

VINICIUS THIAGO LECCO RAMPINELLI

**CONTROLE DE FORMAÇÕES FLEXÍVEIS DE ROBÔS MÓVEIS COM DESVIO DE
OBSTÁCULOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação

Orientador: Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Nascimento Martins

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Carelli

VITÓRIA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Rampinelli, Vinicius Thiago Lecco, 1982-
R177c Controle de formações flexíveis de robôs móveis com desvio
de obstáculos / Vinicius Thiago Lecco Rampinelli. – 2010.
104 f. : il.

Orientador: Mário Sarcinelli Filho.
Co-Orientadores: Felipe Nascimento Martins, Ricardo Carelli.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Robôs móveis. 2. Robôs - Sistemas de controle. 3. Desvio
de obstáculos. I. Sarcinelli Filho, Mário. II. Martins, Felipe
Nascimento, 1975-. III. Carelli, Ricardo. IV. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. V. Título.

CDU: 621.3

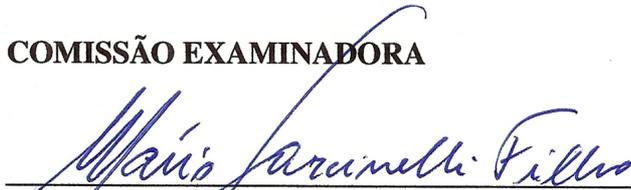
VINICIUS THIAGO LECCO RAMPINELLI

**CONTROLE DE FORMAÇÕES FLEXÍVEIS DE ROBÔS MÓVEIS COM DESVIO DE
OBSTÁCULOS**

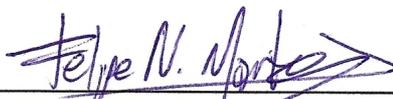
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 03 março de 2010.

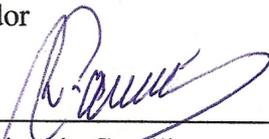
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Felipe Nascimento Martins
Faculdade do Centro Leste
Coorientador



Prof. Dr. Ricardo Carelli
Universidad Nacional de San Juan - Argentina
Coorientador



Profª. Dra. Eliete Maria de Oliveira Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Eduardo Oliveira Freire
Universidade Federal do Sergipe

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e também às pessoas que terão a curiosidade de lê-lo.

Agradecimentos

Registro o meu agradecimento a Deus, por Ele sempre me dar forças para continuar acreditando no trabalho sério e honesto.

Sinceros agradecimentos aos meus pais Geraldo e Lucimar, de quem sempre tive toda a proteção e cuidado e que sempre investiram na minha educação formal, o que certamente me permitiu que chegasse até aqui querendo ir ainda mais longe.

A minha querida irmã Laísa, que muito amo e admiro, pela companhia e por sempre me apoiar e se preocupar comigo.

Agradeço à Letícia, minha noiva e também melhor amiga, por todo o amor, carinho e compreensão, por ouvir as minhas queixas e por me resgatar à realidade após os momentos de introspecção e solidão que este trabalho acabou exigindo.

Fui privilegiado por contar com a orientação do conterrâneo joão-neivense Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho. Gratidão por ter me escolhido para fazer parte de sua equipe, pelas oportunidades oferecidas e pelas correções desta Dissertação e dos artigos que escrevemos.

Tenho muito a agradecer ao meu coorientador Prof. Dr. Felipe Nascimento Martins, sempre justo e generoso. Agradeço pelo apoio, incentivo e por ter dedicado parte do seu tempo precioso para ler esta Dissertação.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Ricardo Carelli, pelo carinho e acolhida no Instituto de Automática da Universidad Nacional de San Juan. Eu não poderia contar com pessoa melhor para desenvolver este trabalho, não somente por sua enorme capacidade, mas principalmente, por seu comprometimento com a profissão.

Gostaria também de agradecer aos professores e membros do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo e do Instituto de Automática da Universidad Nacional de San Juan, em especial ao Prof. Dr. Celso De La Cruz Casaño e ao Prof. Dr. Carlos Soria, por todos os conhecimentos partilhados durante as distintas fases deste trabalho.

A todos os colegas do doutorado, mestrado e graduação, em especial aos amigos e professores Alexandre Santos Brandão e Wanderley Cardoso Celeste, pela convivência, amizade e diversos diálogos abordados a respeito de inúmeros assuntos e temas durante o tempo que passamos juntos.

Não posso deixar de demonstrar minha gratidão aos meus orientadores de iniciação científica na Universidade Federal de Ouro Preto, Luiz de Siqueira Martins Filho e Ronilson Rocha, e também à minha orientadora do Programa de Capacitação Institucional - PCI/MCT/INPE, Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares, por todos os ensinamentos e por terem ampliado meus horizontes para a pós-graduação e paixão à ciência.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo e ao Instituto de Automática da Universidad Nacional de San Juan, pela infra-estrutura e organização que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio dado através da bolsa de estudos durante o período de realização desta Dissertação.

Verdade (Carlos Drummond de Andrade)

*A porta da verdade estava aberta,
mas só deixava passar
meia pessoa de cada vez.*

*Assim não era possível atingir toda a verdade,
porque a meia pessoa que entrava
só trazia o perfil de meia verdade.
E sua segunda metade
voltava igualmente com meio perfil.
E os meios perfis não coincidiam.*

*Arrebentaram a porta. Derrubaram a porta.
Chegaram ao lugar luminoso
onde a verdade esplendia seus fogos.
Era dividida em metades
diferentes uma da outra.*

*Chegou-se a discutir qual a metade mais bela.
Nenhuma das duas era totalmente bela.
E carecia optar. Cada um optou conforme
seu capricho, sua ilusão, sua miopia.*

Resumo

Este trabalho apresenta um esquema de controle multicamadas para controlar formações de $n \geq 3$ robôs móveis, incluindo uma estratégia de desvio de obstáculos. O controlador proposto é capaz de conduzir os robôs para compor formações desejadas (controle de posição) e/ou seguir uma trajetória desejada (controle de seguimento de trajetória). A estratégia de evasão de obstáculos é baseada em forças virtuais, que são geradas em função das distâncias robô-obstáculo, sendo consideradas para alterar as velocidades (linear e angular) individuais dos robôs componentes da formação. Tal estratégia é implementada em cada robô da formação, enquanto que o controlador proposto é aplicável a agrupamentos de três robôs, ou seja, a formações triangulares. Além disso, é apresentada uma prova de estabilidade para o sistema de controle em malha fechada, com base na teoria de Lyapunov, incluindo limitação da magnitude dos sinais de controle, para evitar saturação dos atuadores. Finalmente, resultados de simulação e experimentais são apresentados para distintas formações de robôs móveis tipo unicycle, demonstrando que o esquema de controle proposto é efetivo não somente em termos de assegurar que os robôs alcancem e/ou mantenham uma formação desejada, mas também em termos de evitarem obstáculos enquanto navegam no espaço de trabalho.

Abstract

This work presents a multi-layer scheme to control formations of $n \geq 3$ mobile robots, including a strategy for obstacle avoidance. The proposed controller is able to guide the robots to compose a desired formation (position control) and/or track a desired trajectory (trajectory tracking control). The obstacle deviation strategy is based on virtual forces, generated as a function of the robot-obstacle distance, which are considered to change the linear and angular velocities of the individual robots grouped in a formation. Such strategy is implemented in each robot in the formation individually, whereas the proposed controller is applicable to clusters of three robots, i.e., to triangular formations. Also, a proof of the stability of the closed-loop control system is presented, based on the theory of Lyapunov, including the saturation of the magnitude of the control signals, to avoid the saturation of the actuators. Finally, simulated and experimental results for distinct formations of unicycle-like mobile robots are presented, demonstrating that the proposed control scheme is effective not only in terms of ensuring that the robots reach and/or maintain a desired formation, but also in terms of avoiding obstacles while navigating in the workspace.

Lista de Tabelas

3.1	Características do sensor laser LMS200.	76
3.2	Valores dos parâmetros da estratégia de desvio de obstáculos.	77

Lista de Figuras

1.1	Alavancas de madeira sendo utilizadas para deslocar (a) e levantar (b) pedras. . .	13
1.2	Primeiros robôs móveis construídos e reconhecidos na literatura: Shakey (a) e Stanford Cart (b).	14
1.3	Imagens ilustrativas de manipuladores industriais realizando solda a ponto em uma peça metálica (a) e pintura a <i>spray</i> em retrovisores de automóveis (b). . . .	15
1.4	Robôs móveis comerciais capazes de executar suas tarefas de forma totalmente autônoma: robô aspirador de pó (a) e robô cortador de grama (b).	16
1.5	Robôs movimentando-se de forma coordenada enquanto manipulam (a) e transportam (b) uma barra metálica.	17
1.6	Classificação dos robôs móveis segundo a anatomia.	18
1.7	AGV sendo utilizado para coleta (a) e transporte (b) de produtos.	19
1.8	Pioneer 3-DX equipado com distintos acessórios.	20
1.9	Robô omnidirecional SPARK IV (a) com três rodas suecas motoras (b) arranjadas em forma triangular.	22
1.10	Estacionamento de um robô móvel com restrições não-holonômicas.	22
1.11	Esquema para obtenção do modelo cinemático do robô móvel uniclo.	24
1.12	Representação do CIR do robô móvel uniclo.	25
1.13	Diagrama de blocos do modelo dinâmico completo do robô móvel uniclo. . .	27
2.1	Analogia entre um grupo de pássaros (a) e uma frota de caças tripulados (b) voando em formação a fim de aumentar a eficiência do voo.	29
2.2	Robôs jogadores futebol das modalidades <i>Small Size</i> (a) e Humanoides (b) da competição de futebol de robôs da RoboCup [25].	30
2.3	Movimento coordenado de dois robôs móveis utilizando um sistema de visão omnidirecional.	32

2.4	Robôs móveis unicycle que compõem a formação linear	34
2.5	Fluxo de controle bidirecional.	35
2.6	Esquema multicamadas.	37
2.7	Variáveis de formação.	40
2.8	Diagrama de blocos do esquema de controle de formação.	43
2.9	Robôs móveis utilizados neste trabalho.	45
2.10	Infraestrutura de comunicação entre os dispositivos móveis.	47
2.11	Caminho percorrido pela formação (experimento 1).	49
2.12	Velocidades lineares reais e de referência (experimento 1).	49
2.13	Velocidades angulares reais e de referência (experimento 1).	50
2.14	Evolução temporal dos erros de formação (experimento 1).	50
2.15	Caminho percorrido pela formação (experimento 2).	51
2.16	Velocidades lineares reais e de referência (experimento 2).	52
2.17	Velocidades angulares reais e de referência (experimento 2).	52
2.18	Evolução temporal dos erros de formação (experimento 2).	53
2.19	Caminho percorrido pela formação (experimento 3).	54
2.20	Velocidades lineares reais e de referência (experimento 3).	54
2.21	Velocidades angulares reais e de referência (experimento 3).	55
2.22	Evolução temporal dos erros de formação (experimento 3).	55
2.23	Caminho percorrido pela formação (experimento 4).	57
2.24	Velocidades lineares reais e de referência (experimento 4).	57
2.25	Velocidades angulares reais e de referência (experimento 4).	58
2.26	Evolução temporal dos erros de formação (experimento 4).	58
2.27	Exemplo de uma decomposição triangular de polígono simples.	60
2.28	Esquema multicamadas generalizado para n robôs.	61
2.29	Caminho percorrido pela formação (simulação 1).	64

2.30	Evolução temporal dos erros de formação (simulação 1).	64
2.31	Caminho percorrido pela formação (simulação 2).	65
2.32	Evolução temporal dos erros de formação (simulação 2).	66
3.1	Exemplo de mapa de probabilidades.	69
3.2	Figura ilustrativa apresentada na formulação do problema.	71
3.3	Exemplos de curvas típicas da força de repulsão fictícia.	73
3.4	Interação entre o robô e os obstáculos.	74
3.5	Esquema do posicionamento dos sonares.	76
3.6	Leque de varredura laser.	77
3.7	Imagens capturadas durante o experimento (experimento 3).	78
3.8	Caminho percorrido pela formação (experimento 3).	79
3.9	Velocidades lineares reais e de referência (experimento 3).	79
3.10	Velocidades angulares reais e de referência (experimento 3).	80
3.11	Evolução temporal dos erros de formação (experimento 3).	80
3.12	Imagens capturadas durante o experimento (experimento 4)	81
3.13	Caminho percorrido pela formação (experimento 4).	82
3.14	Velocidades lineares reais e de referência (experimento 4).	82
3.15	Velocidades angulares reais e de referência (experimento 4).	83
3.16	Evolução temporal dos erros de formação (experimento 4).	83
3.17	Caminho percorrido pela formação (simulação 3).	86
3.18	Evolução temporal dos erros de formação (simulação 3).	86
3.19	Caminho percorrido pela formação (simulação 4).	87
3.20	Evolução temporal dos erros de formação (simulação 4).	88
3.21	Caminho percorrido pela formação (simulação 5).	89
A.1	Definição do ambiente de navegação e da quantidade de robôs e obstáculos.	97
A.2	Definição da formação.	98

A.3	Construção dos obstáculos.	98
-----	------------------------------------	----

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Breve Definição e Histórico	13
1.2	Manipuladores Industriais versus Robôs Móveis	15
1.3	Motivação	15
1.4	Classificação dos Robôs Móveis	17
1.4.1	Segundo a Anatomia	18
1.4.2	Segundo a Forma de Operação	18
1.4.3	Segundo a Funcionalidade	19
1.5	Robôs Móveis a Rodas	21
1.6	Modelos Cinemático e Dinâmico	23
1.6.1	Modelo Cinemático do Robô Uniciclo	23
1.6.2	Modelo Dinâmico do Robô Uniciclo	25
1.7	Objetivo e Escopo do Trabalho	27
2	Controle de Formação	29
2.1	Arquiteturas de Controle para Sistemas Multirrobo	30
2.1.1	Arquiteturas de Controle Centralizadas	31
2.1.2	Arquiteturas de Controle Descentralizadas	32
2.1.3	Arquiteturas de Controle Híbridas	33
2.2	Controle de Formação	33
2.2.1	Método Líder-seguidor	33
2.2.2	Abordagens Baseadas em Comportamento	34

2.2.3	Métodos Baseados em Estruturas Virtuais	34
2.3	Esquema de Controle Multicamadas para uma Formação de Três Robôs	35
2.3.1	Estrutura Multicamadas	37
2.3.2	Cinemática Inversa do Robô Móvel Tipo Uniciclo	39
2.3.3	Variáveis de Formação	39
2.3.4	Transformações Cinemáticas	40
2.3.5	Controle de Formação	42
2.3.6	Plataforma de Experimentos	45
2.3.7	Resultados Experimentais	47
2.3.8	Análise dos Resultados Experimentais e Comentários Gerais	59
2.4	Generalização para $n > 3$ Robôs	60
2.4.1	Resultados de Simulação	62
2.4.2	Análise dos Resultados de Simulação e Comentários Gerais	67
3	Desvio de Obstáculos	68
3.1	Desvio de Obstáculos em Formações Multirrobo	70
3.1.1	Desvio de Obstáculos Baseado em Impedância Mecânica	71
3.1.2	Plataforma de Experimentos	75
3.1.3	Resultados Experimentais	77
3.1.4	Análise dos Resultados Experimentais e Comentários Gerais	84
3.1.5	Resultados de Simulação	85
3.1.6	Análise dos Resultados de Simulação e Comentários Gerais	89
4	Conclusões e Trabalhos Futuros	90
	Referências	92
	Apêndice A – Interface Gráfica do Simulador	97

1 *Introdução*

“Vamos começar com as três regras fundamentais da robótica — as três regras que estão mais fortemente estabelecidas no cérebro positrônico de um robô.” Na escuridão, seus dedos cobertos por luvas assinalavam cada ponto.

“Nós temos: Um, um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano se machuque.”

“Certo!”

“Dois”, continuou Powell, “um robô deve obedecer às ordens dadas por seres humanos, exceto quando essas ordens entrarem em conflito com a Primeira Lei”.

“Certo!”

“E três, um robô deve proteger sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Leis.”

(Powell e Donovan discutem as leis da robótica em *Runaround*¹, tradução nossa)

É de entendimento comum que existem atividades importantes que os seres humanos não podem executar fisicamente com facilidade, dadas as suas capacidades naturais. Assim, geralmente recorre-se ao uso de ferramentas e máquinas para realizar tarefas que são incompatíveis com a capacidade humana, ou para realizar tarefas em ambientes desagradáveis e nocivos à saúde humana, como, por exemplo, atividades em locais com altos níveis de radioatividade.

As primeiras versões de tais dispositivos eram ferramentas simples e intuitivas, que geralmente associavam a energia humana à energia necessária para realizar a tarefa planejada, como, por exemplo, polias e alavancas (ver Figura 1.1). A partir da Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, vários esforços foram empreendidos no sentido de criar dispositivos que facilitassem a vida do homem, isto é, máquinas com capacidades automatizadas que fizessem pelo homem os trabalhos rotineiros, pesados e cansativos.

¹Runaround é um conto de ficção científica de 1942, escrito por Isaac Asimov, que contém a primeira aparição explícita das Três Leis da Robótica.

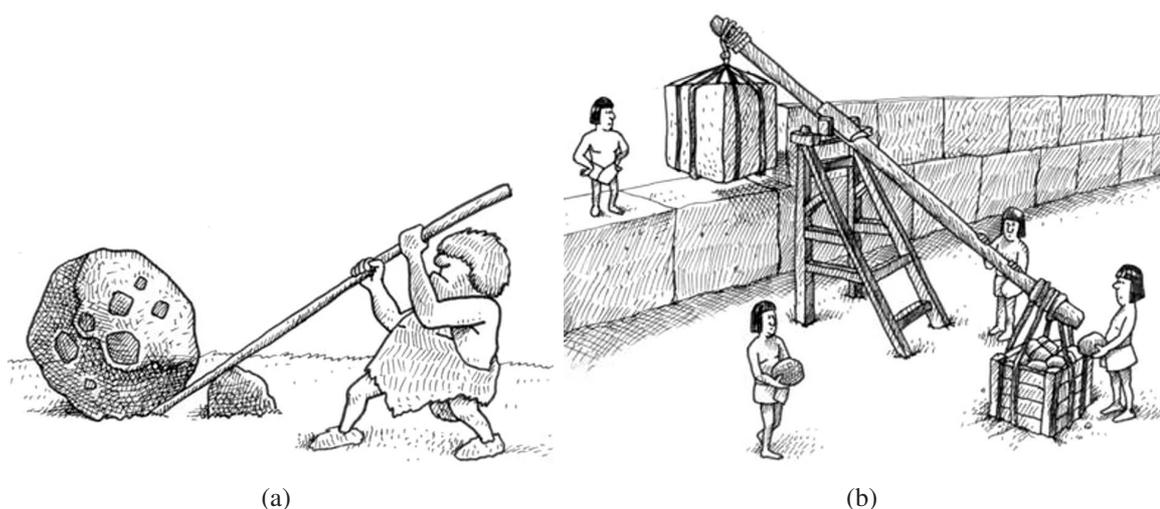


Figura 1.1: Alavancas de madeira sendo utilizadas para deslocar (a) e levantar (b) pedras.

Fonte: Vladimir Filipovic, ZUNS, Belgrad, 2009.

Desenvolvimentos tecnológicos desse tipo refletem a conscientização do potencial de produtividade dos dispositivos que reduzem a participação humana a um papel supervisor, enquanto as máquinas executam as tarefas. Os dispositivos modernos criados sob essa percepção, possibilitados por avanços recentes na velocidade de processamento dos computadores digitais, são máquinas complexas que possuem um alto nível de autonomia. Parte dessas máquinas são geralmente chamadas de robôs móveis, e são o tema deste trabalho.

1.1 Breve Definição e Histórico

Definir o que é um robô móvel não é simples. Os robôs móveis têm sido definidos de muitas maneiras, porém, as definições mais abrangentes são as mais adequadas, devido às várias interpretações feitas acerca de suas capacidades e, conseqüentemente, utilidade.

Segundo Arkin [1], um pioneiro no campo da robótica móvel baseada em comportamento, um robô móvel é uma máquina capaz de extrair informações do ambiente e usar conhecimento sobre o mundo de modo a se mover com segurança e com um propósito. Para Marchi [2], um robô móvel é um dispositivo mecânico montado sobre uma base não fixa, que age sob o controle de um sistema computacional, equipado com sensores e atuadores que lhe permitem interagir com o ambiente.

Um dos primeiros robôs móveis construídos e reconhecidos na literatura foi o Shakey (ver Figura 1.2(a)). Desenvolvido pelo Stanford Research Institute, entre 1966 e 1972, possuía uma variedade de sensores, que incluía uma câmera de TV, sensor de distância por triangulação e

sensores de fim-de-curso. Além disso, era capaz de navegar entre as salas de um laboratório, enviando sinais de rádio a um computador externo, que o permitia efetuar algumas tarefas, como empurrar caixas e evitar obstáculos. O Shakey foi desenvolvido com dois objetivos principais, a saber, estudar as aplicações de inteligência artificial e estudar os processos para controle em tempo real de robôs que interagissem com ambientes complexos.

O robô Stanford Cart, do mesmo instituto de pesquisa, foi desenvolvido para estudos de visão estéreo (ver Figura 1.2(b)). Desenvolvido entre 1973 e 1979, ele utilizava um sistema de navegação baseado no “parar e seguir”, onde, a cada metro percorrido, parava, fazia a leitura dos seus sensores e realizava o planejamento da rota a seguir. O Stanford Cart movia-se cerca de 1 metro a cada 10 ou 15 minutos [3].

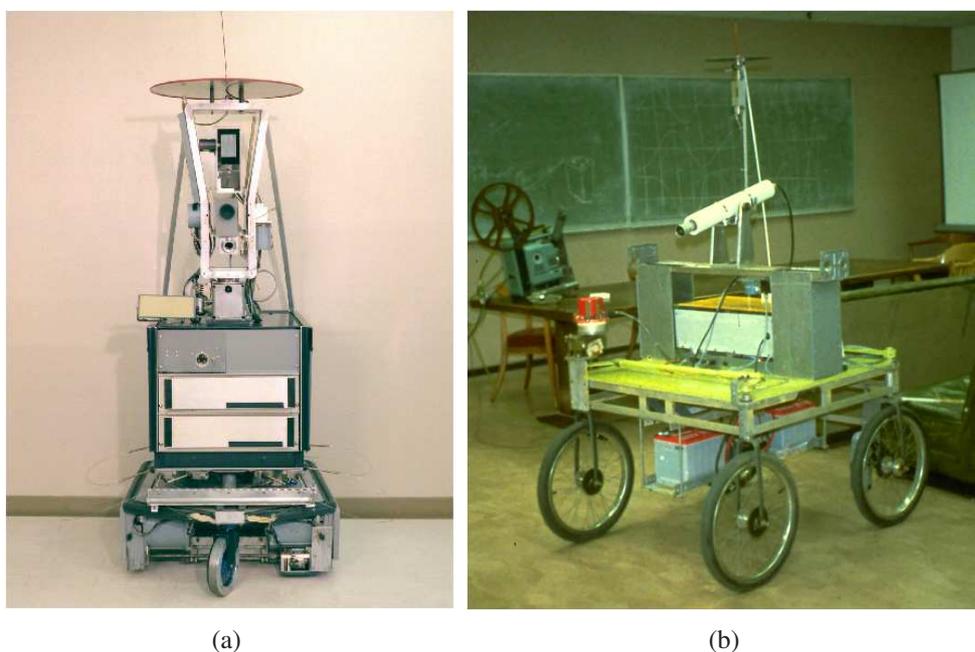


Figura 1.2: Primeiros robôs móveis construídos e reconhecidos na literatura: Shakey (a) e Stanford Cart (b).

Fontes: SRI International, 2009 e Hans Moravec, 2009.

Em meados da década de 80, houve uma “explosão” de projetos de robôs móveis, onde várias empresas começaram a fabricar e comercializar plataformas de robôs móveis prontos para uso. Hoje em dia, os robôs móveis podem ser encontrados nas mais diferentes formas e modelos, o que lhes compete um grande número de aplicações, tais como robôs industriais, robôs de serviço, robôs de pesquisa e robôs pessoais. Esta classificação dos robôs é explicada na Seção 1.4.

1.2 Manipuladores Industriais versus Robôs Móveis

Os robôs manipuladores industriais, compreendem atualmente uma indústria mundial de aproximadamente 5 bilhões de dólares [4]. Aparafusados em locais específicos nas linhas de montagem das indústrias, esses robôs podem mover suas articulações com alta velocidade e precisão enquanto executam tarefas repetitivas, tais como soldagem por pontos e pintura a *spray* (ver Figura 1.3). Na indústria de eletrônicos, por exemplo, os manipuladores inserem componentes eletrônicos em placas de circuito impresso com alta precisão, viabilizando a construção de produtos eletrônicos cada vez menores, como os telefones celulares e os computadores portáteis.



Figura 1.3: Imagens ilustrativas de manipuladores industriais realizando solda a ponto em uma peça metálica (a) e pintura a *spray* em retrovisores de automóveis (b).

Fonte: FANUC Robotics America Inc., 2009.

No entanto, esses robôs possuem uma deficiência fundamental: falta de mobilidade. Um manipulador industrial, preso a uma superfície fixa, possui uma amplitude de movimento limitada, que depende, principalmente, da localização física em que foi instalado. Por outro lado, os robôs móveis são capazes de se deslocar no ambiente em que se encontram, não estando presos a uma localização física.

1.3 Motivação

O estudo da robótica móvel é um tema bastante relevante e atual. De fato, esta área de pesquisa apresentou um grande salto em seu desenvolvimento nas últimas duas décadas. As aplicações práticas de robôs móveis junto a diferentes atividades em nossa sociedade vêm de-

monstrando o quão promissor é o futuro desta área. Por exemplo, seu uso em aplicações domésticas (aspiradores de pó e cortadores de grama robóticos), industriais (transporte automatizado e veículos de carga autônomos), urbanas (transporte público, cadeiras de rodas robotizadas), militares (sistemas de monitoramento aéreo remoto, transporte de suprimentos e de armamento em zonas de guerra, sistemas táticos e de combate) e de segurança e defesa civil e militar (controle e patrulhamento de ambientes, resgate e exploração em ambientes hostis), demonstra a grande variedade de aplicações atuais dos robôs móveis e os interesses econômicos envolvidos em relação ao seu desenvolvimento e aplicação [5]. As Figuras 1.4(a) e 1.4(b) mostram, respectivamente, exemplos de robôs móveis comerciais para uso em aplicações domésticas e urbanas.



Figura 1.4: Robôs móveis comerciais capazes de executar suas tarefas de forma totalmente autônoma: robô aspirador de pó (a) e robô cortador de grama (b).

Fontes: Alfred Kärcher GmbH & Co., 2009 e Friendly Robotics Co., 2009.

Uma extensão natural da ideia de um único robô executando uma tarefa de maneira isolada é a ideia de vários robôs trabalhando juntos. Por exemplo, algumas tarefas podem ser aceleradas por uma divisão de trabalho, outras podem ser tornadas robustas por uma provisão de redundância. Além disso, existem aplicações que carecem de sensoriamento e/ou atuação simultânea em múltiplos locais. Nesses casos, os sistemas multirrobôs possuem um grande apelo, tema que tem atraído a atenção de diversos grupos de pesquisa em todo o mundo.

O Monterey Bay Aquarium Research Institute, por exemplo, está desenvolvendo um sistema de Veículos Submarinos Autônomos (VSAs) para observar o comportamento do oceano. O Autonomous Ocean Sampling Network, como é chamado, baseia-se no movimento coordenado e cooperativo de três VSAs sobre uma região previamente determinada, onde se desdobrará um processo de amostragem adaptativa [6]. O Jet Propulsion Laboratory (JPL), da Agência Aeroespacial Americana, está desenvolvendo o Terrestrial Planet Finder, uma rede de telescópios

concebida para procurar planetas semelhantes à Terra orbitando próximos a estrelas, a fim de procurar pela existência de vida nesses planetas [7]. Fazer com que os telescópios voem em formação é uma condição essencial para o sucesso da missão, um problema comum em sistemas multirrobo. O projeto Robot Work Crew, também desenvolvido pelo grupo de robótica do JPL, tem como objetivo investigar os desafios-chave associados à coordenação multirrobo referentes às tarefas de transporte e de manipulação de objetos longos em ambientes planetários. Em [8], por exemplo, investiga-se o caso em que dois robôs são utilizados para transportar uma carga rígida em forma de barra, onde o movimento de ambos é coordenado por um algoritmo de controle que visa minimizar o *stress* da carga (forças sobre a carga). A Figura 1.5 mostra os dois robôs durante a realização de um teste ao ar livre, simulando a instalação de uma estação de energia solar.

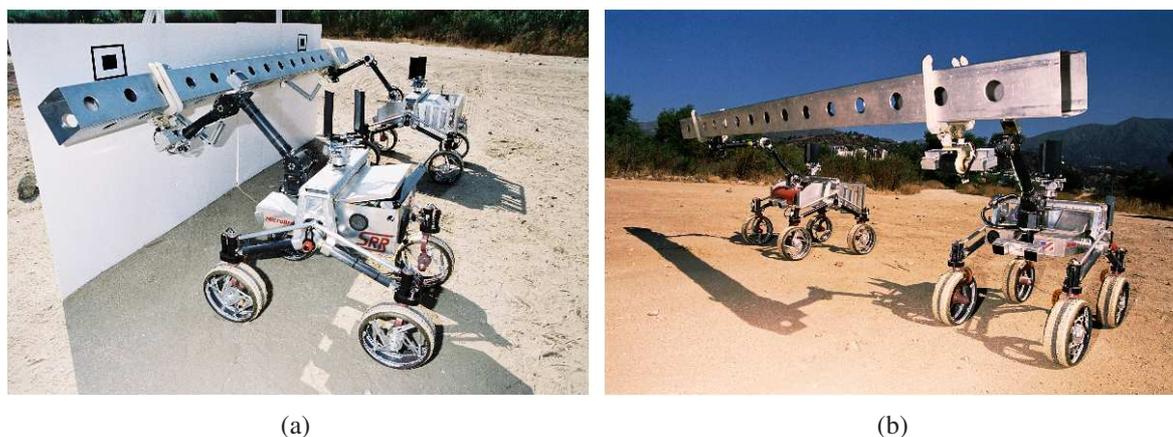


Figura 1.5: Robôs movimentando-se de forma coordenada enquanto manipulam (a) e transportam (b) uma barra metálica.

Fonte: NASA/JPL-Caltech, 2009.

Dentro deste contexto, constata-se a grande importância do estudo dessa área de pesquisa, que está transformando vidas.

1.4 Classificação dos Robôs Móveis

Os robôs móveis têm sido classificados segundo diferentes aspectos, dadas as várias interpretações feitas acerca de suas capacidades e, conseqüentemente, de suas utilidades. Pieri [9], por exemplo, classifica os robôs móveis atuais de acordo com três aspectos principais: anatomia, forma de operação e funcionalidade. É importante ressaltar, no entanto, que ainda não há uma classificação que seja definitiva e aceita como tal.

1.4.1 Segundo a Anatomia

Em relação à anatomia, os robôs móveis podem ser classificados em três grandes grupos: aéreos, aquáticos e terrestres (ver Figura 1.6). Dentre os mais populares, estão os terrestres, os quais se deslocam através de movimentos de translação e rotação, e diferem entre si pelos diferentes tipos de atuadores utilizados para locomoção, que incluem rodas, esteiras e pernas.

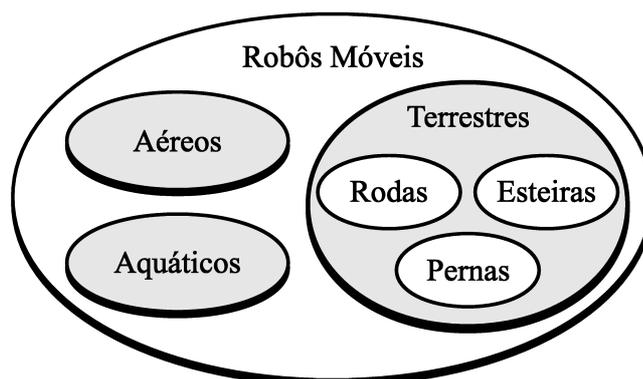


Figura 1.6: Classificação dos robôs móveis segundo a anatomia.

É importante mencionar que esses grupos constituem subdivisões difusas, uma vez que as características de dois grupos podem ser combinadas a fim de construir um robô para executar uma tarefa específica.

1.4.2 Segundo a Forma de Operação

Quando classificados segundo a forma de operação, os robôs móveis podem ser agrupados em completamente autônomos e semi-autônomos [3]. Os robôs considerados completamente autônomos são capazes de realizar suas tarefas tomando suas próprias decisões, sem controle externo humano. Eles recebem um conjunto de tarefas de alto nível, sabendo o que deve ser feito, mas não como deve ser feito, e devem selecionar as ações para o cumprimento de suas tarefas, decidindo apropriadamente sempre que encontrarem situações não previstas, adaptando-se às mudanças do ambiente de forma a cumprirem adequadamente suas metas. Eles diferem dos robôs semi-autônomos, na medida em que estes são projetados para operar com algum grau de controle humano, apesar de serem capazes de tomar certas decisões por si sós.

1.4.3 Segundo a Funcionalidade

Por último, quando agrupados de acordo com as funções para as quais são projetados, os robôs móveis podem ser classificados como: robôs industriais, robôs de serviço, robôs para pesquisa e ensino e robôs para entretenimento.

Robôs Industriais

Os robôs industriais são utilizados para executar tarefas pesadas, como carregar e distribuir grandes quantidades de materiais e peças entre várias estações de montagem de uma fábrica (ver Figura 1.7). Os *Automated Guided Vehicles* (AGVs), como são chamados, recebem tarefas determinadas *a priori* na forma de uma sequência explícita de ações, e as executam em um ambiente completamente estruturado. Para locomoverem-se, normalmente seguem um conjunto de trajetórias que podem estar definidas através de um fio condutor enterrado no piso ou de faixas coloridas pintadas no chão da fábrica.



Figura 1.7: AGV sendo utilizado para coleta (a) e transporte (b) de produtos.

Fonte: Savant Automation Inc., 2009.

Robôs de Serviço

Os robôs de serviço, diferentemente, são utilizados para serviços gerais, como limpeza, vigilância e transporte de materiais leves em ambientes estruturados (ver Figura 1.4). Além disso, possuem certa autonomia, uma vez que processam informação sensorial para atuar em situações não previstas, como desviar de uma pessoa ou de um objeto. O robô de serviço Helpmate, por exemplo, presente em mais de cem hospitais em todo o mundo, transporta documentos, comida e medicamentos entre as salas dos hospitais utilizando vários sensores embarcados. Para

localizar-se, o robô utiliza uma câmera apontada para o teto, que detecta marcos de referência (lâmpadas), especificados manualmente ao robô de antemão [10].

Robôs para Pesquisa

Os robôs para pesquisa e ensino são utilizados principalmente na área acadêmica, para o desenvolvimento de novas tecnologias, processos e produtos. Várias plataformas comerciais estão disponíveis no mercado, para as mais diversas aplicações: robôs para ambientes fechados e/ou abertos, para serviços pesados, robôs didáticos e para propósitos gerais. Dentre as plataformas mais utilizadas pelos pesquisadores no mundo todo, estão as fabricadas pelas empresas K-Team Corporation e MobileRobot Inc.

O Laboratório de Automação Inteligente da Universidade Federal do Espírito Santo, e o Instituto de Automática da Universidad Nacional de San Juan (Argentina), são exemplos de grupos de investigação que utilizam robôs comerciais da empresa MobileRobot Inc. para pesquisa em robótica móvel. Em particular, ambos os grupos possuem exemplares do modelo Pioneer 3-DX, um robô móvel modular com várias opções de acessórios como câmera, sensor laser e ultrassom (ver Figura 1.8).



Figura 1.8: Pioneer 3-DX equipado com distintos acessórios.

Robôs para Entretenimento

Os robôs de entretenimento são os robôs vendidos como forma de lazer e entretenimento pessoal. Ao contrário dos robôs mencionamos anteriormente, estes robôs não realizam tarefas específicas, e são projetados para interagirem com os humanos. O Iftbot, por exemplo, criado por uma associação entre as empresas Futaba Industry e Business Design, pode demonstrar 40 sentimentos diferentes por meio de expressões faciais que combinam movimentos de “olhos”, “sobrancelhas” e “orelhas”. Voltado para interagir com crianças e idosos, o pequeno robô, que tem cerca de 45cm de altura, está equipado com câmera digital, sensores táteis, sensor para evitar obstáculos, reconhecimento vocal, microfone e inteligência artificial para manter uma conversa simples durante duas horas.

1.5 Robôs Móveis a Rodas

A roda tem sido o mecanismo de locomoção mais popular nos robôs móveis terrestres, devido à sua eficiência e simplicidade. Além disso, robôs móveis a rodas geralmente não apresentam problemas de equilíbrio, uma vez que três rodas são suficientes para garantir a sua estabilidade.

Infelizmente, grande parte dos robôs móveis terrestres possui alguma restrição de movimento, em consequência direta das rodas usadas em sua locomoção. Restrições deste tipo são conhecidas como restrições não-holonômicas².

Como exemplos de robôs móveis a rodas holonômicos e não-holonômicos, podem-se citar os robôs omnidirecionais e os robôs tipo carro, respectivamente. Os robôs omnidirecionais, assim chamados por possuírem mobilidade completa no plano horizontal, são capazes de se mover em qualquer direção, sem a necessidade de estarem orientados na direção do movimento. Apesar disso, esses robôs são pouco comuns, pois necessitam de rodas e/ou estruturas mecânicas especiais. A Figura 1.9 mostra um exemplo de robô móvel omnidirecional, construído com três rodas suecas com separação angular igual a 120° . Os pequenos roletes passivos verdes posicionados ao longo das rodas permitem que elas girem normalmente sobre o eixo principal e que se movam com pouco atrito em diversas direções.

²Popularmente, robôs com restrições não-holonômicas são chamados robôs não-holonômicos, enquanto aqueles que não possuem estas restrições são conhecidos como robôs holonômicos [11].



Figura 1.9: Robô omnidirecional SPARK IV (a) com três rodas suecas motoras (b) arranjadas em forma triangular.

Fonte: Nex Robotics Pvt. Ltd., 2009.

O robô móvel tipo carro, como o nome sugere, possui a mesma configuração de um automóvel, ou seja, possui duas rodas de tração e duas de direção. A Figura 1.10 mostra como as restrições não-holonômicas se manifestam em uma, aparentemente simples, tarefa de estacionamento de um robô tipo carro. Como é possível observar, o movimento mais intuitivo para o estacionamento, sem considerar o seu sistema de locomoção, seria uma linha reta deslocando o robô lateralmente para a posição final desejada (ver Figura 1.10(a)). No entanto, esse movimento não é factível quando se considera as restrições não-holonômicas impostas pelo seu sistema de locomoção; assim, o movimento precisa ser feito como na Figura 1.10(b).

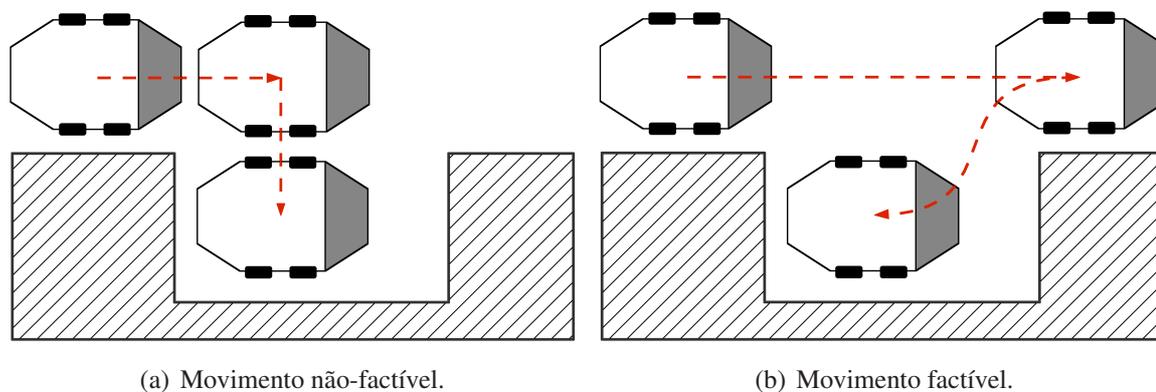


Figura 1.10: Estacionamento de um robô móvel com restrições não-holonômicas.

Não existe um tipo de robô ideal para todas as aplicações, uma vez que cada aplicação possui particularidades que definem a viabilidade do emprego de um determinado tipo de robô. No presente trabalho, decidiu-se utilizar os robôs móveis da linha Pioneer, em particular a plataforma comercial P3-DX (ver Figura 1.8).

Os robôs P3-DX possuem a mesma estrutura dos robôs uniciclos [12]: são dotados de duas rodas com acionamento diferencial, localizadas na parte dianteira, e uma roda livre que serve apenas para sustentação, localizada na parte traseira. Os robôs tipo uniciclo são, provavelmente, os robôs terrestres de mais fácil de construção, sendo amplamente utilizados na comunidade científica. Apesar disso, eles também possuem restrições não-holonômicas, por não possuírem atuadores que os permitam movimentar-se em todas as direções, assim como pela condição de não-escorregamento entre a superfície das rodas e do piso.

Entretanto, os robôs tipo uniciclo podem girar sobre seu eixo e se alinhar à direção de movimento para estacionar, por exemplo.

1.6 Modelos Cinemático e Dinâmico

Para se ter uma ideia clara do movimento de um robô móvel, é de absoluta necessidade conhecer o seu modelo, o qual pode ser dividido em duas partes: um modelo cinemático e um modelo dinâmico [13]. O modelo cinemático corresponde às características geométricas e às restrições de movimentos do robô, enquanto que o modelo dinâmico representa como o robô responde às entradas de controle que produzem o seu movimento no decorrer do tempo, levando em conta a sua massa e o modelo dinâmico dos seus atuadores, por exemplo.

1.6.1 Modelo Cinemático do Robô Uniciclo

O modelo cinemático do robô móvel uniciclo está baseado nas seguintes considerações: o robô é constituído por um chassi rígido e rodas não-deformáveis, que se movem em um plano horizontal [14]. Além disso, considera-se que o contato entre as superfícies das rodas e do piso satisfaz as condições de rotação pura, isto é, uma velocidade constante de rotação das rodas equivale a uma velocidade constante de translação das mesmas³. A Figura 1.11 mostra uma representação esquemática detalhada do robô em estudo.

³No caso não ideal, eventualmente podem existir certos deslizamentos paralelos ao eixo de rotação e/ou de deslocamento do robô, devido a fatores como velocidade de rotação das rodas, velocidade de deslocamento do corpo do robô e forças laterais, como centrífuga e centrípeta, no caso de movimentos curvilíneos.

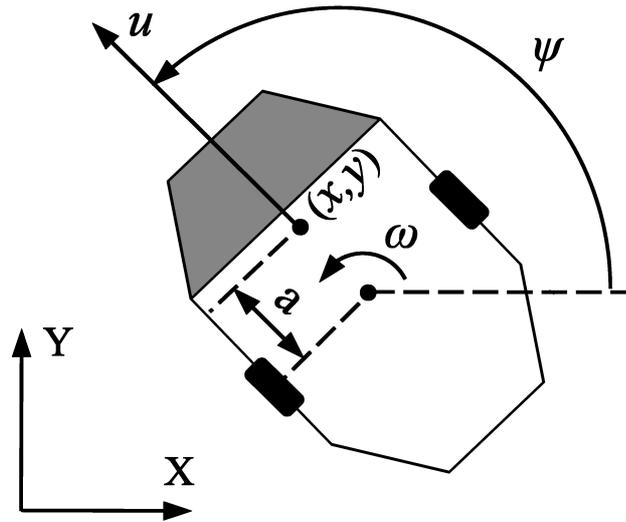


Figura 1.11: Esquema para obtenção do modelo cinemático do robô móvel uniciclo.

Conforme mostra a Figura 1.11, a postura do robô no plano cartesiano XY pode ser descrita em termos da posição cartesiana (x, y) em relação a um referencial fixo no espaço de trabalho e do ângulo de orientação ψ entre o vetor de orientação do robô e o eixo x do referencial fixo no espaço de trabalho. Dessa forma, tem-se que a sua postura é dada pelo vetor (3×1)

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Além disso, em cada instante de tempo, o movimento do robô pode ser visto como uma rotação instantânea ao redor do seu Centro Instantâneo de Rotação (CIR), que no caso do robô móvel uniciclo encontra-se sobre a reta formada pelo prolongamento do eixo virtual que conecta as suas rodas [14], conforme mostra a Figura 1.12. Na figura, v_E e v_D representam, respectivamente, as velocidades das rodas esquerda e direita, ambas em relação ao solo, e R é o raio de curvatura instantâneo da trajetória do robô, isto é, a distância do CIR ao ponto central do eixo virtual que conecta as suas rodas.

Desse modo, se $v_E = v_D$, então o raio R é infinito e o robô move-se em linha reta. Por outro lado, se $v_E = -v_D$, então o raio R é zero e o robô gira ao redor do ponto central do eixo virtual que conecta as suas rodas. Para qualquer outro valor de v_E e v_D o robô move-se em linha curva, ao redor do seu Centro Instantâneo de Rotação, o qual está situado a uma distância R do ponto central do eixo virtual que conecta as suas rodas, alterando tanto a sua posição quanto a sua orientação.

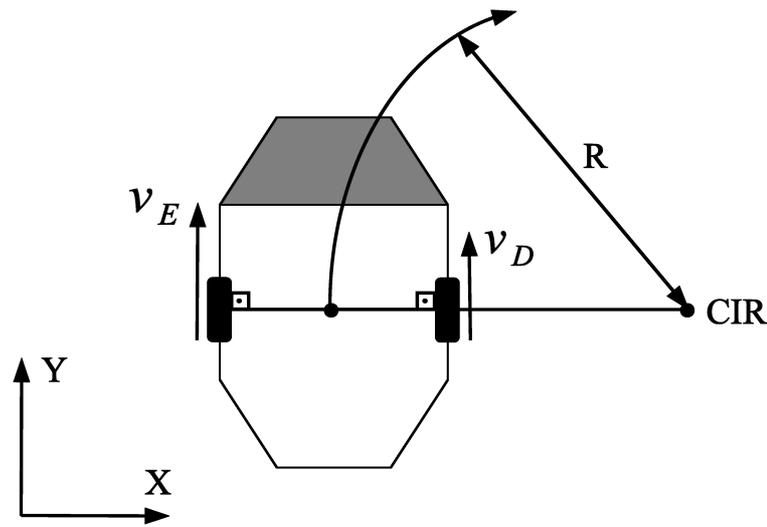


Figura 1.12: Representação do CIR do robô móvel uniciclo.

O modelo cinemático de postura do robô uniciclo, em notação matricial, é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -a \sin \psi \\ \sin \psi & a \cos \psi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

onde a velocidade linear u e a velocidade angular ω são as entradas de controle, e a representa a distância entre o ponto de interesse (x,y) e o ponto central do eixo virtual que conecta as rodas (ver Figura 1.11). Cabe mencionar, no entanto, que em robôs reais, sinais de entrada desse tipo não podem ser aplicados aos robôs diretamente, uma vez que o acionamento dos mesmos é feito por motores elétricos. Em virtude disso, as velocidades são aplicadas indiretamente, através de um controle de velocidade de baixo nível. Além disso, é possível considerar que as velocidades u e ω são desenvolvidas instantaneamente, desde que as mesmas sejam baixas e a inércia do robô seja pequena.

Por fim, tem-se que o robô móvel uniciclo é controlável [13]. Isto significa que ele sempre pode ser conduzido de uma postura inicial ξ_0 a uma postura final ξ_f em um tempo finito, por meio da manipulação dos seus sinais de entrada.

1.6.2 Modelo Dinâmico do Robô Uniciclo

Conforme mencionado na subseção anterior, pode-se supor que as velocidades desenvolvidas pelo robô rastreiam perfeitamente as entradas de controle, sob condição de que as velo-

idades e a inércia do robô sejam baixas. Sendo assim, essa consideração não é válida para muitas aplicações importantes, onde, por exemplo, os robôs precisam desenvolver velocidades altas e/ou transportar cargas pesadas [15]. Nesses casos, é essencial considerar a dinâmica do robô, pois ela passa a ter grande influência na realização dos seus movimentos.

O modelo dinâmico do robô pode ser obtido de duas formas. Uma delas é através da modelagem analítica, também chamada de modelagem fenomenológica, que usa equações diferenciais e/ou algébricas para descrever os fenômenos físicos que ocorrem no sistema. No entanto, esse procedimento nem sempre é trivial, principalmente quando o sistema é muito complexo. A outra forma é através da modelagem empírica, que usa dados de entrada/saída coletados do sistema para obter um modelo matemático aproximado.

Nesse sentido, os diversos modelos dinâmicos de robôs uniciclos disponíveis na literatura diferem, essencialmente, pelo método através do qual foram obtidos e pelo tipo de suas variáveis de entrada, na maior parte das vezes tensões [16] ou torques [17]. No entanto, assim como os robôs da linha Pioneer, a maioria dos robôs comerciais geralmente recebem comandos de controle do tipo velocidade, que são aplicados indiretamente através de um controle de velocidade de baixo nível, conforme comentado na subseção anterior. Nesse contexto, em [18] foi apresentado um modelo dinâmico que tem a vantagem de possuir velocidades linear e angular como variáveis entrada, dado por

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & 0 \\ 0 & \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_4 & -\theta_3 \omega \\ \theta_5 \omega & \theta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

onde a velocidade linear de referência u_{ref} e a velocidade angular de referência ω_{ref} são as entradas do modelo, u e ω são as velocidades efetivamente desenvolvidas pelo robô e $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T$ é o vetor de parâmetros (identificados) do modelo, que é função de alguns parâmetros físicos do robô, como a sua massa e a resistência elétrica de seus motores.

Agrupando as Equações 1.2 e 1.3, obtém-se o chamado modelo dinâmico completo (ver Figura 1.13), dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi - a \omega \sin \psi \\ u \sin \psi + a \omega \cos \psi \\ \omega \\ \frac{\theta_3}{\theta_1} \omega^2 - \frac{\theta_4}{\theta_1} u \\ -\frac{\theta_5}{\theta_2} u \omega - \frac{\theta_6}{\theta_2} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\theta_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix}. \quad (1.4)$$

Analisando a Equação 1.4, observa-se que a dinâmica do movimento longitudinal não está separada da dinâmica do movimento rotacional, isto é, a velocidade linear u influi na aceleração angular $\dot{\omega}$ e a velocidade angular ω influi na aceleração linear \dot{u} . Isso significa que o movimento longitudinal influi no movimento rotacional, e vice-versa.

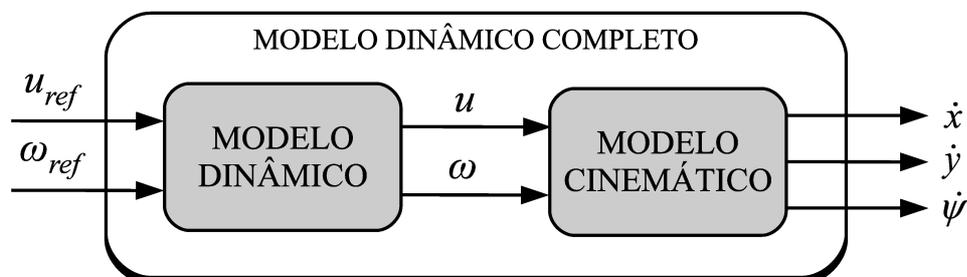


Figura 1.13: Diagrama de blocos do modelo dinâmico completo do robô móvel unicycle.

Outra forma de equacionar o modelo dinâmico dado por (1.3) é proposta em [19], onde algumas de suas propriedades são apresentadas e provadas.

1.7 Objetivo e Escopo do Trabalho

O objetivo geral desta Dissertação é desenvolver um esquema de controle multicamadas para controlar formações compostas de $n \geq 3$ robôs móveis, incluindo uma estratégia de desvio de obstáculos.

Para tratar desse objetivo geral, três objetivos específicos foram definidos: desenvolver um esquema de controle multicamadas para controlar formações compostas de $n = 3$ robôs móveis, generalizar o esquema de controle multicamadas para formações de $n > 3$ robôs e implementar uma estratégia de desvio de obstáculos para que as formações sejam capazes de se moverem evitando colisões com obstáculos circunjacentes.

Desse modo, na tentativa de conduzir de forma clara e concisa o entendimento dos assuntos abordados, o texto foi dividido em quatro capítulos.

O primeiro capítulo, Introdução, descreve, em linhas gerais, o tema Robótica, com foco na Robótica Móvel. O capítulo menciona, por exemplo, alguns sistemas multirrobôs que estão sendo desenvolvidos por diversos grupos de pesquisa em todo o mundo, e apresenta uma classificação, ainda que não seja definitiva, dos robôs móveis atuais. Posteriormente, particulariza o tema no contexto dos robôs móveis a rodas, comentando sobre suas características de mobilidade e apresentando os modelos cinemático e dinâmico do robô móvel a rodas do tipo unicycle,

que é o tipo de robô móvel utilizado nos experimentos e simulações apresentados.

O segundo capítulo, Controle de Formação, inicia, apresentando de forma abrangente os sistemas multirrobo. Em seguida, descreve brevemente as três principais arquiteturas de controle de sistemas multirrobo, bem como as três abordagens principais encontradas nos trabalhos em controle de formação. Posteriormente, descreve a estrutura vertical do esquema de controle multicamadas, inicialmente proposto para controlar formações compostas de $n = 3$ robôs móveis, onde são apresentadas, por exemplo, as variáveis de formação e as transformações cinemáticas de posição e de velocidade. Na sequência, este capítulo apresenta uma proposta para um controlador de formação, assim como uma análise de estabilidade para o sistema em malha fechada correspondente. Para validar o referido esquema, são apresentados resultados experimentais, sobre os quais são feitas algumas análises e alguns comentários gerais.

Ainda no segundo capítulo é apresentada uma proposta de generalização do esquema de controle multicamadas para controlar formações envolvendo $n > 3$ robôs móveis. Para tratar deste tema, inicialmente se descreve brevemente a fundamentação teórica da generalização, assim como o algoritmo utilizado para implementá-la. Finalmente, são apresentados resultados de simulação, sobre os quais são feitas algumas análises e comentários gerais.

O terceiro capítulo, Desvio de Obstáculos, começa revisando três métodos de desvio de obstáculos clássicos: método de detecção de bordas, grade de certeza e método de campos potenciais. Posteriormente, comenta brevemente sobre a navegação autônoma e descreve em detalhes a estratégia de desvio de obstáculos proposta no presente trabalho. Em seguida, apresenta de forma sucinta o sistema sensorial embarcado em cada robô e, por fim, verifica a efetividade dessa estratégia em dois experimentos e duas simulações, sobre os quais também são feitas algumas análises e comentários gerais.

Finalmente, o último capítulo, Conclusões e Trabalhos Futuros, apresenta algumas conclusões obtidas ao longo da pesquisa desenvolvida e sugere algumas propostas de continuidade deste trabalho.

2 *Controle de Formação*

Nos últimos anos, diversos esforços de pesquisa têm sido dirigidos ao controle de sistemas multirroboês. O interesse nesse campo se justifica, principalmente, pelas vantagens que tais sistemas apresentam em relação a um único sistema robótico e pelos aperfeiçoamentos tecnológicos que o amparam, principalmente os que permitem a interação e a integração entre múltiplos sistemas robóticos.

Parte dos primeiros trabalhos em sistemas multirroboês se caracterizava por possuir alguma inspiração biológica, isto é, tentavam imitar fenômenos ou comportamentos naturais a fim de encontrar soluções para os problemas tratados. É importante notar, por exemplo, a similaridade existente entre uma frota de caças tripulados e um sistema biológico formado por um bando de pássaros enquanto se movem em uma formação em “V” (ver Figura 2.1). Sabe-se, que esse tipo de formação ajuda o bando de pássaros a voar mais rapidamente e com maior economia de energia, pois os pássaros que vão na frente do bando (no vértice do “V”), reduzem a resistência do ar para os outros [20].



Figura 2.1: Analogia entre um grupo de pássaros (a) e uma frota de caças tripulados (b) voando em formação a fim de aumentar a eficiência do voo.

Fonte: Reuters, 2009.

As razões para se utilizar sistemas multirrobo podem ser diversas e distintas. No entanto, um dos motivos principais é que eles podem ser empregados para aumentar a eficiência das aplicações. Ou seja, embora a maior parte dos robôs seja utilizada para realizar as tarefas de maneira isolada, os sistemas multirrobo podem ser utilizados para melhor executar essas tarefas, em termos de tempo e qualidade. Além disso, ao invés de se utilizar robôs “poderosos” para executarem tarefas complexas de maneira isolada, como, por exemplo, transporte de objetos grandes e/ou pesados [21], uma solução multirrobo pode ser mais simples e barata, proporcionar flexibilidade e tornar a aplicação tolerante a possíveis falhas de robôs.

Outros exemplos de tarefas que podem ser melhor executadas por sistemas multirrobo são: vigilância e monitoramento de grandes ambientes [22], reconhecimento e inspeção de áreas de interesse, e busca e resgate de sobreviventes em acidentes ou desastres [23]. Outras tarefas simplesmente não podem ser realizadas por um único robô, como, por exemplo, tarefas onde alguns robôs devem posicionar-se em volta de um agente específico a fim de escoltá-lo [24]. Além disso, diversos esforços de pesquisa têm sido dirigidos ultimamente em direção ao campo do entretenimento. Considere, por exemplo, a grande quantidade de campeonatos de futebol de robôs que têm sido promovidos por diversas universidades no mundo todo (ver Figura 2.2).

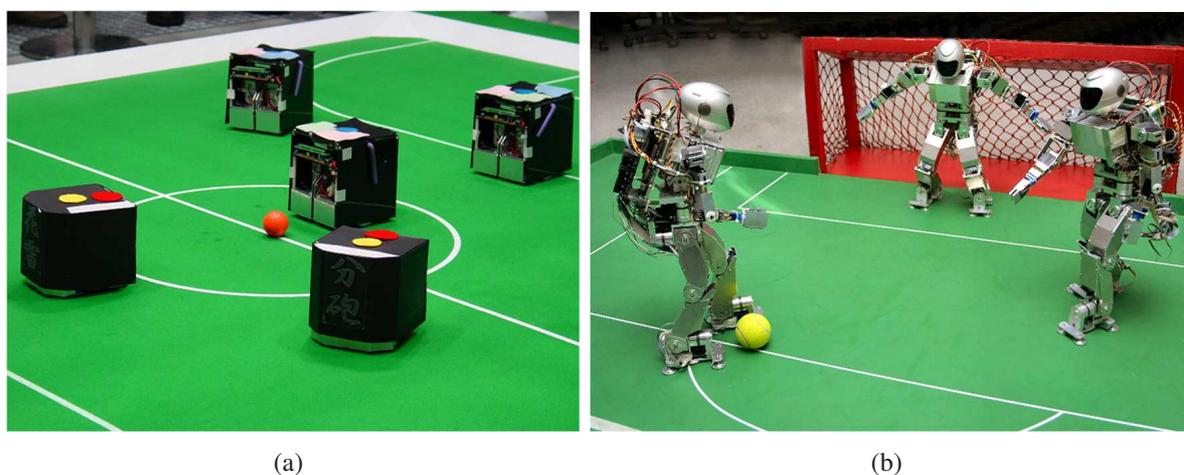


Figura 2.2: Robôs jogadores futebol das modalidades *Small Size* (a) e Humanoides (b) da competição de futebol de robôs da RoboCup [25].

Fonte: RoboCup Japanese National Committee, 2003.

2.1 Arquiteturas de Controle para Sistemas Multirrobo

Embora os sistemas multirrobo possam ser utilizados para executarem diversas missões em diferentes tipos de ambiente, conforme sumarizado anteriormente, uma das considerações técnicas chave comum a todos esses sistemas é a escolha da arquitetura de controle utilizada

para controlar o movimento individual dos robôs. A arquitetura de controle representa uma parte fundamental dos sistemas multirrobo, uma vez que ela pode determinar o sucesso ou o fracasso da missão, tendo influência direta no desempenho global do sistema. Desse modo, em razão da sua importância, diferentes tipos de arquiteturas de controle para sistemas multirrobo têm sido apresentados na literatura, embora a distinção principal seja geralmente feita entre as arquiteturas consideradas centralizadas [26] e as consideradas descentralizadas [27].

2.1.1 Arquiteturas de Controle Centralizadas

Nas arquiteturas consideradas centralizadas, uma entidade central (fixa ou móvel) é responsável pela realização das tarefas referentes à coleta, gerenciamento e processamento das informações sobre o ambiente para controlar o movimento individual de cada robô a fim de garantir a correta realização da missão. Em tais abordagens, a entidade central desempenha um papel fundamental, uma vez que ela gerencia todo o sistema, isto é, todos os robôs atuam no ambiente de acordo com comandos enviados por ela. Como toda a capacidade de processamento e decisão do sistema está concentrada em uma única unidade central, a mesma deve ser “poderosa” o bastante a fim de corresponder às exigências tecnológicas impostas.

Arquiteturas centralizadas podem otimizar a coordenação entre os robôs a fim de melhor realizar as tarefas. Além disso, elas podem facilmente identificar e administrar possíveis falhas entre os robôs do grupo. Por outro lado, a concentração de toda a capacidade de processamento em uma única unidade central pode representar uma fragilidade, visto que uma eventual falha da mesma comprometerá todo o sistema. Outro ponto fraco dessa abordagem se refere ao limite da velocidade de processamento e de comunicação imposto pela unidade central, isto é, tal unidade passa a ser um fator limitante no desenvolvimento de sistemas com vários robôs.

Em [26] e [18], por exemplo, foram apresentadas arquiteturas de controle centralizadas para controlar grupos de robôs móveis que devem ocupar, de maneira coordenada, posições específicas no espaço de trabalho (posicionamento), as quais podem variar no tempo (seguimento). Em [18], em particular, foi realizado um experimento real com dois robôs móveis da linha Pioneer, onde um dos robôs possuía um sistema de visão omnidirecional¹ e um computador a bordo para monitorar e controlar o outro robô (ver Figura 2.3).

¹O sistema de visão omnidirecional permite adquirir imagens que possuem um campo visual horizontal que cobre 360° em torno do robô.



Figura 2.3: Movimento coordenado de dois robôs móveis utilizando um sistema de visão omnidirecional.

Fonte: [28].

2.1.2 Arquiteturas de Controle Descentralizadas

Nas arquiteturas de controle consideradas descentralizadas, diferentemente, os recursos encontram-se distribuídos entre todos os robôs do grupo [29, 30]. Desse modo, cada robô utiliza recursos próprios (por exemplo, sensores de distância que permitem detectar obstáculos e obter as posições relativas dos robôs vizinhos) para tomar as suas próprias decisões. Além disso, cada robô pode comunicar-se e trocar informações somente com robôs que estão fisicamente próximos, e está destinado a realizar apenas uma parte da missão global.

Arquiteturas descentralizadas conseguem dissolver o “gargalo” computacional das arquiteturas centralizadas graças à sua estrutura distribuída — a princípio, a complexidade computacional das arquiteturas descentralizadas é independente do número de robôs. Além disso, elas podem ser tolerantes a possíveis falhas, isto é, falhas individuais não comprometem todo o sistema. Por outro lado, a sua estrutura distribuída dificulta otimizar a coordenação entre os robôs durante a realização da tarefa.

Em [31], por exemplo, foi proposta uma arquitetura de controle descentralizada para coordenar o movimento individual de vários robôs móveis que navegam e desviam de obstáculos desconhecidos presentes no ambiente. A arquitetura proposta é considerada descentralizada, no sentido de que os robôs não trocam informações, sendo cada robô responsável, individualmente, por obter as suas informações sensoriais e por gerar os seus sinais de controle, necessários para garantir a correta realização da missão.

2.1.3 Arquiteturas de Controle Híbridas

Atualmente, verifica-se que as propostas de desenvolvimento de sistemas multirrobo têm preferido utilizar arquiteturas de controle que não são estritamente centralizadas nem descentralizadas, denominadas híbridas [32, 33]. O interesse por esse tipo de abordagem se justifica na medida em que se abre a possibilidade de superar os problemas intrínsecos às abordagens estritamente centralizadas ou descentralizadas.

Em [32], por exemplo, uma arquitetura de controle de formação híbrida foi proposta para controlar grupos de robôs móveis autônomos para atingirem formações pré-determinadas no espaço de trabalho.

2.2 Controle de Formação

O problema de controle de formação de robôs móveis é um dos principais temas abordados pelos trabalhos em coordenação de movimento de robôs móveis, e trata especificamente do problema de controlar as posições e orientações relativas dos robôs pertencentes a um grupo para que o grupo se mova como um todo com uma forma geométrica específica [34, 33]. Em [24], por exemplo, foi proposto um sistema multirrobo destinado a realizar uma tarefa de escolta, onde o ente escoltado se encontrava no centróide de um polígono de ordem n , que possui em cada um dos seus vértices um robô da formação. Outro caso em que a manutenção de uma certa forma geométrica durante a navegação é importante é o caso do transporte de cargas, já que a carga em si tem uma forma geométrica bem definida.

De um modo geral, três abordagens principais podem ser encontradas nos trabalhos em controle de formação apresentados na literatura: líder-seguidor [35, 36], baseadas em comportamento [37, 34] e baseadas em estruturas virtuais [38, 39].

2.2.1 Método Líder-seguidor

No método líder-seguidor, um robô definido como o líder da formação é responsável por guiar todos os robôs que compõem o grupo, chamados de seguidores. Enquanto o robô líder navega em direção ao destino desejado para a formação, os outros o seguem, considerando-o como um ponto de referência. A estrutura líder-seguidor é considerada de fácil implementação. Entretanto, devido ao importante papel do líder nesse método, qualquer falha desse ente prejudicará todo o sistema e comprometerá a realização da tarefa programada. Além disso, como não existe um mecanismo de realimentação nesse método, o erro de um robô pode ser acumulado e

propagado ao longo da formação.

Em [31], por exemplo, foi apresentada uma proposta de controle de formação líder-seguidor. A formação é composta por dois robôs tipo unicycle de tração diferencial, que não compartilham informação (ver Figura 2.4). Nesse caso, é de responsabilidade exclusiva do robô seguidor posicionar-se em uma estrutura linear em relação ao robô líder. A identificação da posição atual do robô líder (que transporta um padrão a ser reconhecido durante a navegação) é efetuada pelo robô seguidor através das medidas provenientes de um sensor de varredura laser, instalado a bordo do mesmo.



Figura 2.4: Robôs móveis unicycle que compõem a formação linear .

Fonte: [31].

2.2.2 Abordagens Baseadas em Comportamento

Nas abordagens baseadas em comportamento, vários comportamentos básicos, tais como evitar colisões, desviar de obstáculos, manter a formação, navegar em direção ao destino desejado, são previamente definidos para cada robô. Nesse método, o sinal de controle recebido por cada robô da formação provém de uma média ponderada dos sinais de controle associados a cada comportamento. A ponderação da média depende da informação recebida pelos sensores do robô a cada instante.

2.2.3 Métodos Baseados em Estruturas Virtuais

A abordagem da estrutura virtual é relativamente semelhante ao método líder-seguidor, exceto que, nesse caso, a referência passa a ser um ponto virtual situado no espaço de trabalho.

Além disso, toda a formação geralmente é considerada como um corpo virtual rígido com uma forma geométrica específica, como um triângulo, por exemplo.

Em [38], por exemplo, foi proposto um algoritmo de controle não-hierárquico a fim de compelir um grupo de robôs móveis a comportar-se como partículas pertencentes a uma estrutura rígida. O algoritmo de controle proposto tem como característica principal o fluxo de controle bidirecional (de cima para baixo e de baixo para cima), o qual difere dos sistemas de controle típicos, onde o fluxo de controle é estritamente descendente (ver diagrama apresentado na Figura 2.5).

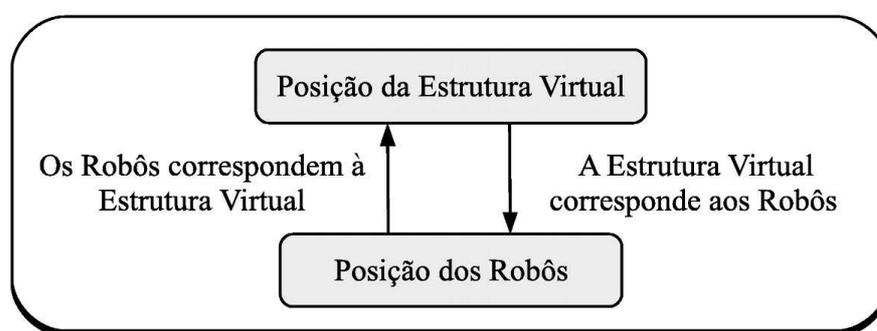


Figura 2.5: Fluxo de controle bidirecional.

Fonte: Adaptado de [38].

De acordo com o diagrama, a posição da estrutura virtual no espaço de trabalho é controlada pelas posições dos robôs no espaço de trabalho, e, simultaneamente, as posições dos robôs são controladas pela posição da estrutura virtual. Dessa forma, à medida que a estrutura virtual se desloca no espaço de trabalho, os robôs, tentando corresponder à estrutura virtual rígida, irão deslocar-se em formação no espaço de trabalho.

2.3 Esquema de Controle Multicamadas para uma Formação de Três Robôs

O desenvolvimento do esquema de controle multicamadas, tomou como base o trabalho apresentado por Mas et al. [40], o qual explora uma abordagem de controle centralizado específica para aplicações envolvendo um grupo de três robôs. Sucintamente, o trabalho apresenta uma abordagem de controle de formação de robôs móveis baseada em estruturas virtuais, denominada *Cluster Space*, cujo controle de posição (ou de seguimento de trajetória) é realizado

sobre o centróide de uma figura geométrica, nesse caso, um triângulo².

O interesse sobre o referido trabalho resulta da possibilidade de especificação e monitoramento simples do movimento de uma formação de robôs móveis. Os pontos centrais da estratégia são: considerar o sistema multirrobôs como uma entidade única e especificar os movimentos individuais dos robôs através dos atributos da formação, como a posição, a orientação, e a forma geométrica da estrutura virtual.

Tais atributos, orientam a seleção adequada das variáveis de estado no espaço da formação convenientes à sua especificação, controle e monitoramento, as quais estão relacionadas às variáveis de estado no espaço dos robôs através de um conjunto de transformações cinemáticas. Estas transformações, por sua vez, permitem que os comandos de controle no espaço da formação sejam convertidos automaticamente em comandos no espaço dos robôs (que, em última instância, serão transformados em comandos para cada atuador em cada robô). Como consequência, um operador (usuário) pode especificar e monitorar o movimento dos robôs sob a perspectiva do espaço da formação, uma vez que o cômputo dos sinais de controle é realizado em relação às variáveis no espaço da formação — as variáveis de formação.

Acredita-se que essa abordagem melhora a usabilidade de um sistema multirrobôs, ao oferecer um nível de abstração de controle superior aos detalhes de implementação específicos aos robôs e seus atuadores.

Considere, por exemplo, a tarefa de coordenar o movimento de um grupo de dois robôs móveis em um plano. Sob o ponto de vista do espaço das variáveis de formação, este sistema multirrobôs simples poderia ser representado como um segmento de reta ocupando uma determinada posição no espaço de trabalho, orientado em uma direção específica, e com um determinado tamanho. Desse modo, um operador poderia “conduzir” a formação ao longo de um caminho arbitrário no espaço de trabalho, enquanto varia a orientação e o tamanho do segmento de reta.

Similarmente, um sistema multirrobôs formado por três robôs móveis poderia ser representado como um triângulo em uma determinada posição no espaço de trabalho, orientado para uma determinada direção, e com dimensões específicas. Da mesma forma, um usuário poderia “conduzir” este grupo de robôs ao longo de um caminho arbitrário, enquanto varia o tamanho e a orientação do triângulo. O triângulo poderia, por exemplo, ser deformado (achatado) para atravessar uma passagem estreita presente no espaço de trabalho da formação.

²O centróide (ou baricentro) de um triângulo representa o seu centro de gravidade, e é obtido pela intersecção das suas medianas.

2.3.1 Estrutura Multicamadas

A arquitetura de controle de formação multirrobôs desenvolvida no presente trabalho está verticalmente estruturada em módulos, de acordo com o esquema multicamadas apresentado na Figura 2.6. Conforme pode ser observado, o esquema proposto está organizado em cinco camadas de maneira hierárquica, onde cada camada funciona como um módulo independente que lida com uma parte específica do problema de controle de formação.

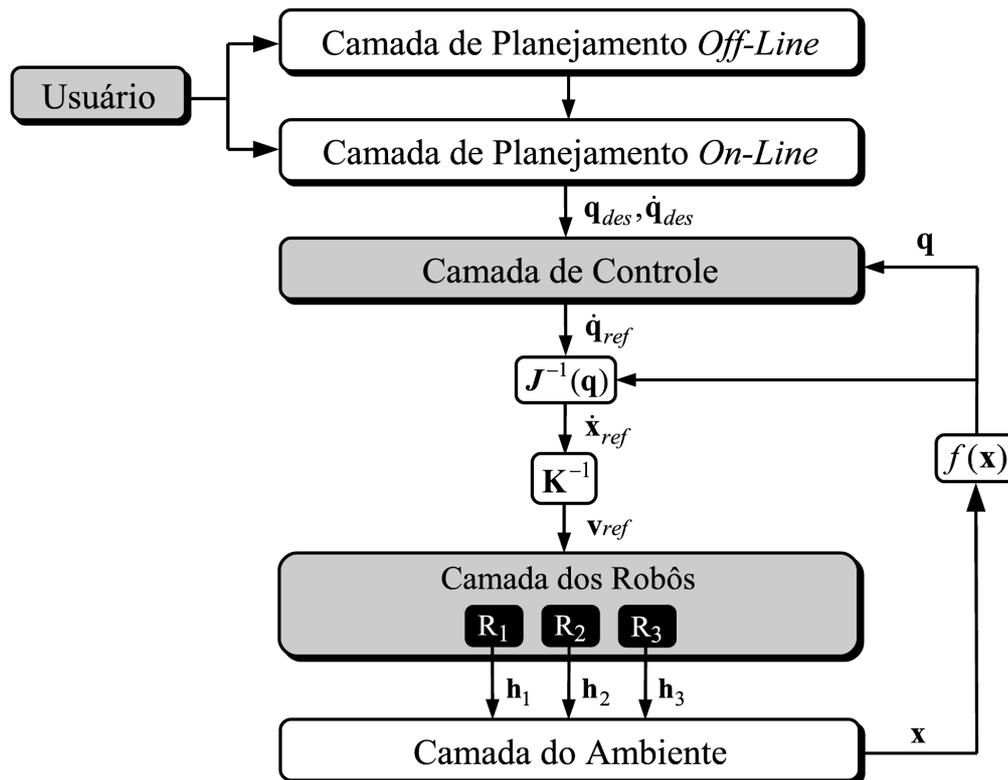


Figura 2.6: Esquema multicamadas.

Este esquema de controle possui uma estrutura básica que inclui a Camada de Controle, a Camada dos Robôs e a camada correspondente ao Ambiente de Navegação. Suas principais características são:

- i. a existência de duas camadas de planejamento, denominadas Camada de Planejamento *Off-Line* e Camada de Planejamento *On-Line*. A primeira é responsável pela determinação das condições iniciais, pela geração da trajetória a ser seguida pela formação e pela definição da forma desejada para a estrutura virtual (um triângulo, neste caso). A segunda tem como objetivo permitir que o usuário modifique as referências especificadas na Camada de Planejamento *Off-line*, durante a execução da tarefa (ou seja, em tempo de

- execução). Por exemplo, a formação pode ser “achatada” para atravessar uma passagem estreita, ter sua velocidade de navegação reduzida a fim de aumentar a sua autonomia, ou, então, sofrer um replanejamento de trajetória devido a mudanças do espaço de trabalho;
- ii. a existência da Camada de Controle, a qual é responsável pela geração dos sinais de controle a serem enviados aos robôs da formação para que estes alcancem os valores desejados determinados pelas camadas de planejamento;
 - iii. a existência da Camada do Robô, que representa os robôs móveis a serem controlados, neste caso robôs tipo unicycle;
 - iv. a existência da Camada do Ambiente, a qual representa todos os objetos modelados que compartilham o espaço de trabalho da formação, como obstáculos, paredes, e, inclusive, os próprios robôs. A utilidade dessa camada é ilustrada no Capítulo 3, onde é apresentada uma metodologia pela qual a formação pode desviar de obstáculos presentes em sua trajetória.

Um dos diferenciais do esquema proposto refere-se à sua modularidade, ou seja, algumas camadas podem ser acrescentadas ou eliminadas, desde que a sua estrutura básica seja mantida e a ausência das camadas eliminadas não afetem as camadas restantes. Por exemplo, a Camada de Planejamento *On-Line* poderia ser descartada no caso em que a trajetória a ser seguida pela formação fosse definida em um ambiente completamente conhecido, livre de obstáculos, onde não fosse necessário realizar qualquer modificação nos valores desejados definidos na Camada de Planejamento *Off-Line*. Outra vantagem desse esquema é a independência de cada camada, isto é, mudanças na parte interna de uma camada não causam mudanças estruturais nas outras camadas. Por exemplo, diversas estratégias de compensação dinâmica podem ser testadas usando uma mesma estratégia de controle de formação e vice-versa [41].

Ainda em relação à Figura 2.6, é importante salientar que alguns blocos adicionais são necessários para completar a estrutura multicamadas proposta: o Jacobiano inverso $J^{-1}(\cdot)$, que relaciona as velocidades desejadas no espaço da formação com as velocidades no espaço dos robôs, a cinemática inversa dos robôs a serem controlados \mathbf{K}^{-1} e a cinemática direta da formação $f(\cdot)$.

A Seção 2.4 apresenta a metodologia pela qual essa estrutura também se torna modular na direção horizontal, ou seja, à medida que novos robôs são adicionados à formação a estrutura cresce somente na direção horizontal.

2.3.2 Cinemática Inversa do Robô Móvel Tipo Uniciclo

Uma vez que a formação seja composta somente por robôs uniciclo (formação homogênea), o modelo cinemático do i -ésimo robô da formação pode ser considerado como aquele apresentado na Subseção 1.6.1. Considerando que somente a posição $\mathbf{h}_i = [x_i \ y_i]^T$ de cada robô está sendo controlada e que a_i , a distância perpendicular entre \mathbf{h}_i e o eixo virtual que une as rodas de tração, deve ser maior que zero, então a cinemática inversa do robô móvel tipo uniciclo é dada por

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{K}_i^{-1} \dot{\mathbf{h}}_i, \quad (2.1)$$

onde $\mathbf{v}_i = [u_i \ \omega_i]^T$, e

$$\mathbf{K}_i^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & \sin \psi_i \\ -\frac{1}{a_i} \sin \psi_i & \frac{1}{a_i} \cos \psi_i \end{bmatrix}, \text{ com } a_i > 0.$$

Desse modo, considerando uma formação de três robôs, tem-se que

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_3 \end{bmatrix},$$

onde o subscrito numérico indica o i -ésimo robô da formação.

Outro diferencial do esquema proposto refere-se ao que se chama de diferenciação³ dos grupos de robôs móveis [42]. Embora a maior parte dos trabalhos apresentados na literatura considere grupos homogêneos de robôs, o esquema proposto admite que a formação seja constituída por robôs móveis que possuam modelos cinemáticos distintos (formação heterogênea). Por exemplo, a formação poderia ser composta por dois robôs uniciclo e um robô tipo carro, sem grande complexidade, sendo somente necessário levar em conta a alteração adequada de \mathbf{K}_i na matriz \mathbf{K} .

2.3.3 Variáveis de Formação

A seleção adequada das variáveis de estado da formação deve ser conveniente ao seu controle e monitoramento. Além disso, ela pode ser feita em função da aplicação a que o sistema se destinará, do próprio projeto do sistema, ou mesmo de algum critério subjetivo, como a preferência de um operador. Na prática, entretanto, tem-se grande interesse nas variáveis de estado

³Tradução do original *differentiation*.

que estão baseadas na metáfora de um corpo rígido virtual que possa se mover através de um plano cartesiano XY enquanto é arbitrariamente dimensionado e articulado.

Nesse sentido, as variáveis de estado utilizadas para representar a formação triangular estão mostradas na Figura 2.7, conforme proposto em [40]. A postura da formação é definida por $\mathbf{P}_F = [x_F \ y_F \ \psi_F]$, onde (x_F, y_F) representa a posição do centróide da formação triangular e ψ_F representa a sua orientação, ambos em relação a um referencial fixo no espaço de trabalho. Sua forma é dada por $\mathbf{S}_F = [p_F \ q_F \ \beta_F]$, cujos parâmetros representam, respectivamente, a distância entre R_1 e R_2 , a distância entre R_1 e R_3 e o ângulo $\widehat{R_2 R_1 R_3}$.

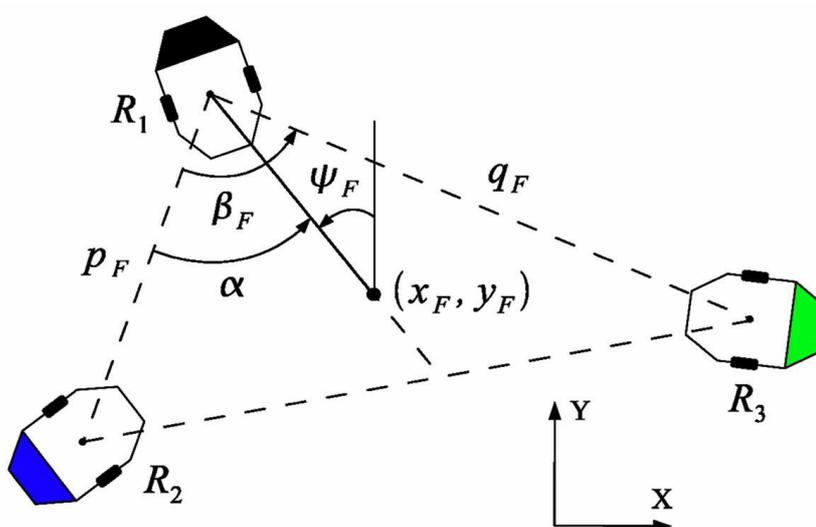


Figura 2.7: Variáveis de formação.

2.3.4 Transformações Cinemáticas

Considerando que tanto a especificação do movimento do sistema multirrobôs como os sinais de controle necessários são dados no espaço da formação, e que estes, por sua vez, são executados por cada robô individualmente (e em última instância, pelos atuadores dos mesmos) torna-se necessário, então, determinar as transformações cinemáticas de posição e velocidade entre as variáveis de estado no espaço da formação e as variáveis de estado no espaço dos robôs.

A relação entre as variáveis de formação (postura e forma) e a posição \mathbf{h}_i dos robôs que compõem a formação é expressa pelas transformações cinemáticas de posição direta e inversa, ou seja, $\mathbf{q} = f(\mathbf{x})$ e $\mathbf{x} = f^{-1}(\mathbf{q})$, onde $\mathbf{q} = [\mathbf{P}_F \ \mathbf{S}_F]^T$ e $\mathbf{x} = [\mathbf{h}_1^T \ \mathbf{h}_2^T \ \mathbf{h}_3^T]^T$.

A transformação cinemática direta $f(\cdot)$, de acordo com a Figura 2.7, é dada por

$$\mathbf{P}_F = \begin{bmatrix} \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \\ \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \\ \arctan \frac{\frac{2}{3}x_1 - \frac{1}{3}(x_2 + x_3)}{\frac{2}{3}y_1 - \frac{1}{3}(y_2 + y_3)} \end{bmatrix}^T, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{S}_F = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} \\ \arccos \frac{p_F^2 + q_F^2 - r_F^2}{2p_F q_F} \end{bmatrix}^T, \quad (2.3)$$

onde $r_F = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}$ representa a distância entre os robôs R_2 e R_3 .

Por sua vez, para a transformação cinemática inversa $f^{-1}(\cdot)$, duas representações devem ser consideradas, ao invés de uma única. Essas duas representações dependem da disposição (em sentido anti-horário) dos robôs R_2 e R_3 em relação ao robô R_1 , ou seja, os robôs podem estar na sequência $R_1R_2R_3$ (ver Figura 2.7) ou na sequência $R_1R_3R_2$, que, de agora em diante, serão referidas simplesmente como **ABC** e **ACB**, respectivamente.

Neste sentido, portanto, $\mathbf{x} = f_{\text{ABC}}^{-1}(\mathbf{q})$ é dada por

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_F + \frac{2}{3}h_F \sin \psi_F \\ y_F + \frac{2}{3}h_F \cos \psi_F \\ x_F + \frac{2}{3}h_F \sin \psi_F - p_F \sin(\alpha + \psi_F) \\ y_F + \frac{2}{3}h_F \cos \psi_F - p_F \cos(\alpha + \psi_F) \\ x_F + \frac{2}{3}h_F \sin \psi_F + q_F \sin(\beta_F - \alpha - \psi_F) \\ y_F + \frac{2}{3}h_F \cos \psi_F - q_F \cos(\beta_F - \alpha - \psi_F) \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

onde $h_F = \sqrt{\frac{1}{2}(p_F^2 + q_F^2 - \frac{1}{2}r_F^2)}$ representa a distância entre $\{R_1\}$ e o ponto médio do segmento de reta $\overline{\{R_2\}\{R_3\}}$, $r_F = \sqrt{p_F^2 + q_F^2 - 2p_F q_F \cos(\beta_F)}$ e $\alpha = \arccos \frac{p_F^2 + h_F^2 - \frac{1}{4}r_F^2}{2p_F h_F}$.

Por sua vez, $\mathbf{x} = f_{\text{ACB}}^{-1}(\mathbf{q})$ é dada por

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_F + \frac{2}{3}h_F \text{sen} \psi_F \\ y_F + \frac{2}{3}h_F \text{cos} \psi_F \\ x_F + \frac{2}{3}h_F \text{sen} \psi_F + p_F \text{sen}(\alpha - \psi_F) \\ y_F + \frac{2}{3}h_F \text{cos} \psi_F - p_F \text{cos}(\alpha - \psi_F) \\ x_F + \frac{2}{3}h_F \text{sen} \psi_F - q_F \text{sen}(\beta_F - \alpha + \psi_F) \\ y_F + \frac{2}{3}h_F \text{cos} \psi_F - q_F \text{cos}(\beta_F - \alpha + \psi_F) \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Tomando a derivada temporal das transformações cinemáticas de posição, pode-se obter as transformações cinemáticas de velocidade, as quais mapeiam as relações de velocidade entre \mathbf{x} e \mathbf{q} através da matriz Jacobiana. Ou seja, $\dot{\mathbf{q}} = J(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}}$ no sentido direto, e $\dot{\mathbf{x}} = J^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ no sentido inverso, onde $J(\mathbf{x})$ e $J^{-1}(\mathbf{q})$, representam, respectivamente, a matriz Jacobiana e a matriz Jacobiana inversa, calculadas segundo as equações

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}) &= \frac{\partial \mathbf{q}_{n \times 1}}{\partial \mathbf{x}_{m \times 1}} \\ J^{-1}(\mathbf{q}) &= \frac{\partial \mathbf{x}_{m \times 1}}{\partial \mathbf{q}_{n \times 1}}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

para $m, n = 1, 2, \dots, 6$ (note que há uma matriz Jacobiana inversa **ABC** e outra **ACB**).

2.3.5 Controle de Formação

Com as transformações cinemáticas definidas, pode-se agora apresentar o esquema de controle adotado para a formação em triângulo, ilustrado pelo diagrama de blocos da Figura 2.8. A Camada de Controle recebe da camada superior o valor desejado das variáveis de formação $\mathbf{q}_{des} = [\mathbf{P}_{Fd} \ \mathbf{S}_{Fd}]^T$ e o valor desejado da derivada primeira dessas variáveis $\dot{\mathbf{q}}_{des} = [\dot{\mathbf{P}}_{Fd} \ \dot{\mathbf{S}}_{Fd}]^T$. O controlador, projetado a nível do espaço da formação, compara esses valores com os valores atuais das variáveis de formação, obtidos das posições atuais dos robôs através da cinemática direta de posição e gera os sinais de controle no espaço da formação, para serem transformados em comandos de velocidade para os robôs através da matriz Jacobiana inversa. Os robôs, por sua vez, utilizam seus controladores de velocidade de baixo-nível para alcançarem as velocidades comandadas.

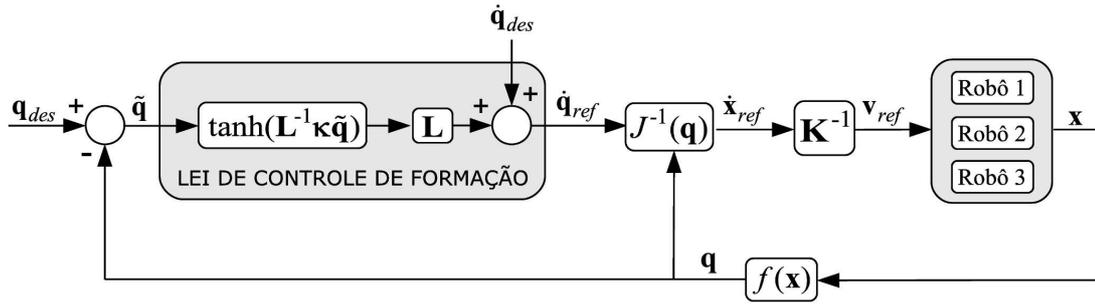


Figura 2.8: Diagrama de blocos do esquema de controle de formação.

Definindo o erro de formação como sendo

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{des} - \mathbf{q}, \quad (2.7)$$

a lei de controle de formação, proposta com base na Teoria de Lyapunov, é

$$\dot{\mathbf{q}}_{ref} = \dot{\mathbf{q}}_{des} + \mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}}), \quad (2.8)$$

onde $\boldsymbol{\kappa}$ e \mathbf{L} representam, respectivamente, as matrizes diagonais definidas positivas de ganho e de saturação.

É importante salientar que os sinais de controle estão limitados por meio da função tangente hiperbólica, a fim de evitar a saturação dos atuadores dos robôs móveis. Sob o ponto de vista do operador, isso significa um maior controle sobre o sistema multirrobôs, uma vez que é possível definir a velocidade máxima de navegação da formação. Considere, por exemplo, alguma aplicação específica envolvendo controle de posição, cujos erros de formação iniciais são elevados. Nesse caso, uma vez que o controlador proposto possui uma parte proporcional ao erro de formação, os sinais de controle iniciais também seriam elevados, caso não estivessem limitados. Aqui considera-se que $\dot{\mathbf{q}}_{des}$ é limitado pela camada de planejamento.

Análise de Estabilidade

Para a análise de estabilidade, considera-se a existência de uma possível discrepância entre a primeira derivada das variáveis de formação de referência e reais (atuais), dada por

$$\boldsymbol{\delta}_v = \dot{\mathbf{q}}_{ref} - \dot{\mathbf{q}}. \quad (2.9)$$

Desse modo, substituindo (2.9) em (2.8), obtém-se a equação do sistema em malha-fechada, que pode ser escrita como

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\delta}_v. \quad (2.10)$$

Além disso, adota-se a função candidata de Lyapunov, definida positiva,

$$V(\tilde{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T \tilde{\mathbf{q}} > 0, \quad (2.11)$$

cuja primeira derivada temporal é

$$\dot{V} = \tilde{\mathbf{q}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}}. \quad (2.12)$$

Então, substituindo (2.10) em (2.12), resulta na derivada da função candidata de Lyapunov em relação às trajetórias do sistema em malha-fechada, dada por

$$\dot{V} = \tilde{\mathbf{q}}^T [\boldsymbol{\delta}_v - \mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}})]. \quad (2.13)$$

Desse modo, assumindo que $\boldsymbol{\delta}_v$ seja zero, chega-se à conclusão que o sistema possui um único ponto de equilíbrio na origem ($\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$) e que este equilíbrio é globalmente assintoticamente estável ($\tilde{\mathbf{q}} \rightarrow \mathbf{0}$ quando $t \rightarrow \infty$), uma vez que a derivada da função candidata de Lyapunov é definida negativa.

Por outro lado, admitindo-se que $\boldsymbol{\delta}_v$ não seja zero, mas que tenha um valor limitado, o equilíbrio será atrativo caso a desigualdade

$$|\tilde{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\delta}_v| < \tilde{\mathbf{q}}^T \mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}}) \quad (2.14)$$

seja assegurada. Desse modo, para pequenos erros de controle, segue que

$$\mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}}) \approx \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}}, \quad (2.15)$$

sendo a desigualdade

$$\|\tilde{\mathbf{q}}\| > \|\boldsymbol{\delta}_v\| / \lambda_{\min}(\boldsymbol{\kappa}), \quad (2.16)$$

uma condição suficiente para que o erro diminua, onde $\lambda_{\min}(\boldsymbol{\kappa})$ representa o autovalor mínimo da matriz $\boldsymbol{\kappa}$. No caso oposto, para grandes erros de controle

$$\mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \boldsymbol{\kappa} \tilde{\mathbf{q}}) \approx \mathbf{L}, \quad (2.17)$$

sendo a desigualdade

$$\lambda_{\min}(\mathbf{L}) > \|\boldsymbol{\delta}_v\|, \quad (2.18)$$

uma condição suficiente para que o erro diminua, onde $\lambda_{\min}(\mathbf{L})$ representa o autovalor mínimo

da matriz \mathbf{L} .

Portanto, pode-se concluir que o erro de formação $\tilde{\mathbf{q}}$ será finalmente limitado quando $\delta_v \neq \mathbf{0}$, com limite dado por

$$\|\tilde{\mathbf{q}}\| \leq \|\delta_v\|/\lambda_{\min}(\boldsymbol{\kappa}). \quad (2.19)$$

Em [41] é mostrado que δ_v pode ser reduzido, com a inclusão de uma Camada de Compensação Dinâmica.

2.3.6 Plataforma de Experimentos

Antes de apresentar os resultados experimentais, apresenta-se uma descrição da plataforma de experimentos.

Robôs Móveis

Os experimentos foram realizados com todo o sistema proposto programado em três robôs móveis comerciais da linha Pioneer: um robô modelo Pioneer 3-DX (Figura 2.9(a)) e dois robôs modelo Pioneer 3-AT (Figuras 2.9(b) e 2.9(c)). Além disso, dado que esses robôs possuem individualmente um computador de bordo com elevada capacidade de processamento, um dos robôs da formação foi escolhido para executar o controlador de formação proposto, ficando então responsável por requisitar as posições correntes dos demais robôs da formação, além de gerar e enviar os sinais de controle a esses mesmos robôs.

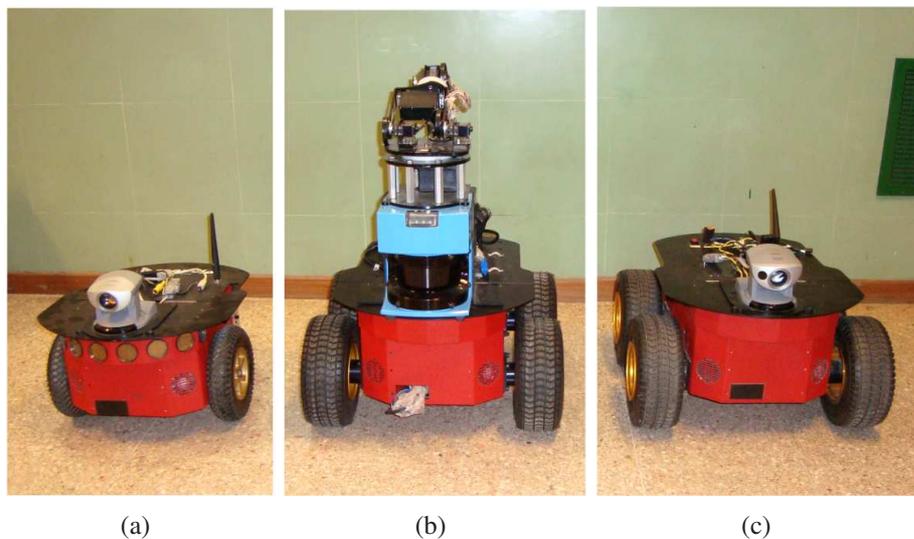


Figura 2.9: Robôs móveis utilizados neste trabalho.

Localização

Em relação ao posicionamento global durante a navegação e aos valores instantâneos das velocidades lineares e angulares dos robôs móveis, decidiu-se utilizar os dados de odometria fornecidos pelos próprios robôs, uma vez que os mesmos são equipados com codificadores ópticos de alta precisão.

É importante mencionar que a escolha da odometria como método de localização não interfere na análise da efetividade e desempenho do esquema proposto, uma vez que os experimentos foram realizados em ambientes interiores controlados e as trajetórias realizadas pelos robôs móveis eram curtas. Além disso, outras técnicas poderiam ser utilizadas ou combinadas para estimar a localização (posição e orientação) atual de cada robô da formação em relação a um referencial fixo absoluto [43, 44]. Isto, porém, foge ao escopo deste trabalho, e não foi implementado.

Em [43], por exemplo, foi apresentado um sistema híbrido de localização baseado em odometria e na detecção de marcos (linhas retas) naturais presentes no ambiente de trabalho, formando uma grade bidimensional. A partir da odometria, obtém-se uma localização aproximada do robô em determinado instante, e periodicamente, a partir de imagens capturadas por uma câmera digital instalada a bordo do robô, eram detectados marcos no ambiente para obter uma localização absoluta do robô, de forma a corrigir o erro de odometria acumulado (melhorando a estimação das posições e orientações do robô).

Comunicação

No que diz respeito à troca de informações entre os robôs da formação, preferiu-se utilizar uma comunicação explícita [45], via rede sem fio (padrão 802.11), uma vez que todos os robôs são equipados com interface Ethernet sem fio. A Figura 2.10 ilustra a infraestrutura de comunicação utilizada durante os experimentos, bem como os sentidos de transmissão dos dados entre os dispositivos móveis. Note que, nesse caso, o robô R_3 está incumbido de receber as posições atuais dos robôs R_1 e R_2 e de enviar os comandos de controle a esses mesmos robôs. A duração total desse ciclo é de 200ms.

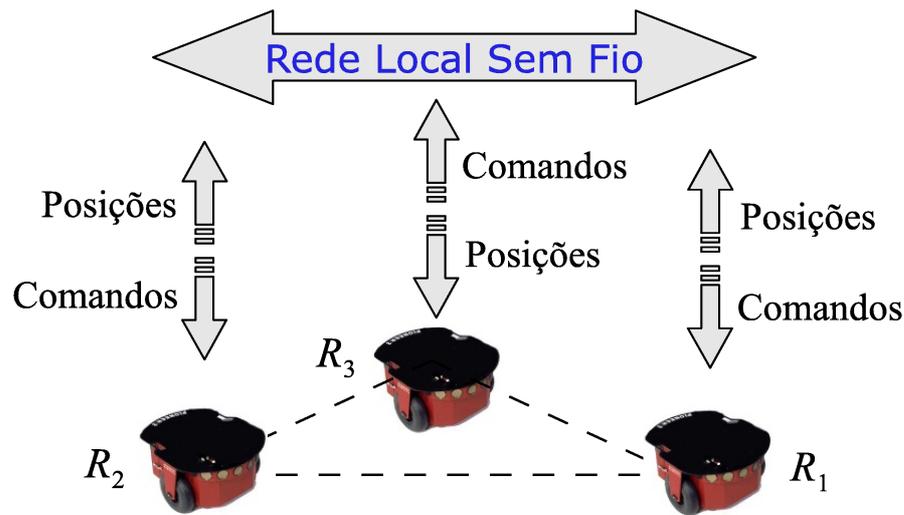


Figura 2.10: Infraestrutura de comunicação entre os dispositivos móveis.

2.3.7 Resultados Experimentais

Estes testes têm como objetivo principal validar o esquema proposto para controlar uma formação triangular de robôs móveis. Desse modo, somente as funcionalidades básicas do referido esquema foram investigadas sendo que nenhum esforço considerável foi feito no sentido de otimizar o desempenho do mesmo.

Ao todo, quatro experimentos reais foram realizados: os dois primeiros correspondem à uma tarefa de controle de posição, onde a formação (inicialmente parada) deve navegar em direção à formação objetivo; já os dois últimos consistem em tarefas de seguimento de trajetória, onde a formação (também inicialmente parada) deve navegar no ambiente de trabalho seguindo uma linha reta e uma linha senoidal, respectivamente.

Os valores escolhidos para as matrizes de ganho e saturação foram

$$\mathbf{\kappa} = \begin{bmatrix} 0,12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix}$$

para a tarefa de controle de posição e

$$\mathbf{\kappa} = \begin{bmatrix} 0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix}$$

para a tarefa de seguimento de trajetória.

É importante mencionar que esses valores foram ajustados manualmente, e que a diferença entre os valores escolhidos para as matrizes de ganho e saturação para ambas as tarefas tem por finalidade ilustrar seus efeitos sobre o movimento da formação. Numa tarefa de controle de posição, por exemplo, caso a formação desejada esteja muito distante da formação inicial, pode-se aumentar os valores da matriz de saturação para permitir que a formação desenvolva maiores velocidades e reduza o tempo de navegação. Neste caso, os valores da matriz de ganho devem ser reduzidos para evitar que a formação ultrapasse a formação desejada, o que, dependendo da aplicação, pode ser catastrófico.

Controle de Posição

No primeiro experimento, correspondente à tarefa de controle de posição, a formação deve manter a sua forma inicial enquanto navega em direção à formação objetivo (a forma da formação objetivo é igual à forma da formação inicial). Para fazer essa demonstração, a formação inicial e a desejada foram definidas, respectivamente, como

$$\begin{aligned} [\mathbf{P}_F(0) \ \mathbf{S}_F(0)] &= [0,70\text{m} \ 1,50\text{m} \ 1,57\text{rad} \ 1,58\text{m} \ 1,58\text{m} \ 0,64\text{rad}] \quad \text{e} \\ [\mathbf{P}_{Fd} \ \mathbf{S}_{Fd}] &= [4,70\text{m} \ 1,90\text{m} \ 1,57\text{rad} \ 1,58\text{m} \ 1,58\text{m} \ 0,64\text{rad}]. \end{aligned}$$

A Figura 2.11 mostra a formação triangular em três instantes de tempo distintos, recuperada do experimento, e o caminho executado por cada robô da formação, onde os triângulos em amarelo e vermelho representam, respectivamente, as formações corrente e desejada.

Além disso, as Figuras 2.12 e 2.13 apresentam as velocidades lineares e angulares (de referência e reais) de cada robô da formação. As velocidades de referência são os sinais de controle gerados pelo controlador de formação, enquanto as velocidades reais são as velocidades efetivamente desenvolvidas pelos robôs.

Finalmente, a evolução dos erros de formação (pose e forma) é mostrada na Figura 2.14.

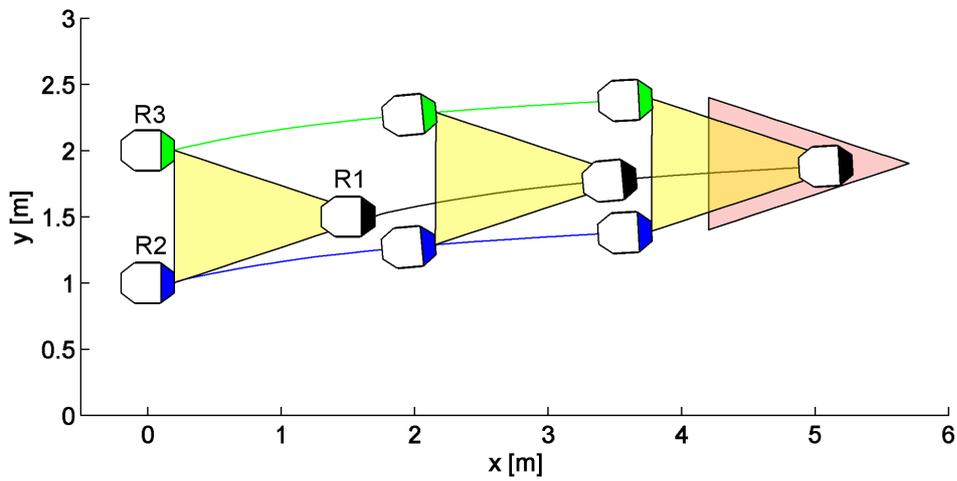


Figura 2.11: Caminho percorrido pela formação (experimento 1).

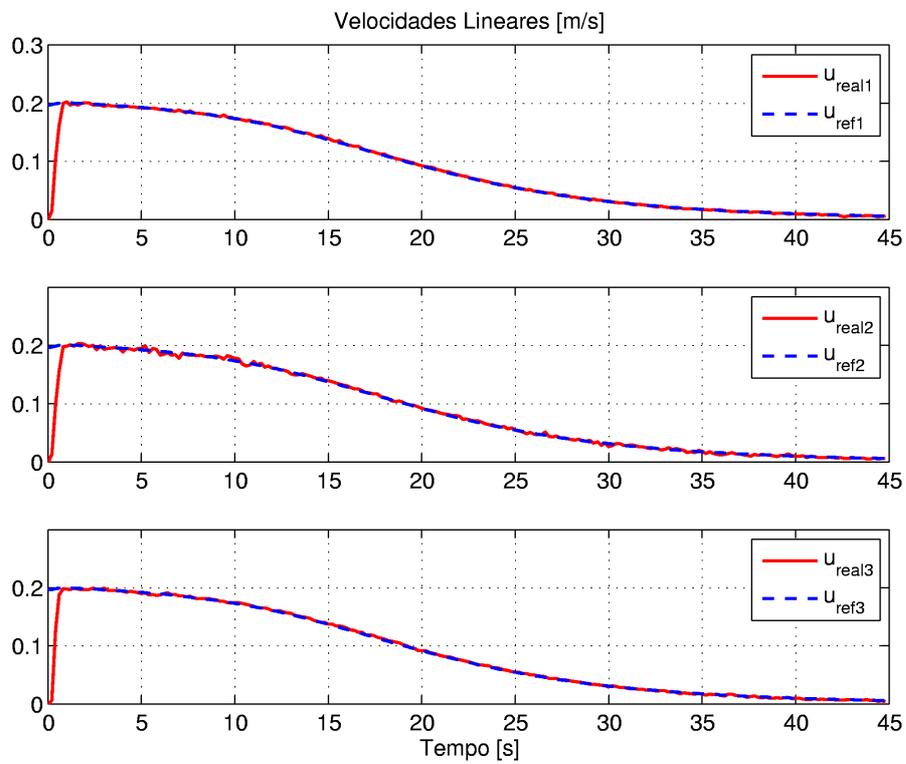


Figura 2.12: Velocidades lineares reais e de referência (experimento 1).

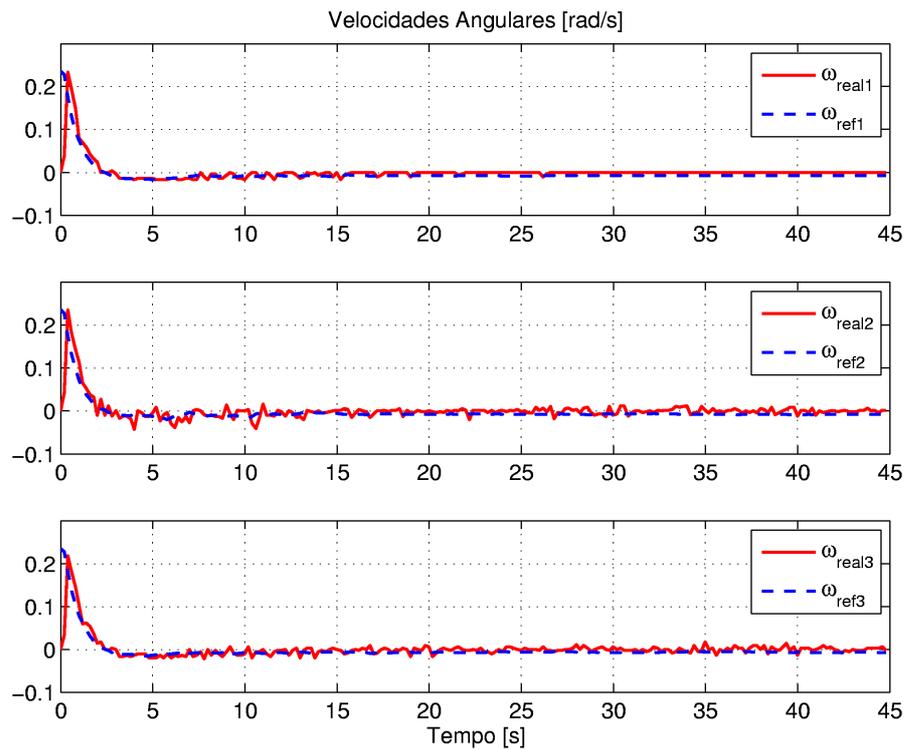


Figura 2.13: Velocidades angulares reais e de referência (experimento 1).

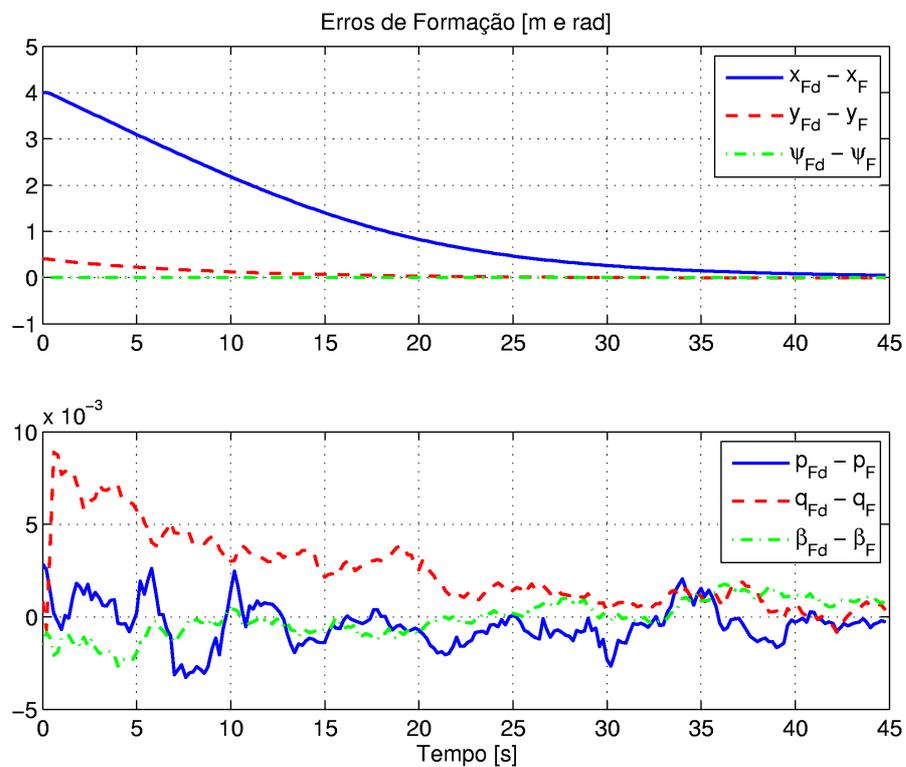


Figura 2.14: Evolução temporal dos erros de formação (experimento 1).

No segundo experimento, diferentemente, a formação deve mudar a sua forma inicial (aumentar a distância entre os robôs R_2 e R_3) enquanto navega em direção à formação objetivo. Para fazer essa demonstração, as formações inicial e desejada foram definidas, respectivamente, como

$$\begin{aligned} [\mathbf{P}_F(0) \mathbf{S}_F(0)] &= [0,70\text{m} \ 1,50\text{m} \ 1,57\text{rad} \ 1,58\text{m} \ 1,58\text{m} \ 0,64\text{rad}] \quad \text{e} \\ [\mathbf{P}_{Fd} \mathbf{S}_{Fd}] &= [4,70\text{m} \ 1,50\text{m} \ 1,57\text{rad} \ 1,58\text{m} \ 1,58\text{m} \ 1,0\text{rad}]. \end{aligned}$$

Novamente, a Figura 2.15 mostra a formação triangular em três instantes de tempo distintos, recuperados do experimento, e o caminho executado por cada robô da formação.

As Figuras 2.16 e 2.17 apresentam as velocidades lineares e angulares (de referência e reais) de cada robô da formação.

A evolução dos erros de formação (pose e forma) é mostrada na Figura 2.18.

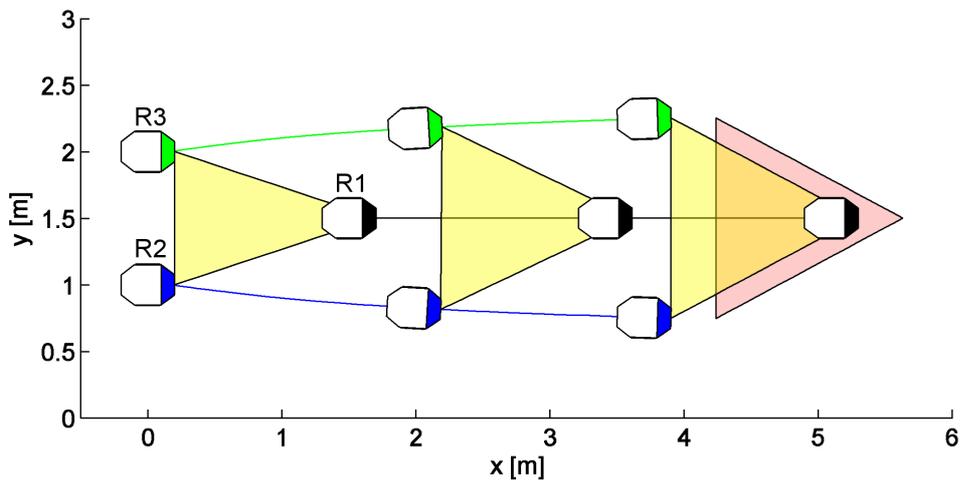


Figura 2.15: Caminho percorrido pela formação (experimento 2).

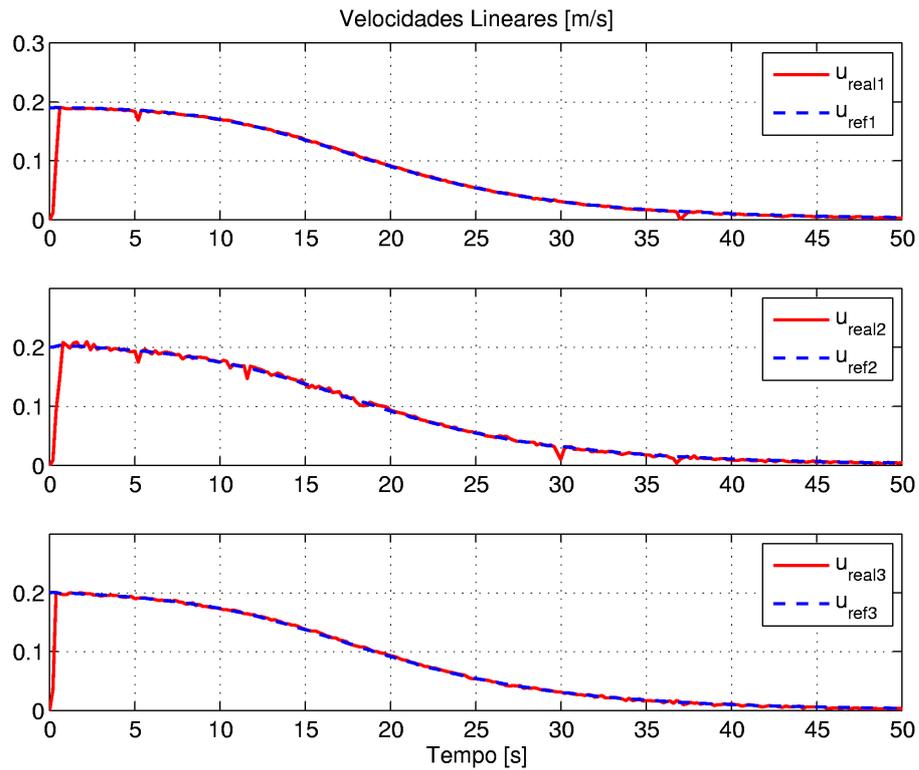


Figura 2.16: Velocidades lineares reais e de referência (experimento 2).

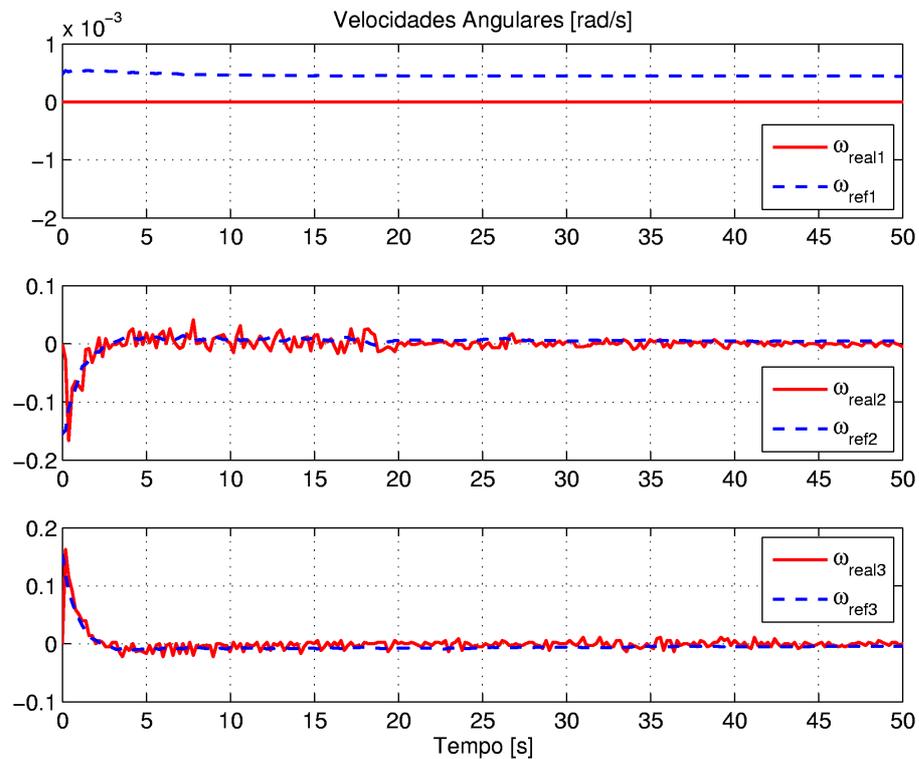


Figura 2.17: Velocidades angulares reais e de referência (experimento 2).

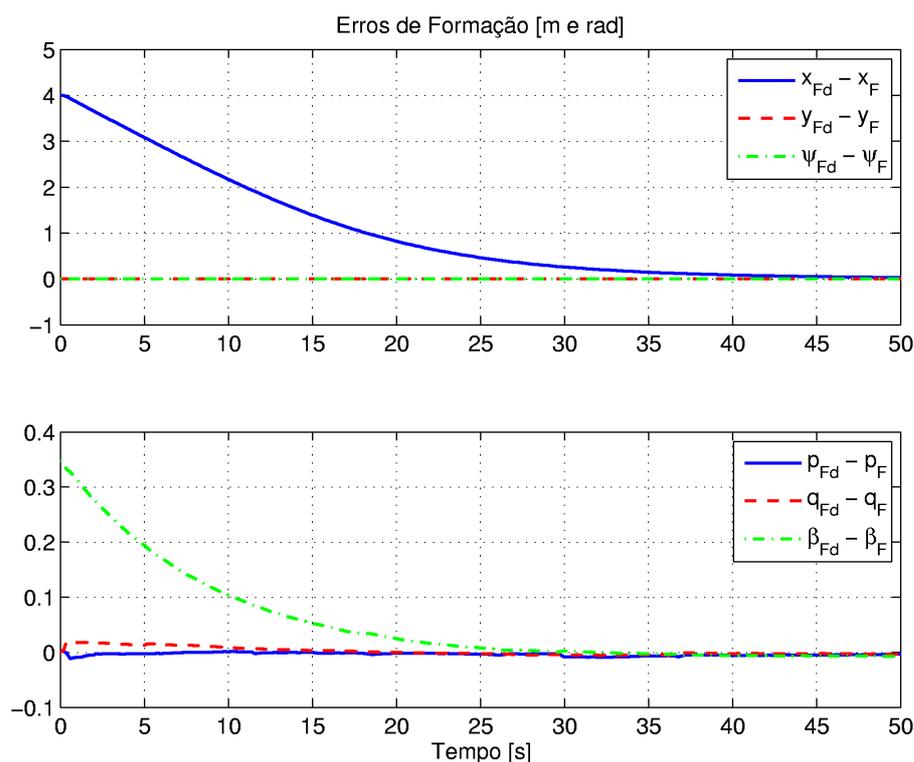


Figura 2.18: Evolução temporal dos erros de formação (experimento 2).

Seguimento de Trajetória

Esta segunda categoria de testes tem como objetivo avaliar o esquema proposto focalizando na realização de tarefas de seguimento de trajetória. Dessa forma, no primeiro experimento os robôs devem manter uma formação desejada (formação inicial, neste caso) enquanto o centroide da formação segue uma trajetória senoidal ao longo do espaço de trabalho, definida como

$$\mathbf{P}_{Fd}(t) = \begin{bmatrix} x_{Fd} \\ y_{Fd} \\ \psi_{Fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_F(0) \\ y_F(0) \\ \psi_F(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,08t \\ 0,3\text{sen}(0,1t) \\ 0 \end{bmatrix},$$

onde $[x_F(0) \ y_F(0) \ \psi_F(0)]^T = [0,7\text{m} \ 1,5\text{m} \ 1,57\text{rad}]^T$ representa a postura inicial da formação.

A Figura 2.19 mostra a formação triangular em três instantes de tempo distintos, recuperados do experimento, e o caminho percorrido por cada robô da formação. Neste caso, a formação desejada não pode ser visualizada diretamente, pois está sobreposta pela formação corrente.

As Figuras 2.20 e 2.21 apresentam as velocidades lineares e angulares (de referência e reais) de cada robô da formação.

A evolução dos erros de formação (pose e forma) é mostrada na Figura 2.22.

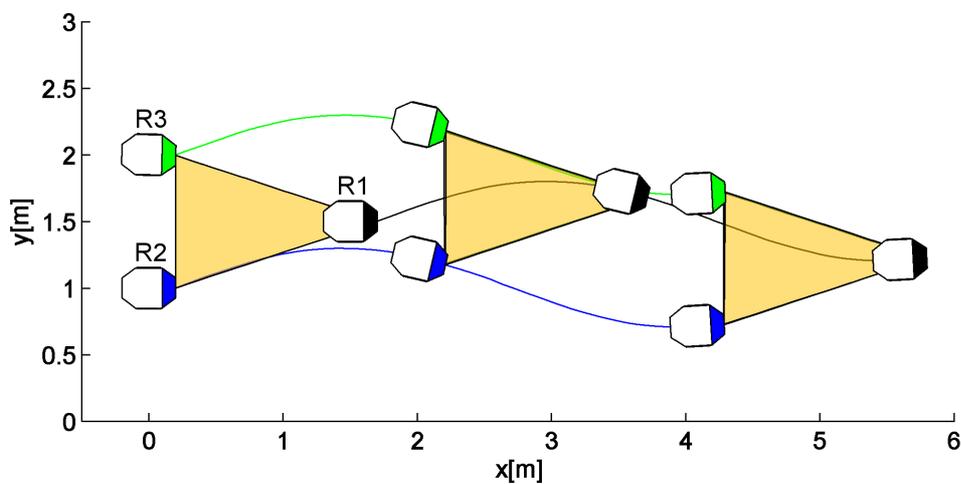


Figura 2.19: Caminho percorrido pela formação (experimento 3).

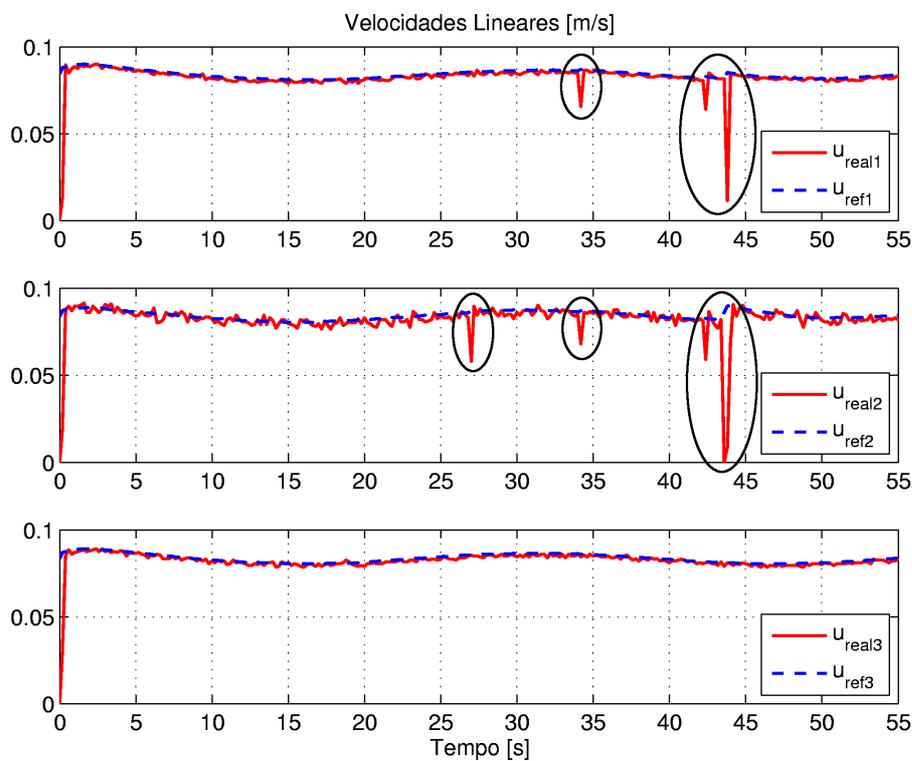


Figura 2.20: Velocidades lineares reais e de referência (experimento 3).

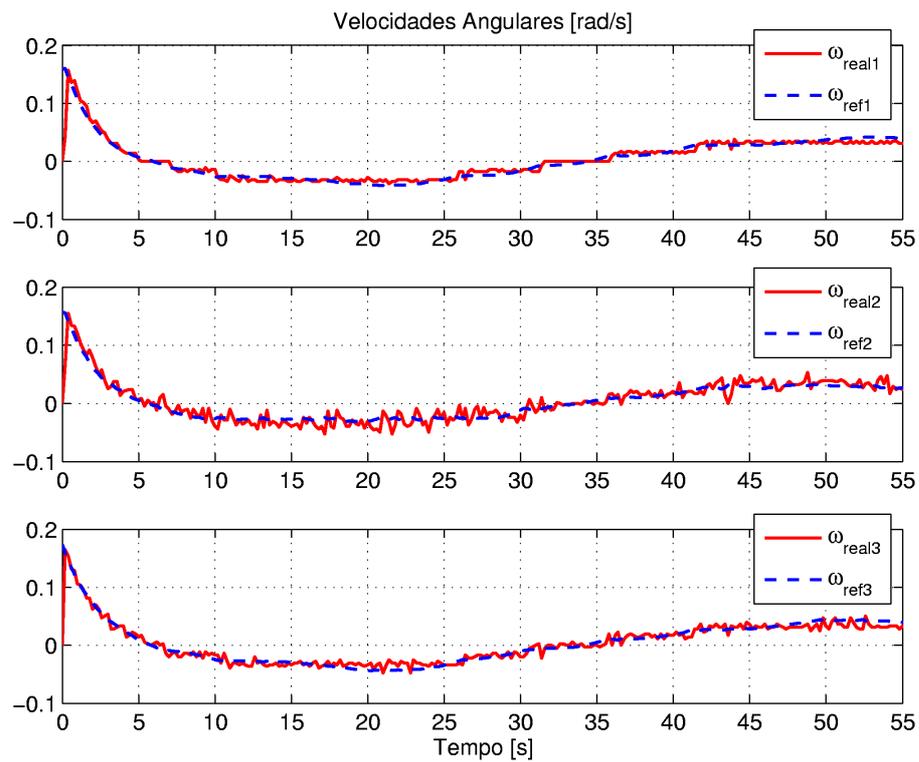


Figura 2.21: Velocidades angulares reais e de referência (experimento 3).

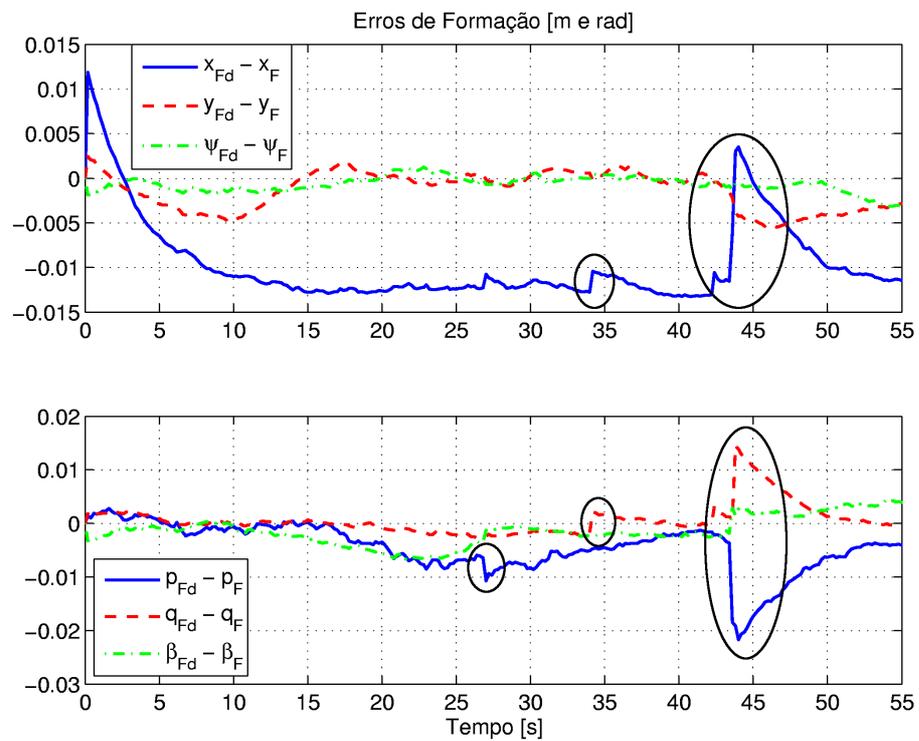


Figura 2.22: Evolução temporal dos erros de formação (experimento 3).

As mudanças transitórias nos valores das velocidades lineares reais (medidas) dos robôs R_1 e R_2 (nos detalhes da Figura 2.20) ocorreram em virtude de problemas de comunicação, mais especificamente devido ao fato dos testes terem sido realizados em uma área onde o nível do sinal de comunicação era “fraco” e também por utilizar a rede local, a qual possuía grande tráfego de informação durante os experimentos.

Como consequência dessas falhas de comunicação, os erros de formação também apresentaram variações transitórias (nos detalhes da Figura 2.22), uma vez que os robôs não recebem os comandos de controle corretamente. É importante lembrar que o robô R_3 não apresenta tais problemas de comunicação visto que foi escolhido para executar o controlador de formação proposto, não necessitando, dessa forma, da rede sem fio local para enviar e receber informações.

No segundo experimento correspondente à tarefa de seguimento de trajetória, a formação deve navegar seguindo uma linha reta horizontal (velocidade translacional desejada de 80mm/s) e modificar a sua forma segundo

$$\mathbf{S}_{Fd}(t) = \begin{bmatrix} p_{Fd} \\ q_{Fd} \\ \beta_{Fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_F(0) \\ q_F(0) \\ \beta_F(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,25\text{sen}(0,1t) \end{bmatrix},$$

onde $[p_F(0) \ q_F(0) \ \beta_F(0)]^T = [1,58\text{m} \ 1,58\text{m} \ 0,64\text{rad}]^T$ representa a forma inicial da formação.

Outra vez, a Figura 2.23 mostra a formação triangular em três instantes de tempo distintos, recuperados do experimento, e o caminho percorrido por cada robô da formação.

As Figuras 2.24 e 2.25 apresentam as velocidades lineares e angulares (de referência e reais) de cada robô da formação.

A evolução dos erros de formação (pose e forma) é mostrada na Figura 2.26.

Do mesmo modo que no experimento anterior, os gráficos das velocidades lineares reais dos robôs R_1 e R_2 e dos erros de formação também contêm variações transitórias em virtude de problemas de comunicação.

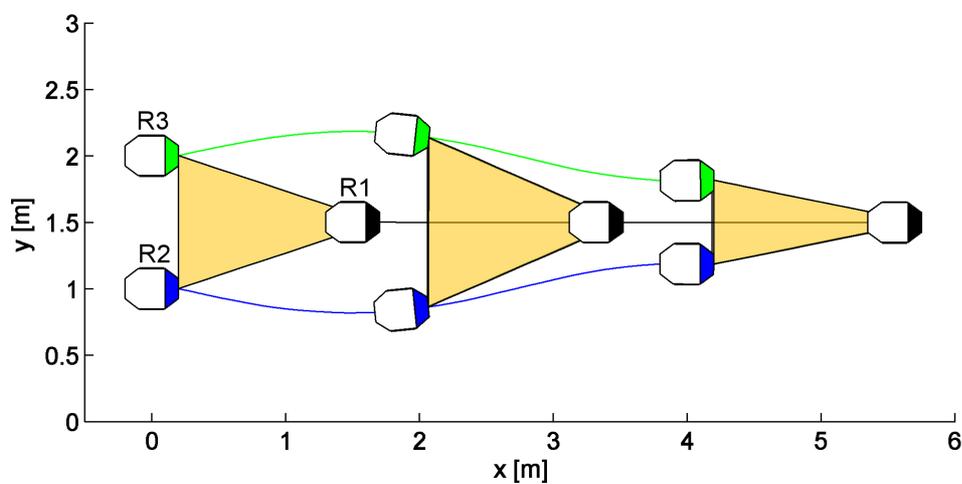


Figura 2.23: Caminho percorrido pela formação (experimento 4).

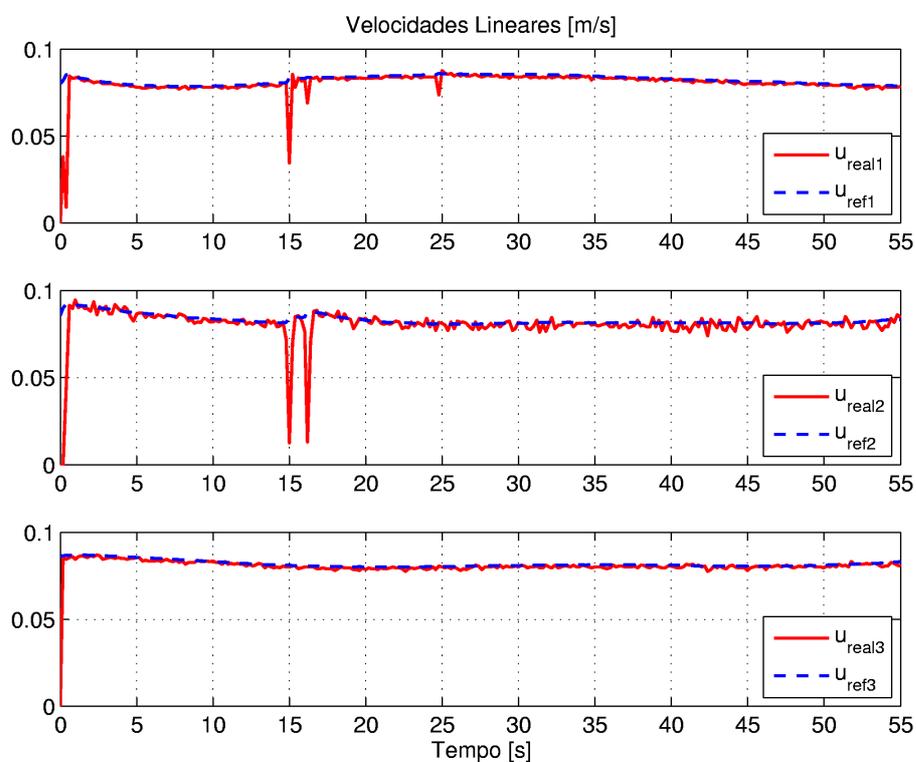


Figura 2.24: Velocidades lineares reais e de referência (experimento 4).

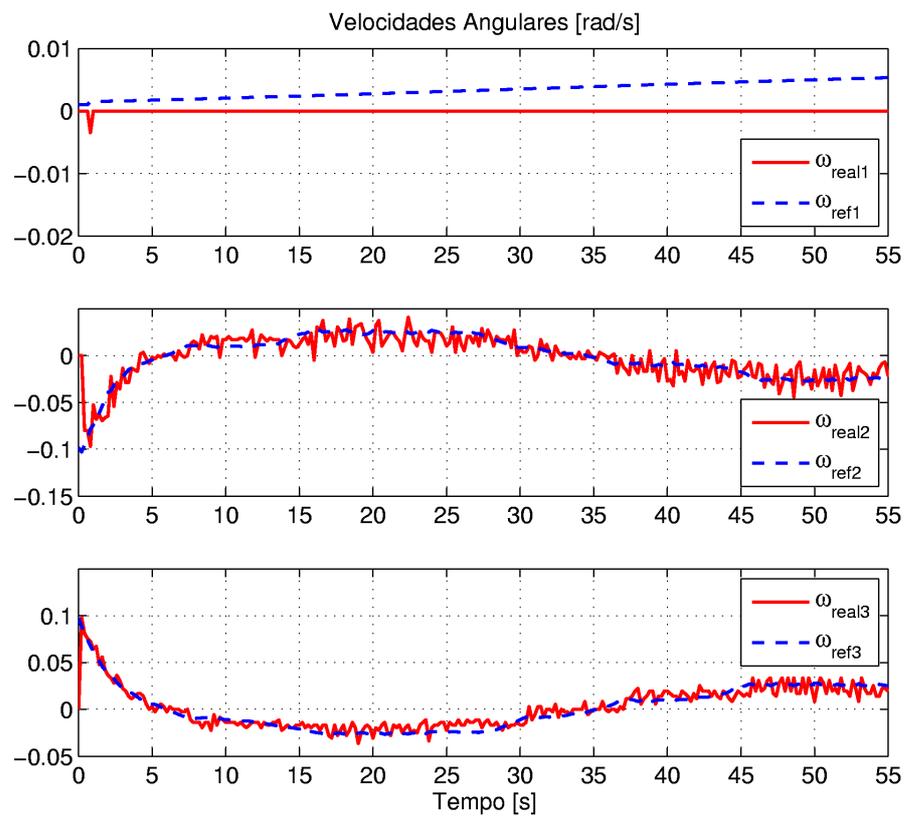


Figura 2.25: Velocidades angulares reais e de referência (experimento 4).

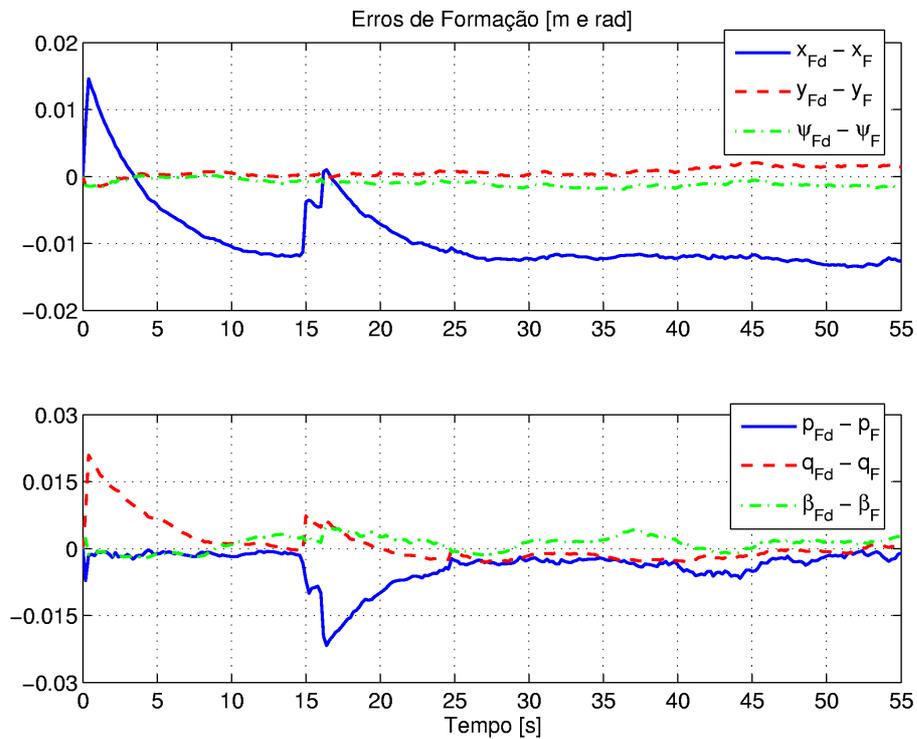


Figura 2.26: Evolução temporal dos erros de formação (experimento 4).

2.3.8 Análise dos Resultados Experimentais e Comentários Gerais

Observando os gráficos apresentados, pode-se verificar que o sistema multirrobôs comportou-se efetivamente conforme esperado nos quatro experimentos realizados, validando, dessa forma, o esquema de controle proposto.

Nos gráficos que mostram a evolução temporal dos erros de formação, pode-se notar que os erros convergem para zero nas tarefas de controle de posição e permanecem limitados nas tarefas de seguimento de trajetória, mesmo na presença dos distúrbios causados pelas falhas de comunicação.

É importante mencionar que as matrizes de ganho e saturação do controlador de formação foram obtidas (ajustadas) mediante simulações, nas quais se buscou encontrar valores de erros de formação aceitáveis.

O controlador de formação, por sua vez, ainda que bastante simples, mostrou-se capaz de controlar uma formação triangular de robôs móveis não somente em direção a uma formação objetivo (tarefa de controle de posição) mas também durante a realização de tarefas de seguimento de trajetória, ao gerar sinais de controle simultâneos e efetivos para todos os robôs da formação.

Isso faz com que a arquitetura apresentada para controlar formações de robôs móveis seja atrativa e apropriada para ser utilizada em diversas aplicações, como escolta, patrulhamento, vigilância, etc. Os experimentos apresentados poderiam, por exemplo, ilustrar missões de escolta. A missão de escoltar pode ser vista como a tarefa de cercar e manter uma formação em torno de um ou vários entes (comboio), cujo movimento não é conhecido *a priori*, mas que pode ser medido em tempo real [24].

Nesse caso, à medida que o objeto escoltado se move no ambiente de trabalho, a formação triangular também se moveria, a fim de manter o objeto em seu centroide. Além disso, os robôs da formação seriam capazes tanto de manter uma distância específica em torno do ente escoltado, preservando a forma da estrutura virtual gerada (um triângulo, neste caso), como de adaptar a forma da formação a fim de tratar eventos não previstos. Este último caso seria particularmente interessante caso a formação necessitasse passar por caminhos estreitos ou lidar com outros tipos de obstruções no ambiente. O uso dessa consideração desempenha um papel-chave na estratégia de desvio de obstáculos que é apresentada no Capítulo 3.

2.4 Generalização para $n > 3$ Robôs

A generalização do esquema de controle multicamadas (proposto inicialmente para uma formação triangular) para uma formação de $n > 3$ robôs é baseada na operação de decomposição de um polígono de n vértices em partes mais simples, neste caso em $n - 2$ triângulos.

A decomposição de polígonos, em particular a triangulação de polígonos, tem sido usada em diversas áreas, como geometria computacional, computação gráfica, reconhecimento de padrões, compressão de dados e processamento de imagens [46, 47], por exemplo. De uma perspectiva mais formal, a triangulação de polígonos está baseada no teorema da triangulação de polígonos, que enuncia que todo polígono admite pelo menos uma triangulação, e que qualquer triangulação de um polígono simples com n vértices tem exatamente de $n - 2$ triângulos, conforme ilustra a Figura 2.27.

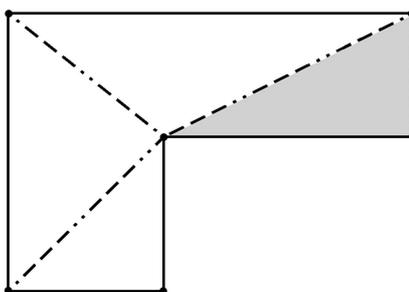


Figura 2.27: Exemplo de uma decomposição triangular de polígono simples.

Nesse sentido, propõe-se o aproveitamento dessa propriedade geométrica dos polígonos e da flexibilidade do esquema de controle proposto na Seção 2.3 para implementar um controle coordenado de $n > 3$ robôs utilizando a mesma lei de controle apresentada na Subseção 2.3.5, com a grande vantagem de não ser necessário efetuar qualquer modificação na matriz Jacobiana que caracteriza a formação triangular. Em [48], por exemplo, sempre que um novo robô é adicionado à formação a matriz Jacobiana necessita ser redefinida, a fim de levar em consideração a presença desse novo robô.

A proposta aqui apresentada consiste, inicialmente, em gerar uma lista contendo a posição de todos os robôs da formação (R_i , para $i = 1, \dots, n$), e formar o triângulo base para a formação, considerando os três primeiros robôs dessa lista ($R_2\widehat{R}_1R_3$ ou $R_3\widehat{R}_1R_2$, atentando para a sequência **ABC** ou **ACB**). Em seguida, formam-se novos triângulos com os robôs restantes com base em um algoritmo muito simples: os demais triângulos são estabelecidos tomando os dois últimos robôs do triângulo imediatamente criado e o robô subsequente na lista inicialmente gerada (em outras palavras, $R_j\widehat{R}_{j+1}R_{j+2}$ ou $R_{j+2}\widehat{R}_{j+1}R_j$, onde $j = 1, \dots, n - 2$ representa a formação

triangular corrente). Com isso, cada formação triangular criada pode ser controlada através do controlador proposto na Subseção 2.3.5.

Desse modo, cada formação triangular está associada a um conjunto de variáveis de formação $\mathbf{q}_i = [\mathbf{P}_{Fi} \ \mathbf{S}_{Fi}]^T$, conforme ilustra a Figura 2.28. Como resultado, uma formação com n robôs tem efetivamente $6(n-2)$ variáveis de formação. Além disso, sempre haverá redundância de sinais de controle nas formações compostas por mais de três robôs. Por exemplo, os robôs R_2 e R_3 pertencentes a uma formação de quatro robôs receberão os sinais de controle associados aos erros das formações triangulares 1 e 2. Neste trabalho, entretanto, optou-se por considerar somente os sinais provenientes do triângulo de menor ordem, ou seja, somente o robô R_{j+2} receberá os sinais de controle associados a formação triangular $j \geq 2$, enquanto que os robôs R_1 , R_2 e R_3 , pertencentes ao triângulo base, receberão normalmente os sinais de controle gerados para formação triangular $j = 1$. As linhas tracejadas ao redor dos robôs, na Camada dos Robôs na Figura 2.28, indicam que os sinais de controle redundantes não são enviados aos robôs que pertencem a mais de uma formação triangular.

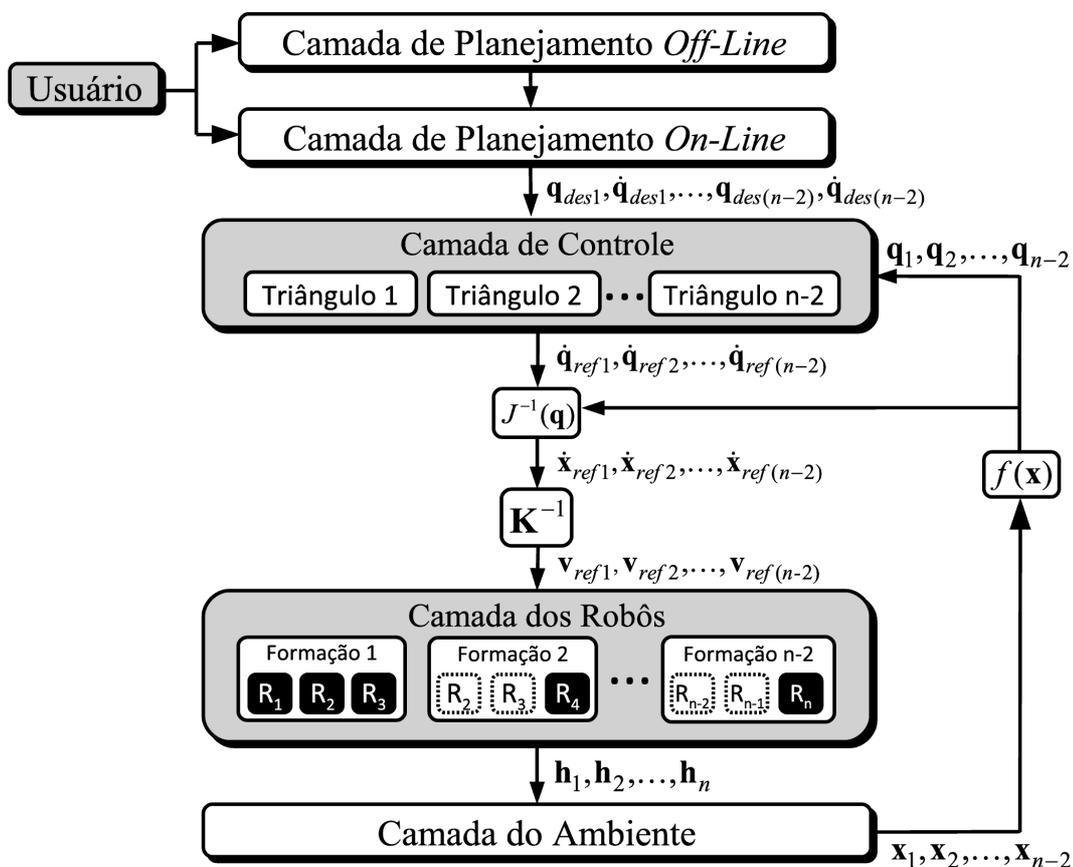


Figura 2.28: Esquema multicamadas generalizado para n robôs.

A decisão de descartar os sinais de controle redundantes parece bastante razoável, uma vez que foi mostrado, através dos experimentos anteriores, que o esquema proposto para três robôs é efetivo em termos de assegurar que os robôs alcancem a formação desejada. Com base nisso, em uma formação de quatro robôs, por exemplo, constata-se que não há necessidade de considerar os sinais de controle redundantes gerados para os robôs R_2 e R_3 (pertencentes as formações triangulares 1 e 2), admitindo que a convergência dos mesmos está assegurada pelos sinais de controle gerados para a primeira formação triangular.

No entanto, uma estratégia que poderia ser aplicada seria fazer a fusão dos sinais de controle disponíveis, para gerar o sinal de controle final a ser enviado a cada robô da formação. A fusão de sinais de controle, estudada em outro contexto, foi proposta em [49].

2.4.1 Resultados de Simulação

Duas simulações foram realizadas a fim de verificar a efetividade da proposta de generalização do esquema de controle multicamadas: a primeira corresponde à tarefa de controle de posição e a segunda, à tarefa de seguimento de trajetória, considerando quatro e oito robôs, respectivamente.

Ambas as simulações foram realizadas usando um simulador proprietário (implementado em MATLAB[®]), baseado na plataforma MRSiM [50], onde estão implementados os modelos cinemático e dinâmico⁴ do robô móvel uniciclo Pioneer 3-DX.

Os valores escolhidos para as matrizes de ganho e de saturação foram

$$\mathbf{\kappa} = \begin{bmatrix} 0,09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,09 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,18 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,18 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix},$$

para a tarefa de controle de posição, e

⁴Os valores dos parâmetros identificados são os mesmos utilizados em [15].

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} 0,12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix},$$

para a tarefa de seguimento de trajetória.

Controle de Posição

Nesta simulação, a formação, inicialmente em forma de losango, deve navegar em direção a uma formação objetivo em forma de coluna. Além disso, diferentemente dos experimentos anteriores, e conforme pode ser observado, os valores da matriz de ganho $\boldsymbol{\kappa}$ foram ajustados a fim de priorizar o estabelecimento da forma desejada, e assegurar uma maior “rigidez” entre as posições relativas dos robôs.

Para que a formação inicial tivesse a forma global de um losango, os valores das variáveis de formação iniciais foram definidos como

$$\begin{aligned} [\mathbf{P}_{F1}(0) \mathbf{S}_{F1}(0)] &= [2,86\text{m } 5,00\text{m } 1,57\text{rad } 2,23\text{m } 2,23\text{m } 0,92\text{rad}] \quad \text{e} \\ [\mathbf{P}_{F2}(0) \mathbf{S}_{F2}(0)] &= [1,53\text{m } 5,00\text{m } 2,55\text{rad } 2,00\text{m } 2,23\text{m } 1,10\text{rad}], \end{aligned}$$

onde o subscrito numérico indica a i -ésima formação triangular.

Do mesmo modo, para que a formação desejada tivesse a forma global de uma coluna, os valores das variáveis de formação desejadas foram definidos como

$$\begin{aligned} [\mathbf{P}_{Fd1} \mathbf{S}_{Fd1}] &= [12,86\text{m } 3,33\text{m } 0,46\text{rad } 2,00\text{m } 1,00\text{m } 1,57\text{rad}] \quad \text{e} \\ [\mathbf{P}_{Fd2} \mathbf{S}_{Fd2}] &= [12,53\text{m } 2,66\text{m } 2,35\text{rad } 2,23\text{m } 1,00\text{m } 1,10\text{rad}]. \end{aligned}$$

É importante mencionar que os valores das variáveis de formação iniciais e desejadas foram obtidos das posições dos robôs que compõem as formações iniciais e desejadas, através da transformação cinemática de posição direta. Esse processo faz parte da proposta de generalização e está embutido na interface com o usuário do simulador, apresentada no Apêndice A.

A Figura 2.29 destaca a formação em quatro instantes de tempo distintos ($t = 0s, 20s, 35s$ e $50s$) durante a simulação.

Para completar os resultados de simulação, a Figura 2.30 apresenta a evolução temporal dos erros de formação das duas formações triangulares.

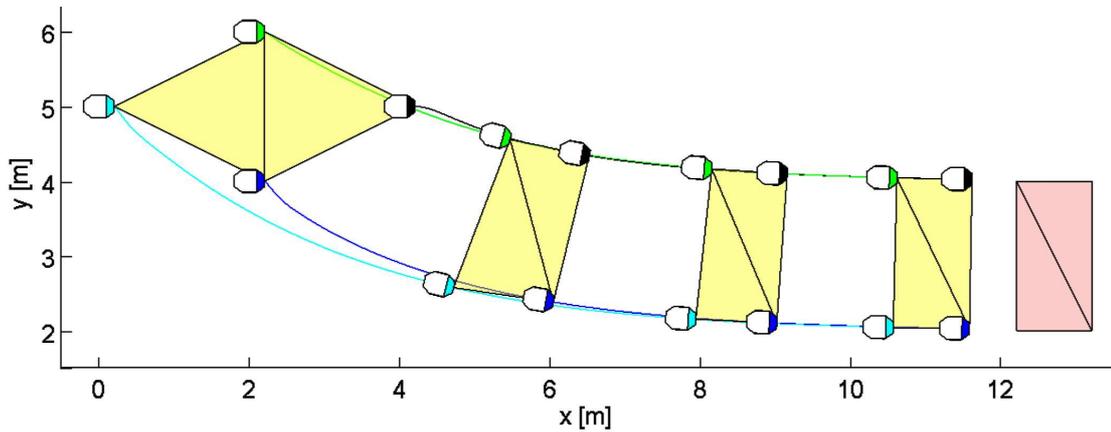


Figura 2.29: Caminho percorrido pela formação (simulação 1).

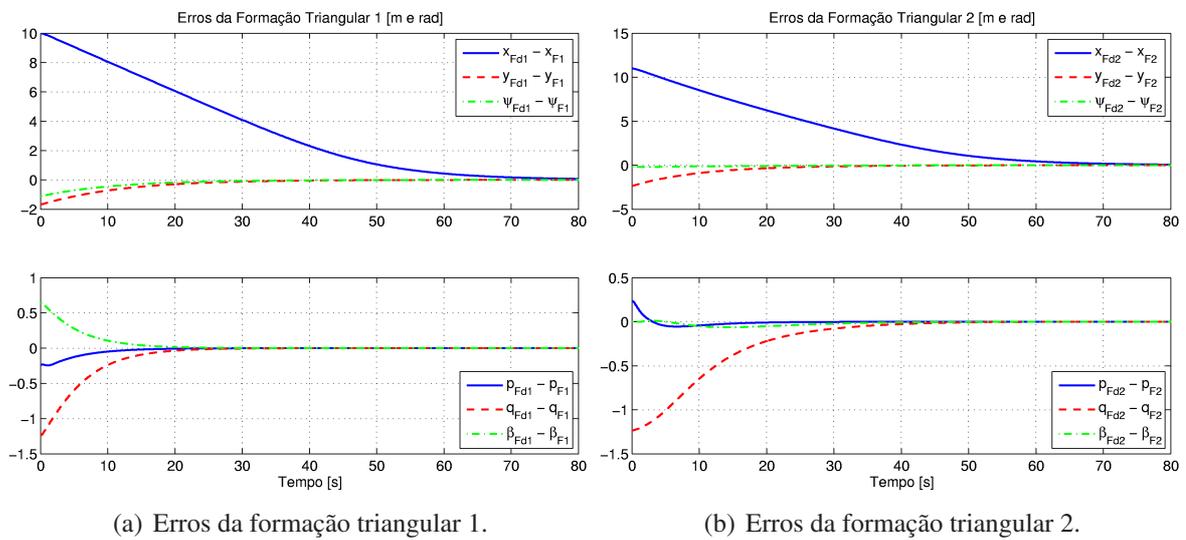


Figura 2.30: Evolução temporal dos erros de formação (simulação 1).

Seguimento de Trajetória

Nesta simulação, diferentemente dos dois experimentos anteriores correspondentes à tarefa de seguimento de trajetória, as formações inicial e desejada possuem pose e forma distintas. Ou seja, os robôs deverão, num primeiro momento, alcançar a pose e forma desejadas para a formação e, posteriormente, manter a formação desejada enquanto os centroides das formações triangulares seguem trajetórias ao longo do espaço de trabalho, definidas como

$$\mathbf{P}_{Fdi}(t) = \begin{bmatrix} x_{Fdi} \\ y_{Fdi} \\ \psi_{Fdi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Fdi}(0) \\ y_{Fdi}(0) \\ \psi_{Fdi}(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,1t \\ 2 \sec(0,075(t - 60)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

onde $[x_{Fdi}(0) \ y_{Fdi}(0) \ \psi_{Fdi}(0)]^T$ representa a postura inicial da i -ésima formação triangular desejada (nesta simulação, $i = 1, 2, \dots, 6$).

Novamente, a Figura 2.31 destaca a formação em quatro instantes de tempo distintos ($t = 0s, 40s, 80s$ e $120s$) durante a simulação. A coluna em vermelho (à esquerda do gráfico) representa a formação inicial desejada.

Para completar os resultados de simulação, a Figura 2.32 apresenta a evolução temporal dos erros de formação das seis formações triangulares.

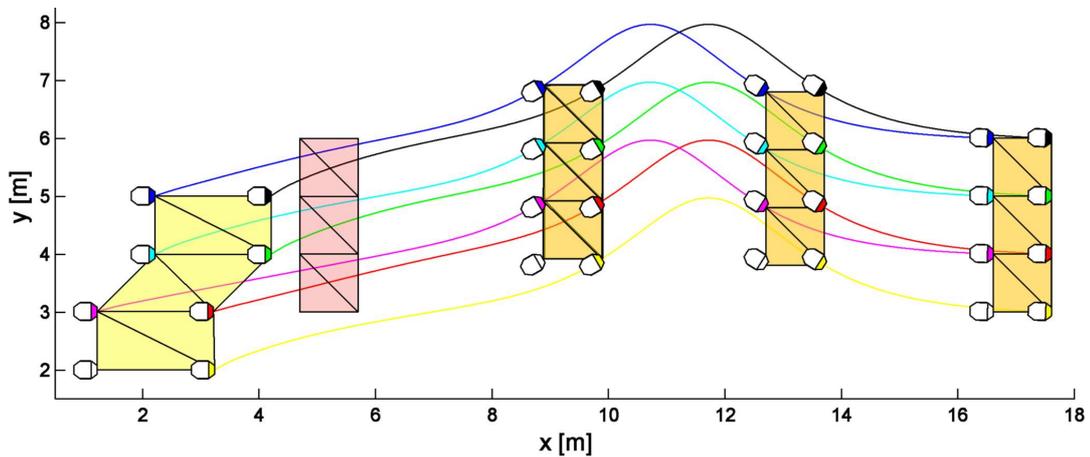


Figura 2.31: Caminho percorrido pela formação (simulação 2).

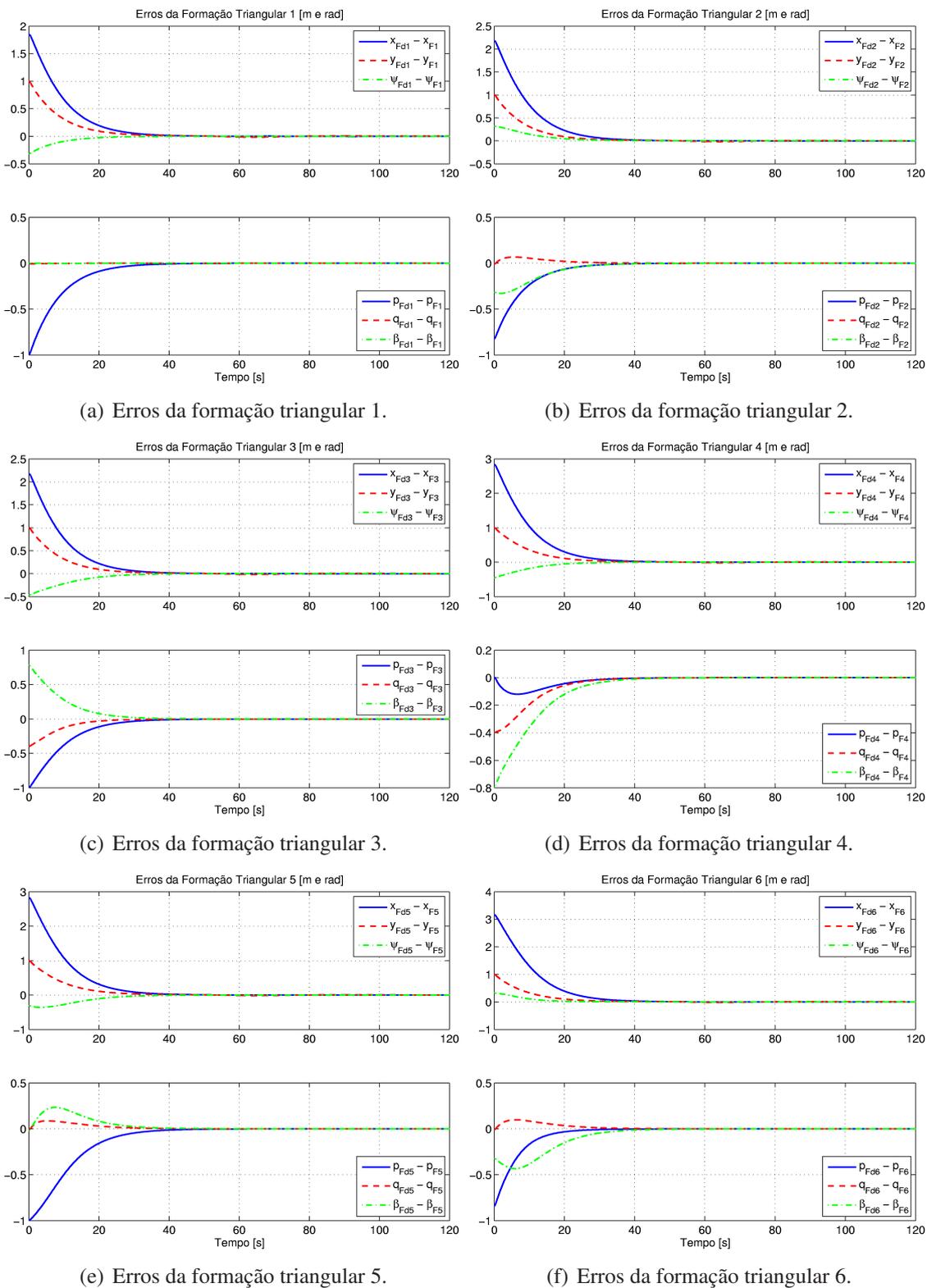


Figura 2.32: Evolução temporal dos erros de formação (simulação 2).

2.4.2 Análise dos Resultados de Simulação e Comentários Gerais

Conforme pode ser observado nos resultados apresentados de ambas as simulações, a generalização do esquema de controle multicamadas para uma formação envolvendo n robôs mostrou-se capaz de assegurar que todos os robôs alcancem e mantenham a formação desejada.

Novamente, analisando os gráficos que mostram a evolução temporal dos erros de formação, observa-se que todas as componentes dos erros de todas as formações triangulares tendem para zero, tanto na tarefa de controle de posição como na tarefa de seguimento de trajetória. Como resultado, tem-se que a formação (global) alcança a configuração definida como formação (global) desejada.

Além disso, alguns comentários a respeito do esquema multicamadas apresentado na Figura 2.6 são cabíveis. O esquema inicialmente proposto para uma formação de três robôs demonstrou ser bastante flexível ao permitir controlar formações contendo mais de três robôs utilizando uma estratégia muito simples: decompor o problema de controle de formação (a nível global) de n robôs móveis em $n - 2$ problemas de controle centralizado de formações triangulares. Mais ainda, tem-se uma estrutura de controle centralizada para a primeira formação triangular, e mais uma estrutura de controle para cada robô da formação, a partir do quarto robô. Portanto, trata-se de uma arquitetura de controle híbrida, no sentido discutido da Subseção 2.1.3.

Finalmente, tem-se que a extensão do esquema proposto amplia consideravelmente o campo de aplicação do presente trabalho. Numa missão de vigilância, por exemplo, dependendo da dimensão da área a ser vigiada, três robôs poderiam ser insuficientes para cobrir a área a ser protegida, motivo que inviabilizaria a utilização da arquitetura de controle inicialmente desenvolvida para coordenar unicamente três robôs.

3 Desvio de Obstáculos

Em robótica móvel, navegar autonomamente entre duas localidades consiste numa tarefa essencial para a realização da maioria das missões. No entanto, diversos problemas estão diretamente relacionados à tarefa de navegação autônoma, como planejamento de trajetória, controle de posição, seguimento de trajetória (tratados no Capítulo 2) e desvio de obstáculos, por exemplo. Desse modo, o tratamento do problema de desvio de obstáculos representa uma questão chave para o sucesso de muitas aplicações envolvendo robôs móveis, uma vez que busca garantir uma navegação segura para os robôs enquanto navegam em seus espaços de trabalho.

Todos os robôs móveis apresentam algum tipo de desvio de obstáculo, variando desde algoritmos primitivos que detectam um obstáculo e param o robô diante dele, a fim evitar uma colisão, até algoritmos complexos que permitem ao robô contornar esses obstáculos [51].

Existem muitos trabalhos dedicados a esse problema, e, embora avanços significativos tenham sido alcançados com o desenvolvimento de novas abordagens, existem alguns métodos de desvio de obstáculos clássicos que devem ser citados: método de detecção de bordas [52, 53], grade de certeza [54, 55] e método de campos potenciais [56, 57].

Método de Detecção de Bordas

Este método utiliza um algoritmo para tentar determinar a posição das bordas verticais dos obstáculos, e, em seguida, calcular um caminho que permita ao robô contornar essas bordas “visíveis”. As linhas que unem duas dessas bordas “visíveis” são consideradas para representar um dos limites dos obstáculos detectados. Essa abordagem foi inicialmente combinada com sensores ultrassônicos (para detecção dos obstáculos) mas, devido à precisão limitada desse tipo de sensor, ela apresentou alguns problemas. Por exemplo, medidas erradas faziam o algoritmo determinar a existência de uma borda em um local completamente errado, resultando, muitas vezes, em caminhos ineficazes.

Grade de Certeza

Diferentemente do método anterior, esta estratégia caracteriza-se por ser adequada para ser combinada com sensores imprecisos, como os sensores ultrassônicos. Desenvolvida por Moravec e Elfes [54, 55], essa estratégia baseia-se na representação probabilística dos obstáculos em um modelo de mundo tipo grade: a área de trabalho do robô é modelada como um arranjo 2D de elementos quadrados (matriz bidimensional), chamados células, onde cada célula possui um valor de certeza que indica a medida de convicção de um obstáculo estar dentro da área celular. Além disso, cada célula tem seu valor de certeza atualizado constantemente pelas novas leituras do(s) sensor(es) à medida que o robô se move na área de trabalho. Desse modo, após um período movendo-se sobre a área, o robô tem um mapa bastante preciso desta.

A Figura 3.1 mostra um exemplo típico de mapa de probabilidades obtido com o método descrito, onde cada símbolo representa uma célula quadrada medindo 15cm de lado. As áreas vazias, possuindo um alto valor de certeza, são representadas por espaços em branco enquanto que as áreas com baixo valor de certeza são representadas pelo símbolo “+”. Além disso, as áreas ocupadas são representadas pelo símbolo “×” enquanto que as áreas desconhecidas são representadas pelo símbolo “•”. Finalmente, os círculos ilustram as posições nas quais o robô realizou varreduras, e as linhas sólidas ilustram objetos importantes e o contorno da área de trabalho (uma sala, neste caso).

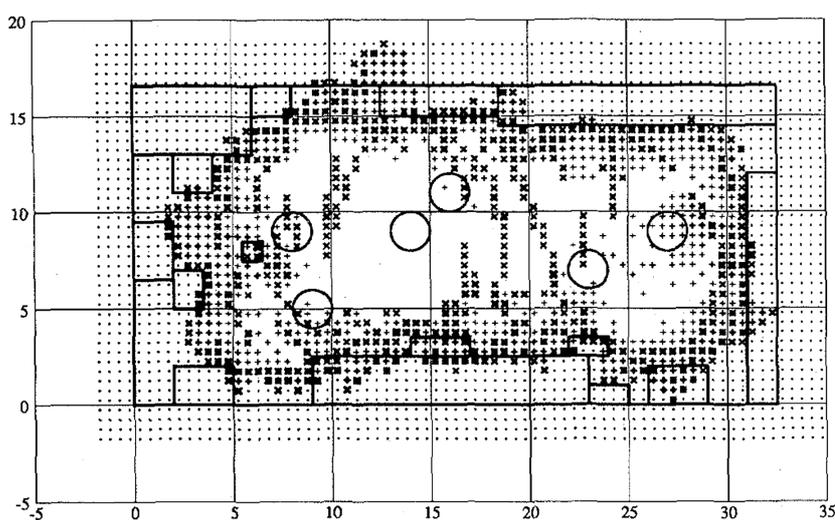


Figura 3.1: Exemplo de mapa de probabilidades.

Fonte: [55].

Método de Campos Potenciais

O método de campos potenciais baseia-se na ideia de que os obstáculos presentes no espaço de trabalho do robô exercem forças repulsivas imaginárias sobre o robô, enquanto que a posição objetivo (posição desejada no espaço de trabalho) exerce uma força de atração imaginária sobre o robô. O comportamento resultante do robô provém do vetor de força resultante, calculado para uma determinada posição do robô, que compreende a soma da força atrativa e das forças repulsivas.

Posteriormente, Borenstein e Koren [57] integraram o conceito de grade de certeza ao método de campos potenciais. A ideia principal era utilizar as informações geradas pelo primeiro método para criar um mapa local do espaço de trabalho do robô, e as informações geradas pelo segundo para desviar de eventuais obstáculos, bem como guiar o robô ao seu destino final. Esse novo método foi chamado de método de Campo de Forças Virtuais. No entanto, após alguns experimentos ele foi abandonado devido à instabilidade e à incapacidade de atravessar passagens estreitas, como portas (problema do mínimo local).

3.1 Desvio de Obstáculos em Formações Multirrobôs

A navegação autônoma representa um nível mais elevado de desempenho para sistema multirrobôs proposto no presente trabalho, uma vez que se considera o problema de desvio de obstáculos em conjunto com as tarefas de controle de posição e de seguimento de trajetória. Diversos trabalhos têm contribuído para investigar esse problema na literatura. Em [58], por exemplo, são apresentadas duas estratégias de desvio de obstáculos para uma formação descentralizada de robôs móveis do tipo líder-seguidor. A primeira refere-se a uma estratégia aplicada a uma formação rígida, onde nenhuma das variáveis de formação (distância entre os robôs e o ângulo de formação) pode ser modificada durante as evasões de obstáculos. Na segunda, diferentemente, assume-se que a formação descentralizada é do tipo semi-rígida, ou seja, existe uma restrição rígida em relação à distância entre os robôs, enquanto o ângulo da formação apresenta flexibilidade controlável.

Outra abordagem que trata desse problema, mas considerando uma formação flexível, é apresentada em [59]. A ideia desse trabalho está originalmente inspirada no seguinte fenômeno hidrodinâmico: quando uma bolha/gota viscosa flui em ambientes com fluido não viscoso, ela se “transforma” e se adapta ao ambiente na presença de obstáculos. Motivados por essa observação, os autores modelaram a formação de robôs com comportamentos análogos aos de uma bolha viscosa, de modo que a formação inicial pudesse modificar a sua forma nas proximidades

dos obstáculos, conforme ilustra a Figura 3.2.

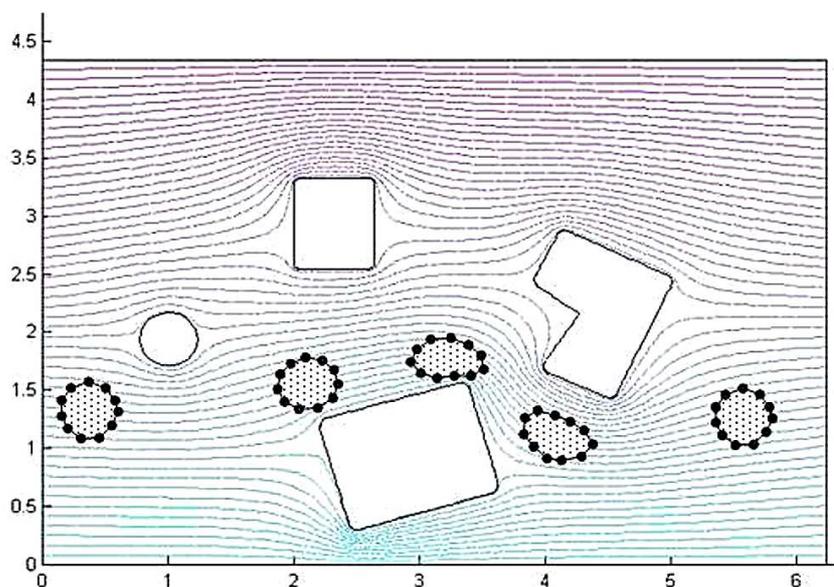


Figura 3.2: Figura ilustrativa apresentada na formulação do problema.

Fonte: [59].

Conforme pode ser observado através da vasta literatura existente, o problema da navegação autônoma em controle de formação, em geral, considera ambientes de trabalho possuindo obstáculos conhecidos e desconhecidos, e utiliza algoritmos de planejamento de trajetórias globais para planejar os caminhos dos robôs entre os obstáculos conhecidos, bem como algoritmos de planejamento de trajetória local para o desvio de obstáculos em tempo real. Neste trabalho, entretanto, assume-se somente o movimento na presença dos obstáculos desconhecidos e, conseqüentemente, concentra-se apenas no aspecto local do desvio de obstáculos.

Desse modo, esta seção descreve como o sistema proposto processa as informações sensoriais sobre o ambiente circunjacente (assume-se que cada robô da formação possui em sistema sensorial embarcado que o permite medir a sua distância aos obstáculos), e a forma com que essa informação é modelada e integrada ao controle de formação para que a mesma seja capaz de desviar de obstáculos enquanto navega no ambiente de trabalho.

3.1.1 Desvio de Obstáculos Baseado em Impedância Mecânica

A estratégia de desvio de obstáculos foi desenvolvida visando preservar a estrutura de controle multicamadas proposta na Subseção 2.3.1, e é baseada nos trabalhos de Hogan [60], que aplica o conceito de impedância mecânica para desvio de obstáculos em robôs manipuladores, e Secchi et al. [61], que aplica o mesmo conceito para modificar a posição objetivo quando um

obstáculo aparece no caminho de um robô móvel.

A principal vantagem dessa estratégia é que cada robô da formação corrige a sua trajetória de forma independente dos demais. Como consequência, a formação comporta-se como uma estrutura flexível na presença de obstáculos, podendo contrair-se e/ou expandir-se. Além disso, é importante mencionar que a implementação dessa estratégia supõe que a aplicação (inspeção de grandes áreas, por exemplo) permite o uso de uma formação flexível.

A ideia principal é associar o movimento do robô às forças fictícias (forças virtuais) que caracterizam a sua interação de não-contato com o ambiente ao seu entorno. Assim como realizado em Mut et al. [62], a interação mecânica, que no caso dos robôs móveis geralmente representa uma colisão, foi substituída por uma interação de não-contato, que leva em consideração a distância entre o robô e o obstáculo detectado.

Como qualquer obstáculo deve ser evitado, a interação robô-ambiente foi definida por forças de repulsão fictícias F_f determinadas por

$$F_f = b(d_{max} - d)^n, \quad (3.1)$$

onde d é a distância do robô ao obstáculo mais próximo, d_{max} é a máxima distância robô-obstáculo que produz força fictícia não nula ($F_f = 0$ se $d \geq d_{max}$), e n é um número inteiro positivo. Já a constante b corresponde à calibração do sistema, sendo determinada por

$$b(d_{max} - d_{min})^n = F_{fmax}, \quad (3.2)$$

onde d_{min} é a menor distância ao obstáculo aceitável para se evitar uma colisão.

Para facilitar o entendimento da Equação 3.1, a Figura 3.3 apresenta duas curvas típicas da força de repulsão fictícia para $d_{max} = 1,05\text{m}$, $d_{min} = 0,3\text{m}$ e $F_{fmax} = 1\text{N}$. Note que quanto maior for a distância d , menor será a força F_f , e vice-versa. Além disso, diferentemente de [61] e [58], a inclinação das curvas aumenta à medida que d diminui. Em termos práticos, isso significa que a ação da força fictícia será mais efetiva quando o robô estiver mais próximo do obstáculo. Como consequência, as interações iniciais robô-obstáculo serão mais suaves, evitando mudanças bruscas no movimento dos robôs quando os obstáculos forem inicialmente detectados. Em outras palavras, a interação se dará de forma mais cautelosa.

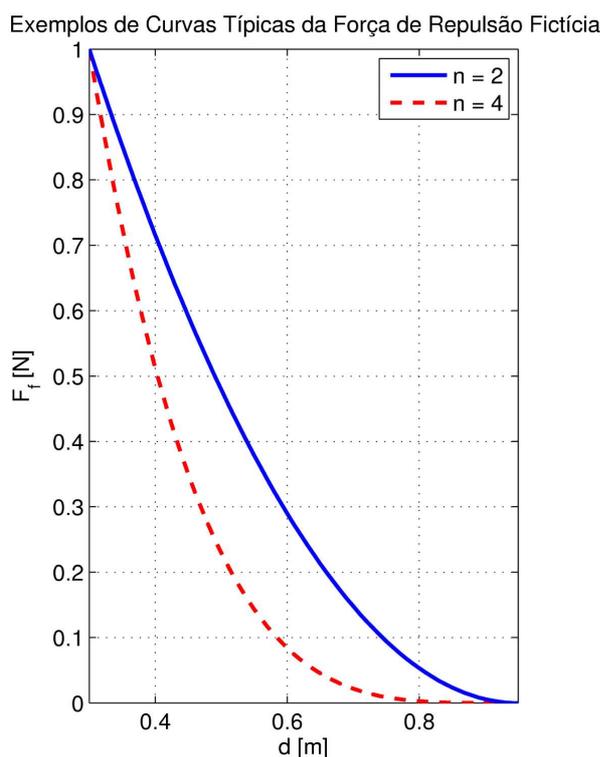


Figura 3.3: Exemplos de curvas típicas da força de repulsão fictícia.

A fim de capacitar o sistema multirrobo a mover-se em ambientes com múltiplos obstáculos, cada robô da formação considerará a ação de duas forças fictícias no cálculo da correção de sua trajetória, as quais estão associadas às menores medidas de distância detectadas em ambos os lados.

Desse modo, conforme ilustra a Figura 3.4, as variáveis d_D , d_E , β_D e β_E representam as medidas de distância mais próximas à direita e à esquerda de cada robô e os ângulos associados. Os ângulos β_D e β_E estão mapeados nos intervalos $[-90^\circ 0^\circ]$ e $[90^\circ 0^\circ]$, em função das características dos sensores de distância utilizados nos experimentos, os quais são descritos na próxima subseção.

Ainda em relação à Figura 3.4, o semi-anel em cinza, definido pelas distâncias d_{max} e d_{min} , pode ser entendido como um “escudo virtual”, onde qualquer objeto (incluindo os robôs da formação) que for detectado a uma distância menor que a distância de segurança d_{max} será considerado como um objeto perigoso que deve ser evitado. Portanto, neste caso, as distâncias desejadas entre os robôs da formação devem ser maiores que a distância de segurança.

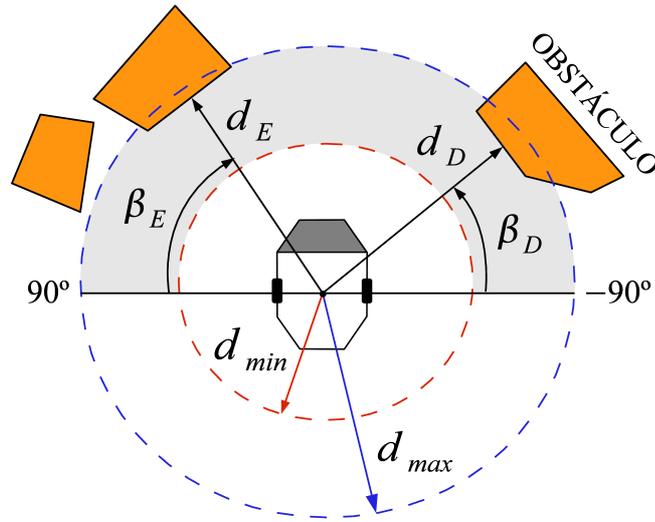


Figura 3.4: Interação entre o robô e os obstáculos.

No que diz respeito à implementação do comportamento de desvio de obstáculos, decidiu-se utilizar a seguinte estratégia: quando qualquer robô da formação detectar algum obstáculo dentro do seu “escudo virtual” suas velocidades linear e angular de referência, geradas pelo controlador de formação, devem ser corrigidas de modo a reduzir a primeira (exceto se o obstáculo estiver paralelo ao robô) e modificar a segunda a fim de girar o robô no sentido oposto ao obstáculo detectado.

Para obter esse comportamento, as velocidades linear e angular efetivamente enviadas aos robôs da formação são, respectivamente, calculadas como

$$u_{obs} = u_{ref} - u_C \quad (3.3)$$

$$\omega_{obs} = \omega_{ref} + \omega_C, \quad (3.4)$$

sendo u_{ref} e ω_{ref} as velocidades linear e angular de referência, e u_C e ω_C as correções de velocidade linear e angular, definidas como

$$u_C = Z_u^{-1}(F_D \text{sen} \beta_D + F_E \text{sen} \beta_E) \quad (3.5)$$

$$\omega_C = Z_\omega^{-1}(F_D - F_E), \quad (3.6)$$

onde Z_u e Z_ω representam as impedâncias mecânicas que caracterizam a interação robô-ambiente, consideradas como

$$Z_u = I_u s^2 + B_u s + K_u \quad (3.7)$$

$$Z_\omega = I_\omega s^2 + B_\omega s + K_\omega, \quad (3.8)$$

sendo I_u e I_ω , B_u e B_ω , e K_u e K_ω constantes positivas que representam, respectivamente, os efeitos da inércia, do amortecimento e da constante elástica.

Em relação a (3.5), observe que a redução da velocidade linear dos robôs depende do ângulo de detecção do(s) obstáculo(s) mais próximo(s). Desse modo, caso $\beta_D = -90^\circ$ e $\beta_E = 90^\circ$, tem-se que o robô não reduzirá a sua velocidade linear, uma vez que não existe risco de colisão, pois os obstáculos encontram-se paralelos ao seu movimento.

Analisando (3.6), observe que as componentes de força possuem sinais opostos. Desse modo, considerando o mesmo caso anterior, tem-se que o robô tenderá a posicionar-se no ponto médio entre ambos os obstáculos uma vez que a correção da velocidade angular depende somente das distâncias aos obstáculos mais próximos.

Novamente, cabe enfatizar que esta estratégia é aplicada a cada robô individualmente, não aumentando o esforço computacional da unidade central de controle quando novos robôs são adicionados à formação. Além disso, caso a formação navegue em um ambiente completamente estruturado, livre de obstáculos, essa estratégia pode ser simplesmente desativada.

3.1.2 Plataforma de Experimentos

A plataforma utilizada nos experimentos associados à tarefa de desvio de obstáculos, compreende, além da plataforma já descrita na Subseção 2.3.6, o sistema sensorial que permite a cada robô da formação medir a sua distância aos obstáculos circunjacentes mais próximos, composto por um cinturão de ultrassom e dois sensores de varredura laser (nos detalhes da Figura 1.8).

Cinturão de Ultrassom

O cinturão de ultrassom, embarcado no robô Pioneer 3-DX, corresponde a um grupo de oito sonares distribuídos da seguinte forma: dois sonares laterais, dispostos um em cada lado do robô, e seis sonares frontais, separados em intervalos de 20° , conforme ilustra a Figura 3.5

No que diz respeito ao seu funcionamento, a taxa de aquisição dos sonares pode ser regulada, sendo normalmente ajustada na frequência de 25Hz (40 milissegundos por sonar). Além disso, sua faixa de operação varia entre 10cm e 5m (aproximadamente), dependendo da taxa de aquisição [63].

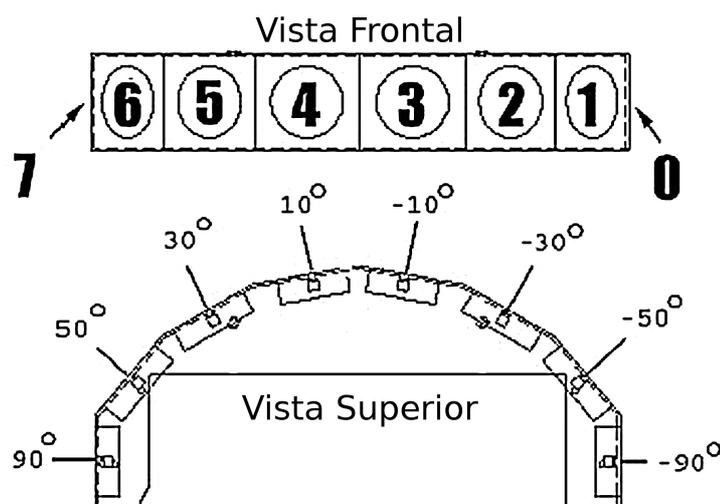


Figura 3.5: Esquema do posicionamento dos sonares.

Fonte: Adaptado de [63].

Sensores de Varredura Laser

Os dois sensores de varredura laser, instalados a bordo dos robôs Pioneer 3-AT, são do mesmo modelo LMS200, fabricados pela empresa alemã SICK. Trata-se de um sensor de distância extremamente preciso que rapidamente tornou-se bastante utilizado na comunidade de robótica. A Tabela 3.1 apresenta algumas características desse sensor [64].

Tabela 3.1: Características do sensor laser LMS200.

Campo de Visada:	180°
Resolução Angular (regulável):	0,25° / 0,5° / 1°
Alcance Máximo:	80m
Resolução:	10mm
Interface de Dados (configurável):	RS 232 / RS 422
Peso:	4,5kg (aproximadamente)
Dimensões (L x P x A):	156mm x 155mm x 210mm

Fonte: [64].

Similarmente ao cinturão de ultrassom, o LMS200 fornece um mapa polar bidimensional, que relaciona as medidas de distâncias com o ângulos em que tais medidas foram realizadas. Seu funcionamento consiste basicamente em emitir um feixe laser sobre um espelho rotativo. Dessa forma, à medida que o espelho gira, o feixe laser varre um arco de 180°, criando um leque de varredura laser conforme ilustra a Figura 3.6.

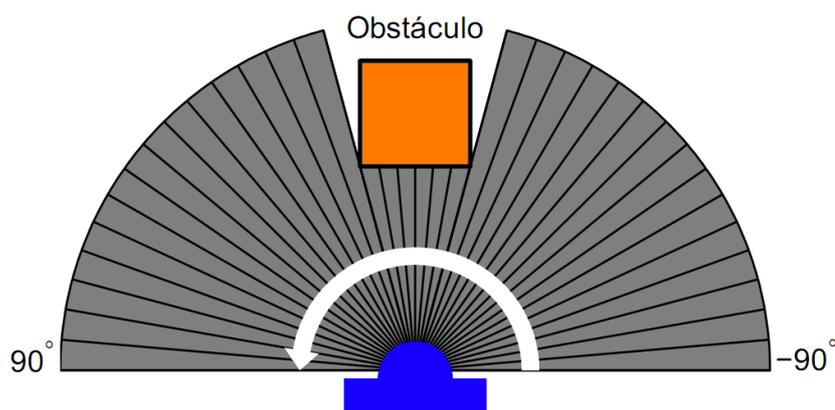


Figura 3.6: Leque de varredura laser.

Fonte: Adaptado de [64].

3.1.3 Resultados Experimentais

Estes testes têm como objetivo principal verificar a efetividade da estratégia de desvio de obstáculos incorporada à estrutura de controle multicamadas desenvolvida no presente trabalho.

Para realizar essa verificação, dois experimentos reais foram realizados. Em ambos, os três robôs móveis que constituem as formações triangulares devem, sempre que for possível, manter suas posições relativas iniciais, ou seja, devem manter a forma inicial das formações, enquanto navegam seguindo uma linha reta horizontal (velocidade translacional desejada de 80mm/s) em um ambiente parcialmente estruturado, contendo obstáculos desconhecidos. Mais especificamente, os cenários propostos para ambos os experimentos correspondem a um corredor (medindo aproximadamente 3m de largura por 7m de comprimento) contendo dois e um obstáculos, respectivamente.

Os valores adotados para os parâmetros da estratégia de desvio de obstáculos, ou seja, para as constantes das Equações 3.1, 3.7 e 3.8, estão organizados na Tabela 3.2. É importante mencionar que esses valores foram ajustados após diversas simulações, de acordo com a velocidade de navegação desejada da formação.

Tabela 3.2: Valores dos parâmetros da estratégia de desvio de obstáculos.

$d_{min} = 0,30\text{m}$	$b = 1,0$
$d_{max} = 0,95\text{m}$	$n = 2,0$
$I_u = 0,4\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$	$I_\omega = 0,2\text{N}\cdot\text{s}/\text{rad}$
$B_u = 5,6\text{N}/\text{rad}$	$B_\omega = 1,4\text{N}/\text{rad}$
$K_u = 10,0\text{N}/\text{rad}$	$K_\omega = 0,65\text{N}/\text{rad}$

Com relação ao controlador de formação, os valores escolhidos para as matrizes de ganho e de saturação foram os mesmos adotados na realização dos experimentos de seguimento de trajetória, apresentados na Subseção 2.3.7.

Primeiro Experimento

Neste primeiro experimento, dois obstáculos foram inseridos nas laterais do corredor, a fim de produzir um afunilamento (estreitamento) no caminho livre da formação, e com isso forçá-la a modificar (comprimir) a sua forma inicial enquanto ultrapassa a obstrução.

A Figura 3.7 mostra três imagens capturadas durante o experimento, as quais estão em correspondência com os instantes representados na Figura 3.8.

Além disso, as Figuras 3.9 e 3.10 apresentam as velocidades lineares e angulares (efetivamente enviadas e reais) de cada robô da formação.

Finalmente, a evolução dos erros de formação (pose e forma) é mostrada na Figura 3.11.

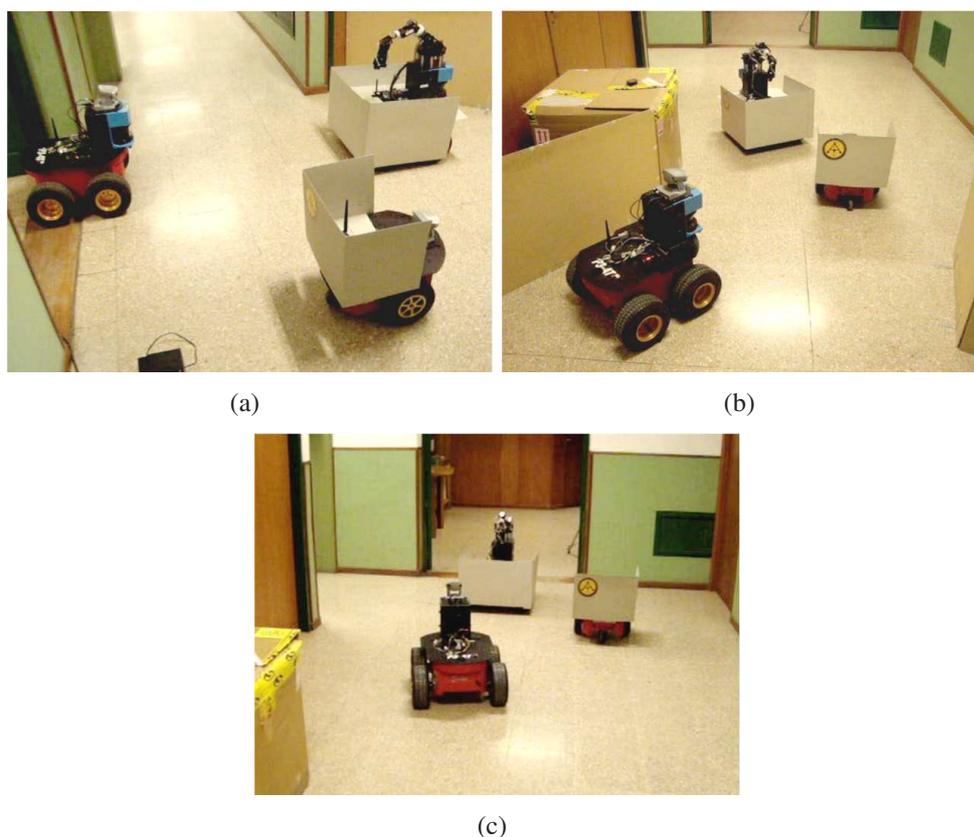


Figura 3.7: Imagens capturadas durante o experimento (experimento 3).

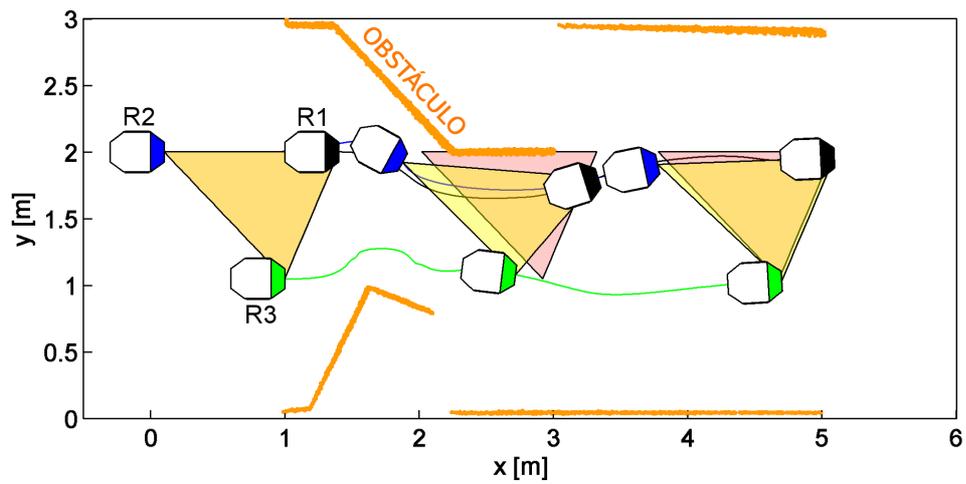


Figura 3.8: Caminho percorrido pela formação (experimento 3).

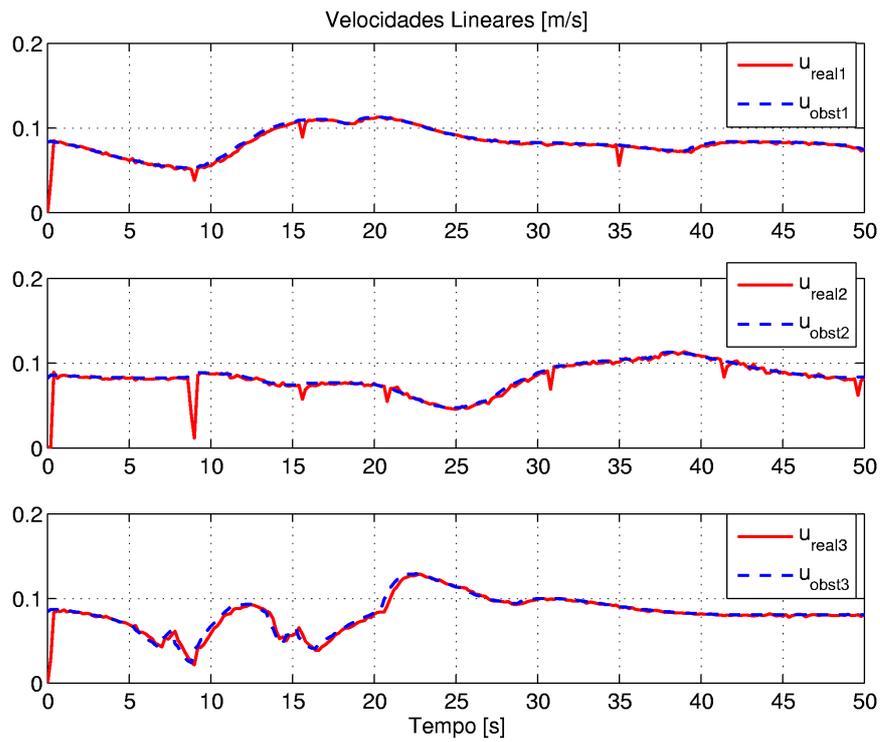


Figura 3.9: Velocidades lineares reais e de referência (experimento 3).

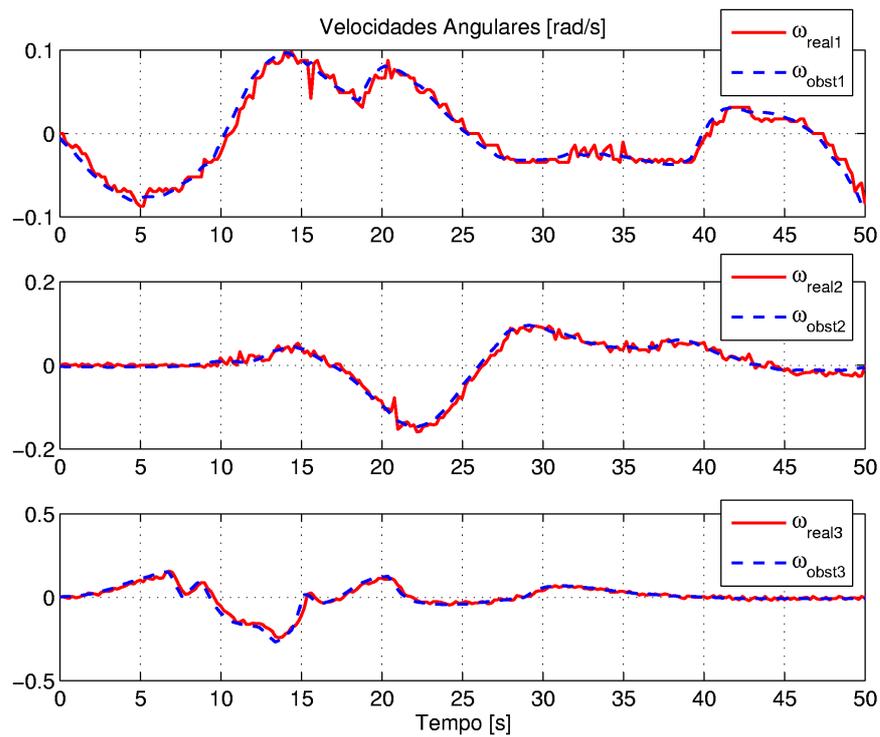


Figura 3.10: Velocidades angulares reais e de referência (experimento 3).

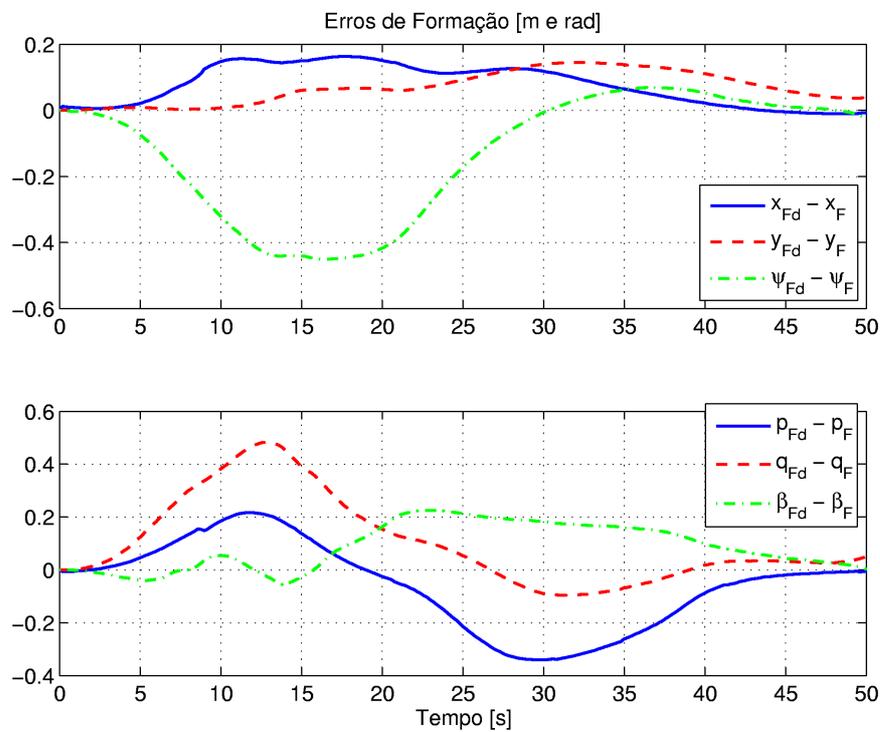


Figura 3.11: Evolução temporal dos erros de formação (experimento 3).

Segundo Experimento

Neste segundo experimento, a formação será compelida a modificar a sua forma inicial de maneira oposta ao experimento anterior, ou seja, agora, devido à presença de um obstáculo no centro do corredor, a formação será forçada a expandir-se.

Novamente, a Figura 3.12 mostra três imagens capturadas durante o experimento, as quais estão em correspondência com os instantes representados na Figura 3.13.

Do mesmo modo, as Figuras 3.14 e 3.15 apresentam as velocidades lineares e angulares (efetivamente enviadas e reais) de cada robô da formação.

Finalmente, a evolução dos erros de formação é mostrada na Figura 3.16.

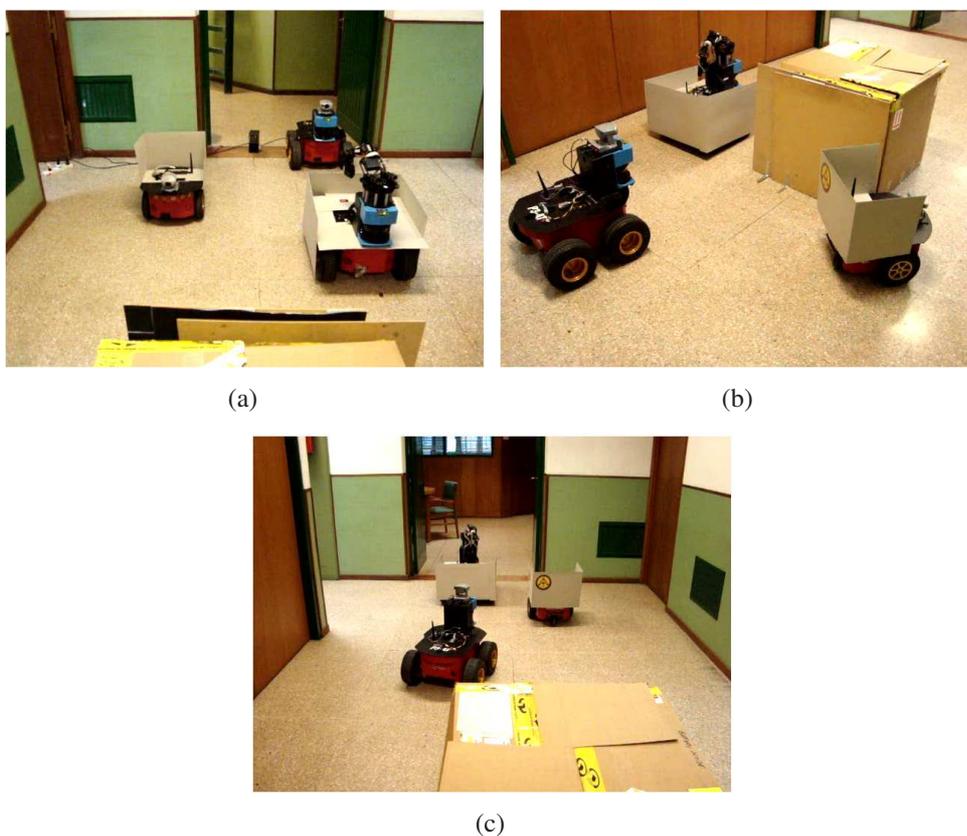


Figura 3.12: Imagens capturadas durante o experimento (experimento 4)

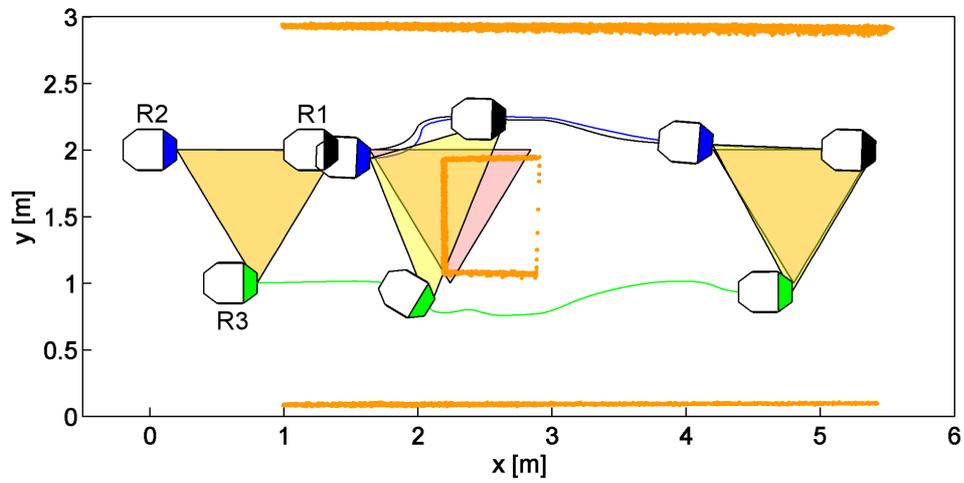


Figura 3.13: Caminho percorrido pela formação (experimento 4).

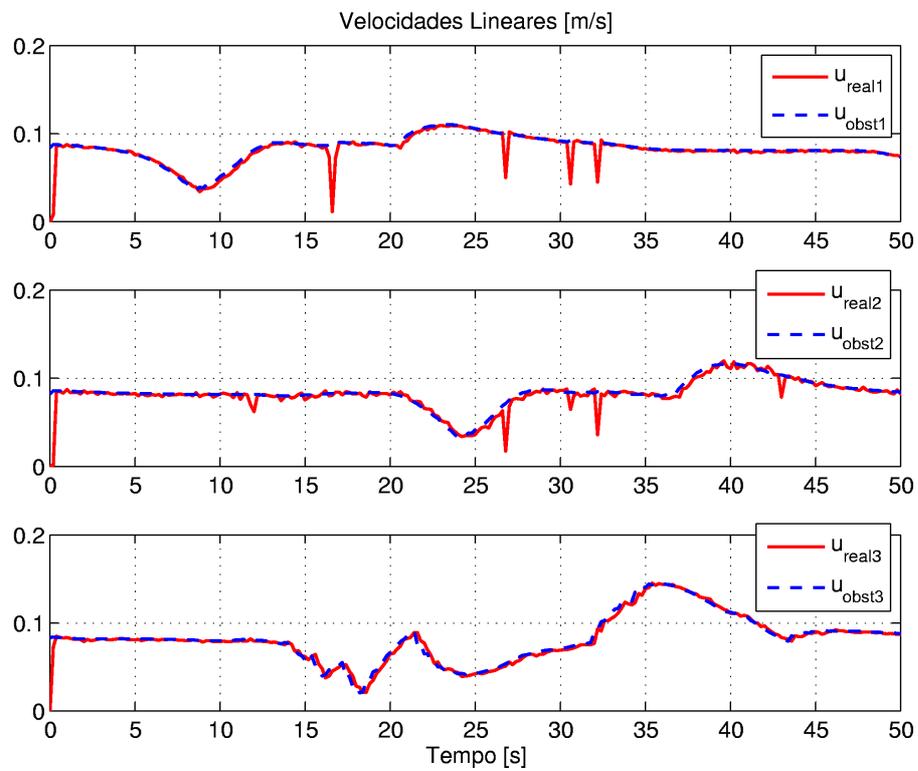


Figura 3.14: Velocidades lineares reais e de referência (experimento 4).

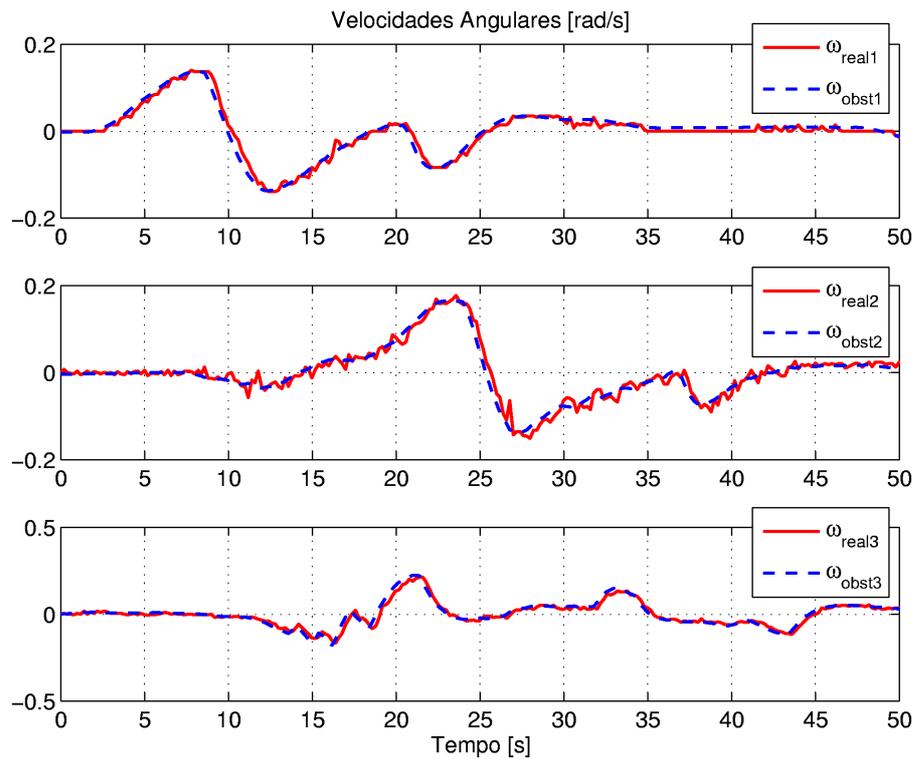


Figura 3.15: Velocidades angulares reais e de referência (experimento 4).

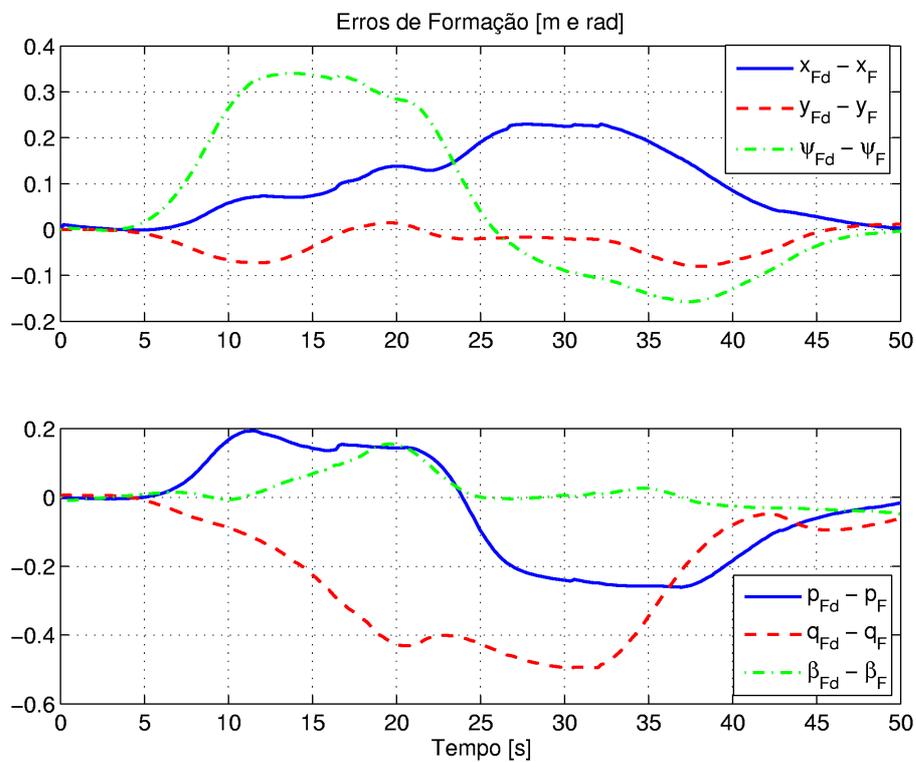


Figura 3.16: Evolução temporal dos erros de formação (experimento 4).

3.1.4 Análise dos Resultados Experimentais e Comentários Gerais

Analisando os resultados apresentados, pode-se concluir que as velocidades (lineares e angulares) de cada robô da formação foram modificadas apropriadamente pela estratégia de desvio de obstáculos, visto que todos os robôs foram capazes de desviar dos obstáculos presentes em seu caminho. Desse modo, sob um outro ponto de vista, tem-se que a formação como uma entidade única é capaz de se mover livre de colisões com os obstáculos circunjacentes, enquanto segue uma trajetória especificada pelo usuário.

Visualizando as Figuras 3.8 e 3.13, pode-se observar as formações triangulares sendo deformadas (comprimida e expandida, respectivamente), enquanto ultrapassam os obstáculos e, em seguida, restabelecendo suas formas desejadas após os obstáculos serem ultrapassados.

Os gráficos que mostram a evolução temporal dos erros de formação (Figuras 3.11 e 3.16) ajudam a confirmar essas duas observações. Note, no início dos gráficos, o aparecimento de erros de formação diferentes de zero, indicando que as formações começaram a perder suas poses e/ou formas desejadas. Veja também, no final dos gráficos, os erros tendendo a zero, indicando que os obstáculos foram ultrapassados e as formações desejadas estão sendo restabelecidas.

Além disso, observe que, na presença de obstáculos, as formações triangulares deformaram-se e adaptaram-se ao ambiente de forma bastante consistente. Repare também que, em ambos os experimentos, as deformações não respeitaram um padrão de deformação estabelecido *a priori*, pois cada robô da formação procurou ajustar sua trajetória de forma independente dos demais, buscando unicamente contornar os obstáculos e retornar à trajetória desejada.

Desse modo, como a formação não segue um tipo de deformação especificada para ajustar-se e transpor os obstáculos, acredita-se que sua aplicação em tarefas de busca e resgate ou mapeamento de áreas, por exemplo, seja mais eficiente que o emprego de qualquer outro tipo de formação com flexibilidade limitada.

Por exemplo, supondo que os experimentos apresentados representassem tarefas de busca e resgate, fica claro que uma formação verdadeiramente flexível teria maior chance de encontrar um sobrevivente que uma formação que segue algum padrão de deformação (ou somente comprimir-se, ou somente expandir-se, por exemplo), uma vez que esta seria incapaz de buscar por sobreviventes em todos os espaços livres de ambos os experimentos.

3.1.5 Resultados de Simulação

Finalmente, esta subseção apresenta dois resultados de simulação para avaliar a eficácia da utilização da proposta de desvio de obstáculos em formações com $n > 3$ robôs. A primeira simulação corresponde à tarefa de controle de posição, enquanto que a segunda, à tarefa de seguimento de trajetória, ambas considerando formações de seis robôs.

Novamente, as simulações foram realizadas usando o simulador proprietário comentado na Subseção 2.4.1, onde também está implementado o modelo do sensor laser LMS200. Desse modo, admite-se que cada robô possui a bordo um sensor de varredura laser, capaz de medir a sua distância aos obstáculos circunjacentes mais próximos.

Com relação aos controladores de formação, os valores escolhidos para as matrizes de ganho e de saturação são os mesmos que foram adotados na realização dos experimentos de controle de posição e seguimento de trajetória, apresentados na Subseção 2.3.7. Do mesmo modo, os valores adotados para os parâmetros da estratégia de desvio de obstáculos são os mesmos apresentados na Tabela 3.2.

Controle de Posição

Nesta primeira simulação, a formação retangular (medindo 3m de largura por 2m de profundidade) deve ultrapassar dois obstáculos paralelos (medindo 1m de largura por 4m de profundidade, aproximadamente) enquanto navega em direção à formação objetivo, a qual possui a mesma forma e está situada a 9,5m da formação inicial.

A Figura 3.17 destaca a formação em três instantes de tempo distintos ($t = 0s$, $45s$ e $90s$) durante a simulação.

Para completar os resultados de simulação, a Figura 3.18 apresenta a evolução temporal dos erros de formação das quatro formações triangulares.

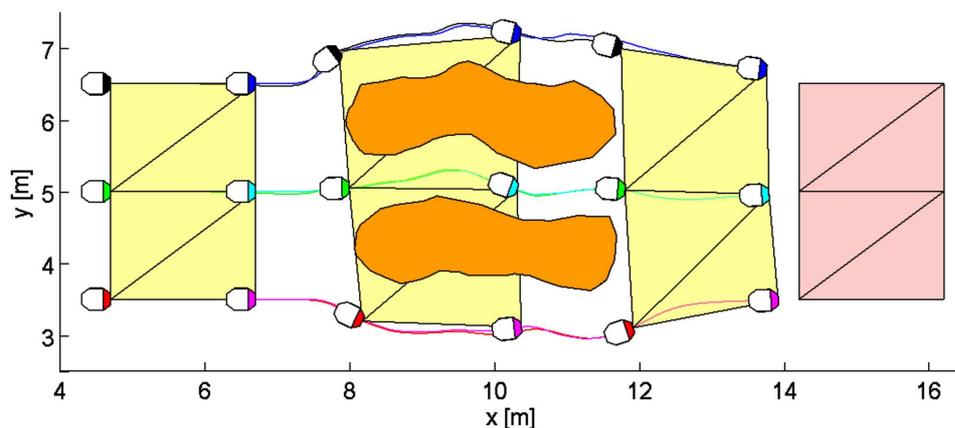


Figura 3.17: Caminho percorrido pela formação (simulação 3).

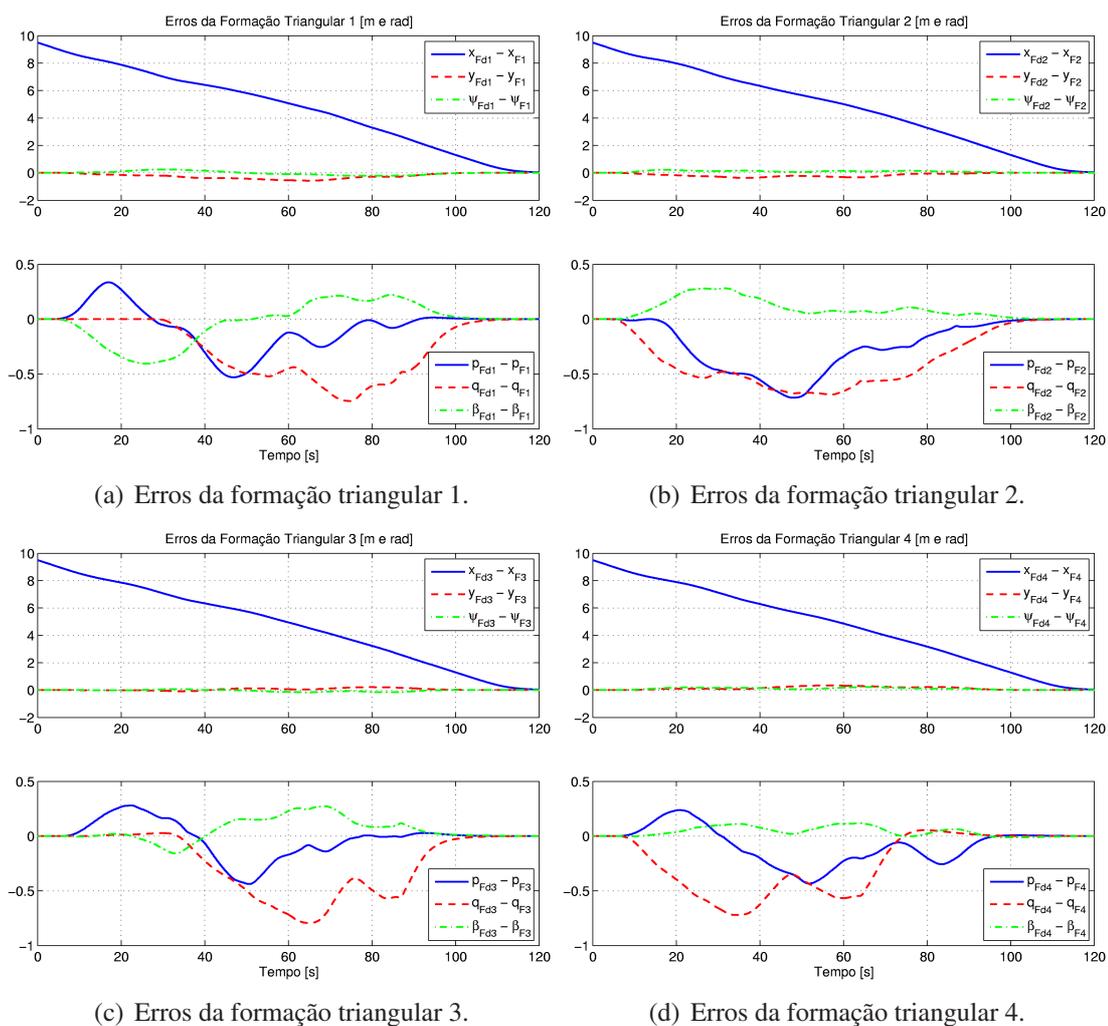


Figura 3.18: Evolução temporal dos erros de formação (simulação 3).

Seguimento de Trajetória

Nesta segunda simulação, a formação deve seguir uma trajetória horizontal (velocidade translacional desejada de 80mm/s), da esquerda para a direita, em um ambiente onde foram inseridos cinco obstáculos com posições desconhecidas sobre as trajetórias de cada robô da formação.

Novamente, a Figura 3.19 destaca a formação em três instantes de tempo distintos ($t = 0s$, $40s$ e $88s$) durante a simulação.

Para completar os resultados de simulação, a Figura 3.20 apresenta a evolução temporal dos erros de formação das quatro formações triangulares.

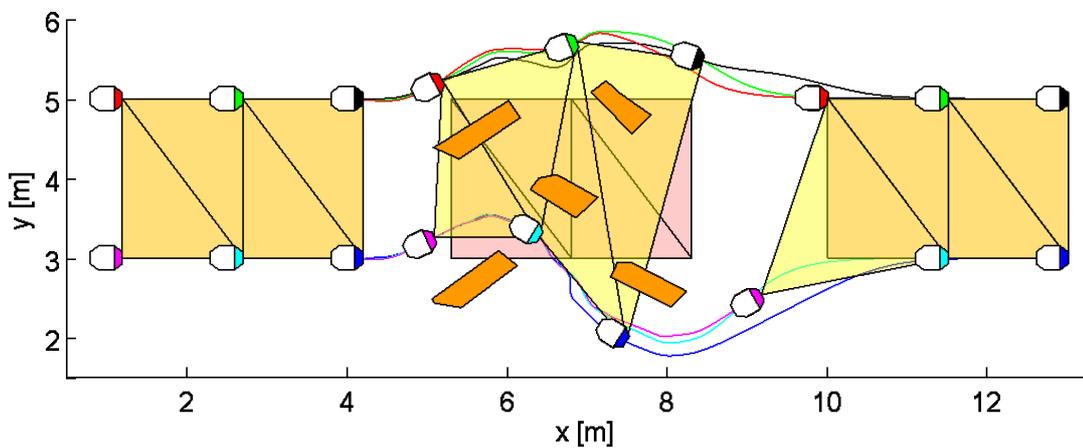


Figura 3.19: Caminho percorrido pela formação (simulação 4).

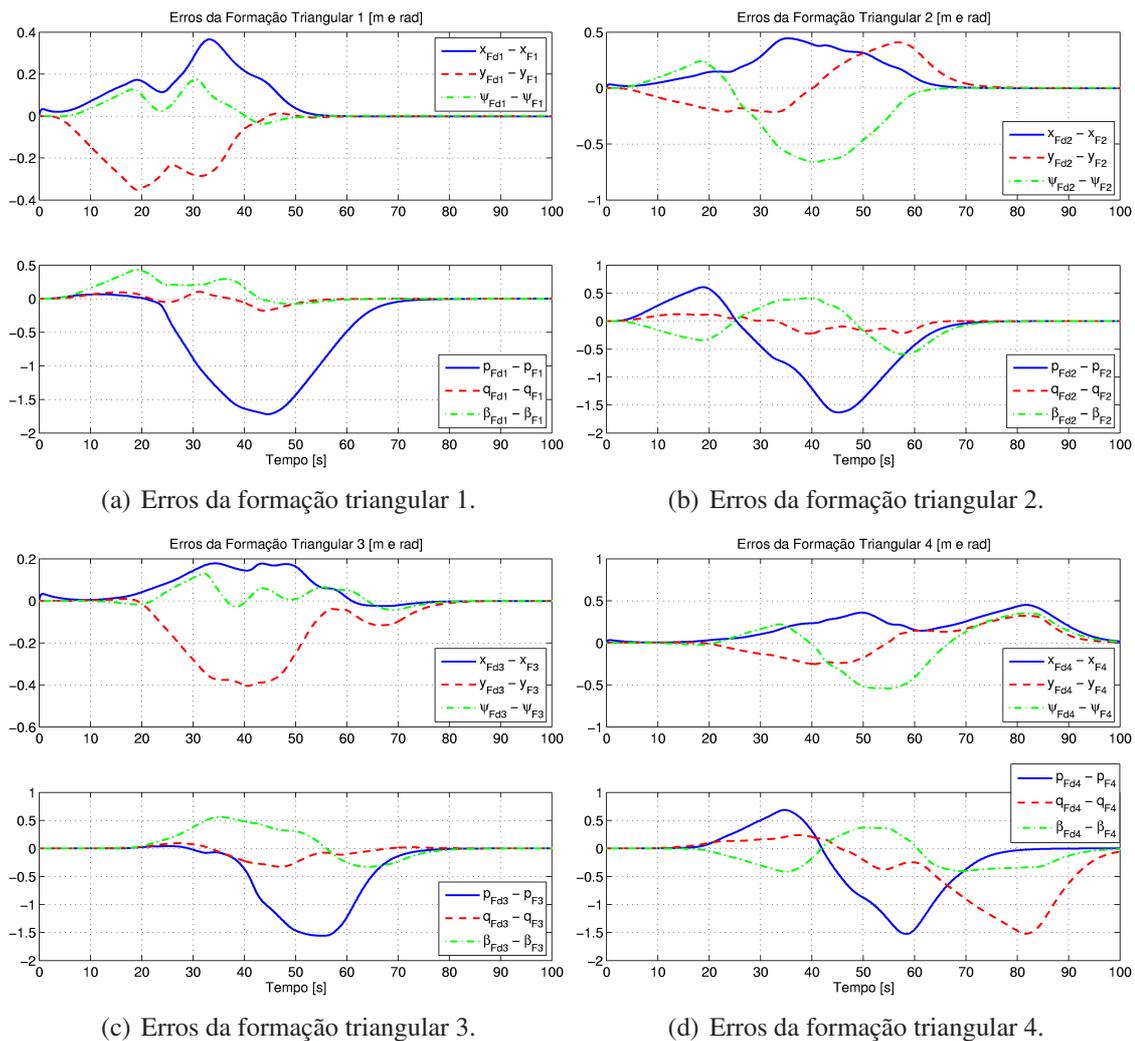


Figura 3.20: Evolução temporal dos erros de formação (simulação 4).

3.1.6 Análise dos Resultados de Simulação e Comentários Gerais

Os resultados de simulação apresentados mostram que a estratégia de desvio de obstáculos proposta também pode ser utilizada com sucesso em formações com $n > 3$ robôs, não somente em seguimento de trajetória, mas também em controle de posição.

Além disso, cabe ressaltar que a estratégia de corrigir as velocidades de cada robô da formação, baseada em somente duas medidas de distância, mostrou-se adequada ao objetivo de modificar as trajetórias desses robôs de maneira efetiva, a custo computacional baixo, e, uma vez que as correções de velocidade foram modeladas com dinâmicas análogas à dinâmica de um sistema massa-mola-amortecedor, as trajetórias individuais dos robôs foram modificadas e restabelecidas de forma relativamente suave.

Apesar disso, as constantes que representam os efeitos da inércia, do amortecimento e da constante elástica (ver Equações 3.7 e 3.8), devem ser ajustadas de acordo com a velocidade de navegação desejada da formação. Desse modo, percebe-se que a função tangente hiperbólica do controlador de formação (ver Subseção 2.3.5) desempenha um papel-chave na viabilização dos requerimentos necessários para a utilização da estratégia de desvio de obstáculos proposta em tarefas de controle de posição, ao permitir limitar a velocidade de navegação da formação.

A Figura 3.21, ilustra um caso em que a simulação referente à tarefa de controle de posição foi repetida, após os elementos diagonais da matriz de saturação serem substituídos por 0,8. Observe que, neste caso, a magnitude das correções de velocidade dos robôs verde e azul, por exemplo, foi insuficiente para fazê-los navegar entre os obstáculos sem colisão.

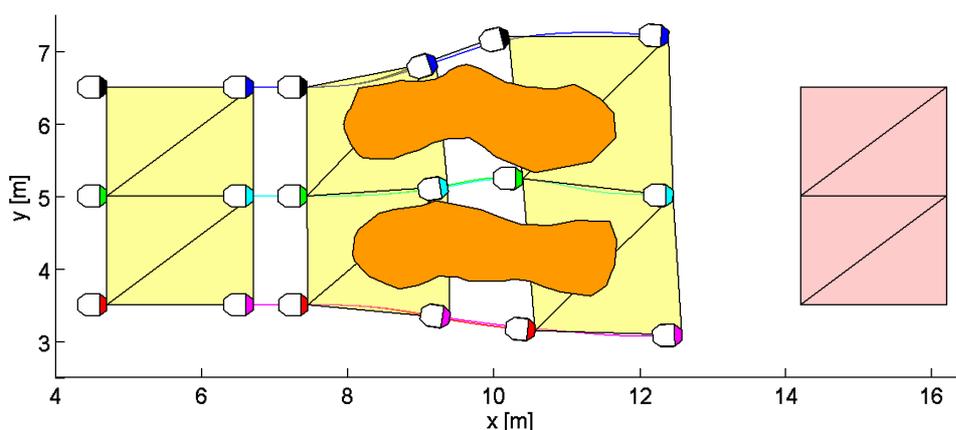


Figura 3.21: Caminho percorrido pela formação (simulação 5).

4 *Conclusões e Trabalhos Futuros*

Inicialmente, este trabalho descreveu e analisou o desenvolvimento de um esquema multicamadas para controlar formações triangulares de robôs móveis, o qual teve como base um trabalho prévio de Mas et al. [40], cujo controle de posição (ou de seguimento de trajetória) foi realizado sobre o centróide de uma figura geométrica, neste caso um triângulo.

O controlador de formação, proposto para funcionar como uma Camada de Controle, mostrou-se, através de vários testes reais, capaz de guiar uma formação triangular de robôs móveis, não somente em direção a uma formação objetivo (tarefa de controle de posição), mas também durante a realização de tarefas de seguimento de trajetória.

Além disso, também foi apresentada uma análise de estabilidade para o sistema em malha-fechada, onde concluiu-se que o erro de formação $\tilde{\mathbf{q}}$ será finalmente limitado quando $\delta_v \neq \mathbf{0}$ e que este limite depende do erro de seguimento de velocidade da formação δ_v .

Posteriormente, foi proposta uma generalização do esquema de controle multicamadas para controlar formações envolvendo $n > 3$ robôs móveis, a qual tem como característica principal possibilitar que formações com formas geométricas básicas (losango, pentágono, quadrado, retângulo, por exemplo), possam ser projetadas a partir de formações compostas por três robôs.

Uma vez implementada a proposta de generalização no simulador proprietário, duas simulações foram realizadas e, conforme pode ser observado pelos resultados apresentados, a generalização do esquema de controle multicamadas mostrou-se capaz de assegurar que todos os robôs alcançassem e mantivessem as configurações definidas para as formações desejadas.

Finalmente, foi desenvolvida uma estratégia de desvio de obstáculos, onde cada robô da formação corrige a sua trajetória de forma independente dos demais, fazendo com que a formação se comporte como uma estrutura flexível na presença de obstáculos.

A efetividade dessa estratégia foi verificada em dois experimentos e duas simulações, sendo que, em ambos os casos, pode-se concluir que as velocidades de cada robô da formação foram modificadas apropriadamente pela estratégia de desvio de obstáculos, fazendo com que a for-

mação como uma única entidade fosse capaz de se deslocar livre de colisões com os obstáculos circunjacentes, enquanto navegava em direção a uma formação objetivo ou seguia uma trajetória especificada pelo usuário.

Como proposta de continuidade deste trabalho, pretende-se abordar o assunto da singularidade. Nas cadeias cinemáticas dos robôs manipuladores, as singularidades ocorrem em configurações onde as matrizes Jacobiana e Jacobiana inversa se tornam singulares. Estendendo esse conceito para o presente trabalho, tem-se que as singularidades ocorrerão onde $J(\mathbf{x})$ ou $J^{-1}(\mathbf{q})$ se tornam singulares. Em termos práticos, as singularidades ocorrem quando a geometria da formação triangular se torna degenerada (perde a forma triangular), ou seja, quando $p_F = 0$, $q_F = 0$, $p_F = \infty$, $q_F = \infty$ ou $\beta_F = \pi$.

Os dois primeiros casos podem ser tratados através da implementação de alguma estratégia para evitar colisões robô-robô, como a técnica de desvio de obstáculos que foi apresentada. Os dois casos seguintes não representam exemplos reais que possam ser alcançados pelas aplicações práticas em análise. Por outro lado, o último caso pode ocorrer e deve ser evitado através da seleção de um conjunto alternativo de variáveis de formação, onde as singularidades existem em uma configuração diferente.

É importante dizer que em todos os experimentos e simulações apresentadas no presente trabalho as configurações singulares foram evitadas, a fim de enfatizar os resultados das abordagens propostas.

Outra proposta de trabalho futuro refere-se ao assunto da suscetibilidade do método de desvio de obstáculos a mínimos locais, o qual esteve além dos objetivos do presente trabalho. Esse caso pode ser eventualmente tratado, com a inserção de um supervisor no sistema de controle, a fim de monitorar algumas situações de mínimo local, intervindo no sistema para permitir que a situação se altere, permitindo a cada robô sair da configuração de mínimo local.

Outra desvantagem desse método, conforme comentado no decorrer do texto, se refere ao ajuste manual das constantes que representam os efeitos da inércia, do amortecimento e da constante elástica. Este ponto pode ser contornado automatizando o processo de ajuste dessas variáveis, tornando-as função da velocidade de navegação desejada da formação e das constantes d_{max} , d_{min} , b e n , por exemplo.

Os trabalhos publicados a partir dos resultados parciais desta pesquisa ([41], [65], [66], [67], [68] e [69]) estão citados nas referências bibliográficas.

Referências

- [1] ARKIN, R. C. *Behavior-Based Robotics*. Cambridge: MIT Press, 1998.
- [2] MARCHI, J. *Navegação de Robôs Móveis Autônomos: Estudo e Implementação de Abordagens*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil, 2001.
- [3] DUDEK, G.; JENKIN, M. *Computational Principles of Mobile Robotics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. 280 p.
- [4] LIMITED, E. G. P. ARC sees industrial robotics market hitting \$5 billion in 2010. *Industrial Robot: An International Journal*, v. 33, n. 6, 2006.
- [5] WOLF, D. F. et al. Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real. Tutorial. Julho 2009.
- [6] WHATMORE, R. *Terrestrial Planet Finder*. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 15 out. 2009.
- [7] HANRAHAN, C. *Autonomous Ocean Sampling Network*. Disponível em: <<http://www.mbari.org/aosn/>>. Acesso em: 15 out. 2009.
- [8] TREBI-OLLENNU, A. et al. Mars rover pair cooperatively transporting a long payload. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC, USA: [s.n.], 2002. v. 3, p. 3136–3141.
- [9] PIERI, E. R. de. Curso de robótica móvel. Notas de Aula. Março 2002.
- [10] ENGELBERGER, G. HelpMate, a service robot with experience. *Industrial Robot: An International Journal*, v. 25, n. 2, p. 101–104, 1998.
- [11] AGUIRRE, L. A. et al. *Enciclopédia de Automática: Controle e Automação*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2007.
- [12] AICARDI, M. et al. Closed loop steering of unicycle like vehicles via lyapunov techniques. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 2, n. 1, p. 27–35, 1995.
- [13] CRUZ, C. D. L. Controle de um robô móvel de tração diferencial. Notas de Aula. Maio 2008.
- [14] CAMPION, G.; BASTIN, G.; D’ANDREA-NOVEL, B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. In: *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Atlanta, GA, USA: [s.n.], 1993. p. 462–469.

- [15] MARTINS, F. N. et al. An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking. *Control Engineering Practice*, v. 16, n. 11, p. 1354–1363, November 2008.
- [16] FUKAO, T.; NAKAGAWA, H.; ADACHI, N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 16, n. 5, p. 609–615, October 2000.
- [17] DAS, T.; KAR, I. N. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 14, n. 3, p. 501–510, May 2006.
- [18] CRUZ, C. D. L.; CARELLI, R. Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots. In: *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Paris: [s.n.], 2006. p. 3880–3885.
- [19] MARTINS, F. N. et al. Dynamic modeling and adaptive dynamic compensation for unicycle-like mobile robots. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics*. Munique: [s.n.], 2009.
- [20] SCIENTIFIC AMERICAN. *Why do migratory birds fly in a V-formation?* October 2007. Disponível em: <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=why-do-migratory-birds-fl>>. Acesso em: 29 out. 2009.
- [21] STOUTEN, B.; GRAAF, A. J. d. Cooperative transportation of a large object-development of an industrial application. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2450–2455.
- [22] HOUGEN, D. F. et al. A miniature robotic system for reconnaissance and surveillance. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, CA, USA: [s.n.], 2000. v. 1, p. 501–507.
- [23] JENNINGS, J. S.; WHELAN, G.; EVANS, W. F. Cooperative search and rescue with a team of mobile robots. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics*. Monterey, CA, USA: [s.n.], 1997. p. 193–200.
- [24] ANTONELLI, G.; ARRICHIELLO, F.; CHIAVERINI, S. The entrapment/escorting mission for a multi-robot system: Theory and experiments. In: *2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Zurich: [s.n.], 2007. p. 1–6.
- [25] KITANO, H. et al. RoboCup: The robot world cup initiative. In: *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 340–347.
- [26] KELLY, R. et al. Control de una pandilla de robots móviles para el seguimiento de una constelación de puntos objetivo. In: *VI Congreso Mexicano de Robótica*. Torreón, Coahuila, Mexico: [s.n.], 2004.
- [27] YAMAGUCHI, H.; ARAI, T.; BENI, G. A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 36, n. 4, p. 125–147, September 2001.
- [28] CARELLI, R. Control de robots móviles. Notas de Aula. Novembro 2008.

- [29] ARKIN, R. C. Cooperation without communication: Multiagent schema-based robot navigation. *Journal of Robotic Systems*, v. 9, n. 3, p. 351–364, 1992.
- [30] BECKERS, R.; HOLL, O. E.; DENEUBOURG, J. L. From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics. In: *Artificial Life IV: proceedings of the fourth international workshop on the synthesis and simulation of living systems*. [S.l.]: MIT Press, 1994. p. 181–189.
- [31] BRANDÃO, A. S. et al. Decentralized navigation control and obstacle avoidance for a rigid mobile robot formation. In: *3rd International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*. San Juan, Argentine: [s.n.], 2008.
- [32] SHAO, J. et al. Leader-following formation control of multiple mobile robots. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Limassol: [s.n.], 2005. p. 808–813.
- [33] DAS, A. K. et al. A vision-based formation control framework. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 18, p. 813–825, 2002.
- [34] BALCH, T.; ARKIN, R. C. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 14, n. 6, p. 926–939, 1998.
- [35] MONTEIRO, S.; VAZ, M.; BICHO, E. Attractor dynamics generates robot formation: from theory to implementation. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2582–2586.
- [36] DESAI, J. P.; OSTROWSKI, J.; KUMAR, V. Controlling formations of multiple mobile robots. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: [s.n.], 1998. v. 4, p. 2864–2869.
- [37] FREDSLUND, J.; MATARIC, M. J. Robot formations using only local sensing and control. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 308–313.
- [38] TAN, K.; LEWIS, M. A. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In: *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Osaka, Japan: [s.n.], 1996. v. 1, p. 132–139.
- [39] BELTA, C.; KUMAR, V. Trajectory design for formations of robots by kinetic energy shaping. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC: [s.n.], 2002. v. 3, p. 2593–2598.
- [40] MAS, I.; PETROVIC, O.; KITTS, C. Cluster space specification and control of a 3-robot mobile system. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA' 08)*. Pasadena, CA: [s.n.], 2008. p. 3763–3768.
- [41] BRANDÃO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with adaptive dynamic compensation. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Mechatronics*. Málaga, Spain: [s.n.], 2009.
- [42] CAO, Y. U. et al. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. In: *Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Pittsburgh, PA, USA: [s.n.], 1995. v. 1, p. 226–234.

- [43] BEZERRA, C. G.; ALSINA, P. J.; MEDEIROS, A. A. D. de. Um sistema de localização para um robô móvel baseado em odometria e marcos naturais. In: *VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Bauru: [s.n.], 2003.
- [44] VALGAS-FILHO, J. H. de Ávila. *Uma Metodologia para Correção Dinâmica de Erros de Odometria em Robôs Móveis*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- [45] PARKER, L. E. Current state of the art in distributed autonomous mobile robotics. In: *Distributed Autonomous Robotic Systems*. [S.l.]: Springer, 2000. p. 3–12.
- [46] FOURNIER, A.; MONTUNO, D. Y. Triangulating simple polygons and equivalent problems. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, v. 3, n. 2, p. 153–174, 1984.
- [47] SILVA, V. C. D. *Decomposição Triângular de Imagens: uma Aplicação em Compressão*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2003.
- [48] CRUZ, C. D. L.; CARELLI, R. Dynamic model based formation control and obstacle avoidance of multi-robot systems. *Robotica*, v. 26, n. 3, p. 345–356, 2008.
- [49] FREIRE, E. et al. A new mobile robot control approach via fusion of control signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, v. 34, n. 1, p. 419–429, 2004.
- [50] BRANDÃO, A. S.; SARCINELLI-FILHO, M.; BASTOS-FILHO, T. F. MRSim: Un ambiente gráfico para simulación de navegación de robots móviles. In: *V Jornadas Argentinas de Robótica*. Bahía Blanca, Argentina: [s.n.], 2008.
- [51] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments. In: *Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Cincinnati, OH, USA: [s.n.], 1990. p. 572–577.
- [52] KUC, R.; BARSHAN, B. Navigating vehicles through an unstructured environment with sonar. In: *Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Scottsdale, AZ, USA: [s.n.], 1989. p. 1422–1426.
- [53] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Obstacle avoidance with ultrasonic sensors. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, v. 4, n. 2, p. 213–218, 1988.
- [54] MORAVEC, H.; ELFES, A. E. High resolution maps from wide angle sonar. In: *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 1985. p. 116–121.
- [55] ELFES, A. Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, v. 3, n. 3, p. 249–265, 1987.
- [56] KOREN, Y.; BORENSTEIN, J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In: *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Sacramento, CA, USA: [s.n.], 1991. p. 1398–1404.
- [57] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobilerobots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 7, n. 3, p. 278–288, 1991.

- [58] BRANDÃO, A. S. *Controle Descentralizado com Desvio de Obstáculos para uma Formação Líder-seguidor de Robôs Móveis*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.
- [59] SHAO, J.; WANG, L.; XIE, G. Flexible formation control for obstacle avoidance based on numerical flow field. In: *45th IEEE Conference on Decision and Control*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 5986–5991.
- [60] HOGAN, N. Impedance control – an approach to manipulation. i - theory. ii - implementation. iii - applications. *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control*, v. 107, p. 1–24, March 1985.
- [61] SECCHI, H.; CARELLI, R.; MUT, V. Impedance control for mobile robots with sensorial feedback. In: *XIV National Symposium of Automatic Control - AADECA*. Argentina: [s.n.], 1994. p. 19–24.
- [62] MUT, V.; CARELLI, R.; KUCHEN, B. Adaptive impedance control for robots with sensorial feedback. In: *XIII National Symposium of Automatic Control - AADECA*. Argentina: [s.n.], 1992. p. 345–349.
- [63] MOBILEROBOTS INC. *Pioneer 3 Operations Manual*. [S.l.], 2006.
- [64] SICK. *LMS200/211/221/291 - Laser Measurement Systems*. Germany, 2006.
- [65] RAMPINELLI, V. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with obstacle avoidance. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- [66] RAMPINELLI, V. et al. Um esquema de controle multicamadas aplicado a uma formação multirrobo com desvio de obstáculos. In: *IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Brasília: [s.n.], 2009.
- [67] MARTINS, F. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with adaptive dynamic compensation. In: *XIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*. Rosario, Argentina: [s.n.], 2009.
- [68] RAMPINELLI, V. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with obstacle avoidance. In: *XIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*. Rosario, Argentina: [s.n.], 2009.
- [69] RAMPINELLI, V. et al. Embedding obstacle avoidance in the control of a flexible multi-robot formation. In: *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Bari, Italy: [s.n.], 2010.

APÊNDICE A – Interface Gráfica do Simulador

Conforme comentado ao longo do texto, as simulações foram realizadas usando um simulador proprietário (implementado em MATLAB[®]), baseado na plataforma MRSiM, cujos detalhes de implementação podem ser encontrados em [50].

No que diz respeito à definição do ambiente de simulação, por exemplo, o simulador utilizado apresenta diversas facilidades por meio da interface gráfica com o usuário.

Definição do Ambiente de Navegação e da Quantidade de Robôs e Obstáculos

Quando o usuário executa o código MATLAB[®], três janelas são mostradas em sequência, conforme ilustra a Figura A.1. Primeiramente, o usuário deve definir as dimensões do espaço de trabalho da formação, ou seja, os limites mínimos e máximos do ambiente de navegação. Em seguida, ele deve estabelecer o número de robôs que irão compor a formação (no mínimo três) e a quantidade de obstáculos que serão inseridos no ambiente, mesmo que não seja obrigatório agregar obstáculos ao ambiente de simulação.

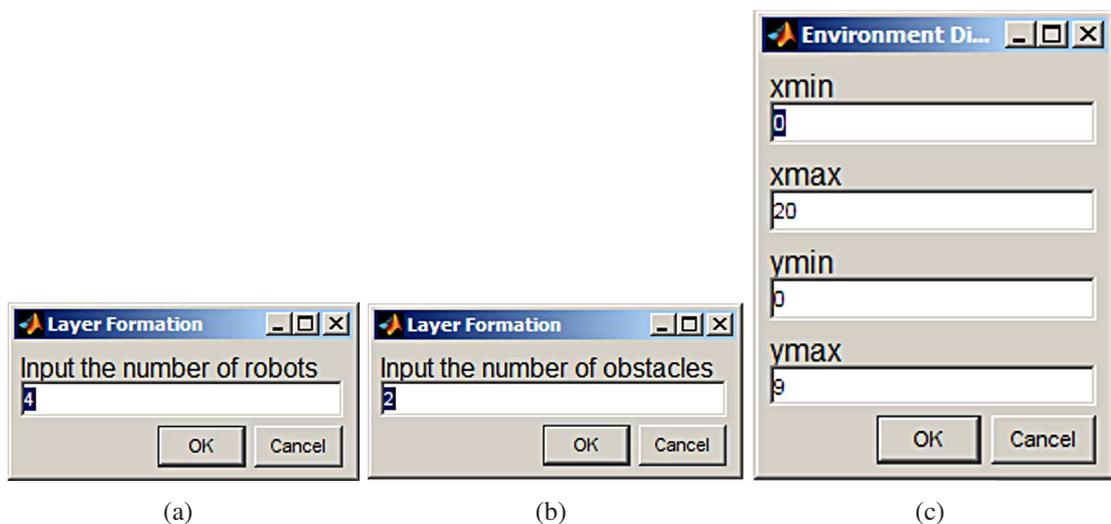


Figura A.1: Definição do ambiente de navegação e da quantidade de robôs e obstáculos.

Definição da Formação e Construção dos Obstáculos

Após o usuário definir os limites do ambiente de navegação e a quantidade de robôs e obstáculos, ele poderá definir a formação inicial e criar os obstáculos através do mouse do computador. Para determinar a pose de cada robô da formação, por exemplo, ele deve movimentar o cursor (apontador) até as coordenadas do ambiente de navegação onde deseja inserir o respectivo robô e pressionar o botão esquerdo, conforme ilustra a Figura A.2. Para definir a orientação, ele deve pressionar novamente o botão esquerdo (no ambiente de navegação) na direção para a qual o robô estará orientado.

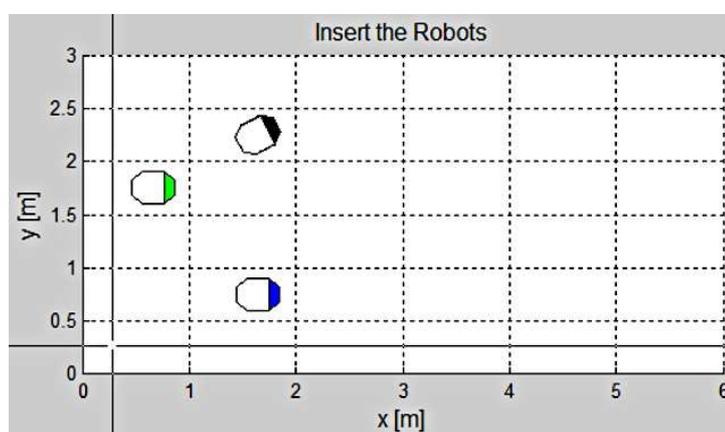


Figura A.2: Definição da formação.

Com relação à construção dos obstáculos, o usuário deve proceder de modo similar, ou seja, ele deve pressionar o botão esquerdo do mouse para definir cada vértice do respectivo obstáculo, conforme ilustra a Figura A.3. Para indicar que o último vértice foi inserido, ele deve pressionar o botão direito do mouse.

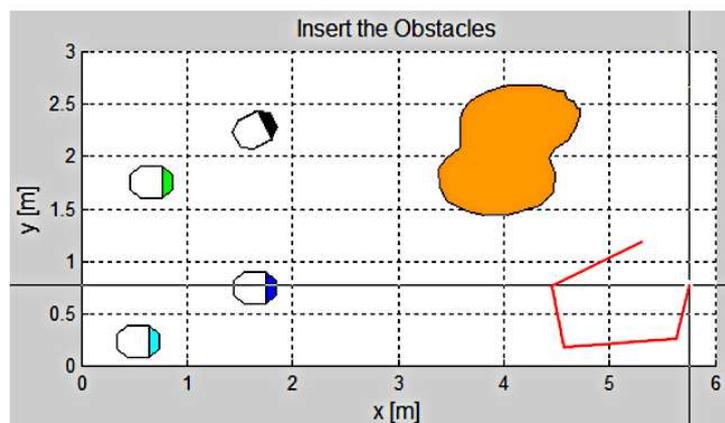


Figura A.3: Construção dos obstáculos.