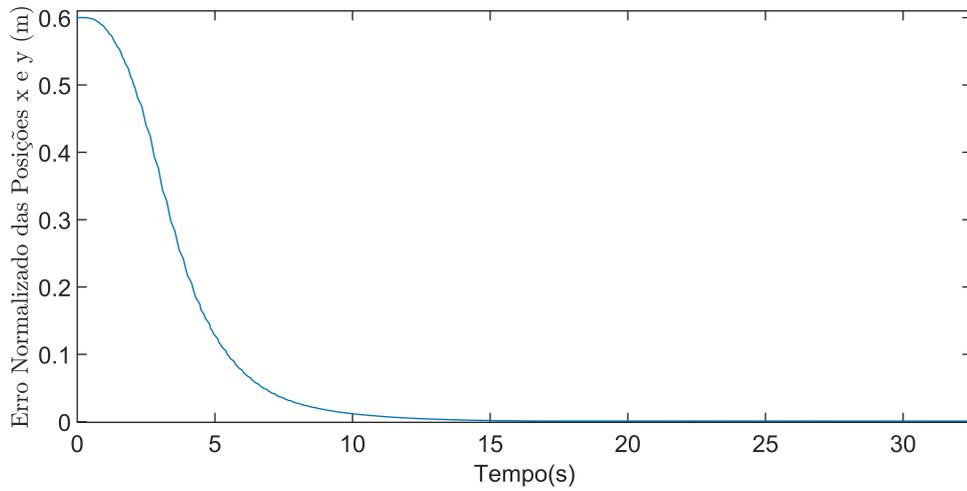


Figura 5.29: Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste com prioridade para a posição.

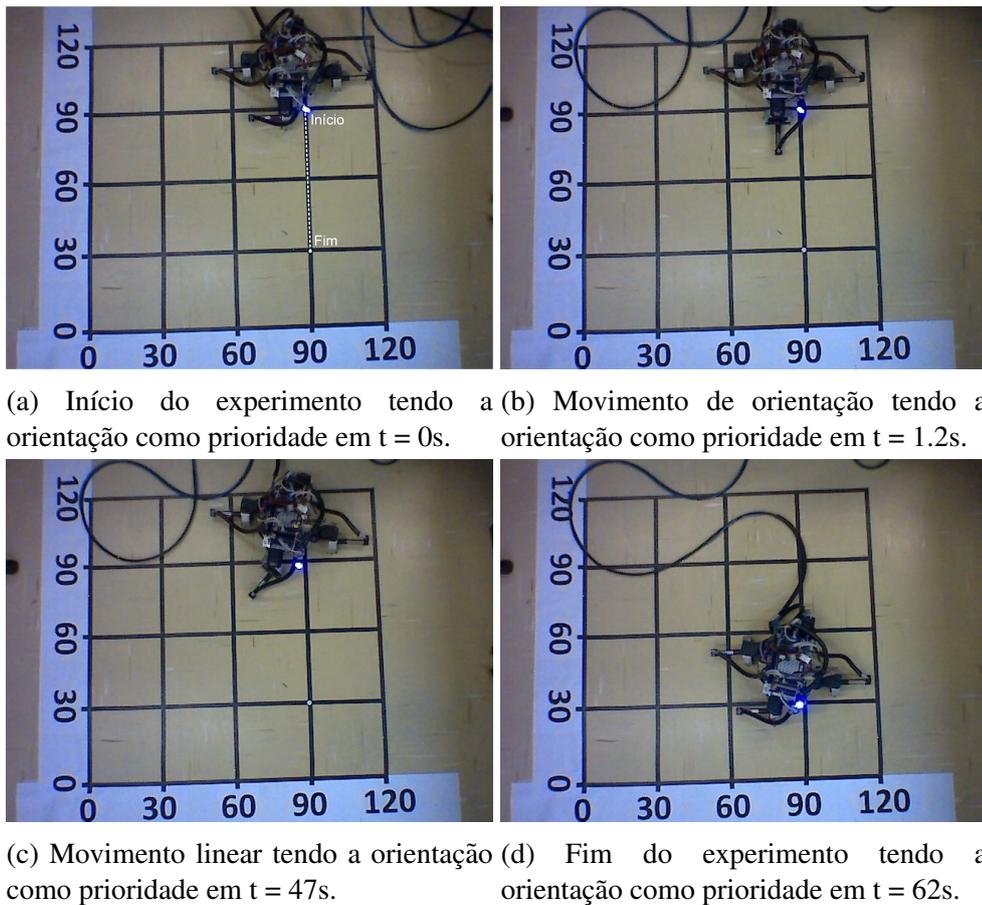


Figura 5.30: Trajetória para o experimento com prioridade para a orientação do controle inteligente do AIR-2.

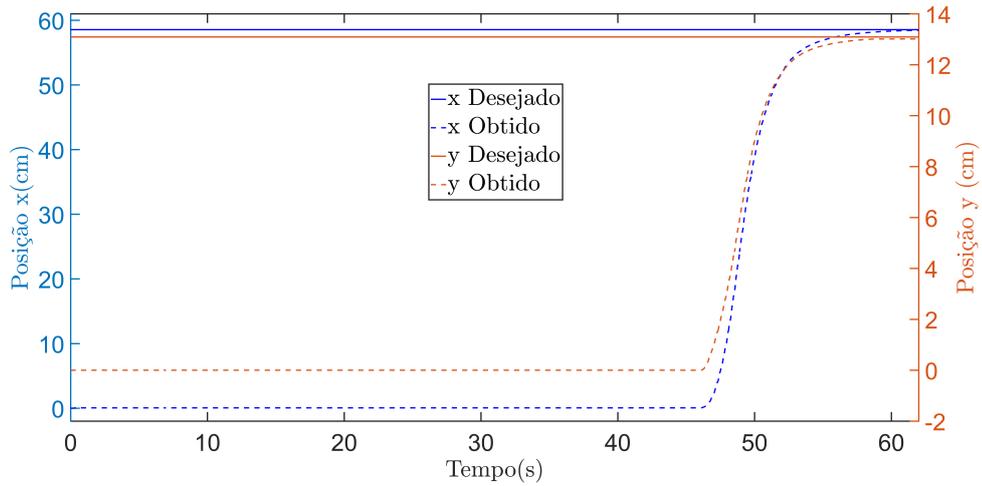


Figura 5.31: Gráfico das Posições x e y para o teste com prioridade para a orientação.

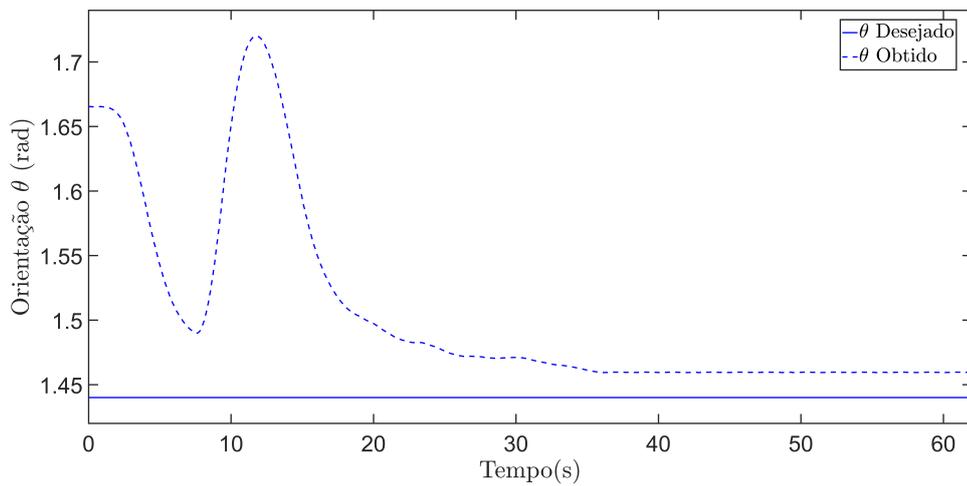


Figura 5.32: Gráfico da Orientação θ para o teste com prioridade para a orientação.

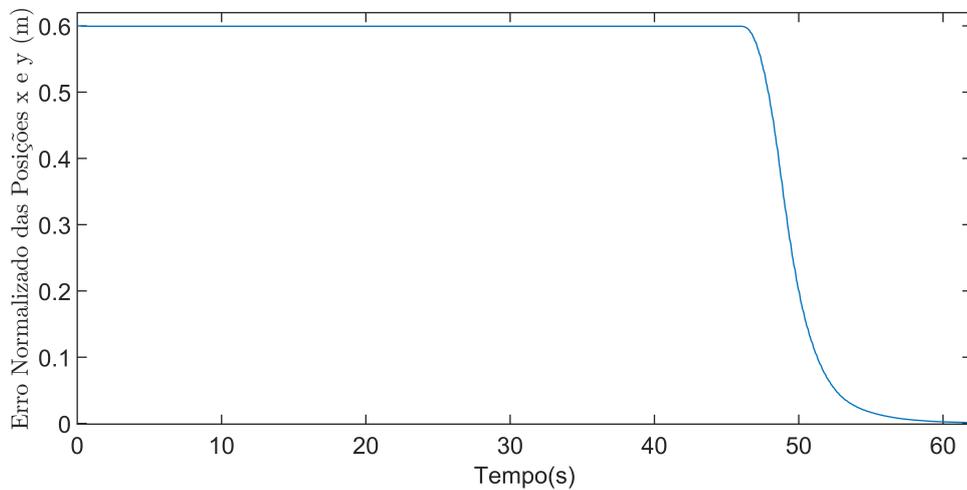


Figura 5.33: Gráfico do Erro das Posições x e y para o teste com prioridade para a orientação.

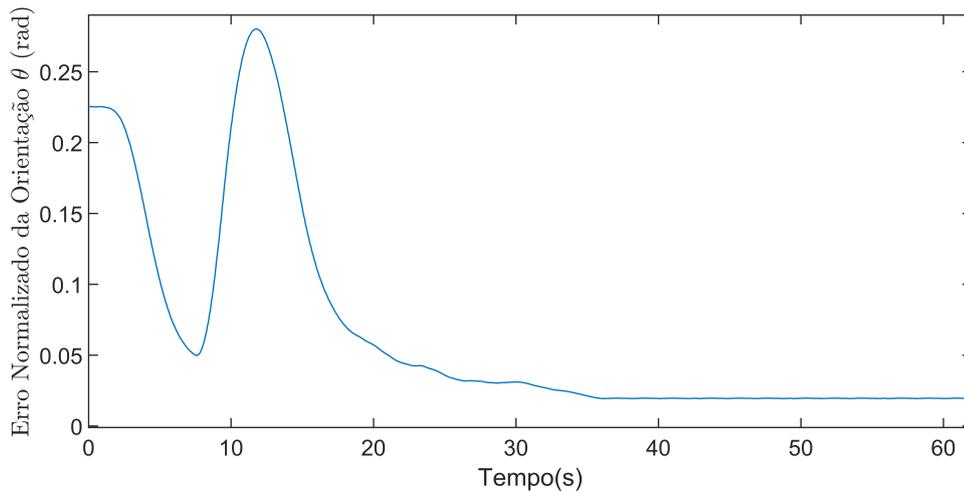


Figura 5.34: Gráfico do Erro da Orientação θ para o teste com prioridade para a orientação.

A Fig. 5.33 não demonstra os erros de posição, devido a odometria ser obtida pelas rodas, assim não considera o deslocamento causado pelo movimento de orientação.

5.3 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS

Ao analisar todos os experimentos que o protótipo do AIR-2 foi submetido, pode-se concluir que o robô obteve uma boa performance. Apesar de ser um protótipo e apresentar vários problemas estruturais, os resultados foram bons.

É necessário destacar que para os movimentos linear e livre, a odometria gerada a partir das rodas pode ser um problema para deslocamentos em grandes distâncias. A utilização de um filtro de Kalman, para a fusão de mais sensores, seria uma solução que minimizaria o acúmulo de erros na odometria pela integração da velocidade do robô. Quanto ao movimento de orientação, a rigidez da estrutura mecânica do protótipo gerou um problema, já que ela faz com que o robô tenha pequenos deslocamentos laterais e não um movimento rotacional puro.

Outro problema que foi observado durante os testes, foi a presença de uma folga em dois servo motores. Essa folga traz erros de ângulo aos servos, e portanto, faz com que o robô não movimente-se na direção desejada e também pode ocasionar erros durante a orientação do AIR-2.

Além disso, as rodas impressas possuem baixo atrito com a superfície e estão desbalanceadas. O acoplamento entre a roda e o motor sem escovas possui uma pequena folga, que gera um desbalanceamento durante a rolagem da roda. Ademais, o protótipo não apresenta sistema de cambagem nos garfos das rodas. Desta maneira, mais fatores comprometem a movimentação do protótipo durante os experimentos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentados as conclusões finais deste trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma estratégia de controle inteligente de posição e velocidade para um robô escalador com rodas direcionáveis. O robô escalador, chamado de AIR-2, apresenta rodas magnéticas e será utilizado para inspecionar tanques de armazenamento, principalmente os vasos de pressões que armazenam Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

Sendo assim, foi feito um levantamento sobre os principais requisitos para inspeção em vasos de pressões e tanques atmosféricos, destacando-se a necessidade do robô ter uma alta manobrabilidade para a realização de movimentos suaves e precisos. Outro requisito importante é o sistema de adesão do robô escalador, o qual deve garantir que o robô possa navegar por toda a superfície do tanque sem causar o seu desprendimento e que já foi validado por Rovani (2013), Espinoza (2014) e Veiga (2015). Esses requisitos foram alcançados pelo robô AIR-2, que se assemelha a um robô omnidirecional, tendo apenas uma diferença: o AIR-2 não possui a capacidade de reorientar-se enquanto se move. Isso é causado pelas restrições de deslizamento lateral e de adesão magnética das rodas. Dessa forma, o robô AIR-2 realiza o mesmo movimento, mas em 2 ações diferentes.

Embora o AIR-2 possua uma alta manobrabilidade, isto eleva o nível de dificuldade da implementação de uma estratégia de controle. Sendo assim, as características não-holonômicas (causada pelas restrições de deslizamento lateral e de adesão magnética) e não linearidades do sistema robótico elevam o nível de complexidade da implementação do controle. Então, analisando os tipos de controladores existentes para robôs escaladores, foi selecionada uma estratégia de controle baseada em sistema Fuzzy para o controle inteligente de velocidade do AIR-2.

A escolha da lógica Fuzzy baseou-se, principalmente, na implementação de um controlador sem a necessidade de ter os modelos cinemático e dinâmico do AIR-2, que seria uma tarefa custosa, dadas as não-linearidades presentes no robô. Portanto, levando em consideração as características de movimentação do AIR-2, o controle inteligente de velocidade é responsável pela realização de três movimentos: linear, orientação e livre. Sendo a entrada do controlador as velocidades lineares \dot{x} e \dot{y} e a velocidade angular $\dot{\theta}$.

A fim de verificar a precisão dos movimentos do controlador inteligente de velocidade, foi desenvolvido um controlador de posição. O controle de posição fornecerá a entrada do controlador inteligente de velocidade, ou seja, os controladores estarão em cascata.

Para a validação do controle inteligente de posição e velocidade, foram realizados experimentos em um ambiente simulado e real. A experimentação virtual demonstrou que o AIR-2 pode realizar a navegação por todo o tanque GLP, com movimentos precisos e suaves. Já o experimento real enfrentou alguns problemas, pois foi realizado em um protótipo adaptado em um ambiente 2D.

Apesar do protótipo ter algumas limitações, a resposta do controlador inteligente foi adequada e demonstrou que a estratégia de controle adotada atendeu os requisitos de navegação durante a inspeção. No decorrer do projeto, surgiram inúmeros problemas e desafios, dentre eles destacam-se as adaptações feitas no protótipo, o que geraram alguns empecilhos como: a falta do sistema de cambagem e ausência do sistema de suspensão em losango do projeto original. Outro problema identificado durante os experimentos reais foi a folga presente em 2 servo motores, que causaram um pequeno desalinhamento com os outros servos e assim o robô desviava-se um pouco da trajetória desejada.

A adoção do ROS como sistema operacional facilitou a programação do AIR-2, já que este possui várias ferramentas e bibliotecas que auxiliaram o desenvolvimento do controle inteligente. Além do mais, o ROS é compatível com diversos programas, como o Matlab e o V-REP, o que auxiliou a verificação e validação do controlador proposto.

Por fim, este trabalho propiciou o entendimento do ROS (com uma grande aceitação mundial), a utilização da lógica Fuzzy em controle e a adoção do V-REP para a simulação do AIR-2. Este trabalho foi premiado no **III Concurso de Teses e Dissertações em Robótica** (CTDR 2016), tendo recebido **Menção Honrosa**.

Além disso, permitiu a seguinte publicação:

- SANTOS, H. B.; TEIXEIRA, M. A. S.; DE OLIVEIRA, A. S.; ARRUDA, L. V. R. de; NEVES-JR; F. *Scheduled Fuzzy Controllers For Omnidirectional Motion Of An Autonomous Inspection Robot With Four Fully Steerable Magnetic Wheels. In: Latin American Robotics Symposium / Brazilian Robotics Symposium*, Out 2016, Recife. *Proceeding of IEEE LARS/SBR*. p. 263-268.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos por este trabalho, seguem algumas sugestões de trabalhos futuros:

1. Desenvolver o planejamento de trajetória para o uso em inspeções de vasos de pressões e tanques atmosféricos;
2. Utilização de novos sensores na odometria, o que acarretaria em uma localização mais precisa durante a navegação dos tanques de armazenamento;
3. Incrementar o controle inteligente de posição e velocidade levando em consideração as não-linearidades do AIR-2, como por exemplo, o sistema de cambagem, suspensão, aceleração da gravidade e força de adesão das rodas magnéticas.

REFERÊNCIAS

- ALKALLA, M. G.; FANNI, M. A.; MOHAMED, A. F. Versatile climbing robot for vessels inspection. **Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2015 International Conference on**, p. 18–23, May 2015.
- EICH, M.; VÖGELE, T. Design and control of a lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection. **Control Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on**, p. 1200–1205, June 2011.
- ELFERIK, S.; IMRAN, I. H. Control of nonholonomic mobile robot based on immersion and invariance adaptive control. **Systems, Signals Devices (SSD), 2015 12th International Multi-Conference on**, p. 1–5, March 2015.
- ESPINOZA, R. V. **Estimador de adesão de um robô escalador com rodas magnéticas**. Dissertação (Mestrado) — CPGEI - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba, 2014.
- FAISAL, M. et al. Robot localization using extended kalman filter with infrared sensor. **2014 IEEE/ACS 11th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)**, p. 356–360, Nov 2014. ISSN 2161-5322.
- FIGUEIREDO, L. C.; JOTA, F. G. Introdução ao controle de sistemas não-holonômicos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, scielo, v. 15, p. 243 – 268, 09 2004. ISSN 0103-1759. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592004000300002&nrm=iso>.
- GIORDANO, P. R. et al. On the kinematic modeling and control of a mobile platform equipped with steering wheels and movable legs. **Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on**, p. 4080–4087, May 2009. ISSN 1050-4729.
- JAMALI, P. et al. An intelligent fuzzy control scheme for mechatronic model of a standard-wheeled omni-directional mobile robot. **Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2013 3rd International Conference on**, p. 249–254, Dec 2013.
- KALRA, L. P.; GU, J.; MENG, M. A wall climbing robot for oil tank inspection. **Robotics and Biomimetics, 2006. ROBIO '06. IEEE International Conference on**, p. 1523–1528, Dec 2006.
- KARIM, N. A.; ARDESTANI, M. A. Takagi-sugeno fuzzy formation control of nonholonomic robots. **2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)**, p. 178–183, Jan 2016.
- KECSKÉS, I.; BALOGH, Z.; ODRY, P. Modeling and fuzzy control of a four-wheeled mobile robot. **2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics**, p. 205–210, Sept 2012. ISSN 1949-047X.

KHATIB, E. I. A. et al. Multiple sensor fusion for mobile robot localization and navigation using the extended kalman filter. **Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium on**, p. 1–5, Dec 2015.

KINDL, V. et al. Redesign of an undercarriage wheel for a self-acting robot. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, n. 2, p. 1–5, Feb 2016. ISSN 0018-9464.

LAM, T. L.; QIAN, H.; XU, Y. Omnidirectional steering interface and control for a four-wheel independent steering vehicle. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 15, n. 3, p. 329–338, June 2010. ISSN 1083-4435.

LIU, N. Intelligent path following method for nonholonomic robot using fuzzy control. **Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2009. ICINIS '09. Second International Conference on**, p. 282–285, Nov 2009.

MICHELS, K. et al. **Fuzzy Control: Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers (Studies in Fuzziness and Soft Computing)**. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006. ISBN 3540317651.

MINEO, C. et al. Robotic path planning for non-destructive testing – a custom {MATLAB} toolbox approach. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 37, p. 1 – 12, 2016. ISSN 0736-5845. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584515000666>>.

MINETTO, E. Introdução. In: . São Paulo: NOVATEC, 2007. cap. Introdução, p. 17.

MURPHY, R. **Introduction to AI Robotics**. MIT Press, 2000. (A Bradford book). ISBN 9780262133838. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RVlnL_X6FrwC>.

NUKULWUTHIOPAS, W.; LAOWATTANA, S.; MANEEWARN, T. Dynamic modeling of a one-wheel robot by using kane's method. **Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on**, v. 1, p. 524–529 vol.1, 2002.

OFTADEH, R. et al. Bounded-velocity motion control of four wheel steered mobile robots. **Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on**, p. 255–260, July 2013. ISSN 2159-6247.

OLIVEIRA, A. S. de et al. Adhesion force control and active gravitational compensation for autonomous inspection in lpg storage spheres. **Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian**, p. 232–238, Oct 2012.

PAN, E. et al. Control system of a small intelligent inspection robot for nuclear power plant use. **Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on**, p. 837–842, Aug 2015.

PASSINO, K.; YURKOVICH, S. **Fuzzy Control**. California, USA: Addison-Wesley, 1998. 182-186 p. ISBN 9780201180749.

PEREIRA, A. C. M. et al. **USB - Universal Serial Bus**. 2016. Disponível em: <<http://homepages.dcc.ufmg.br/adrianoc/usb/>>. Acesso em: 9 Abr. 2016.

PETROBRAS. **N-1281**: Projeto, fabricação e montagem de esfera. Rev. G, Fev 2011.

RADA-VILELA, J. **fuzzylite: a fuzzy logic control library**. 2014. Disponível em: <<http://www.fuzzylite.com>>.

ROBOTICS, C. **Coppelia Robotics v-rep: Create. Compose. Simulate. Any Robot**. 2016. Disponível em: <<http://www.coppeliarobotics.com/>>. Acesso em: 9 Abr. 2016.

ROS. **ROS.org - Powering the world's robots**. 2016. Disponível em: <<http://www.ros.org/>>. Acesso em: 9 Abr. 2016.

ROSA, A. B.; GNOATTO, R. Reprojetado e construção de protótipo de um robô de inspeção de cordões de solda em superfícies metálicas verticais e esféricas (segunda geração). **Trabalho de Conclusão de Curso-Engenharia Industrial Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba**, p. 137, 2015.

ROVANI, A. Desenvolvimento do protótipo de um robô para inspeção de cordões de solda em superfícies metálicas verticais. **Trabalho de Conclusão de Curso-Engenharia Industrial Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba**, p. 117, 2013.

RöHRIG, C. et al. Localization of an omnidirectional transport robot using ieee 802.15.4a ranging and laser range finder. **Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on**, p. 3798–3803, Oct 2010. ISSN 2153-0858.

SAN-MILLAN, A. Design of a teleoperated wall climbing robot for oil tank inspection. **Control and Automation (MED), 2015 23th Mediterranean Conference on**, p. 255–261, June 2015.

SCHMIDT, D.; BERNS, K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—a survey of design aspects and technologies. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 61, n. 12, p. 1288 – 1305, 2013. ISSN 0921-8890. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889013001656>>.

SHEN, W.; GU, J.; SHEN, Y. Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks. **IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005**, v. 4, p. 2072–2077 Vol. 4, July 2005. ISSN 2152-7431.

SIEGWART, R.; NOURBAKHS, I. R. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. Scituate, MA, USA: Bradford Company, 2004. ISBN 026219502X.

SONG, H.; CHOI, W.; KIM, H. Robust vision-based relative-localization approach using an rgb-depth camera and lidar sensor fusion. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 6, p. 3725–3736, June 2016. ISSN 0278-0046.

SUN, L.; GAN, J. Researching of two-wheeled self-balancing robot base on lqr combined with pid. **Intelligent Systems and Applications (ISA), 2010 2nd International Workshop on**, p. 1–5, May 2010.

TAVAKOLI, M. et al. Omniclimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 61, n. 9, p. 997 – 1007, 2013. ISSN 0921-8890.

TOOLBOXES, T. **AST inspection savings using in-service robotics**. 2016. Disponível em: <http://www.ttoolboxes.com/training/CourseDocuments/37/AST_InspectionSavingsUsingInServiceRobotics.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2016.

VEIGA, R. S. d. **Sistema de navegação e localização para um robô escalador magnético de inspeção baseado em sensores LIDAR**. Dissertação (Mestrado) — CPGEI - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba, 2015.

WANG, J.; SU, C.-Y.; OYA, M. Robust motion tracking control of partially nonholonomic mechanical systems. **Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on**, v. 5, p. 4608–4613 Vol.5, April 2004. ISSN 1050-4729.

WORKSHOP, M. **Rede CAN - O que é e como funciona**. 2016. Disponível em: <<http://machineworkshop.com.br/rede-can-o-que-e-e-como-funciona/>>. Acesso em: 9 Abr. 2016.

WU, M. et al. Design and optimal research of a non-contact adjustable magnetic adhesion mechanism for a wall-climbing welding robot. **International Journal of advanced robotic systems**, InTech, v. 10, 2013.

YU, S.; LIU, S.; XU, H. Adaptive fuzzy trajectory-tracking control of uncertain nonholonomic mobile robots. **2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics**, p. 481–486, July 2008. ISSN 1935-4576.

YUAN, G.; YANG, S. X.; MITTAL, G. S. Tracking control of a mobile robot using a neural dynamics based approach. **Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on**, v. 1, p. 163–168 vol.1, 2001. ISSN 1050-4729.

ANEXO A – DIAGRAMA COMPLETO DO CONTROLE DO AIR-2

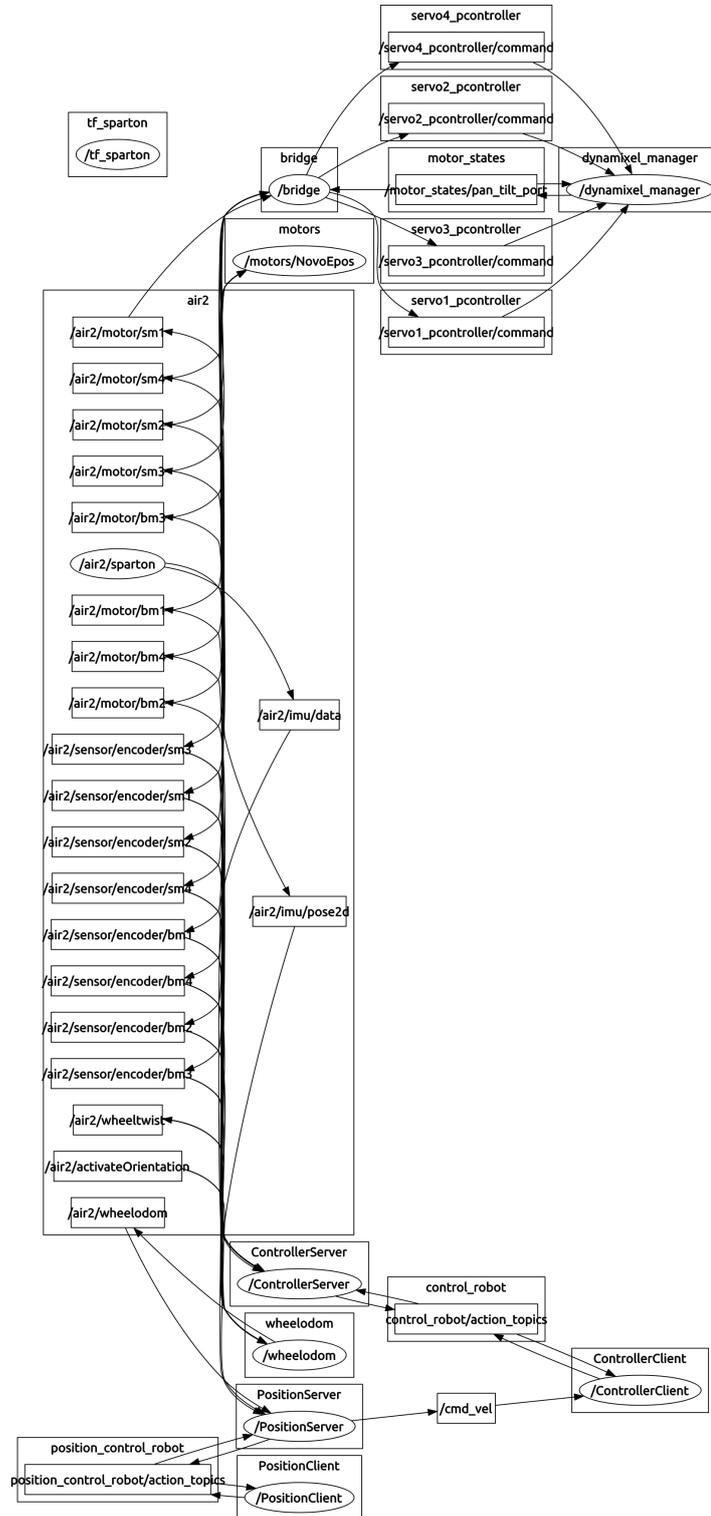


Figura A.1: Diagrama completo do controle do AIR-2.