

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Bernardo Ordoñez

**Estratégia de controle cooperativo baseado
em consenso para um grupo multi-veículos**

**Florianópolis
2013**

Bernardo Ordoñez

Estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para um grupo multi-veículos

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Ubirajara F. Moreno

Coorientador: Prof. Jés Cerqueira

Florianópolis
2013

Bernardo Ordoñez

**Estratégia de controle cooperativo baseado em consenso
para um grupo multi-veículos**

Esta Tese foi julgada aprovada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 24 de maio 2013.

Prof. Chefe, Dr. Jomi Fred Hübner
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ubirajara F. Moreno - UFSC
Orientador

Prof. Dr. Jês Cerqueira - UFBA
Coorientador

Prof. Dr. Ricardo H. C. Takahashi - UFMG

Prof. Dra. Carla C. Koike - UnB

Prof. Dr. Hector Bessa Silveira - UFSC

Prof. Max Hering de Queiroz - UFSC

Prof. Dr. Jomi Fred Hübner - UFSC

Agradecimentos

Aos meus pais, que ainda pequenino me levaram ao colégio. A educação iniciou antes...

À minha irmã, que demonstra sempre seu carinho de forma incondicional.

Ao pessoal do Sindicato do LCMI. O convívio com eles me tornou uma pessoa melhor. O mérito é todo deles!

Ao pessoal do Goitaka Rugby, que proporcionaram momentos únicos de diversão e amizade. Com eles aprendi que o rugby é mais do que um esporte.

Ao pessoal do DAS. Especialmente ao meu orientador, prof. Ubirajara, primeiro pela orientação, segundo e não menos importante, pela amizade e conversas, principalmente sobre rugby, universidade e papel do professor. Estendo os cumprimentos ao meu coorientador, prof. Jés, pela ajuda e incentivo durante o período de doutorado. E por fim, agradeço imenso ao prof. Luis Almeida, que me recebeu em Portugal com muito respeito e atenção em um estágio que foi fundamental para o doutorado.

A CAPES pelo auxílio financeiro mediante PRO ENGENHARIAS - (CoopAC-Automação) Cooperação Acadêmica e Científica em Sistemas de Controle Digital, Automação e Robótica e CAPES/FCT - Projeto Comunicações de Tempo Real em Redes Sem Fio.

Resumo da tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para um grupo multi-veículos

Bernardo Ordoñez

Maio/2013

Orientador: Prof. Ubirajara F. Moreno, Dr.

Co-orientador: Prof. Jés Cerqueira, Dr.

Nesta tese é apresentada uma proposta de controle cooperativo baseado em consenso para resolver o problema de *rendezvous* para um grupo multi-veículos. Como caráter essencial de cooperação entre os veículos, estes compartilham informação acerca do conhecimento individual, o que está sujeito a falhas na comunicação com origem diversa, desde faltas nos dispositivos de comunicação até perdas de pacote. A estratégia de controle cooperativo proposta consiste no desenvolvimento de leis de controle descentralizadas para que cada veículo determine sua trajetória de consenso até o ponto de encontro, que a priori é desconhecido para alguns integrantes da equipe. Para tal, utiliza-se uma abordagem baseada em controle preditivo, o que permite a inclusão de requisitos de resposta, bem como de restrições, de modo a manter o caráter de cooperação entre os veículos do grupo. De forma complementar à proposta, adicionam-se à formulação das trajetórias de consenso, restrições de conectividade entre veículos, restrições de ângulo de sensoriamento em relação ao ponto de encontro e à formação de cobertura sobre o ponto de referência. Trata-se ainda neste trabalho de protocolos de comunicação com intuito de melhorar a pontualidade na troca periódica de informações, melhorando a convergência da tarefa de consenso.

Palavras chave: Controle cooperativo, teoria de consenso, otimização, protocolos de comunicação.

Abstract of thesys presented to Federal University of Santa Catarina as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Systems and Automation Engineering.

Cooperative control strategy based on consensus for multi-vehicles group

Bernardo Ordoñez

May/2013

Advisor: Prof. Ubirajara F. Moreno, Dr.

Co-advisor: Prof. J es Cerqueira, Dr.

In this thesis, a cooperative control strategy for teams of multiple autonomous vehicles to solve a basic coordination problem, called rendezvous problem, is presented. The vehicles share information about individual knowledge in order to cooperate. It is considered that communication failures can be occurs due to packet losses and device faults. In the cooperative proposal, a decentralized control laws are developed to drive all the vehicles to a reference position by performing trajectories with consensus. The rendezvous point is a priori unknown to some group members. The calculus of the consensus trajectories is based on receding horizon control, which allows to include response requirements and constraints for maintaining cooperation between the vehicles of the group. Additionally, it is added to the consensus trajectories formulation: connectivity constraints between vehicles, optimization of the sensing angle relative to the rendezvous point and coverage formation on the reference point. Finally, in this work, communication protocols are studied for improving the timeliness in the information exchange, which improves the convergence of consensus task.

Keywords: Cooperative control, consensus theory, optimization, communication protocols.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Aplicações de controle cooperativo.....	3
Figura 1.2 Ilustração 1 do problema de <i>rendezvous</i>	5
Figura 1.3 Ilustração 2 do problema de <i>rendezvous</i>	6
Figura 1.4 Publicações abordando controle cooperativo.....	8
Figura 2.1 Exemplo de topologia com fluxo orientado.....	19
Figura 2.2 Formas equivalentes de consenso.....	23
Figura 2.3 Topologias de comunicação - exemplo ilustrativo.....	24
Figura 2.4 <i>Estados da informação</i> - exemplo ilustrativo.....	26
Figura 2.5 Consenso de rastreamento - exemplo ilustrativo.....	29
Figura 3.1 Estratégia do controle preditivo.....	34
Figura 3.2 Implementação da estratégia controle cooperativo.....	41
Figura 3.3 Posições iniciais dos veículos.....	42
Figura 3.4 Topologias A e B - exemplo ilustrativo.....	43
Figura 3.5 <i>Estados da informação</i> - Topologia A.....	44
Figura 3.6 <i>Estados da informação</i> - Topologia B.....	45
Figura 3.7 Número de iterações - Topologias A e B.....	46
Figura 4.1 Cenário 1: falha no dispositivo de comunicação.....	49
Figura 4.2 Cenário 2: diferença entre os veículos vizinhos.....	50
Figura 4.3 Relação: $\theta_{i,j}$ e $D_{ij}^{MAN}, D_{ij}^{EUC}$ para $0^0 \leq \theta_{i,j} \leq 90^0$	52
Figura 4.4 Relação: $\theta_{i,j}$ e $D_{ij}^{MAN}, D_{ij}^{EUC}$ para $0^0 \leq \theta_{i,j} \leq 360^0$	53
Figura 4.5 Diagrama de blocos da estratégia de controle.....	54
Figura 4.6 Topologias A e B - exemplo ilustrativo.....	56
Figura 4.8 Posto L_n sem restrição de conectividade - Top. B.....	56
Figura 4.7 ξ_i sem a restrição de conectividade - Top. B.....	57

Figura 4.9	ξ_i com a restrição de conectividade - Top. B	58
Figura 4.10	Posto L_n com restrição de conectividade - Top. B	59
Figura 4.11	Trajetórias de consenso com restrição de movimento..	60
Figura 4.12	Problema de otimização de θ_i	60
Figura 4.13	Diagrama de blocos para otimização de θ_i	62
Figura 4.14	Topologias A e B - Otimização de θ_i	63
Figura 4.15	ξ_i com otimização de θ_i - Topologias A e B.....	64
Figura 4.16	Diagrama de blocos para problema de cobertura.....	65
Figura 4.17	Etapa 1(A) - ξ_i com cobertura da referência.....	67
Figura 4.18	Etapa 2(A) - ξ_i com cobertura da referência.....	68
Figura 4.19	Etapa 1(B) - ξ_i com cobertura da referência.....	68
Figura 4.20	Etapa 2(B) - ξ_i com cobertura da referência.....	68
Figura 5.1	Perda de pacotes na comunicação - Ilustração	70
Figura 5.2	Troca de mensagens entre veículos i e j	72
Figura 5.3	Demonstração gráfica para T_x^{prox} e $T_x^{prox'}$	73
Figura 5.4	Protocolo para sincronização das mensagens.....	74
Figura 5.5	Exemplo ilustrativo - Topologias C e D	78
Figura 5.6	Iterações e colisão com $T_{mens}^i = 1 ms$ - Top. C	79
Figura 5.7	Iterações e colisão com $T_{mens}^i = 2 ms$ - Top. C	80
Figura 5.8	Iterações e colisão com $T_{mens}^i = 1 ms$ - Top. D	81
Figura 5.9	Iterações e colisão com $T_{mens}^i = 2 ms$ - Top. D	81
Figura 5.10	Exemplo ilustrativo - Topologia E	82
Figura 5.11	Iterações e colisão com $T_{mens}^i = 1 ms$ - Top. E	83
Figura 5.12	Iterações e colisão com $T_{mens}^i = 2 ms$ - Top. E	84

Glossário

Parâmetros e variáveis:

n : número de veículos.

G_n : grafo de ordem n .

i : índice de identificação do veículo i .

j : índice de identificação do veículo j .

v_i : nó i .

e_{ij} : aresta que liga os nós i e j .

ν_n : conjunto de nós de ordem n .

ε_n : conjunto de arestas de ordem $n \times n$.

N_i : conjunto dos nós vizinhos de i .

τ_G : árvore orientada.

A_n : matriz de adjacência de ordem n .

a_{ij} : entrada (i, j) da matriz de adjacência A_n .

L_n : matriz laplaciana de ordem n .

l_{ij} : entrada (i, j) da matriz laplaciana L_n .

ρ_n : posto da matriz laplaciana L_n .

t : tempo.

$\xi_i(t)$: estado da informação do veículo i no tempo t .

$u_i(t)$: sinal de controle do veículo i no tempo t .

$\xi_r(t)$: estado de referência no tempo t .

k : instante amostral.

$\xi_i(k)$: estado da informação do veículo i no instante k .

Δ_k : período de amostragem.

$u_i(k)$: sinal de controle do veículo i no instante k .

x, y : coordenadas no eixo cartesiano.

$p_i^{(x,y)}$: posição do veículo i nas coordenadas (x, y) .
 r_{com}^i : raio de comunicação do veículo i .
 N_p : horizonte de predição da janela deslizante.
 $\xi(k + ki|k)$: predição do estado $\xi(k + ki)$ a partir do instante k .
 $u(k + ki|k)$: predição do controle $u(k + ki)$ a partir do instante k .
 $\tilde{\xi}_i$: predição do estado ξ_i .
 Δ_ξ : matriz de ponderação associada a ξ_i .
 Δ_e : matriz de ponderação associada a ξ_r .
 λ_{u_i} : vetor de ponderação do controle u_i .
 J_i : função objetivo, ou funcional, do veículo i .
 p_i : probabilidade de sucesso na troca de mensagens do veículo i .
 Ω_i : conjunto do espectro da probabilidade p_i .
 d_{ij} : distância euclidiana entre os veículos i e j .
 d_{ij}^{MAN} : distância Manhattan entre os veículos i e j .
 $\tilde{\xi}_j^{x,y}$: derivada simples do estado ξ_j .
 α_i : parâmetro de ajuste.
 $\theta_{(i,j)}$: ângulo entre os veículos i e j .
 J_i^θ : função objetivo para minimizar θ_i .
 θ_i^d : ângulo de orientação desejado.
 T_i : período de atualização do veículo i .
 T_{up} : período de atualização do grupo.
 T_{slot} : janela de atualização.
 T_i^{prox} : próximo período de atualização do veículo i .
 $T_i^{prox'}$: próximo período de atualização corrigido do veículo i .
 T_{mens}^i : tempo de duração da mensagem do veículo i .
 ψ : critério de convergência para o consenso.

Acrônimos e siglas:

VANT: Veículo Aéreo Não Tripulado.
RMR: robô móvel com rodas.
MILP: do inglês, Mixed Integer Linear Programming.
LMI: do inglês, linear matrix inequalities.
LQR: do inglês, linear quadratic regulator.

PID: Proporcional, Integral e Derivativo.

GPS: do inglês, global positioning system.

GPC: do inglês, generalized predictive control.

RF: rádio frequência.

TDMA: do inglês, time division multiple access.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Sobre o controle cooperativo	2
1.2	Definição do problema	4
1.3	Motivação e trabalhos relacionados	7
1.4	Proposta e contribuições	11
1.4.1	Contribuições	12
1.5	Estrutura do texto	13
1.5.1	Lista de publicações	14
2	Teoria de consenso em grupo multi-veículo	17
2.1	Preliminares em Teoria dos Grafos	18
2.2	Consenso em grupo multi-veículo	20
2.2.1	Consenso com dinâmica integradora de 1 ^a ordem	21
2.2.2	Exemplo ilustrativo	23
2.2.3	Consenso de rastreamento	27
2.3	Resumo	28
3	Controle cooperativo para geração de trajetórias de consenso	31
3.1	Preliminares sobre o controle preditivo	32
3.2	Leis de controle para geração de trajetórias de consenso	34
3.2.1	Definição da função objetivo	35
3.2.2	Formulação quadrática	36
3.3	Implementação da estratégia de controle cooperativo . .	40
3.4	Sobre a troca de mensagens	41
3.5	Simulações numéricas e análise dos resultados	44
3.6	Resumo	45
4	Extensão do controle cooperativo para geração de trajetórias de consenso	47

4.1	Restrição de conectividade	48
4.1.1	Desenvolvimento da restrição de conectividade	50
4.1.2	Implementação da estratégia	54
4.1.3	Simulações numéricas e análise dos resultados	56
4.2	Trajetórias de consenso com otimização do ângulo de sensoramento	59
4.2.1	Exemplo Ilustrativo	59
4.2.2	Otimização do ângulo de orientação J_i^θ	61
4.2.3	Implementação da estratégia	61
4.2.4	Simulação e análise dos resultados	63
4.3	Trajetórias de consenso e o conceito de estado da informação	64
4.3.1	Implementação da estratégia	65
4.3.2	Simulação e análise dos resultados	66
4.4	Resumo	67
5	Aspectos da comunicação na estratégia de controle cooperativo baseado em consenso	69
5.1	Protocolo de comunicação para sincronização de mensagens	71
5.2	Modelagem da troca de mensagens	75
5.3	Simulação e análise dos resultados	76
5.3.1	Consenso médio	77
5.3.2	Consenso de referência	82
5.4	Resumo	84
6	Conclusões	85
6.1	Contribuições da tese	86
6.2	Perspectivas de atividades futuras	87

Capítulo 1

Introdução

A utilização de veículos robotizados, ou grupo destes, em tarefas executadas de forma autônoma tornou-se possível devido aos avanços tecnológico e científico na miniaturização dos sistemas eletromecânicos que os constituem, aspecto que vincula-se à instrumentação dos veículos. De forma complementar e como consequência tecnológica, houve significativo avanço relacionado ao procedimento do veículo, no qual sobressaem-se estudos sobre novas metodologias para estratégias de ordenação e desenvolvimento de protocolos de comunicação.

É natural então, imaginar que brevemente grupos multi-veículos serão responsáveis pelas próprias ações e por conseguinte, desempenharão papel importante em tarefas desafiadoras, tais como operações de busca e resgate, vigilância e monitoramento de ambientes para, por exemplo, detecção de incêndios em florestas e mapeamento do fundo do mar [48, 64], além de aplicações militares ¹. A utilização de um grupo composto por veículos com diferentes características individuais fica evidenciada nas aplicações acima citadas, em que o uso de veículos terrestres, aéreos e aquáticos faz-se necessário.

Desta utilização de um grupo de veículos espera-se que o mesmo assuma um comportamento coordenado e que seus integrantes sejam autônomos, e para tal, podem-se empregar estratégias de cooperação. Em grande parte das tarefas, a ação de um único veículo, que tem conhecimento espacial e recursos limitados, não conduz necessariamente ao sucesso da mesma. Evidencia-se assim, a vantagem de contar com

¹O financiamento e aplicações militares é um tema vigente em que alguns importantes pesquisadores têm debatido sobre o assunto. Para mais informação recomenda-se a leitura das seguintes referências [30, 74, 75, 82]

um grupo coordenado de veículos que podem compartilhar conhecimento para realização de tarefas em ambientes dinâmicos, ainda com o atributo de que estratégias baseadas em um grupo de veículos podem prover robustez frente a falhas de comunicação e perda de algum integrante na execução da tarefa [70, 77].

No âmbito de controle cooperativo um aspecto fundamental é o compartilhamento de informação para efetivar a cooperação, [61, 63], a qual é caracterizada pela troca de mensagens entre os integrantes do grupo durante a execução de uma tarefa. Neste contexto, o problema de *rendezvous* para um grupo multi-veículos é abordado nesta tese. O objetivo primário é projetar estratégias locais de controle baseadas em consenso para que cada veículo alcance um ponto de encontro, que é inicialmente desconhecido.

1.1 Sobre o controle cooperativo

O conceito de controle cooperativo implica que em uma determinada tarefa executada por um grupo de veículos, que na literatura aparece muitas vezes denominado pelo termo grupo multi-veículos, necessariamente este grupo deve apresentar um comportamento cooperativo coletivo para que o resultado da tarefa seja o esperado. O ideal é que os veículos cooperem entre si, o que efetivamente faz do grupo uma equipe.

A seguir são apresentados os conceitos de equipe e cooperação com intuito de estabelecer uma associação do significado de uso comum destas palavras com o assunto de estudo desta tese [11, 19].

Equipe: *grupo de entidades autônomas e organizadas que compartilham um objetivo em comum.*

Cooperação: *ato de agir junto com outro, ou outros, para um fim comum.*

As pesquisas sobre sistemas multi-veículos para realização de tarefas com conceitos de cooperação datam do começo da década de 1980, as quais estavam relacionadas quase exclusivamente ao campo da robótica móvel, [60]. Com o desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio com baixo custo, na década de 1990, a atenção de pesquisadores envolvidos com o tópico aumentou significativamente.

Desde então, com o desenvolvimento e disponibilização de recursos computacionais embarcados em veículos autônomos, novos sistemas

multi-veículos foram propostos em aplicações que englobam desde sistemas militares até redes de sensores móveis para vigilância, passando por monitoramento de estradas e sistemas de transporte aéreos, [44].

Na Figura 1.1 são apresentadas as principais técnicas utilizadas e desenvolvidas para projetar estratégias que resolvam tarefas a partir de conceitos de controle cooperativo. Esta divisão não é necessariamente fixa, dado que algumas estratégias podem ser casos específicos de outras, mas o objetivo aqui é apresentar um breve relato sobre as técnicas e como estas podem ser divididas em grupos de acordo com o objetivo da tarefa.



Figura 1.1: Esquema sobre o controle cooperativo e possíveis aplicações de técnicas para o desenvolvimento de estratégias utilizando conceitos de cooperação entre os integrantes de uma equipe.

No controle da formação, o principal objetivo é manter a posição relativa entre os veículos de um grupo ou então relativa a uma referência, para o qual podem ser utilizadas abordagens baseada em otimização, [16, 58]; campos potenciais, [33, 46, 49] e técnica de Enxame,

do inglês *swarm*, [47, 66].

Nas tarefas cooperativas com solução baseada principalmente na alocação de recursos, a meta é definir uma tomada de decisão sobre as tarefas e recursos que cada veículo desempenhará para um objetivo comum ao grupo. Para tal, podem-se utilizar critérios baseados em otimização MILP [17, 67] e protocolos para delegação de tarefas baseados em inteligência artificial [29, 59, 80, 81].

No problema de planejamento espaço-temporal especificam-se as trajetórias dos veículos para um objetivo determinado a partir da aplicação. Neste contexto, encaixa-se o problema de cobertura, em que deve-se proceder estratégias para a cobertura de uma área segundo algum critério de avaliação para o desempenho da tarefa. Podem ser usados tanto veículos como o conceito de sensores móveis [10, 23, 56, 79].

Ainda sobre o planejamento no espaço, tem-se o problema de *rendezvous*, com o desígnio de projetar estratégias locais, e individuais, para que todos os integrantes de um determinado grupo se encontrem em uma localização em comum definida sempre de acordo com uma negociação entre os próprios integrantes do grupo [3, 35, 42, 78].

Desta forma, aplicações típicas que envolvem o problema de *rendezvous* são os problemas definidos como missões de busca/resgate e busca/captura, em que os alvos são fixos e móveis, respectivamente. Evidentemente, as missões acima citadas podem ser abstrações de problemas como exploração, vigilância e monitoramento de ambientes tanto internos como externos [48, 64].

Por fim, surgem os algoritmos de consenso, no qual os veículos integrantes de um grupo têm avaliação e/ou decisão baseadas em informação distribuída e protocolos de comunicação [20, 51]. A teoria de consenso pode ser utilizada para proceder a negociação entre os integrantes de um grupo de forma que este processo seja robusto o suficiente frente a mudanças no ambiente de comunicação, já que este tipo de problema torna-se mais desafiador quando consideram-se variações na topologia da rede de comunicação.

1.2 Definição do problema

A teoria de consenso pode ser utilizada para abordar o problema de *rendezvous* em um grupo multi-veículos. O problema é caracterizado pela negociação entre os integrantes de um grupo para determinar a localização do ponto de encontro, que *a priori* é conhecido apenas por parte da equipe.

De fato, em missões é bastante comum que apenas uma parte do

grupo tenha acesso a informação de referência, e mais, provavelmente estes veículos não têm comunicação com todos os outros integrantes, já que há limitação de conhecimento. Por conseguinte, a troca de informação entre os membros do grupo faz-se necessária para que ocorra a partilha de conhecimento, vide Figura 1.2.

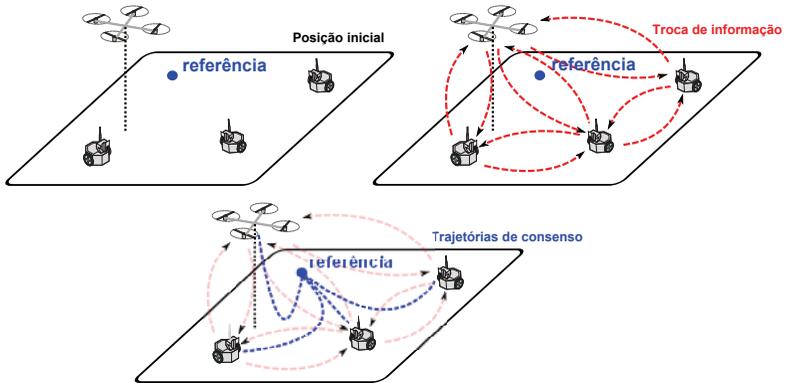


Figura 1.2: Ilustração do problema conforme Definição 1.1, em que os veículos integrantes da equipe devem compartilhar informação para geração das trajetórias de consenso para alcançar o ponto de *rendezvous*, sobre o qual o grupo tem conhecimento limitado.

Neste cenário, o problema de *rendezvous* é formalmente apresentado na Definição (1.1), em que destacam-se as principais características do problema.

Definição 1.1 (Problema de Rendezvous) *O objetivo para o problema de rendezvous em um grupo multi-veículos é desenvolver estratégias de controle descentralizadas e individuais de forma que todos os integrantes do grupo alcancem um ponto de encontro que a priori é desconhecido, ou limitado a parte do grupo [35].*

Nas estratégias de consenso tradicionalmente aplicadas ao problema de *rendezvous*, os veículos simultaneamente convergem para um local mediante negociação entre os mesmos. Esta localização depende dos valores das posições iniciais dos veículos que compartilham informação com o restante do grupo, ou seja, é uma localização que depende da estrutura de comunicação.

Ao utilizar a abordagem clássica não é possível resolver o problema de busca/resgate ou busca/captura, dado que o local alvo deve

ser necessariamente a localização de resgate ou captura. Neste cenário, surge o conceito de *consenso de rastreamento*, ou referência, em que a posição de *rendezvous* deve ser especificada como um valor particular, a depender da aplicação.

Desta forma, podem ser abordados tanto problemas em que não há um valor definido para a tarefa de *rendezvous*, como tarefas em que há a especificação de um valor desejado, ou de referência.

Em tarefas de coordenação tanto o fluxo de informação como o compartilhamento de informação são considerados dois fatores fundamentais. Assim, a teoria dos grafos pode ser usada para representar a estrutura de comunicação mediante a topologia da rede [20, 63].

Em relação ao compartilhamento da informação entre dois veículos, o fluxo da informação no canal de comunicação é considerado orientado, ou seja, dada uma situação na qual o veículo i recebe informação oriunda do veículo j , o mesmo não ocorre necessariamente no sentido do veículo i enviar dados para o veículo j . Apenas admite-se partilha de informação entre dois veículos que sejam considerados vizinhos, o que depende exclusivamente da distância entre os mesmos, caracterizando portanto, uma troca de informação limitada pela distância. Essa caracterização é mostrada na Figura 1.3.

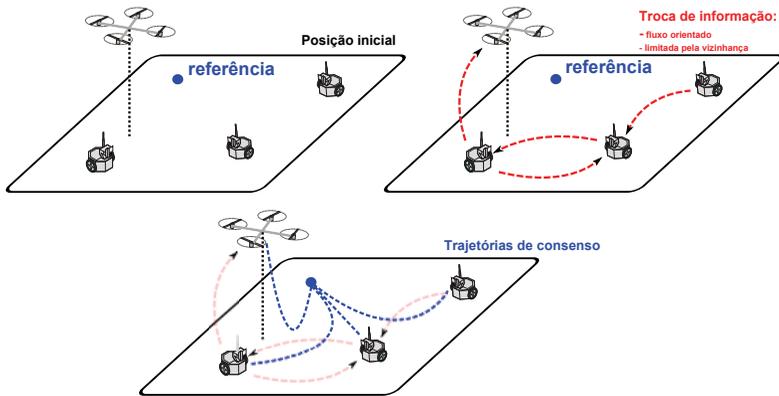


Figura 1.3: Ilustração do problema em que a comunicação entre os veículos tem fluxo orientado e é limitada à vizinhança do veículo. Deste modo, fica caracterizado que o conhecimento individual dos veículos sobre os outros integrantes é limitado.

Como de fato os veículos estão em constante movimento, algumas falhas vinculadas à comunicação naturalmente podem ocorrer,

inclusive com veículos vizinhos. Por exemplo, alguns canais de comunicação podem falhar de forma temporária devido a presença de um obstáculo entre dois veículos. Ou então, uma situação oposta pode ocorrer, na qual um canal de comunicação pode surgir quando dois veículos encontram-se dentro de um raio possível de comunicação.

Ainda, considera-se que os dispositivos de comunicação podem sofrer faltas temporárias devido ao mau funcionamento técnico. Desta forma, ao longo do trabalho é utilizada sempre uma configuração baseada em topologia variante no tempo de acordo com a distância entre os veículos e também, de forma complementar, admite-se uma probabilidade individual de falha temporária para cada canal de comunicação habilitado pela distância.

Portanto, considerando as limitações expostas anteriormente, o objetivo principal é que cada veículo seja capaz de calcular leis de controle descentralizadas considerando:

- i) *Conhecimento e troca de informação limitados, principalmente pela distância.*
- ii) *Fluxo de informação orientado.*
- iii) *Canais de comunicação sujeitos a faltas temporárias, que resulta em topologias variantes no tempo.*
- iv) *Informação do ponto de encontro limitada a parte do grupo.*

Desta forma, espera-se que todos os integrantes do grupo alcancem um consenso acerca do ponto de encontro mediante a especificação das trajetórias de consenso.

1.3 Motivação e trabalhos relacionados

A teoria de consenso relaciona-se historicamente com a ciência da computação, a qual foi uma das bases para o desenvolvimento da computação distribuída [8, 12]. No entanto, o foco desta tese de doutorado é a aplicação desta teoria no contexto de controle cooperativo para sistemas multi-veículos². Porém, não é exclusividade do problema

²Devido à ligação com a ciência da computação, vários trabalhos utilizam a concepção de agente, que no problema de *rendezvous* tem a mesma conotação que veículo. Ao longo deste trabalho procurar-se-á manter o termo original apresentado no trabalho citado.

de consenso o estudo de sistemas multi-veículos, para citar alguns, este estudo inclui controle da formação de robôs [13, 15, 37, 43], controle de cobertura de sensores [9, 10, 34], controle da conectividade de redes [1, 27, 76] e técnica de enxame [40, 83, 88].

Na Figura 1.4, é apresentada uma breve pesquisa sobre o número de artigos publicados, considerando congressos nacionais, internacionais e periódicos, nestes últimos 15 anos com o tema controle cooperativo como tema principal. De forma complementar, também procurou-se verificar quais destas publicações estão baseadas em abordagens relacionadas com o consenso para sistemas multi-veículos. Conforme pode-se constatar, há um aumento no interesse da academia nestes dois assuntos durante a última década. É interessante ponderar que também é crescente o acesso a publicações e a quantidade de congressos e periódicos especializados no tema. Evidentemente, este cenário só é possível graças ao interesse dos pesquisadores e aos novos desafios que decorrem dos trabalhos publicados.

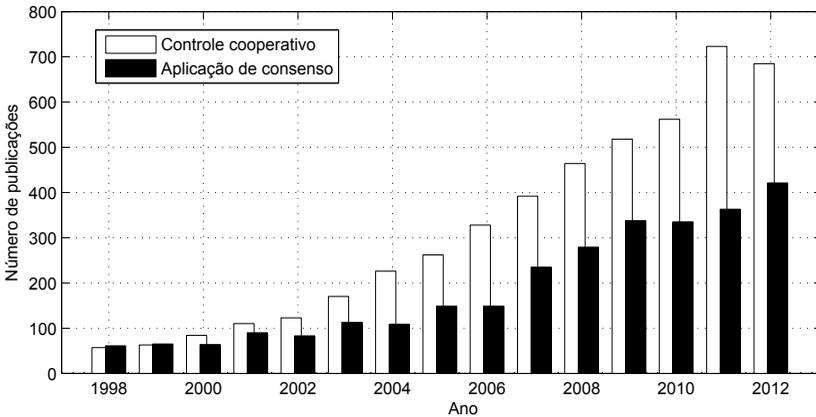


Figura 1.4: Publicações nos últimos 15 anos com ênfase em trabalhos em controle cooperativo e abordagem no contexto de consenso. A pesquisa foi realizada considerando conferências e periódicos com base no sistema de busca do *www.scholar.google.com*.

Aspectos teóricos sobre a definição do problema de consenso foram introduzidos em [51] e [50], nos quais incluem-se o fluxo orientado de informação, chaveamento de topologias, atraso na comunicação, e principalmente, o estabelecimento de relação entre a conectividade algébrica do grafo e a convergência de consenso. De forma complementar,

é notável a utilização de ferramentas baseadas em teoria dos grafos para os problemas de cooperação de grupos multi-veículos [2, 14, 20], bem como a consideração do problema de coordenação utilizando algoritmos clássicos de consenso com troca de informação limitada [62, 72, 73]

Dentre as várias opções para aplicação da teoria de consenso no contexto de controle cooperativo, está o problema de *rendezvous*, que pode ser considerado um problema básico de coordenação, no qual as trajetórias de cada veículo do grupo devem ser projetadas de forma descentralizada de acordo com o objetivo em comum do grupo, para que cada um destes alcance a posição desejada, [35, 36, 38, 42].

No cálculo das leis de controle para o consenso, uma grande diversidade de abordagens vêm sendo aplicadas, sobretudo estratégias baseadas na otimização de algum critério ou funcional, por exemplo: [28, 71] é baseado em formulações LMI; [6] utiliza-se da teoria de controle ótimo com formulação LQR; [26] aborda a parametrização dos pesos da matriz de comunicação como um problema de otimização convexa; em contraponto, [31] baseia-se em otimização MILP; [87] desenvolve o consenso sob a norma H_∞ para um sistema não linear baseado em modelo nebuloso; e ainda, o conceito de estabilidade de Lyapunov tem sido utilizado para garantir o consenso [84, 89]. E para finalizar, também pode-se abordar o problema de consenso desde o contexto da inteligência artificial, como [24], em que um controle robusto é desenvolvido baseado em redes neurais.

Neste sentido, este trabalho de tese baseia-se também na otimização de critérios para calcular as trajetórias de consenso, no caso, a teoria de controle preditivo, [16, 22, 32, 53, 54]. Com abordagem baseada no controle preditivo, critérios como erro de seguimento, energia dos estados e esforço de controle têm seus índices de avaliação maximizados para um melhor desempenho refletido na trajetória de consenso.

Em tarefas de coordenação, tanto o fluxo da informação como a troca de informação são fatores chaves para o sucesso na cooperação entre os integrantes do grupo. Os dispositivos de comunicação instalados nos veículos naturalmente têm limitação no alcance, tanto para transmissão como recebimento de mensagens, o que obriga os veículos manterem uma distância mínima para comunicação entre os mesmos.

Há também outros fatores importantes relacionados com a partilha de informação, por exemplo, falhas nos canais de comunicação podem acontecer por consequência da alta demanda de dados no canal, ou pelas faltas pontuais e passageiras devido à presença de obstáculos no ambiente, ou ainda, em razão da incidência de falhas temporárias no dispositivos de comunicação.

De acordo com o exposto no parágrafo anterior, é de se esperar que a topologia da rede, e por conseguinte a conectividade desta, mude durante a realização da tarefa, dado que os veículos estão em movimento. Em se tratando de partilha de informação é preciso que os veículos respeitem alguns requisitos de conectividade para que a informação seja distribuída aos veículos, e efetivamente, ocorra uma troca de informação entre os veículos.

Desponta a necessidade de projetar leis de controle que além de garantir as trajetórias de consenso, também garantam a conectividade entre os veículos, o que está diretamente ligado à convergência das trajetórias de consenso. À primeira vista, uma estratégia natural é manter uma condição de conectividade, admitindo que é uma condição já existente na topologia da rede. Ou seja, a ideia principal aqui é garantir a cada instante uma comunicação que inicialmente apresentasse como conectada, e portanto, suficiente para obtenção do consenso entre os veículos.

O problema de conectividade entre veículos, ou agentes, para os problemas de coordenação tem sido abordado sob diferentes óticas. Para citar algumas, em [41, 45] é aplicada uma saturação nas entradas de controle no sentido de manter veículos vizinhos em determinados círculos de vizinhança. Alguns algoritmos baseiam-se em aumentar a conectividade algébrica, a qual está associada com os autovalores da matriz laplaciana [21, 27]. Alguns trabalhos também exploram um abordagem centralizada, como [85], em que uma estratégia de malha aberta garante a conectividade do grupo, ou [86], que utiliza uma abordagem de campos potenciais baseada nos autovalores da matriz laplaciana para medir a conectividade.

Entretanto, de acordo com as aplicações, falhas de comunicação podem ocorrer enquanto os veículos estão em movimento devido a obstáculos no terreno, faltas nos dispositivos ou perda de pacotes. Estas faltas dificultam a garantia de estabilidade, e constata-se como principal desvantagem dos algoritmos existentes justamente este fato, já que os mesmos são aplicados em situações em que a comunicação apenas é limitada pela distância, desprezando situações em que não há total confiabilidade nos canais de comunicação [18, 57].

A questão que surge é como projetar leis de controle que garantam conectividade e que lidem com a presença de falhas na comunicação. A abordagem proposta aqui é desenvolver uma restrição de conectividade para ser adicionada ao problema de otimização que seja adaptativa conforme a posição entre os veículos vizinhos. A ideia principal é garantir que uma vez criado um canal de comunicação entre

dois veículos, a relação de vizinhança será mantida durante toda a tarefa mediante uma métrica de distância entre os veículos vizinhos. Caso ocorram falhas de comunicação, as últimas informações acerca dos estados vizinhos são mantidas e utilizadas até o reestabelecimento da comunicação.

Como de fato os veículos estão em movimento conforme desenvolvimento da tarefa, a topologia é variante no tempo, uma vez que a comunicação entre os veículos é diretamente proporcional à distância entre os mesmos. Além deste aspecto de mobilidade, citam-se outros fatores que conduzem a ideia de topologia variante no tempo e por isso, são abordados no cálculo da lei de controle: perda de pacote devido a comunicação sem fio e faltas temporárias nos dispositivos de comunicação.

Admitindo que uma vez caracterizada a vizinhança entre dois veículos, esta será mantida durante toda a tarefa, surge outro problema relacionado a partilha da informação. Mesmo estando a uma distância passível de comunicação, existe a possibilidade de perda de pacote devido a comunicação sem fio. Na troca de mensagens utilizando comunicação RF é particularmente difícil alcançar pontualidade devido à exposição do meio e interfaces de comunicação instaladas em cada veículo. Por este motivo, acrescenta-se à estratégia de controle cooperativo baseado em consenso um protocolo de comunicação, com o qual é possível melhorar a pontualidade na troca periódica de informação, minimizando a possibilidade de perda de pacotes devido principalmente às colisões entre as mensagens [52, 69]. Desta forma, avalia-se o impacto que este protocolo pode causar na convergência do problema de consenso.

1.4 Proposta e contribuições

Motivada pelos assuntos ainda abertos para discussão direcionados para a coordenação de sistemas multi-veículos, esta tese tem como objetivo investigar novas condições relacionadas com o consenso de referência associado ao problema de *rendezvous*, o que é sintetizado no objetivo (1.1).

Objetivo 1.1 *O objetivo primário desta tese é desenvolver uma estratégia de controle cooperativo descentralizada baseada em consenso para resolver o problema de rendezvous em um grupo multi-veículo.*

Ao longo desta tese, na proposta de estratégia para cooperação entre os veículos são utilizados os conceitos de controle preditivo ba-

seado em janela deslizante. Com isso, no projeto das trajetórias de consenso é possível maximizar o desempenho de requisitos de resposta, obtendo uma convergência mais rápida para o ponto de *rendezvous*.

Na estrutura de controle os veículos têm conhecimento e troca de informação limitados, o que aproxima o cenário de simulação de casos práticos. Neste sentido, o fluxo da informação é sempre orientado, os veículos têm comunicação limitada pela distância, os canais de comunicação estão sujeitos a faltas temporárias com origem diversa (desde faltas nos dispositivos de comunicação até perdas de pacote) e ainda, a informação acerca do ponto de encontro é limitada a parte do grupo.

Embora a tarefa básica proposta nesta tese seja o problema de *rendezvous*, de uma maneira bastante direta (manipulação da função custo para adicionar requisito de velocidade, forças de repulsão ou distância mínima entre os veículos), é possível adaptar a mesma estratégia de cooperação para aplicação em outras tarefas de coordenação, como por exemplo, controle de formação e técnicas de enxame.

A estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para o problema de *rendezvous* permite que seja utilizado um controle local de fácil implementação dado que o resultado sempre gera trajetórias de consenso factíveis. Os resultados de simulação são utilizados para ilustrar a efetividade da estratégia de cooperação, assim como as extensões, ambos baseados em consenso, nos quais procuram-se explorar diferentes cenários para a tarefa de *rendezvous*.

1.4.1 Contribuições

A seguir são enumeradas as contribuições decorrentes do desenvolvimento deste trabalho de doutorado:

i) *Formulação de estratégia de controle cooperativo descentralizado para geração das trajetórias de consenso, em que se considera:*

- *conhecimento e troca de informação limitados, principalmente pela distância.*
- *fluxo de informação orientado.*
- *canais de comunicação sujeitos a faltas temporárias, que resulta em topologias variantes no tempo.*
- *informação do ponto de encontro limitada a parte do grupo.*

ii) *Garantia de conectividade (relação de vizinhança) entre dois veículos, que resulta em uma formulação de trajetórias de consenso tolerante*

a faltas temporárias nos dispositivos de comunicação.

iii) *Extensão da estratégia de controle cooperativo para abordar o problema da otimização do ângulo de sensoriamento em relação ao ponto de encontro e a formação sobre o ponto de rendezvous, que a priori é desconhecido.*

iv) *Aplicação de protocolo de comunicação para re-sincronização na troca de mensagens para fazer frente à perda de pacotes devido à colisão e exposição na comunicação sem fio.*

v) *Estudo sobre a convergência de consenso para o problema de rendezvous vinculada às ocorrências de colisões de mensagens durante a partilha da informação.*

1.5 Estrutura do texto

A tese está organizada por capítulos. A seguir uma breve descrição geral sobre cada um destes capítulos é apresentada:

- **Capítulo 2:** Apresentam-se as principais características da teoria de consenso, a qual é basicamente caracterizada pela comunicação e partilha da informação entre os integrantes de um grupo. De forma complementar, alguns aspectos da teoria dos grafos são discutidos, principalmente os relacionados com a conectividade dos grafos, aspectos estes que serão bastante importantes para sequência do desenvolvimento das estratégias de controle baseadas em consenso.
- **Capítulo 3:** Uma estratégia de controle cooperativo baseada em consenso para o problema de *rendezvous* é desenvolvida. Como resultado, são projetadas leis de controle descentralizadas para que cada veículo determine sua trajetória de consenso até o ponto de encontro. Para tal, utiliza-se a teoria de controle preditivo baseado em janela deslizante, o que permite a inclusão de requisitos de resposta sem comprometer o caráter de cooperação entre os veículos do grupo. Resultados de simulação são mostrados para analisar o desempenho da estratégia.
- **Capítulo 4:** À estratégia de controle cooperativo para a geração de trajetórias de consenso são adicionadas soluções para enfrentar problemas de comunicação e complementação de objetivos. Desse

modo, adiciona-se uma restrição de conectividade adaptativa, na qual a principal ideia é manter a relação de vizinhança entre dois veículos por toda a tarefa para fazer frente a faltas temporárias nos dispositivos de comunicação. Embora a tarefa básica proposta nesta tese seja o problema de *rendezvous*, outros objetivos são explorados. Assim, duas abordagens que complementam o problema de *rendezvous* são adicionadas à proposta inicial (otimização do ângulo de sensoriamento dos veículos de acordo com o ponto de encontro e formação de cobertura sobre o ponto de referência).

- **Capítulo 5:** Admitindo que a relação de vizinhança entre dois veículos será mantida durante toda a tarefa, surge outro problema relacionado a partilha da informação. Ainda que dois veículos quaisquer estejam a uma distância passível de comunicação, existe a possibilidade de perda de pacote devido a problemas inerentes à comunicação sem fio. Na troca de mensagens utilizando comunicação radio-frequência é particularmente difícil alcançar pontualidade devido à exposição do meio e interfaces de comunicação instaladas em cada veículo. Por este motivo, acrescenta-se à estratégia de controle cooperativo baseado em consenso um protocolo de comunicação para melhorar a pontualidade na troca periódica de informação. Desta forma, pretende-se minimizar a possibilidade de perda de pacotes como consequência das colisões entre as mensagens. Como resultado, avalia-se o impacto que este protocolo pode causar na convergência de consenso para o problema de *rendezvous* mediante simulações numéricas.
- **Capítulo 6:** No capítulo é apresentada uma discussão final sobre os resultados obtidos com a tese, destacando novamente os objetivos que nortearam o trabalho e as principais contribuições da tese. Por fim, algumas perspectivas para trabalhos futuros são apontadas.

1.5.1 Lista de publicações

Como atividade decorrente da tese de doutorado, os seguintes artigos técnico científicos foram desenvolvidos e publicados no ambiente acadêmico:

[1] ORDOÑEZ, B.; OLIVEIRA, L.; MORENO, U. F.; CERQUEIRA, J.; ALMEIDA, L. (2012). Utilização de protocolo de comunicação para sin-

cronização das mensagens para controle cooperativo baseado em consenso. *Congresso Brasileiro de Automática*, Campina Grande, Brasil.

[2] ORDOÑEZ, B.; MORENO, U. F.; CERQUEIRA, J.; ALMEIDA, L. (2012) Generation of Trajectories Using Predictive Control for Tracking Consensus with Sensing. *Procedia Computer Science*, v. 10, p. 1094-1099.

[3] ORDOÑEZ, B.; MORENO, U. F.; CERQUEIRA, J.; ALMEIDA, L. (2013) Generation of Trajectories Using Predictive Control for Tracking Consensus with Sensing and Connectivity Constraints. *Studies in computational intelligence*, Springer.

[4] ORDOÑEZ, B.; MORENO, U. F.; CERQUEIRA, J.; ALMEIDA, L. (2013) Generation of Trajectories Using Predictive Control for Tracking Consensus with Adaptive Connectivity Constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*. (submetido).

Capítulo 2

Teoria de consenso em grupo multi-veículo

No contexto de controle cooperativo, consenso pode ser definido como o compromisso entre os integrantes de um grupo acerca de um objetivo em comum. Para modelar este ponto de vista comum e individual utiliza-se uma variável definida como *estado da informação*, e ainda, determinam-se as variáveis de coordenação sobre as quais o grupo procura obter consenso, as quais podem ser posição e velocidade de um veículo, ou ângulos de orientação, ou então outra qualquer variável de interesse conforme o cenário de aplicação. Desta forma, pode-se utilizar o *estado da informação* para representar uma abstração destas variáveis de coordenação, tais como localização ou tempo de encontro [63].

A teoria de consenso tem sido aplicada em redes de veículos autônomos e também atraído atenção de grupos de pesquisa na comunidade acadêmica devido ao seu caráter teórico que possibilita unificar vários problemas. Para citar alguns, tem-se controle de formação, *rendezvous*, redes de sensores móveis, etc. As características fundamentais relacionadas com a teoria de consenso podem ser encontradas em [50, 51, 62].

Pela necessidade de aplicação, o projeto de leis de controle para consenso tem um caráter primordial de ser distribuído. Somente admite-se interação entre veículos vizinhos, o que implica em atualizações do valor de cada *estado da informação* baseadas somente nos *estados da informação* localizados dentro da vizinhança.

Em tarefas de coordenação tanto o fluxo de informação como o compartilhamento de informação são considerados dois fatores funda-

mentais. A seguir, é apresentado um relato geral a respeito da teoria dos grafos com as principais características destacadas, uma vez que estas têm papel fundamental no desenvolvimento do trabalho.

2.1 Preliminares em Teoria dos Grafos

O grafo orientado pode ser denominado por dígrafo, em que a principal característica é que se considera o fluxo da informação como unidirecional. Em um grupo multi-veículos com diferentes tipos de veículos é bastante comum a presença de veículos apenas com receptores, e outros com transmissores, de acordo com a característica de cada veículo, e ainda, a intensidade de transmissão de cada veículo não é uniforme, o que depende da localização do veículo e das perdas de pacote de dados devido a ruídos ou interferência no sinal, justificando assim, a opção de trabalhar com dígrafos.

Seja um grafo orientado de ordem n representado por $G_n = (\nu_n, \varepsilon_n)$, considerando o conjunto de nós $\nu_n = \{v_1, \dots, v_n\}$ e o conjunto de arestas $\varepsilon_n \subseteq \nu_n \times \nu_n$, em que n é o número de veículos no grupo. Os nós pertencem a um conjunto finito definido por $\Gamma = 1, \dots, n$. As arestas do dígrafo G_n são denotadas por $e_{ij} = (v_i, v_j)$. O conjunto de vizinhos de um nó v_i é definido por $N_i = \{v_j \in \nu : (v_i, v_j) \in \varepsilon_n\}$ para $j = 1, \dots, n$.

Definição 2.1 (Caminho orientado) *Um caminho orientado é um dígrafo $G_n = (\nu_n, \varepsilon_n)$ na forma*

$$\nu_n = \{v_1, \dots, v_n\} \quad e \quad \varepsilon_n = \{(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{n-1}, v_n)\}$$

em que os nós são diferentes. Os nós v_1 e v_n são conectados por G_n mediante uma sequência orientada de arestas em ε_n . De forma mais geral, tem-se $(v_i, v_{i+1}) \in \varepsilon_n$, para qualquer $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

O número de arestas de um caminho orientado define o seu comprimento e um caminho orientado com comprimento q é denotado por G^q .

Definição 2.2 (Árvore orientada) *Uma árvore orientada τ_G é um dígrafo G_n conexo (existe um caminho orientado entre qualquer dois de seus nós $v_i \in \nu$ e $v_j \in \nu$ para $i, j = 1, \dots, n$) sem a ocorrência de ciclos (caminho com $q \geq 3$, em que o primeiro e o último nó coincidem, mas nenhum outro nó é repetido).*

Uma árvore orientada pode ser denominada enraizada, se a partir de um nó definido como raiz, pode-se traçar um caminho orientado para todos os outros nós do dígrafo.

Uma árvore de extensão orientada (do inglês, *spanning tree*) é o subconjunto de arestas de um dígrafo que forma uma árvore orientada contendo todos os nós. Desta forma, tem-se que $\tau_G = \{\nu_\tau, \varepsilon_\tau\}$ é uma árvore de extensão de G_n , se τ_G é uma árvore orientada e ainda $\nu_\tau = \nu$.

No caso dos dígrafos, a ocorrência de uma árvore de extensão orientada é uma condição mais fraca se comparada a condição de um dígrafo fortemente conectado, conforme a definição (2.3).

Definição 2.3 (Dígrafo fortemente conectado) *Um dígrafo G_n é dito fortemente conectado se a partir de qualquer ν_i há um caminho orientado para todos os outros nós de G_n .*

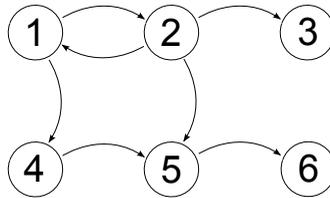


Figura 2.1: Topologia de comunicação entre 6 veículos quaisquer. A seta indica o fluxo de orientação, assim sendo, uma seta que parte do nó i para j está indicando que o veículo j recebe informação do veículo i . Nota-se que o dígrafo contém 2 árvores de extensão com raízes nos nós 1 e 2, mas não é fortemente conectado, uma vez que, desde os nós 3, 4, 5 e 6 não há caminhos orientados passando por todos os outros nós.

Na Figura 2.1 é mostrado um exemplo para ilustrar a condição descrita anteriormente. Pode-se constatar a presença de mais de uma árvore de extensão, mas o grafo não é um dígrafo fortemente conectado. Ambos nós, 1 e 2, são raízes para uma árvore de extensão orientada, dado que há um fluxo para todos os outros nós da rede. Entretanto, o dígrafo não é fortemente conectado pois não há um caminho partindo dos nós 3, 4, 5 e 6 para os outros nós da rede.

Com a informação contida na topologia do sistema multi-veículo define-se a matriz de adjacência, e por conseguinte, a relação que existe entre os veículos, no que diz respeito a partilha da informação.

Definição 2.4 (Matriz de adjacência) *A matriz de adjacência $A =$*

$[a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ de um dígrafo com um conjunto de nós $\nu = \{v_1, \dots, v_n\}$ é definida tal que a_{ij} é positiva se $e_{ij} \in \varepsilon$, enquanto $a_{ij} = 0$ se $e_{ij} \notin \varepsilon$.

Por convenção, adota-se $a_{ii} = 0$ para todo $i \in \Gamma$, em que não se considera para fins de partilha de informação uma auto comunicação.

Definição 2.5 (Matriz Laplaciana) A matriz Laplaciana, $L = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$, é composta por l_{ij} elementos do grafo orientado, tal que $l_{ii} = \sum_{i \neq j} a_{ij}$ e $l_{ij} = -a_{ij}$ para todo $i \neq j$. Se $(j, i) \notin \varepsilon$, então $l_{ij} = -a_{ij} = 0$.

A matriz Laplaciana tem as seguintes propriedades:

- i) $l_{ij} \leq 0$, para $i \neq j$;
- ii) $\sum_{j=1}^n l_{ij} = 0$, para $i = 1, \dots, n$.

Da definição de L tem-se que é uma matriz diagonal dominante com todas as entradas não negativas. A seguir são apresentadas algumas propriedades associadas com a matriz Laplaciana destacadas em [48, 64]. Seja um dígrafo G_n tem-se:

i) A soma dos elementos em todas as linhas de L é igual a zero, e portanto, tem-se que 0 é sempre um autovalor de L associado ao autovetor $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$, com um vetor coluna de 1 com ordem $n \times 1$. Com isso, tem-se posto $\rho_n \leq n - 1$.

ii) Se G_n é fortemente conectado, então posto $\rho_n(G_n) = n - 1$.

iii) A matriz Laplaciana L tem um autovalor 0 único e todos os outros autovalores estão no semi plano direito aberto se e somente se G_n tem uma árvore de extensão orientada.

iv) Se G_n tem $c \geq 1$ componentes fortemente conectados, então o posto é $\rho_n(G_n) = n - c$.

2.2 Consenso em grupo multi-veículo

A ideia básica da teoria de consenso é impor dinâmicas similares sobre os *estados da informação* de cada veículo para que àqueles converjam para um valor comum, que pode ser determinado como objetivo do grupo.

O termo *estado da informação* representa uma concretização da variável de coordenação para o grupo de robôs. Por exemplo, pode significar o centro de uma formação de robôs, o tempo de encontro em determinado local, o comprimento de um perímetro monitorado, ou ângulo de orientação do movimento para um grupo de veículos.

Uma forma básica de implementar a ideia de consenso definida anteriormente é mostrada no equacionamento a seguir [20, 48, 50, 63]:

$$\dot{\xi}_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)), \quad \text{para } i = 1, \dots, n. \quad (2.1)$$

em que, $a_{ij}(t)$ é a entrada da matriz de adjacência, $\xi_i \in \mathfrak{R}^m$ é o *estado da informação* e t é o tempo. A consequência direta da eq. (2.1) é que o *estado da informação* $\xi_i(t)$ do veículo i é direcionado no sentido do *estado da informação* dos seus vizinhos.

A equação (2.1) pode ser escrita na forma matricial:

$$\dot{\xi}(t) = -L_n(t) \xi(t) \quad (2.2)$$

na qual, $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T$ é o vetor com os *estados da informação* e $L_n = [l_{ij}] \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ é a matriz Laplaciana associada ao dígrafo G_n .

Definição 2.6 (Consenso médio) *O consenso para uma rede multi-veículo (2.1) e (2.2) é alcançado se para qualquer estado inicial $\xi_i(0)$,*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\xi_i(t) - \xi_j(t)| = 0,$$

para $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n$.

Com base na definição 2.6, surge uma questão importante que é justamente determinar em que condições os veículos convergem para o valor comum de consenso. Neste sentido, em [48, 63], foram apresentados resultados que podem ser sumarizados no seguinte teorema:

Teorema 2.1 *Se G_n é um dígrafo, as eq. (2.1) e (2.2) obtêm consenso se e somente se G_n tem uma árvore de extensão orientada.*

2.2.1 Consenso com dinâmica integradora de 1ª ordem

O *estado da informação* pode estar associado com diversas dinâmicas. De forma geral, quando é atrelado à informação pura utiliza-se

uma dinâmica de primeira ordem, ao contrário, por exemplo, quando é associado a dinâmica de um veículo, neste caso, o *estado da informação* pode ser modelado por uma dinâmica de segunda ordem já direcionado com a dinâmica do veículo.

Desta forma, nesta tese é considerado o *estado da informação* com dinâmica de primeira ordem representado por

$$\dot{\xi}_i(t) = u_i(t), \quad \text{para } i = 1, \dots, n. \quad (2.3)$$

em que, $\xi_i \in \mathfrak{R}^n$ denota o *estado da informação* associado ao veículo i e $u_i \in \mathfrak{R}^n$ é o sinal de entrada de controle do veículo. Desta forma, cada veículo i está relacionado a um nó do dígrafo G_n com as respectivas dinâmicas expressas acima.

O protocolo de consenso mais básico [20, 25, 51, 62] pode ser definido como:

$$u_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)), \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

no qual $a_{ij}(t)$ é a entrada da matriz de adjacência $A_n \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ associada com o dígrafo G_n e $\xi \in \mathfrak{R}^m$ é o *estado da informação*.

Como esperado, a consequência direta da eq. (2.4) é que o *estado da informação* $\xi_i(t)$ do veículo i é direcionado no sentido do *estado da informação* dos seus vizinhos. De trabalhos anteriores [48, 64], o equilíbrio de consenso é a média ponderada de todos os estados iniciais da informação. Evidentemente, este valor de equilíbrio depende da topologia de interação e dos pesos dos valores a_{ij} , e portanto, *a priori* é um valor desconhecido. Na Figura 2.2 é mostrada a equivalência entre a topologia da rede com um diagrama de blocos explicitando a importância da matriz Laplaciana.

A dinâmica do *estado da informação* (2.3) pode ser implementada usando o modelo discreto dado por:

$$\xi_i[k+1] = \xi_i[k] + \Delta_k u_i[k], \quad \text{para } i = 1, \dots, n, \quad (2.5)$$

em que Δ_k é o período de amostragem, e $\xi_i[k]$ e $u_i[k]$ são respectivamente o *estado da informação* e entrada de controle para o veículo i no intervalo de tempo k .

A comunicação entre os veículos ocorre em intervalos de tempo mediante uma sequência de amostragem $\{t_k|_{k=1}^{\infty}\}$ que satisfaz a seguinte condição: $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots, \lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \infty$.

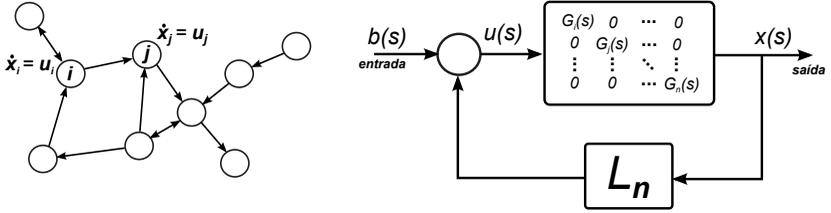


Figura 2.2: Duas formas equivalentes de consenso. Na esquerda, nós com dinâmicas integradoras, em que j recebe informação de i se existe um *link* conectando os dois nós. Na direita, o diagrama de blocos de uma rede com as dinâmicas interconectadas com idênticas funções de transferência $G(s) = 1/s$. Para o consenso básico tem-se $b(s) = 0$.

Desta forma, adota-se o seguinte modelo de dígrafo variante no tempo $G_n(t) = (\nu_n, \varepsilon_n(t))$. O conjunto ν_n de nós é fixo durante toda a tarefa, porém, o conjunto de arestas do dígrafo $\varepsilon_n(t)$ é variante no tempo, em que a cada instante de tempo t , canais de comunicação associados às arestas podem ser habilitados ou desabilitados.

No sistema multi-veículo, apenas há possibilidade de interação entre determinado veículo i e sua vizinhança, para que o mesmo possa calcular a lei de controle e conseqüente trajetória de consenso. Surge então a necessidade de definir uma relação de vizinhança entre os veículos.

Definição 2.7 (Vizinhança) *Seja r_{com}^i o raio de comunicação do veículo i . Se*

$$\|p_i^{(x,y)}[k+1] - p_j^{(x,y)}[k+1]\|_2 \leq r_{com}^i$$

em que p_i e p_j são as posições dos veículos nos eixos coordenados X e Y , então é estabelecida uma condição de vizinhança entre os veículos i e j .

2.2.2 Exemplo ilustrativo

Neste exemplo pretende-se investigar e aclarar o panorama sobre as condições em que é possível obter convergência para o consenso e como a configuração da topologia de comunicação pode influenciar o resultado final de consenso, o que de fato está relacionado à matriz Laplaciana. No exemplo são utilizadas as topologias mostradas na Figura 2.3 para aplicação do protocolo de consenso mostrado na eq. (2.4).

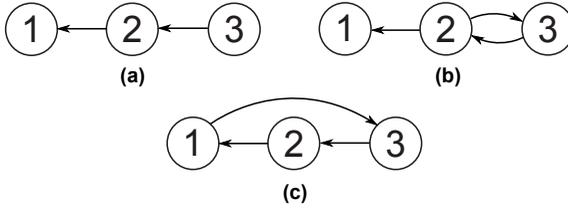


Figura 2.3: Três tipos de topologias para comunicação entre três veículos com fluxo orientado de informação. Ao contrário das topologias (a) e (b), o dígrafo em (c) é fortemente conectado, já que há um caminho orientado partindo de cada um dos três veículos até todos os outros integrantes da rede.

Para uma topologia de comunicação associada a um dígrafo fortemente conectado, conforme discutido na seção sobre teoria dos grafos, tem-se que *zero* é sempre um autovalor de L . Com isso, o vetor coluna $\mathbf{1}$ é um autovetor associado ao autovalor *zero*, o que implica que o espaço gerado de $\mathbf{1}$ está contido no espaço gerado de L . Desta forma, é importante estabelecer para quais condições assegura-se que o autovalor *zero* ocorra uma única vez no espectro de L , já que desta forma, a convergência de consenso pode ser garantida pelo Teorema 2.1.

Para um dígrafo fortemente conectado, tem-se que *zero* é um autovalor não-repetido de L , porém, esta condição não é necessária para a ocorrência deste autovalor não-repetido. Por exemplo, sejam as seguintes matrizes Laplacianas relacionadas às topologias mostradas na Figura 2.3.

$$L_{(a)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1,5 & -1,5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_{(b)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1,5 & -1,5 \\ 0 & -2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$L_{(c)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1,5 & -1,5 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Embora todas as matrizes Laplacianas mostradas tenham autovalores *zero* não-repetidos, as topologias mostradas em (a) e (b) na Figura 2.3 não são fortemente conectadas. A característica comum

entre $L_{(a)}$, $L_{(b)}$ e $L_{(c)}$ é que todas elas têm uma árvore de extensão orientada.

De fato, *zero* é um autovalor não-repetido de L se e somente se o respectivo dígrafo contém uma árvore de extensão orientada [7, 39, 65]. Este resultado implica que é possível alcançar consenso se e somente se a topologia orientada de comunicação contém uma árvore de extensão orientada (de forma similar, quando o fluxo de informação na topologia de comunicação não é orientado, basta apenas que o grafo seja conectado).

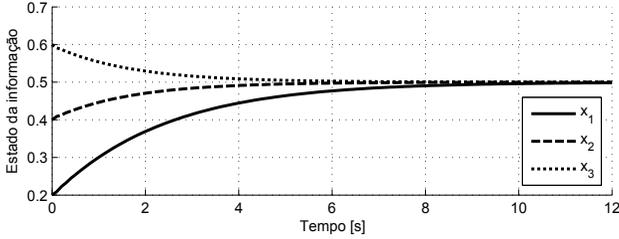
Quando a topologia de comunicação é representada por um dígrafo com uma árvore de extensão orientada, [65], o estado de equilíbrio é uma média ponderada das condições iniciais dos *estados da informação* da rede. Entretanto, alguns dos componentes associados ao autovetor coluna **1** e o autovalor não-repetido *zero* podem ser nulos, implicando que os *estados da informação* de alguns veículos não contribuem com o ponto de equilíbrio de consenso.

Seja o exemplo ilustrativo mostrado na Figura 2.3 com as respectivas matrizes Laplacianas. Admite-se que a topologia de comunicação é fixa durante toda a tarefa.

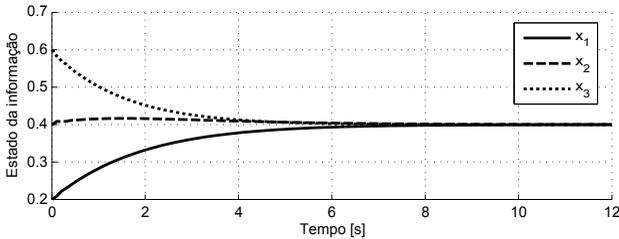
Considerando as matrizes Laplacianas, pode-se verificar que para $L_{(a)}$, as condições iniciais dos *estados da informação* dos veículos 1 e 2 não afetam o equilíbrio, de fato, o veículo 3 tem comportamento de um líder virtual, conforme será detalhado na próxima seção. Em $L_{(b)}$, a condição inicial do *estado da informação* do veículo 1 não afeta o equilíbrio. Entretanto, em $L_{(c)}$, todas as condições iniciais dos *estados da informação* dos veículos contribuem com o equilíbrio de consenso.

Observando os dígrafos mostrados na Figura 2.3, pode-se perceber que para $L_{(a)}$, somente o veículo 3 é capaz de enviar a sua informação para todos os outros veículos integrantes do grupo, seja de forma direta ou indireta. Similarmente, para $L_{(b)}$, ambos veículos 2 e 3 podem repassar suas respectivas informações para todo o grupo, enquanto que para $L_{(c)}$, todos os veículos podem repassar suas informações para todos os outros integrantes da equipe. Para ilustrar estas ideias, na Figura 2.4 são mostrados os comportamentos dos *estados da informação* para as situações (b) e (c).

Portanto, quando a topologia de comunicação é fortemente conectada, todas as condições iniciais dos *estados da informação* contribuem com o equilíbrio de consenso. Em um caso especial, o equilíbrio de consenso pode ser a média ponderada das condições iniciais de todos os *estados da informação*, o que caracteriza o *consenso médio*. Se a topologia de comunicação é fortemente conectada e também balanceada,



(a) Dinâmicas dos *estados da informação* para consenso utilizando a topologia (b) mostrada na Figura 2.3.



(b) Dinâmicas dos *estados da informação* para consenso utilizando a topologia (c) mostrada na Figura 2.3.

Figura 2.4: Dinâmicas dos *estados da informação* para consenso de três veículos. Os estados iniciais dos veículos são $[0, 2; 0, 4; 0, 6]$, respectivamente. Desde que a média dos estados iniciais é 0, 4, o consenso médio é alcançado em (b), em que a topologia é fortemente conectada e balanceada, o que não ocorre em (a).

então $\mathbf{1}$ é o autovetor de L associado ao autovalor *zero* único. Como mostrado em [51], o consenso médio é alcançado se e somente se a topologia orientada de comunicação é fortemente conectada e balanceada.

Em contraste, quando a topologia orientada de comunicação contém uma árvore de extensão orientada, o equilíbrio de consenso é a média ponderada de todas as condições iniciais dos *estados da informação* que têm um caminho orientado para todos os outros veículos [65]. A condição de árvore de extensão orientada é menos restritiva do que a condição de fortemente conectada e balanceada. Entretanto, como mostrado acima, o equilíbrio de consenso é função somente das condições iniciais dos *estados da informação* dos veículos que têm um caminho orientado para todos os outros veículos do grupo.

2.2.3 Consenso de rastreamento

O objetivo do consenso de rastreamento é direcionar todos os *estados da informação*, referentes a cada veículo, do grupo para um estado de referência. Nos protocolos básicos de consenso, sabe-se que o valor de consenso está somente relacionado com a topologia da rede e de forma complementar, também com os pesos das entradas da matriz de adjacência a_{ij} , sendo portanto, um valor desconhecido *a priori*.

Entretanto, em algumas aplicações ou até mesmo situações particulares, pode ser desejável que o consenso sobre o *estado da informação* convirja para um valor pré definido. Como por exemplo, em operações de cooperação para *rendezvous*, na qual é preciso determinar uma localização de referência para busca/resgate ou busca/captura. Neste caso, a convergência deve incluir ambas situações de convergência, tanto para um valor acerca do objetivo comum do grupo como para um valor de referência.

Uma estratégia usual para abordar o consenso de referência é considerar um mesmo grupo de veículos com ordem n e um líder virtual, o qual é denominado pelo índice $n + 1$. O estado de referência é $\xi_{n+1} = \xi_r \in \mathfrak{R}^n$, em que ξ_r contém toda a informação relacionada com o local de referência.

Neste caso considera-se que o estado de referência ξ_r é constante, e o *estado da informação* é modelado com dinâmica de primeira ordem conforme equacionamento a seguir:

$$u_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(\xi_i - \xi_j) - a_{i(n+1)}(\xi_i - \xi_r) \quad (2.6)$$

no qual $\xi_i \in \mathfrak{R}^m$ é o *estado da informação* do veículo i e a_{ij} com $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n + 1$ é a entrada (i, j) da matriz de adjacência $A_{n+1} \in \mathfrak{R}^{n \times (n+1)}$.

Definição 2.8 (Consenso de referência) *O consenso de referência em um rede multi-veículo, (2.3) e (2.6), é alcançado se para qualquer estado inicial $\xi_i(0)$ com $i = 1, \dots, n$,*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\xi_i(t) - \xi_j(t)| = 0$$

e

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\xi_i(t) - \xi_r(t)| = 0$$

para $i, j = 1, \dots, n$.

Neste caso, o consenso inclui convergência tanto para um valor acerca do objetivo comum do grupo como para um valor de referência. O estado de referência ξ_r é conhecido por apenas parte do grupo, daí a importância de partilhar informação acerca dos *estados da informação* referentes a cada veículo.

Evidentemente, algumas modificações na representação do dígrafo são requeridas. O dígrafo $G_{n+1} = (\nu_{n+1}, \varepsilon_{n+1})$ é usado para modelar as interações entre todos os $n+1$ veículos. Seja $A_{n+1} \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ a matriz de adjacência associada com G_{n+1} , em que: (i) $a_{ij} > 0$ se $(j, i) \in \varepsilon_{n+1}$; (ii) $a_{i(n+1)} > 0$ se ξ_r , caso esta informação esteja disponível para o veículo i , para $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n$; (iii) $a_{(n+1)j} = 0$ para todo $j = 1, \dots, n+1$; e (iv) $a_{ii} = 0$ para todo $i = 1, \dots, n$.

A seguinte hipótese é uma convenção adotada ao longo de todo o trabalho:

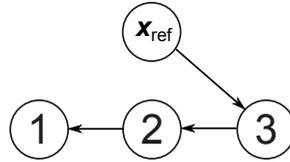
Hipótese 2.1 *Se o dígrafo G_{n+1} tem uma árvore de extensão orientada, o veículo $n+1$ (i.e., líder virtual) tem a informação do local de referência e mais, trata-se do veículo relacionado com o nó raiz da topologia da rede.*

A condição para que G_{n+1} tenha uma árvore de extensão orientada é que, no mínimo, o veículo $n+1$ tenha um caminho de forma orientada para todos os outros veículos de grupo. Esta é uma garantia para o sucesso do consenso de convergência. Nota-se que no caso dos dígrafos, (i.e., fluxo orientado) a existência da árvore de extensão orientada é uma condição mais fraca do que a condição de fortemente conectada.

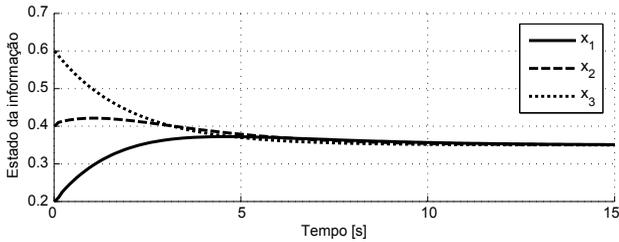
No exemplo, adiciona-se um nó virtual com a informação da referência, x_{ref} na Figura 2.5(a), conectado ao nó 3, o que caracteriza uma árvore de extensão a partir do nó raiz, que é justamente o nó x_{ref} , satisfazendo a condição para o consenso, conforme pode-se ver na Figura 2.5(b).

2.3 Resumo

Neste capítulo foram abordadas as características principais sobre a teoria de consenso para sistemas multi-veículos. Parte importante no desenvolvimento da tese, a teoria de grafos com seus principais aspectos foi apresentada, sempre com uma visão direcionada ao problema de consenso, com alguns exemplos ilustrativos mostrados para uma melhor captação dos aspectos teóricos mostrados no capítulo.



(a) Topologia modificada com estado de referência.



(b) Dinâmicas dos estados da informação para consenso de rastreamento utilizando a topologia acima.

Figura 2.5: Dinâmica dos *estados da informação* para o consenso de rastreamento para três veículos conforme topologia (a) modificada mostrada na Figura 2.3.

O objetivo do próximo capítulo é desenvolver um protocolo para projetar leis de controle descentralizadas e individuais que garantam trajetórias de consenso factíveis para todos os veículos do grupo conforme requisitos de resposta, considerando a dificuldade de que a referência de consenso é conhecida apenas por parte do grupo.

Capítulo 3

Controle cooperativo para geração de trajetórias de consenso

A estratégia de controle cooperativo para grupo multi-veículos proposta neste capítulo está fundamentada em abordagem baseada nos conceitos de controle preditivo com janela deslizante. Os mesmos princípios de cooperação apresentados no capítulo 2 são utilizados na construção da estratégia de controle, e também servem como parâmetros para garantir o consenso para o grupo de veículos.

O desenvolvimento de estratégias de controle cooperativo para um grupo multi-veículos com abordagem baseada em consenso é bastante dificultado pela presença de informação limitada, devido principalmente a faltas e eventos imprevisíveis sobre os dispositivos de comunicação dos veículos, o que dificulta, e por conseguinte limita a partilha da informação entre os integrantes da equipe.

Neste sentido foram desenvolvidos trabalhos nos quais a cooperação é garantida em redes compostas por veículos com acesso a informação de forma limitada [47, 51, 64], que em um primeiro momento se reflete no uso de grafos com fluxo orientado de informação (dígrafos) e, para o caso de consenso de referência, a localização final de *rendezvous* é conhecida apenas por parte dos integrantes do grupo de veículos.

Em contraste aos trabalhos focados principalmente na etapa de análise sobre as propriedades de consenso [28, 47, 51, 64], a proposta de controle cooperativo utilizando teoria de consenso é baseada na otimi-

zação de um funcional para a síntese das trajetórias de consenso visando maximizar o desempenho sobre os requisitos de resposta em sintonia com a incorporação da estrutura de comunicação entre os veículos.

Como resultado, tem-se uma formulação em que os veículos atualizam suas trajetórias de consenso mediante conhecimento e troca de informação limitados. Neste contexto, o problema de *rendezvous* é abordado considerando fluxo da informação orientado, que os veículos têm comunicação limitada pela distância, e a topologia de comunicação é variante no tempo, posto que a habilitação dos canais de comunicação depende da distância entre os veículos. Admite-se ainda, que os canais de comunicação estão sujeitos a faltas temporárias com origem diversa e que a informação acerca do ponto de encontro é limitada a parte do grupo.

3.1 Preliminares sobre o controle preditivo

Uma breve introdução ao controle preditivo é apresentada com intuito de descrever suas principais características, entre as quais, pode-se destacar o princípio de janela deslizante¹, cujo conceito é fundamental para implementar com sucesso este tipo de estratégia em problemas de consenso.

O controle preditivo não está associado e nem designa uma estratégia de controle específica, deste modo, pode-se dizer que está relacionado com uma ampla quantidade de métodos de controle que utilizam um modelo do sistema para obter uma lei de controle mediante a minimização de uma função objetivo [5].

De forma geral, pode-se afirmar que os algoritmos de controle preditivo, independentemente do método de controle a ser utilizado, possuem os seguintes elementos em comum:

- Modelo do sistema para predição.
- Função objetivo, ou apenas funcional.
- Método para calcular a lei de controle.

Evidencia-se que justamente a grande variedade de opções para definir um modelo de predição, função objetivo e obtenção da lei de

¹Em inglês, principalmente nos trabalhos dentro do contexto de controle cooperativo e consenso, a referência à estratégia é majoritariamente feita pelo termo *receding horizon control*, não descartando-se o termo *model predictive control*

controle, é que origina a grande quantidade de versões para os controladores preditivos.

Pode-se apontar que o modelo para a predição é certamente um elemento fundamental para o sucesso da estratégia, uma vez que o mesmo deve ser capaz de representar adequadamente a dinâmica do processo para que se possa proceder o cálculo das predições. Evidentemente, no contexto de controle de processos industriais o conhecimento do planta nem sempre está ao alcance do projetista, no entanto, pela natureza de aplicação deste trabalho, a dinâmica do processo, ou seja, do *estado da informação* é conhecida e definida como uma dinâmica integradora de primeira ordem. O principal obstáculo está no conhecimento dos estados vizinhos futuros e será discutido adiante.

As funções custo têm impacto direto no cálculo da lei de controle, desta forma, deve conter os termos que permitam calcular a lei de controle de acordo com as preferências de projeto e cenário de aplicação. Em geral, considera-se como objetivo minimizar o erro de referência de modo a minimizar o esforço de controle.

Para calcular a lei de controle deve-se obter das etapas anteriores os estados preditos para definição da função objetivo, a qual deve ser minimizada considerando as possíveis restrições do problema. Como resultado, tem-se uma sequência de ações de controle que se aplicados, conferem ao sistema o resultado proposto nos objetivos do funcional.

No entanto, uma das características sobressalentes do controle preditivo é a possibilidade de empregar o conceito da janela deslizante. Ainda que o resultado do processo de otimização gere toda a sequência de controles futuros, a cada período de amostragem, somente a primeira ação de controle é aplicada, descartando as outras ações futuras. A cada instante renova-se o vetor de controles futuros com informações novas obtidas a partir do sistema real.

Todas estas três etapas são sumarizadas a seguir, caracterizando a metodologia do controlador preditivo baseado em janela deslizante, as quais podem ser relacionadas à Figura 3.1:

- A cada instante, mediante o uso do modelo do sistema, os estados futuros são preditos para o horizonte de predição N_p . A predição dos estados $\xi[k+k_i|k]$ para $k_i = 1, \dots, N_p$ depende dos valores no instante t (estados e controles passados) e dos sinais de controle futuros $u[k+k_i|k]$ para $k_i = 1, \dots, N_p-1$, os quais serão calculados.
- A sequência de controles futuros é calculada mediante a otimização de um critério de acordo com a aplicação, em geral, os controles futuros visam minimizar uma função objetivo que considera

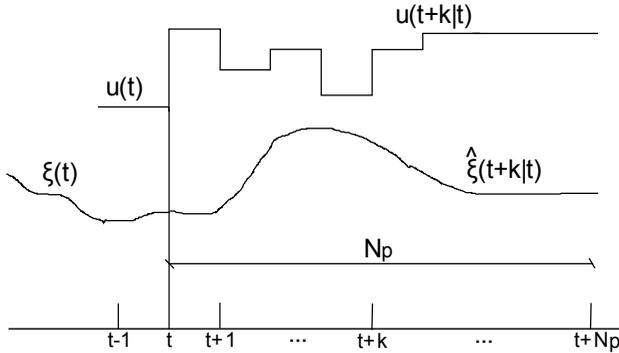


Figura 3.1: Estratégia do controle preditivo baseado em janela deslizante com horizonte de predição N_p .

erro de rastreamento, esforço de controle e energia dos estados.

- O sinal de controle $u[k]$ é aplicado no processo e todos os outros sinais de controle da sequência de controles futuros são rejeitados, dado que no próximo instante amostral, o algoritmo é repetido para calcular o novo controle $u[k+1|k+1]$, ou seja, a cada iteração uma janela deslizante com horizonte N_p é utilizada para predição dos estados.

3.2 Leis de controle para geração de trajetórias de consenso

Nesta seção é apresentada a proposta de uma estratégia de controle cooperativo descentralizada e individual, de forma que cada veículo integrante da equipe possa calcular a própria trajetória de consenso para solucionar o problema de *rendezvous*. Para tal, a troca de informação está limitada à uma relação entre veículos vizinhos. É importante ressaltar que as trajetórias de consenso relacionadas ao *estado da informação* estão sempre associadas às posições dos veículos nos eixos x e y , em que denota-se por $\xi_i^{(x,y)}$ para $i = 1, \dots, n$.

Na estratégia para cooperação entre os veículos são utilizados os conceitos de controle preditivo baseado em janela deslizante anteriormente discutidos. Com isso, pode-se explorar a etapa de síntese de leis de controle que geram as trajetórias de consenso maximizando o desem-

penho de requisitos de resposta, pretendendo assim, uma convergência mais rápida para o ponto de *rendezvous*.

3.2.1 Definição da função objetivo

É interessante que a função objetivo contenha termos que uma vez minimizados, satisfaçam os objetivos da tarefa, visto que o resultado deste processo de otimização origina o vetor de decisão composto por uma sequência de controles futuros ótimos. O desafio passa pela formulação de um funcional J que contenha as características de controle cooperativo, principalmente no que se refere à troca de informação, de forma a complementar o desempenho sobre os requisitos de resposta.

Sendo assim, inicialmente pode-se definir J a partir da equação do sinal de controle utilizada no capítulo anterior, que é utilizada em protocolos de consenso [20, 25, 51, 62]. Seja a equação:

$$u_i = - \underbrace{\sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i^{(x,y)} - \xi_j^{(x,y)})}_{\text{termo 1}} - \underbrace{a_{i(n+1)} (\xi_i^{(x,y)} - \xi_r^{(x,y)})}_{\text{termo 2}}$$

para $i = 1, \dots, n$ (3.1)

na qual $\xi_i^{(x,y)} \in \mathbb{R}^m$ é o *estado da informação* do veículo i , $\xi_j^{(x,y)} \in \mathbb{R}^m$ são os *estados da informação* dos veículos vizinhos $j \in N$, $\xi_r^{(x,y)} \in \mathbb{R}^m$ é estado de referência e a_{ij} com $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n + 1$ é a entrada (i, j) da matriz de adjacência $A_{n+1} \in \mathbb{R}^{n \times (n+1)}$.

Na eq. (3.1), o termo 1 é análogo à parcela que contempla a energia dos estados no controle LQR tradicional, e o termo 2 é análogo ao problema de rastreamento do controle ótimo.

Assim, define-se um J_i que incorpora os termos 1 e 2, e de forma complementar, também considere o esforço de controle. Chega-se ao seguinte equacionamento:

$$\begin{aligned}
J_i[k] &= \sum_{j=1}^n \sum_{k_i=1}^{N_p} \left\| \hat{\xi}_i[k+k_i|k] - \hat{\xi}_j[k+k_i|k] \right\|_{\Delta_\xi}^2 \\
&+ \sum_{k_i=1}^{N_p} \left\| \hat{\xi}_i[k+k_i|k] - \xi_r[k+k_i|k] \right\|_{\Delta_e}^2 \\
&+ \sum_{k_i=1}^{N_u} \|\Delta u_i[k+k_i|k]\|_{\lambda_{u_i}}^2, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3.2)
\end{aligned}$$

em que n é o número de veículo, N_p é o horizonte de predição e consequentemente, o tamanho da janela deslizante. As notações $\hat{\xi}_i[k+k_i|k]$ e $\hat{\xi}_j[k+k_i|k]$ são as predições dos estados i e j , respectivamente, para $k_i = 1, \dots, N_p$ a partir do instante atual k . Em relação ao esforço de controle, tem-se que N_u é o horizonte de controle, $\Delta u_i[k]$ é o incremento de controle e λ_u é uma função no tempo que permite quantificar a penalização no sinal de controle de acordo com o comportamento desejado do sistema.

As matrizes Δ_ξ e Δ_e estão compostas pelos valores da matriz de adjacência correspondentes. Desta forma, quando não há canal de comunicação habilitado entre os veículos i e j (*i.e.*, i e j não são vizinhos), os respectivos parâmetros de entrada da matriz Δ_ξ são nulos. De forma similar, quando o veículo i não recebe informação acerca da referência, já que o conhecimento é limitado, o respectivo parâmetro de entrada da matriz Δ_e é nulo.

Desta forma, pode-se propor o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned}
\min_{u_i[k]} \quad & J_i = L \left(\hat{\xi}_i[k+k_i|k], \hat{\xi}_j[k+k_i|k], \Delta U_i \right) \\
\text{s.a.} \quad & \dot{\xi}_i = f(\xi_i[k+k_i|k], \xi_j[k+k_i|k], u_i[k+k_i|k]) \\
& u_i[k+k_i|k] \in U \quad k_i = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (3.3)
\end{aligned}$$

em que a minimização do funcional J_i associado a uma função L está sujeita a restrições da dinâmica dos estados da informação $\xi_i[k+k_i+1|k]$ e no sinal de controle $u_i[k+k_i|k] \in U$.

3.2.2 Formulação quadrática

A função objetivo (3.2) em sua forma matricial pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
 J_i[k] &= \sum_{j=1}^n \left(\hat{E}_{\xi_i}[k] - \hat{E}_{\xi_j}[k] \right)' \Delta_{\xi_i} \left(\hat{E}_{\xi_i}[k] - \hat{E}_{\xi_j}[k] \right) \\
 &+ \left(\hat{E}_{\xi_i}[k] - E_{\xi_r}[k] \right)' \Delta_{e_i} \left(\hat{E}_{\xi_i}[k] - E_{\xi_r}[k] \right) \\
 &+ (\Delta u_{\xi_i}[k])' \lambda_{u_i} (\Delta u_{\xi_i}[k]), \quad \text{para } i = 1, \dots, n, \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

em que

$$\begin{aligned}
 \hat{E}_{\xi_i}[k] &= [\xi_i[k+1|k]' \quad \xi_i[k+2|k]' \quad \dots \quad \xi_i[k+N_p|k]']' \\
 \hat{E}_{\xi_j}[k] &= [\xi_j[k+1|k]' \quad \xi_j[k+2|k]' \quad \dots \quad \xi_j[k+N_p|k]']' \\
 E_{\xi_r}[k] &= [\xi_r[k+1|k]' \quad \xi_r[k+2|k]' \quad \dots \quad \xi_r[k+N_p|k]']' \\
 \Delta u_{\xi_i}[k] &= [\Delta u_i[k|k]' \quad \Delta u_i[k+1|k]' \quad \dots \quad \Delta u_i[k+N_p-1|k]']'.
 \end{aligned}$$

Dado que os *estados da informação* têm dinâmica de primeira ordem, as predições destes estados para a janela deslizante N_p podem ter a seguinte notação matricial:

$$\hat{E}_{\xi_i} = E_{\xi_i}^0 + T U_i \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3.5)$$

em que, $\hat{E}_{\xi_i} \in \mathfrak{R}^{N_p \times 2}$ é a matriz de predição dos estados, $E_{\xi_i}^0 \in \mathfrak{R}^{N_p \times 2}$ é matriz composta pelo estado ξ_i no início do horizonte de predição (*i.e.*, $E_{\xi_i}^0 = \xi_i[k] \times \mathbf{1}^{N_p \times 2}$), $T \in \mathfrak{R}^{N_p \times N_p}$ é uma matriz auxiliar composta por Δ_k , e $U_i \in \mathfrak{R}^{N_p \times 2}$ é um vetor com as entradas de controle futuros.

A notação matricial para os incrementos de controle pode assumir a seguinte forma:

$$\Delta u_{\xi_i} = U_{\xi_i}^0 + U_{aux} U_i, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

na qual $\Delta u_{\xi_i} \in \mathfrak{R}^{N_u \times 2}$ é a matriz com os incrementos de controle, $U_{\xi_i}^0 \in \mathfrak{R}^{N_u \times 2}$ é a matriz com o controle U_{ξ_i} no instante k [*i.e.*, $U_{\xi_i} = u_i[k] \times \mathbf{1}^{N_u \times 2}$], e $U_{aux} \in \mathfrak{R}^{N_u \times N_u}$ é uma matriz auxiliar para implementar as diferenças entre os incrementos de controle.

Observação 3.1 Na eq. (3.4) pode-se notar que implicitamente estão contidas as entradas de controle do veículo i e seus correspondentes vizinhos $j \in N_i$ (\hat{E}_{ξ_i} e \hat{E}_{ξ_j} , respectivamente). No entanto, ao calcular a lei de controle para geração da trajetória de consenso do veículo i , que é

baseada na minimização de J_i , o vetor de controles futuros dos veículos vizinhos j é desconhecido. Desta forma, a predição dos estados vizinhos é totalmente comprometida, posto que as trajetórias de consenso dos veículos vizinhos j para a o horizonte de predição são desconhecidas.

Uma solução possível é reescrever o vetor de controle como $U = [U_1, \dots, U_n]$. No entanto, uma das condições primárias no cálculo da lei de controle para as trajetórias de consenso é a descentralização, e com a solução mostrada acima o problema tornar-se-ia centralizado (vetor U com todos os controles dos veículos do grupo). E mais, negligencia-se o fato da comunicação ter fluxo orientado (*i.e.*, utilizando $U = [U_1, \dots, U_n]$, tem-se que a entrada a_{ij} tem o mesmo significado que a_{ji}).

Neste contexto, dado que a formulação do problema deve ser descentralizada, assume-se que a predição dos estados vizinhos é desconhecida, uma vez que não é possível contar com a informação da sequência de controles ótimos futuros dos estados vizinhos.

Portanto, na função objetivo $J_i[k]$ somente implementa-se os estados atuais do vizinho j no instante k , o que requer uma modificação na função conforme equacionamento a seguir:

$$\begin{aligned}
 J'_i[k] &= \sum_{j=1}^n \left\| E_{\xi_i}^0 + T U_i - E_{\xi_j}^0 \right\|_{\Delta_{\xi_i}}^2 \\
 &\quad + \left\| E_{\xi_i}^0 + T U_i - E_{ref} \right\|_{\Delta_{e_i}}^2 + \left\| U_{\xi_i}^0 + U_{aux} U_i \right\|_{\lambda_{u_i}}^2, \\
 &\text{para } i = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Ao expandir os termos e resolver a eq. (3.7) em relação à U_i tem-se:

$$\begin{aligned}
 J'_i[k] &= \sum_{j=1}^n U'_i (T' \Delta_{\xi} T + T' \Delta_e T + U'_{aux} \lambda_{u_i} U_{aux}) U_i \\
 &\quad + 2(E_{\xi_i}^0{}' M_{\delta} - (E_{\xi_j}^0{}' + E'_{ref}) \Delta_{\xi} T + U_{\xi_i}^0{}' \lambda_{u_i} U_{aux}) U_i \\
 &\quad + (E_{\xi_j}^0{}' \Delta_{\xi} E_{\xi_j}^0 + E_{\xi_i}^0{}' \Delta_{\xi} E_{\xi_i}^0 - 2M_{aux}), \\
 &\text{para } i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

em que $M_{\delta} = \Delta_{\xi} T + \Delta_e T$ e $M_{aux} = E_{\xi_j}^0{}' \Delta_{\xi} E_{\xi_i}^0 + U_{\xi_i}^0{}' \lambda_{u_i} U_{\xi_i}^0$.

Como o objetivo é minimizar a função custo J'_i , os termos constantes na eq. (3.8) podem ser desprezados. E também são definidas as

matrizes auxiliares H_i e f_i como:

$$H_i = T' \Delta_\xi T + T' \Delta_e T + U'_{aux} \lambda_{u_i} U_{aux}$$

e

$$f_i = E_{\xi_i}^{0'} M_\delta - \sum_{j=1}^n E_{\xi_j}^{0'} \Delta_\xi T - E'_{ref} \Delta_\xi T + U_{\xi_i}^{0'} \lambda_{u_i} U_{aux},$$

e desta forma, a minimização de J'_i na eq. (3.8) pode ser expressa como um problema de formulação quadrática dado por

$$\begin{aligned} \min_{u_i} \quad & \frac{1}{2} U_i^T H_i(\xi_i, \xi_j) U_i + f_i^T(\xi_i, \xi_j) U_i \\ \text{s.a.} \quad & \dot{\xi}_i = u_i \\ & u_i \in U \end{aligned} \tag{3.9}$$

em que a restrição no sinal de controle pode ser implementada com os valores máximos e mínimos $[\overline{U} \in Ue\underline{U} \in U$, respectivamente, como mostrado na eq. (3.9)].

Na implementação e avaliação da proposta de controle cooperativo baseado em consenso para o problema de *rendezvous* as seguintes condições são assumidas ao longo deste documento.

Hipótese 3.1 *O dígrafo $G_{n+1}(t|t = 0)$ tem uma árvore de extensão orientada.*

A ideia acima é garantir que a condição inicial do grafo orientado, associado à topologia de comunicação $G_{n+1}(t|t = 0)$, tenha, no mínimo, um caminho orientado conectando todos os veículos, e mais, o líder virtual, $n + 1$, deve conter a informação acerca da referência.

Deste modo, as posições iniciais dos veículos sempre são definidas de acordo com a hipótese (3.1) a fim de garantir uma conexão inicial mínima entre os integrantes do grupo.

Lema 3.1 *Se o dígrafo $G_{n+1}(t)$ relacionado com a matriz de adjacência têm uma árvore de extensão orientada, então as matrizes $\Delta_{\xi_i} \geq 0$ e $\Delta_{e_i} \geq 0$, e como consequência, a formulação quadrática é convexa.*

Assumindo que $G_{n+1}(t)$ tem uma árvore de extensão orientada, então $\sum_{j=1}^n a_{ij} \neq 0$ e $a_{ij} > 0$ para cada veículo i , o que significa que

o veículo i recebe informação de pelo menos um de seus vizinhos. As matrizes Δ_{ξ_i} e Δ_{e_i} são compostas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\Delta_{\xi_i} &= M_j^\xi \\ \Delta_{e_i} &= M_i^e,\end{aligned}\tag{3.10}$$

em que $M_j^\xi = \text{diag}(a_{ij})$ e $M_i^e = \text{diag}(a_{i(n+1)})$. Portanto, de acordo com (3.10), as leis de controle são sempre formuladas tal que $\Delta_{\xi_i} \geq 0$ e $\Delta_{e_i} \geq 0$, o que garante a convexidade da função objetivo. A solução de (3.9) pode ser comparável à solução do problema de programação linear e o ótimo global pode ser alcançado [4].

Observação 3.2 *As leis de controle para geração das trajetórias de consenso são totalmente descentralizadas. Note que o horizonte de predição N_p e o período de amostragem Δ_k podem ser individualizados para cada integrante da equipe e portanto, diferentes.*

Como resultado, devido ao caráter descentralizado na geração das trajetórias de consenso, não há necessidade de sincronização entre os veículos para atualização dos estados, o que diferencia a estratégia proposta de abordagens baseadas em controle preditivo distribuído [16, 68], em que o procedimento de cálculo repassado aos veículos faz-se mediante uma sincronização entre os veículos.

Evidentemente, esta proposta de controle cooperativo descentralizado não gera trajetórias ótimas individuais, visto que há limitação no conhecimento dos estados vizinhos. Deste modo, uma abordagem centralizada deve obter resultados melhores se comparados aos obtidos pela estratégia. Porém, é importante comparar as abordagens com intuito de analisar os desempenhos de ambas frente ao problema de *rendezvous* baseado em consenso.

3.3 Implementação da estratégia de controle cooperativo

A estratégia de controle cooperativo pode ser implementada conforme é mostrado na Figura 3.2. Na rotina (1) estão enumerados as ações sequenciais que cada veículo procede para o cálculo das trajetórias de consenso.

A cada iteração do algoritmo de controle, a otimização de J_i gera uma trajetória para os N_p pontos do horizonte de predição, exclusivamente baseada na troca de informação. Um modelo é utilizado para a

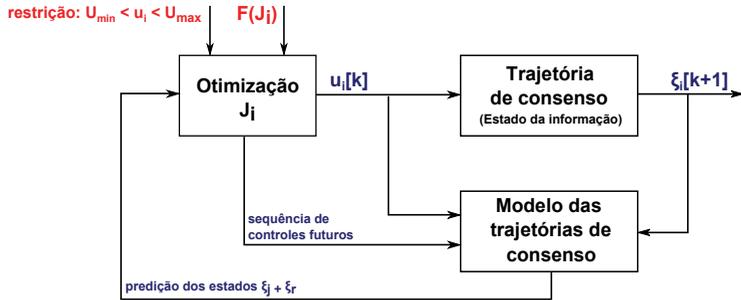


Figura 3.2: Estrutura básica para implementação da estratégia controle cooperativo baseada em consenso para o problema de *rendezvous*.

Rotina 1: Rotina para implementação da estratégia de controle cooperativo para consenso

1. Definição da matriz de adjacência $(A_{ij}[k]) \rightarrow$ Definição 2.7;
2. Definição da probabilidade de receber/enviar mensagens para cada aresta de $(A_{ij}[k])$;
3. Definição de $J_i(G_{n+1}(k|k = k_i), j) \in N_i$ para $i = 1, \dots, n$;
4. Rotina de otimização para cada veículo $i \Rightarrow u_i(k|k = k_i)$ de acordo com o Lema 3.1;
5. Atualização do *estado da informação* $\xi_i^{(x,y)}$.

predição dos estados futuros do sistema baseado em valores passados e atuais com intuito de otimizar as ações de controle futuras. Entretanto, somente a primeira ação de controle é implementada e assume-se que o veículo está equipado com um controlador local para proceder sua locomoção até o ponto desejado da trajetória de consenso.

3.4 Sobre a troca de mensagens

A rotina de simulação é implementada em *Matlab*[®] e na interação entre os veículos alguns erros de comunicação são considerados, por exemplo, perda de pacotes devida à instabilidade no canal de comunicação. Desta forma, cada canal tem uma probabilidade individual de sucesso na partilha de informação segundo a distribuição de Bernoulli.

A probabilidade p_i é modelada conforme:

$$a_{ij}(p_i) : \Omega_i \rightarrow \mathfrak{R} \text{ para } a_{ij} \in \varepsilon \mid \Omega_i = [80\%, 95\%]$$

em que cada canal de comunicação a_{ij} entre dois veículos quaisquer i e j , está associado a uma probabilidade de sucesso p_i .

As perdas de comunicação não alteram a topologia de comunicação de forma permanente. De fato, as falhas nos canais de comunicação sempre são assumidas como temporárias, o que implica em faltas durante algumas iterações da simulação.

Outra questão chave para definir a estrutura de comunicação entre os veículos e assim, também estabelecer como é a troca de mensagens entre os veículos, está relacionada com o alcance de transmissão de cada integrante. No grupo multi-veículos admite-se a presença de veículos terrestres com alcances diferenciados de transmissão, os quais são limitados pela distância devido a limitações nos dispositivos, ou então, podem estar expostos à obstáculos de terrenos e edificações urbanas.

Nas simulações admite-se que os veículos têm raios de comunicação variados definidos conforme a seguir:

$$r_{com}^i = [70; 80; 50; 50; 30; 30] \text{ metros}$$

em que $i = 1, \dots, 6$.

Desta forma, a topologia deve variar pelo fato de que canais de comunicação podem ser habilitados conforme a evolução da tarefa. Espera-se que a topologia de comunicação tenha mais canais habilitados entre os veículos a medida que os mesmos se aproximem do ponto de encontro.

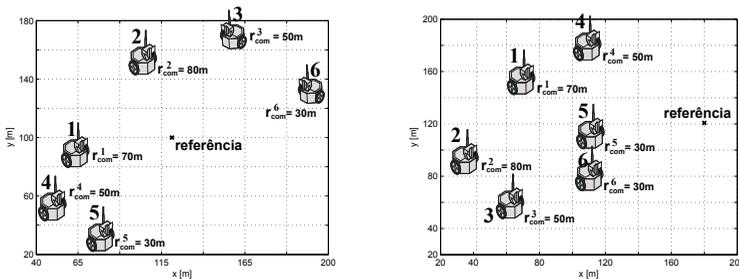


Figura 3.3: Posições iniciais dos veículos para o cenário 1 (esquerda) e para o cenário 2 (direita).

Na Figura 3.3 são mostrados dois diferentes arranjos para a posição inicial dos veículos. Para o cenário 1 tem-se as seguintes posições iniciais:

$$\xi_1 = [60, 85], \xi_2 = [100, 155], \xi_3 = [145, 170], \xi_4 = [40, 50], \\ \xi_5 = [70, 30] \text{ e } \xi_6 = [185, 140];$$

E para o cenário 2 são definidas as posições iniciais a seguir:

$$\xi_1 = [65, 150], \xi_2 = [35, 100], \xi_3 = [60, 75], \xi_4 = [110, 160], \\ \xi_5 = [105, 115] \text{ e } \xi_6 = [105, 85].$$

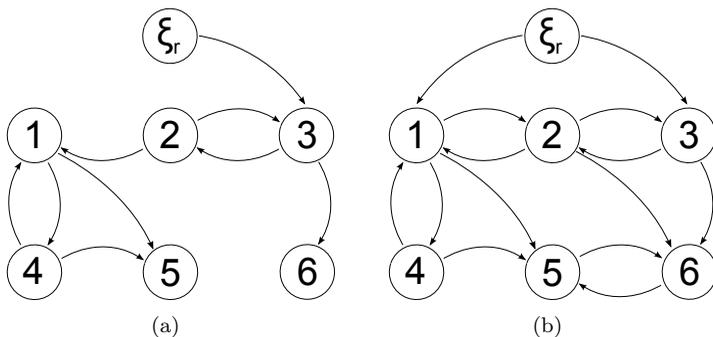
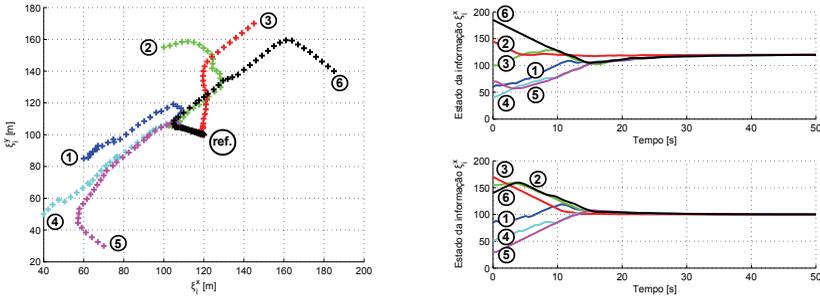


Figura 3.4: (a) Topologia A; (b) Topologia B. Ambas topologias são utilizadas nos exemplos ilustrativos para aplicação da estratégia de controle cooperativo. As setas indicam o sentido do fluxo da informação.

Nas topologias mostradas na Figura 3.4 estão ilustradas as estruturas iniciais de comunicação entre os veículos de acordo com as posições e alcance de comunicação dos veículos mostradas na Figura 3.3. As setas indicam o sentido do fluxo da informação. Ambas topologias são utilizadas para simulação e avaliação do desempenho da proposta de controle cooperativo.

Os nós 1 até 6 representam os veículos e seus respectivos *estados da informação* expressados por ξ_i com $i = 1, \dots, 6$. O estado ξ_r é usado para definir a informação da referência ($\xi_r^A = [120, 100]$ e $\xi_r^B = [150, 120]$ para as topologias A e B, respectivamente). A informação de referência somente está disponível para alguns veículos do grupo.

3.5 Simulações numéricas e análise dos resultados



(a) Evolução dos estados da informação no plano (x, y)

(b) Estados da informação vs tempo

Figura 3.5: Dinâmicas dos estados da informação $\xi_i^{(x,y)}$ para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo para consenso utilizando a topologia A .

Nas Figuras 3.5 e 3.6 são mostradas as evoluções dos *estados da informação* de todos os veículos do grupo como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo, resumizada na Rotina 1, em que o propósito é a geração das trajetórias de consenso no sentido de resolver o problema de *rendezvous*.

Em ambas simulações, o primeiro objetivo é analisar o impacto que a limitação no conhecimento da predição dos *estados da informação* dos veículos vizinhos pode ter sobre o desempenho da tarefa na solução do problema de *rendezvous*.

Neste sentido, na Figura 3.7 são mostrados os números de iterações necessárias para o consenso de referência tanto para as leis de controle descentralizadas (estratégia proposta neste capítulo) como para o caso centralizado (*i.e.*, trajetórias de consenso calculadas a partir do conhecimento dos estados vizinhos, em que as leis de controle são calculadas em conjunto).

De forma complementar, adicionou-se à comparação, um protocolo de consenso também descentralizado, mas com os parâmetros fixos (*i.e.*, as entradas a_{ij} da matriz de adjacência são fixas) apresentado em [63], o qual é bastante similar aos protocolos tradicionais encontrados na literatura [20, 48, 50].

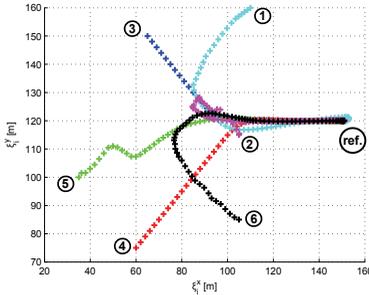
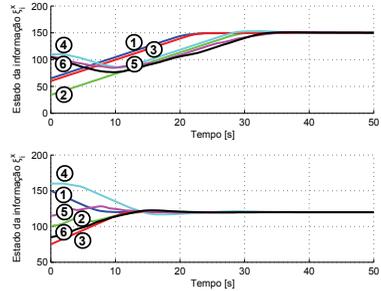
(a) Evolução dos *estados da informação* no plano (x, y) (b) *Estados da informação vs tempo*

Figura 3.6: Dinâmicas dos *estados da informação* $\xi_i^{(x,y)}$ para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo para consenso utilizando a topologia B .

Como esperado, a partir dos resultados confirma-se que a abordagem centralizada tem convergência mais rápida para o consenso de referência no problema de *rendezvous*. No entanto, a diferença de desempenho quando comparada à estratégia descentralizada baseada em controle preditivo não é significativa, já que mesmo com o desconhecimento dos estados futuros vizinhos, devido ao princípio do horizonte deslizante, a cada instante, a trajetória de consenso pode ser ajustada conforme as informações atuais recebidas dos vizinhos.

Ainda, se comparado ao protocolo descentralizado de parâmetros fixos, uma análise sobre os resultados indica que a aplicação da estratégia cooperativa baseada em consenso e controle preditivo tem uma convergência mais rápida para cada *estado da informação* no sentido do estado de referência devido ao compromisso entre convergência e esforço de controle explicitado no funcional J .

Portanto, pode-se aplicar a estratégia cooperativa descentralizada, em que assume-se uma limitação no conhecimento dos estados vizinhos futuros, sem comprometer o desempenho de consenso para o problema de *rendezvous*.

3.6 Resumo

Neste capítulo apresentou-se o desenvolvimento de leis de controle descentralizadas para que cada veículo determine sua trajetória

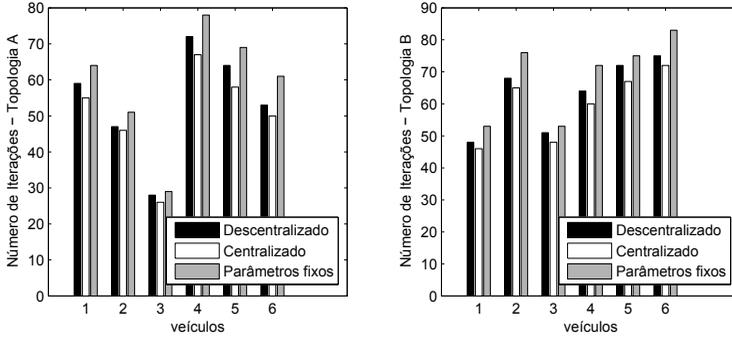


Figura 3.7: Número de iterações para o consenso de referência para cada veículo integrante do grupo para três estratégias. A estratégia de controle cooperativo descentralizada proposta neste capítulo, uma versão centralizada desta estratégia e uma terceira estratégia com parâmetros fixos.

de consenso até o ponto de *rendezvous*. A abordagem está baseada em teoria de controle preditivo com o princípio da janela deslizante. Justamente por basear-se em otimização de uma função custo, com esta estratégia é possível incluir requisitos de resposta sem comprometer o caráter de cooperação entre os veículos do grupo.

Admitindo que de fato os veículos estão em movimento conforme andamento da tarefa, a topologia é variante no tempo, uma vez que a habilitação de um canal de comunicação entre os veículos é diretamente proporcional à distância entre os mesmos. Alguns resultados de simulação são mostrados para avaliar o desempenho da estratégia proposta frente a outras propostas encontradas na literatura.

Capítulo 4

Extensão do controle cooperativo para geração de trajetórias de consenso

O controle cooperativo é baseado na geração de trajetórias de consenso para solucionar o problema de *rendezvous* com informação limitada sobre o ponto de referência. Para atingir consenso de forma descentralizada apenas permite-se troca de informação entre veículos vizinhos.

Uma das extensões da estratégia proposta é adicionar à formulação do problema uma restrição de conectividade adaptativa, na qual, a principal ideia é que, uma vez definido que o veículo i é vizinho de j , esta relação de vizinhança será mantida por toda a tarefa. Desta forma, espera-se que a abordagem faça frente a perda de comunicação devido à distância entre os veículos.

Embora a tarefa básica proposta nesta tese seja o problema de *rendezvous*, de uma maneira bastante direta e com a mesma estrutura de controle pode-se apontar no desenvolvimento de novas estratégias para aplicação em outras tarefas de coordenação, ou ainda, considerar outros requisitos como objetivos da tarefa.

Na sequência apresentam-se outras duas abordagens que podem complementar o problema de *rendezvous*. Na primeira, adiciona-se um outro objetivo à tarefa, em que se considera a otimização do ângulo

de sensoriamento dos veículos, o qual está relacionado com o ponto de encontro. Em um segundo momento, junto ao problema de *rendezvous*, adiciona-se um objetivo complementar à tarefa, o qual tem por finalidade manter uma formação sobre o ponto de referência, que *a priori* é desconhecido.

4.1 Restrição de conectividade

Como os veículos estão em movimento durante a tarefa, a cada iteração, a distância entre os veículos deve ser considerada como variante no tempo. Deste modo, admite-se que alguns canais de comunicação entre os veículos podem falhar devido a faltas nos dispositivos de comunicação. Por outro lado, novos canais de comunicação podem ser habilitados quando os veículos movem-se para uma região em que o raio de comunicação do veículo possibilita a troca de informação.

Seja um veículo i com r_{com}^i sendo o raio de comunicação. Se

$$\|p_i^{(x,y)}[k+1] - p_j^{(x,y)}[k+1]\|_2 \leq r_{com}^i$$

em que p_i e p_j são as posições dos veículos, então é estabelecida uma condição de vizinhança entre os veículos i e j (*i.e.*, $a_{ij} > 0$, vide a definição 2.7) Na topologia de comunicação, estas situações refletem-se na adição ou remoção de arestas entre i e j no dígrafo G_n .

Ainda, cada canal de comunicação a_{ij} habilitado tem uma probabilidade p_i modelada conforme:

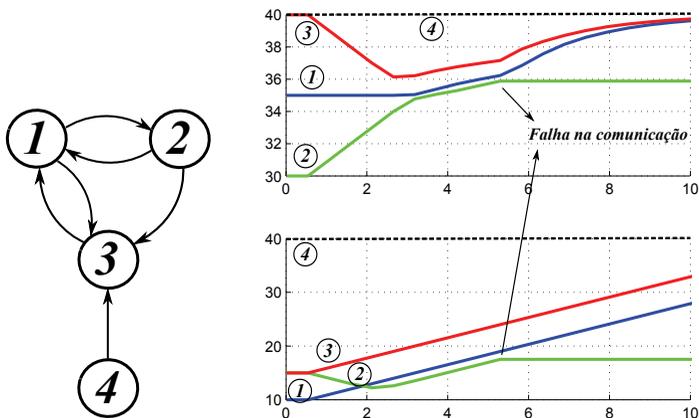
$$a_{ij}(p_i) : \Omega_i \rightarrow \mathfrak{R} \text{ para } a_{ij} \in \varepsilon \mid \Omega_i = [50\%, 95\%]$$

em que cada a probabilidade de sucesso p_i associada ao intervalo Ω_i é definida segundo a distância entre os veículos i e j . Este procedimento tem como ideia principal ajustar o valor p_i relativo à troca de informação repassada do veículo i para j . Para isso, quanto maior a distância entre os mesmos, admite-se que é maior a probabilidade de que os dados contidos na mensagem sofram deterioração devido a ruídos e interferências.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são mostrados dois exemplos ilustrativos sobre a importância de implementar uma condição para manter o raio mínimo de conectividade entre dois veículos, e desta forma, manter o canal de comunicação para troca de informação entre os integrantes do grupo.

No primeiro exemplo, vide Figura 4.1, o dispositivo de comunicação do veículo 2 falha de forma temporária, o que resulta na perda

do canal de comunicação com os outros integrantes do grupo. Pode-se ver na mesma figura que os veículos 1 e 3 distanciam-se do veículo 2 durante a falha no dispositivo de comunicação. Quando o canal é reestabelecido, a distância entre os veículos pode ser suficientemente grande para impedir que se estabeleça uma comunicação entre os veículos.



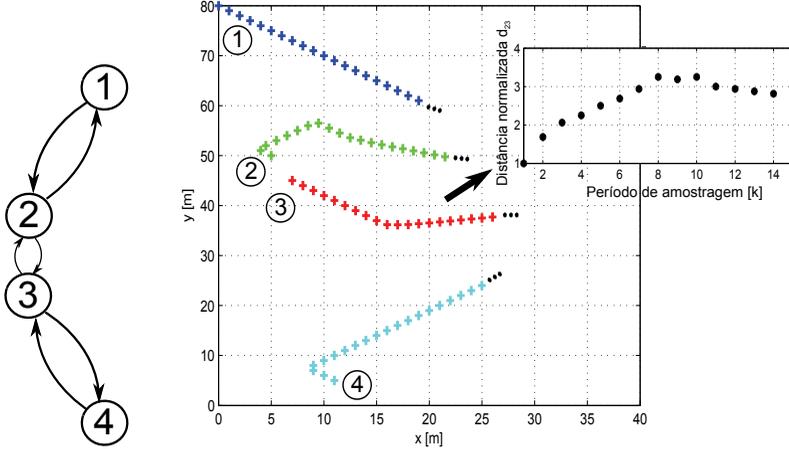
(a) Topologia com veículo 1, 2 e 3. O estado 4 é usado somente para alocar a informação de referência.

(b) Dinâmica dos *estados da informação* dos veículos em que ocorre uma falha temporária no dispositivo de comunicação do veículo 2.

Figura 4.1: Exemplo ilustrativo com a ocorrência de uma falta temporária no dispositivo de comunicação de um dos veículos do grupo.

Com intuito de evitar esta situação, surge a ideia de implementar uma restrição de conectividade à formulação do problema. Neste cenário, a ideia é utilizar a última informação recebida pelo veículo, assumindo sempre que a falha é temporária. O *estado da informação* apenas é atualizado quando o canal de comunicação é reestabelecido.

Outra situação crítica ocorre quando o veículo tem canais de comunicação com vizinhos separados por uma grande diferença (vide Figura 4.2, em que o veículo 2 tem um vizinho próximo, 3, e um outro vizinho distante, 1). Desde que a lei de controle é proporcional à distância, como consequência devido a diferença entre d_{12} e d_{13} ocorre um desvio entre os veículos 2 e 3. No caso acima, o incremento no desvio entre os veículos 1 e 2 pode resultar na perda do canal de comunicação entre os integrantes.



(a) Topologia com veículo 1, 2, 3 e 4.

(b) Dinâmicas dos estados da informação dos veículos com detalhe da distância normalizada entre os veículos 1 e 2. A evolução da distância d_{12} é ocasionada pela grande diferença entre as distâncias para os veículos vizinhos.

Figura 4.2: Exemplo ilustrativo em que a distância entre veículos vizinhos causa o afastamento entre os veículos.

4.1.1 Desenvolvimento da restrição de conectividade

A ideia principal é que uma vez definido que i é vizinho de j , então, a relação de vizinhança entre os mesmos será mantida durante toda a tarefa (*i.e.*, dois veículos vizinhos são mantidos dentro do raio de conectividade, ou raio de comunicação). Seja $\xi_i[k+1]^{(x,y)} = \xi_i[k] + \Delta_k U_i[k]$ e $\xi_j[k+1]^{(x,y)} = \xi_j[k] + \Delta_k U_j[k]$, a distância Euclidiana entre duas posições apenas para o próximo instante definida por:

$$\begin{aligned}
 d_{ij} &= \left((\xi_i^x[k+1] - \xi_j^x[k+1])^2 + (\xi_i^y[k+1] - \xi_j^y[k+1])^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= \left((\xi_i^x[k] + \Delta_k U_i^x[k] - \xi_j^x[k] + \Delta_k U_j^x[k])^2 \right. \\
 &\quad \left. + (\xi_i^y[k] + \Delta_k U_i^y[k] - \xi_j^y[k] + \Delta_k U_j^y[k])^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Novamente fazendo referência à observação (3.1), enquanto o algoritmo está calculando as entradas de controle futuros ótimos $U_i[k]$, os valores de $U_j[k]$ ainda são desconhecidos. Por isso, o valor da próxima

localização do veículo vizinho é estimado usando a derivada de primeira ordem.

Ao utilizar como métrica a distância Euclidiana, a variável de decisão $U_i[k]$ assume uma forma quadrática, o que é um problema, já que as restrições adicionadas a formulação linear não devem assumir esta forma. Para evitar esta situação, utiliza-se como métrica de distância a forma *Manhattan*¹, o que proverá um resultado mais conservador à solução do problema. Assim, a seguinte restrição é considerada para inclusão na formulação do problema para o instante $k + 1$:

$$\begin{aligned} d_{ij}^{MAN} &= \left| \xi_i^x[k] + \Delta_k U_i^x[k] - \tilde{\xi}_j^x[k + 1] \right| \\ &\quad + \left| \xi_i^y[k] + \Delta_k U_i^y[k] - \tilde{\xi}_j^y[k + 1] \right| \\ &\leq \alpha_i r_{com}, \end{aligned} \tag{4.2}$$

em que $\tilde{\xi}_j^{(x,y)}[k + 1]$ é o *estado da informação* vizinho estimado, r_{com} é o raio de comunicação e α_i é um parâmetro de sintonia que permite relaxar a restrição. Esta restrição pode ser adicionada à formulação de modo bastante direto no problema de otimização na forma $A U_i \leq B$.

Para as restrições de distância sobre os estados futuros não se tem informação da predição dos estados vizinhos j , desta forma, a restrição é implementada na forma:

$$\begin{aligned} \left| \xi_i^{x,y}[k + 1] + \Delta_k U_i^{x,y}[k + 1] - \tilde{\xi}_j^{x,y}[k + 1] \right| &\leq \alpha_i[k + 1] r_{com} \\ \left| \xi_i^{x,y}[k + 2] + \Delta_k U_i^{x,y}[k + 2] - \tilde{\xi}_j^{x,y}[k + 1] \right| &\leq \alpha_i[k + 2] r_{com} \\ &\vdots \\ \left| \xi_i^{x,y}[k + N_p] + \Delta_k U_i^{x,y}[k + N_p] - \tilde{\xi}_j^{x,y}[k + 1] \right| &\leq \alpha_i[k + N_p] r_{com} \end{aligned} \tag{4.3}$$

em que $\alpha_i[k + k_i] = \alpha_i[k]$ para $k_i = 2, 3, 4, \dots, N_p$ absorve a simplificação considerada em $\tilde{\xi}_j^{x,y}[k + 1]$ para os estados futuros.

Desta forma, a estrutura da estratégia é similar à apresentada no capítulo anterior [minimização de J'_i na eq. (3.8)] acrescida da restrição

¹A distância Manhattan entre dois pontos em um sistema cartesiano de coordenadas pode ser definida como a soma dos comprimentos da projeção da linha que une os pontos com os eixos das coordenadas (Norma 1). A origem do termo é explicada já que é uma métrica que define a menor distância possível que um carro é capaz de percorrer em uma malha urbana, tal como Manhattan.

de conectividade. O problema pode ser expresso mediante a seguinte formulação quadrática:

$$\begin{aligned}
 \min_{u_i} \quad & \frac{1}{2} U_i^T H_i U_i + f_i^T U_i \\
 \text{s.a.} \quad & \dot{\xi}_i = u_i \\
 & \xi_i \in \Xi \\
 & u_i \in U
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

em que as matrizes H_i e f_i são as mesmas anteriormente apresentadas, $\xi_i \in \Xi$ é a restrição nos *estados de informação* e $u_i \in U$ é a restrição no sinal de controle.

Em relação ao parâmetro de ajuste α_i , surge uma questão: como proceder a relaxação de cada α_i ? A métrica *Manhattan* provê um resultado mais conservador, então, a primeira etapa consiste em estabelecer uma condição entre as métricas de distâncias Euclidiana e Manhattan, para isso, investiga-se a evolução destas métricas quando varia-se o ângulo de orientação entre dois veículos quaisquer i e j no sentido de definir correlações de magnitude.

Na Figura 4.3 é mostrada a variação dos ângulos para o primeiro quadrante (*i.e.*, $0 \leq \theta_{i,j} \leq \pi/2$). Nota-se que para $\theta_{(i,j)} = 0^0$ e $\theta_{(i,j)} = 90^0$, as distâncias Euclidiana e Manhattan coincidem em magnitude.

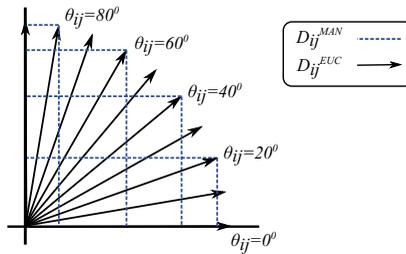


Figura 4.3: Relação entre o ângulo de orientação $\theta_{i,j}$ para dois veículos quaisquer e as métricas Euclidiana (D_{ij}^{EUC}) e Manhattan (D_{ij}^{MAN}).

De acordo com a Figura 4.3, a relação entre as métricas Euclidiana (D_{ij}^{EUC}) e Manhattan (D_{ij}^{MAN}) pode ser definida como:

$$\begin{aligned}
\frac{d_{ij}^{MAN}}{d_{ij}^{EUC}} &= 1, & \text{para } \theta_{ij} &= 0^0 \\
&= 0.855, & \text{para } \theta_{ij} &= 10^0 \\
&= 0.779, & \text{para } \theta_{ij} &= 20^0 \\
&= 0.736, & \text{para } \theta_{ij} &= 30^0 \\
&= 0.707, & \text{para } \theta_{ij} &= 40^0 \\
&= 0.716, & \text{para } \theta_{ij} &= 50^0 \\
&= 0.726, & \text{para } \theta_{ij} &= 60^0 \\
&= 0.791, & \text{para } \theta_{ij} &= 70^0 \\
&= 0.869, & \text{para } \theta_{ij} &= 80^0 \\
&= 1, & \text{para } \theta_{ij} &= 90^0
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Como mostrado na eq. (4.5), há um comportamento quadrático entre as métricas utilizadas. Na Figura 4.4 é mostrada essa relação quadrática para cada quadrante do círculo unitário.

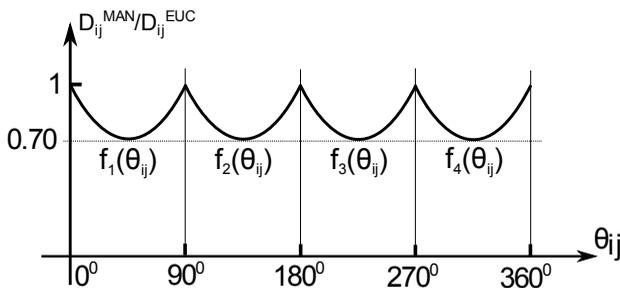


Figura 4.4: Relação entre o ângulo de orientação $\theta_{(i,j)}$ para $0^0 \leq \theta_{i,j} \leq 360^0$ e a razão entre as métricas Euclidiana e Manhattan.

Baseado nas Figuras 4.3 e 4.4, define-se um polinômio quadrático para quantificar a relação entre o ângulo de orientação para dois veículos quaisquer e o parâmetro de sintonia α_i . Este parâmetro de sintonia α_i é ajustado conforme equacionamento a seguir:

$$\begin{aligned}
\alpha_i(f_1) &= 0.0001439 \theta_{ij}^2 - 0.01287 \theta_{ij} + 0.9869, \\
\alpha_i(f_2) &= 0.0001439 \theta_{ij}^2 - 0.03878 \theta_{ij} + 3.311, \\
\alpha_i(f_3) &= 0.0001439 \theta_{ij}^2 - 0.06469 \theta_{ij} + 7.967, \\
\alpha_i(f_4) &= 0.0001439 \theta_{ij}^2 - 0.0906 \theta_{ij} + 14.96, \\
&\text{para } i = 1, \dots, n,
\end{aligned} \tag{4.6}$$

em que θ_{ij} é o ângulo de orientação entre os veículos i e j , sempre desde a perspectiva do veículo i .

4.1.2 Implementação da estratégia

A estratégia de controle cooperativo pode ser implementada conforme é mostrado na Figura 4.5. O modelo de primeira ordem é utilizado para a predição dos estados futuros do sistema baseado em valores passados e atuais com intuito de otimizar as ações de controle futuras. Esta sequência de controle é calculada pelo otimizador considerando a função objetivo e restrições do problema.

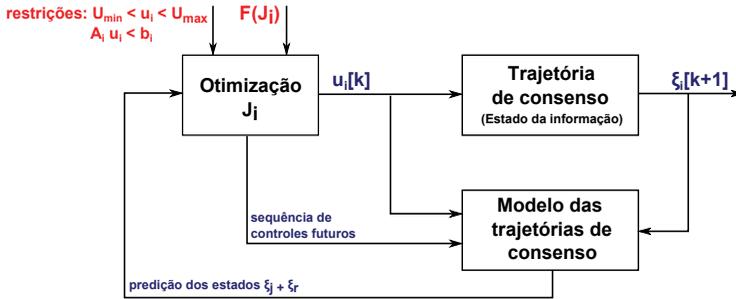


Figura 4.5: Estrutura básica da estratégia de controle cooperativo baseado em controle preditivo

A cada iteração do algoritmo, a otimização de J_i gera uma trajetória para os N_p pontos do horizonte de predição, exclusivamente baseada na troca de informação. Entretanto, somente a primeira ação de controle é implementada e assume-se que o veículo é equipado com um controlador local para proceder sua locomoção até o ponto desejado da trajetória de consenso. Como resultado, tem-se trajetórias de consenso factíveis para cada veículo do grupo. Na rotina 2 é mostrado o procedimento de implementação da estratégia de controle cooperativo.

<p>Rotina 2: Rotina para implementação da estratégia de controle cooperativo para consenso</p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Definição da matriz de adjacência $(A_{ij}[k]) \rightarrow$ Definição 2.7; 2. Definição da probabilidade de receber/enviar mensagens para cada aresta de $(A_{ij}[k])$; 3. Definição de $J_i(G_{n+1}(k k = k_i), j) \in N_i$ para $i = 1, \dots, n$; 4. Rotina de otimização para cada veículo $i \Rightarrow u_i(k k = k_i)$ de acordo com o Lema 3.1; 5. Atualização do <i>estado da informação</i> $\xi_i^{(x,y)}$.

A rotina foi implementada em *Matlab*[®] e alguns erros de comunicação foram considerados, por exemplo, perda de pacotes devido a instabilidade no canal de comunicação. Desta forma, cada canal tem uma probabilidade individual de sucesso na troca de informação, conforme mostrado no início do capítulo. Estas perdas de comunicação não alteram a topologia de comunicação de forma permanente. De fato, as falhas nos canais de comunicação são assumidas como temporárias.

As posições iniciais dos veículos são diferentes para cada cenário. Assim, são definidas as seguintes localizações de partida para a Topologia A:

$$\xi_1 = [50, 120], \xi_2 = [120, 180], \xi_3 = [170, 180], \xi_4 = [70, 30], \\ \xi_5 = [40, 50] \text{ e } \xi_6 = [130, 150];$$

e Topologia B:

$$\xi_1 = [35, 100], \xi_2 = [50, 150], \xi_3 = [80, 190], \xi_4 = [45, 30], \\ \xi_5 = [20, 30] \text{ e } \xi_6 = [40, 195].$$

As topologias mostradas na Figura 4.6 são utilizadas para avaliar o desempenho da proposta de controle cooperativo. As setas indicam o sentido do fluxo da informação. Os nós 1 até 6 representam os veículos e seus respectivos *estados da informação* expressos por ξ_n (com $n = 1, \dots, 6$). O estado ξ_r é usado para definir a informação da referência ($\xi_r^A = [80, 80]$ e $\xi_r^B = [100, 150]$ para as topologias A e B, respectivamente), em que tal informação somente está disponível para alguns veículos do grupo.

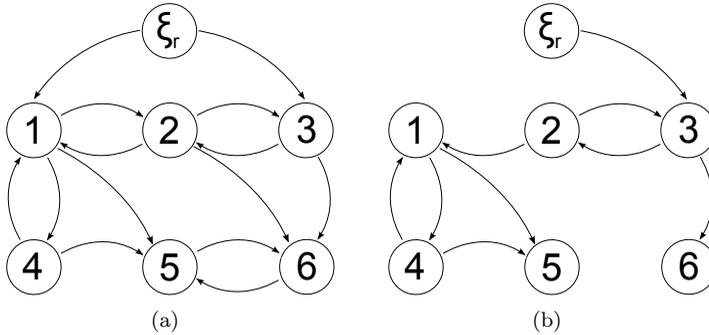


Figura 4.6: (a) Topologia A; (b) Topologia B. Ambas topologias são utilizadas nos exemplos ilustrativos para aplicação da estratégia de controle cooperativo. As setas indicam o sentido da fluxo da informação.

4.1.3 Simulações numéricas e análise dos resultados

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são mostrados os comportamentos dos *estados da informação* como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo sumarizada na rotina 1 para geração das trajetórias de consenso no sentido de resolver o problema de *rendezvous*.

O objetivo é mostrar o impacto da inclusão da restrição de conectividade para o consenso no problema de *rendezvous*. Neste cenário, o dispositivo de comunicação do veículo 2 falha durante um intervalo de tempo. Em um primeiro momento, sem a restrição de conectividade, quando o veículo 2 tem reestabelecido seu canal de comunicação, o veículo encontra-se afastado do grupo de referência. Como consequência de tal desvio, não é possível alcançar consenso global, sendo que cada grupo alcança um consenso local.

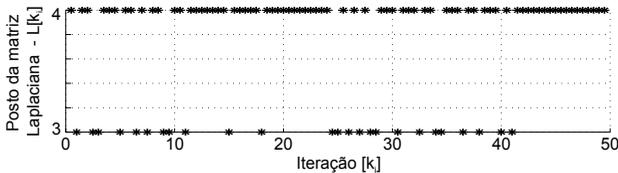


Figura 4.8: Posto da matriz Laplaciana para cada iteração k usando a topologia B.

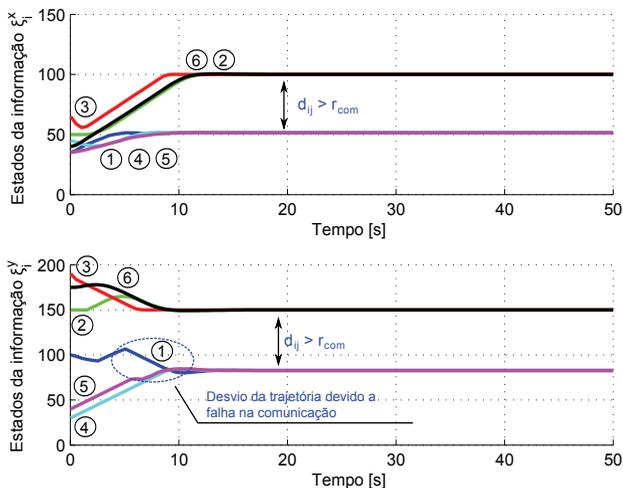


Figura 4.7: Dinâmicas dos *estados da informação* ξ_i para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo para consenso sobre a topologia B sem a restrição de conectividade.

Quando a restrição de conectividade é utilizada [vide Figura 4.9], a falta no canal de comunicação do veículo 2 não implica no seu afastamento, pelo contrário, devido a restrição, a ação do veículo 3 é procurar manter uma distância limite para esperar pelo reestabelecimento do veículo 2.

Este comportamento só faz sentido porque o veículo 2 tem conhecimento que seu dispositivo de comunicação está falhando e por isso, não atualiza seu *estado da informação* para não correr o risco de se afastar do grupo.

Nota-se que o grupo fica ancorado pela falta no dispositivo de comunicação do veículo 2, daí a consideração de faltas temporárias, período em que os outros veículos do grupo utilizarão a última informação recebida com intuito de manter a restrição de conectividade.

Em um hipotético caso de falta permanente, o veículo 2 seria deixado para trás, e o grupo poderia seguir trocando informação para obter o consenso acerca do ponto de *rendezvous*.

Quando finalmente o veículo 2 recupera a capacidade de comunicação, a distância entre os veículos permite reestabelecer o canal de comunicação, e portanto, o grupo pode alcançar o consenso global.

Este exemplo é meramente ilustrativo e tem como objetivo es-

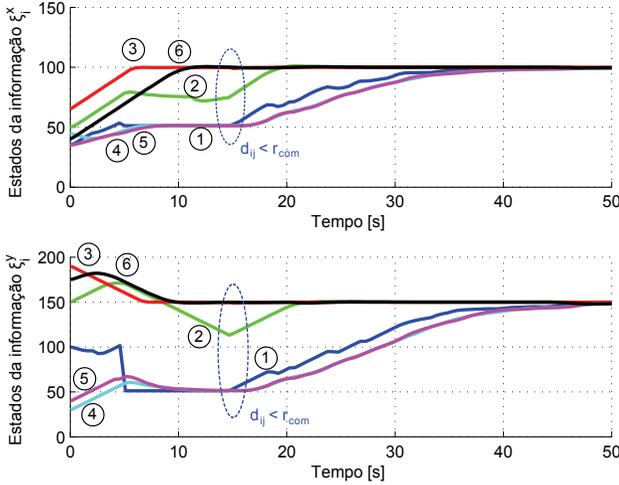


Figura 4.9: Dinâmicas dos *estados da informação* ξ_i para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo para consenso sobre a topologia B com a restrição de conectividade.

clarecer sobre a importância da implementação da restrição de conectividade, em que a ideia principal é garantir que uma vez inicialmente definida uma relação de vizinhança entre dois veículos, os mesmo continuarão vizinhos durante a realização da tarefa.

Sobre o posto da matriz Laplaciana, tem-se a seguinte condição de suficiência baseado nas Figuras 4.8 e 4.10 e nas definições da matriz laplaciana no capítulo 2:

Observação 4.1 *Se o grupo alcança consenso e o posto da matriz Laplacian é $\rho_L = n - 1$, em que n é o número total de veículos no grupo, então o consenso é global.*

Evidentemente, é sabido que quando o grupo alcança consenso global, a topologia de comunicação pode ser fortemente conectada devido à mínima distância entre os veículos. Contudo, esta não é uma condição necessária.

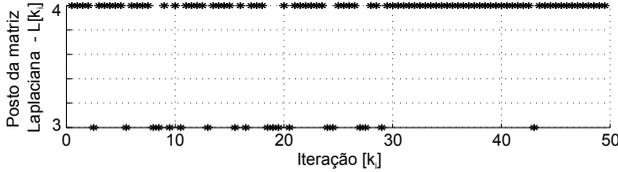


Figura 4.10: Posto da matriz Laplaciana para cada iteração k usando a topologia B .

4.2 Trajetórias de consenso com otimização do ângulo de sensoriamento

Na estratégia de controle cooperativo proposta neste capítulo, apenas considera-se o cálculo da trajetória de consenso associada ao respectivo *estado da informação*, que é justamente o entendimento individual de cada veículo acerca do ponto de encontro.

Para proceder o seguimento da trajetória, assume-se que cada veículo é equipado de controladores locais, os quais garantem que o veículo alcance o ponto designado na trajetória de consenso a cada período de amostragem.

Em momento algum do cálculo das leis de controle considera-se que o veículo possa ter restrições mecânicas de movimento, por exemplo, uma restrição não holonômica, típica dos robôs móveis com rodas. Ou mais ainda, assumindo que o veículo é equipado com uma câmera fixa, em que o ângulo de sensoriamento pode ser associado à orientação do veículo, pode-se adicionar como objetivo da tarefa que o ângulo de sensoriamento coincida com a localização de *rendezvous*. Na continuação, será desenvolvida uma estratégia complementar para incluir estes aspectos no cálculo das trajetórias de consenso.

4.2.1 Exemplo Ilustrativo

Na Figura 4.11 é mostrado um exemplo bastante ilustrativo, em que um veículo qualquer do grupo com um controlador local, ao tentar seguir a trajetória de consenso pode ter desempenho prejudicado, já que no cálculo da trajetória não foram consideradas as restrições de movimento do veículo (veja a trajetória inferior).

No instante k , a orientação do veículo é oposta à direção do próximo ponto desejado, e desta forma, devido à restrição não holonômica presente no veículo, o mesmo deve realizar uma curva mais aberta (veja

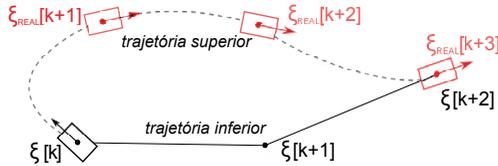


Figura 4.11: Exemplo ilustrativo para destacar a diferença entre as trajetórias de consenso de acordo com as restrições de movimento do veículo.

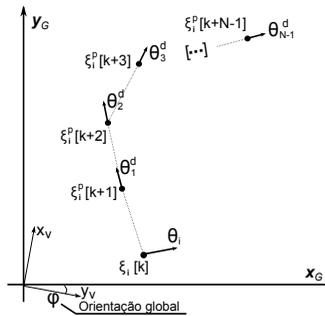


Figura 4.12: Problema de otimização para o ângulo de sensoriamento do veículo, em que o objetivo é minimizar a diferença entre o ângulo de sensoriamento do veículo e o ponto de *rendezvous*.

a trajetória superior), o que acarreta um atraso na rota do veículo, já que este necessita uma iteração a mais para alcançar a trajetória de consenso. A depender das curvas presentes na trajetória de consenso, este atraso pode ser maior, e em um caso extremo, pode-se fazer com que o veículo se afaste do raio de comunicação com seus vizinhos.

De forma complementar, assumindo que o veículo tem instalada uma câmera fixa, em que o ângulo de sensoriamento pode ser associado à orientação do veículo, é adicionada à estratégia de cooperação uma rotina de otimização sobre o ângulo de sensoriamento, principalmente motivada pelo conhecimento, a cada instante k , da sequência de todas as entradas de controle futuras (otimização de J_i) e portanto, a predição de todos os pontos da trajetória de consenso.

4.2.2 Otimização do ângulo de orientação J_i^θ

A otimização da orientação do veículo é baseada na minimização do erro quadrático entre o ângulo de sensoramento de veículo com o próximo ponto da trajetória de consenso, conforme é mostrado na Figura 4.12. Seja a seguinte função custo:

$$J_i^\theta = \sum_{k=1}^{N_p-1} \left\| \theta_i^d[k+1] - \theta_i[k+1] \right\|^2, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (4.7)$$

em que θ_i^d é a orientação de sensoramento desejada e θ_i é a orientação atual do veículo i .

O objetivo é encontrar o valor de θ_i que minimiza J_i^θ , desde que algumas restrições são impostas ao problema, todas relacionadas com a restrição de movimento do veículo. Para isso, define-se uma rotação individual máxima δ_d e um raio de curvatura r_c para cada veículo i . Os novos *estados da informação* associados às coordenadas x e y são:

$$\begin{aligned} \xi_i^x[k+1] &= \xi_i^x[k] \cos(\theta_i[k+1] + \varphi) \\ \xi_i^y[k+1] &= \xi_i^y[k] \sin(\theta_i[k+1] + \varphi) \end{aligned} \quad (4.8)$$

em que φ é a rotação relacionada à uma referência global, já que δ_d e θ_i são variáveis locais, conforme mostrado na Figura 4.12. Ressalta-se que a cada iteração da estratégia de controle cooperativo, a rotação máxima de cada veículo é $3\delta_d$ (devido a restrições mecânicas e saturação no sinal de controle) e o valor final de θ_i é definido mediante a otimização de J_i^θ .

É importante notar que na eq. (4.8) não aparecem as variáveis de entrada de controle. Estas já foram calculadas anteriormente pela aplicação da estratégia de controle cooperativo (de fato, aqui utilizam-se os pontos calculados para otimização da orientação). Este procedimento é complementar, no qual o objetivo é corrigir a orientação do veículo, o que pode implicar, ou não, na correção da trajetória de consenso.

4.2.3 Implementação da estratégia

A implementação é mostrada no digrama de blocos da Figura 4.13, em que se pode constatar a similaridade com a estratégia geral de consenso, com a diferença do bloco de otimização da orientação do ângulo. A cada iteração, a otimização de J_i gera a trajetória de

consenso para os N_p pontos da janela deslizante, com a informação destes pontos, a orientação do veículo i é calculada (*i.e.*, otimização de J_i^θ).

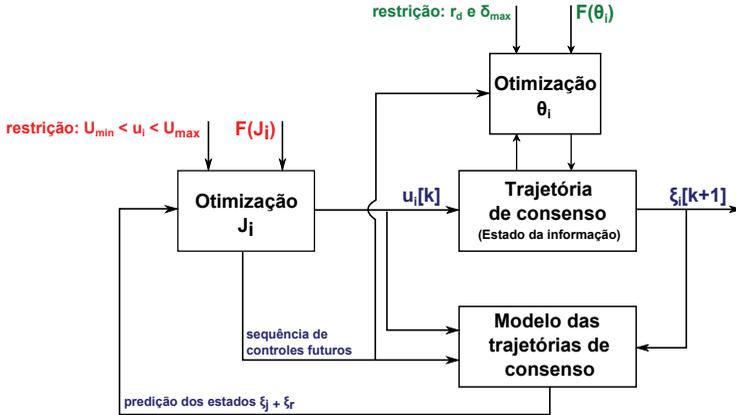


Figura 4.13: Diagrama de blocos para implementação da estratégia de controle cooperativo associada a otimização do ângulo de sensoriamento para o problema de *rendezvous*.

As topologias apresentadas na Figura 4.14(a) e (b) são usadas para avaliar o desempenho da proposta de extensão da estratégia de controle cooperativo. Ambas foram escolhidas de forma arbitrária e as setas indicam o sentido do fluxo da informação.

Os nós 1 até 6 representam os veículos com os respectivos *estados da informação*, os quais são expressados como ξ_n com $n = 1, \dots, 6$. Ainda foi definido que os veículos associados aos nós 1 e 2 são robôs móveis com rodas com restrição de movimento não holonômico, e os demais veículos não têm restrição de movimento. O estado ξ_r é usado para definir a informação de referência ($\xi_r^A = [100, 100]$ e $\xi_r^B = [190, 100]$ para as topologias A e B, respectivamente) com informação disponível apenas para alguns veículos do grupo.

Abaixo são mostradas as posições iniciais de todos os veículos, as quais são definidas numericamente como segue, Topologia A:

$$\xi_1 = [50, 120], \xi_2 = [120, 180], \xi_3 = [170, 180], \xi_4 = [70, 30], \\ \xi_5 = [40, 50] \text{ e } \xi_6 = [130, 150];$$

e Topologia B:

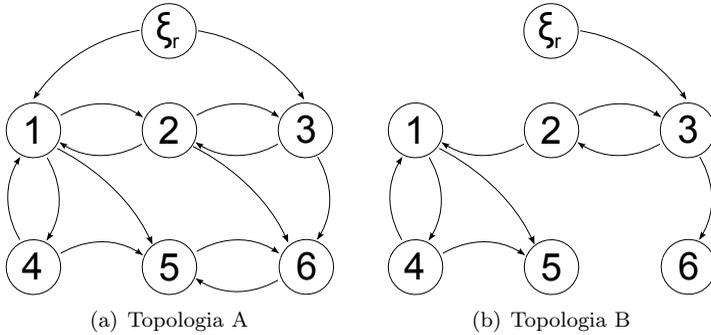


Figura 4.14: Topologias utilizadas nos exemplos ilustrativos para aplicação da estratégia de controle cooperativo com otimização do ângulo de sensoriamento. As setas indicam o sentido da fluxo da informação

$$\xi_1 = [35, 100], \xi_2 = [50, 150], \xi_3 = [80, 190], \xi_4 = [45, 30],$$

$$\xi_5 = [20, 30] \text{ e } \xi_6 = [40, 195].$$

4.2.4 Simulação e análise dos resultados

Na Figura 4.15 são mostrados os resultados obtidos com a aplicação da estratégia de consenso com a adição da rotina de otimização.

Nos exemplos, pode-se constatar a diferença entre os comportamentos dos *estados da informação* quando é considerada a restrição de movimento dos veículos associada à otimização do ângulo de sensoriamento dos veículos 1 e 2.

É possível notar que, nas iterações iniciais, o objetivo complementar de guiar as trajetórias dos veículos 1 e 2 de acordo com as restrições é satisfatório. A trajetória de consenso é então associada com o ponto de *rendezvous*.

Os resultados apresentados confirmam que o problema de *rendezvous* com abordagem baseada em consenso é resolvido sem comprometimento de desempenho, mesmo com a inclusão de um novo objetivo, caracterizada pela otimização da orientação do veículo de acordo com o ponto de encontro. Como resultado, todas as trajetórias de consenso são factíveis para os controladores locais, já que as mesmas consideram as restrições de movimento de cada veículo.

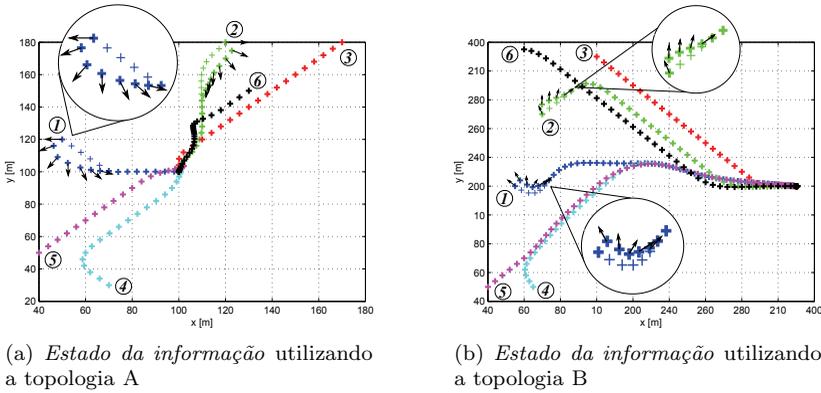


Figura 4.15: Dinâmicas do estado da informação ξ_i como resultado da aplicação da estratégia de controle cooperativo para consenso e otimização do ângulo de sensoriamento.

4.3 Trajetórias de consenso e o conceito de estado da informação

Nesta outra abordagem para o controle cooperativo utilizando a teoria de consenso, o diferencial é utilizar ao máximo a abstração do conceito de *estado da informação*. As trajetórias de consenso calculadas estão sempre associadas exclusivamente à dinâmica da informação, desde que a variável *estado da informação* é um entendimento individual de cada veículo acerca do ponto de *rendezvous*.

Do ponto de vista da aplicação, pode ser interessante que alguns veículos do grupo compartilhem seu conhecimento acerca do ambiente mas que mantenham a posição física. Desta forma, principalmente quando se está perto do ponto de *rendezvous*, a densidade de comunicação da rede é mantida sem a necessidade de que os veículos se encontrem todos na mesma localização.

A primeira etapa desta proposta é justamente baseada na geração das trajetórias de consenso para todos os veículos do grupo. De acordo com a definição de vizinhança, espera-se que alguns instantes antes que todos os veículos alcancem o consenso acerca do ponto de *rendezvous*, os mesmos devem necessariamente encontrar-se dentro de uma área na qual é possível estabelecer comunicação entre todos os membros dada a condição de vizinhança.

É neste estágio que se explora ao máximo a abstração do conceito de *estado da informação*, e nesta segunda etapa, faz-se uma distinção entre a localização efetiva do veículo e o respectivo *estado da informação*. Assim, mesmo com os veículos parados, o grupo pode definir o ponto de encontro uma vez que estão todos dentro de um raio de comunicação. Após definir o ponto de encontro, ressaltando que *a priori* é desconhecido, cada veículo pode definir sua trajetória para proceder a cobertura do ponto de *rendezvous*.

Este procedimento faz sentido quando a matriz laplaciana é fortemente conectada, sempre considerando o sentido orientado do fluxo de informação.

Hipótese 4.1 *É assumido que cada veículo integrante do grupo tem conhecimento acerca do número total de veículos.*

A hipótese 4.1 é essencial para que cada veículo defina de forma descentralizada quando há uma condição de topologia fortemente conectada, para portanto, proceder a definição do ponto de *rendezvous*, em que os veículos estarão temporariamente parados.

4.3.1 Implementação da estratégia

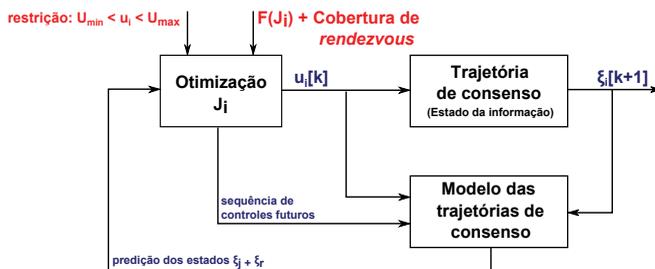


Figura 4.16: Diagrama de blocos para implementação da estratégia de controle cooperativo associada à formação sobre o ponto de *rendezvous*.

A rotina para implementar esta estratégia é similar à apresentada anteriormente, com a adição de alguns passos complementares, conforme pode-se constatar na Figura 4.16 e na rotina (3).

Rotina 3: Rotina para implementação da estratégia de controle cooperativo para consenso com cobertura do ponto de *rendezvous*

1. Definição da matriz de adjacência $(A_{ij}[k]) \rightarrow$ Definição 2.7;

2. Verificar se o dígrafo é fortemente conectado;

se $G_n \rightarrow$ conectado então

2.1. Compartilhar a informação para definir o ponto de *rendezvous*;

2.2. Definir a formação individual de cada veículo sobre o ponto de *rendezvous*;

2.3. Atualização do estado da informação, $\xi_i^{x,y}$.

fim

3. Definição da probabilidade de receber/enviar mensagens para cada aresta de $(A_{ij}[k])$;

4. Definição de $J_i(G_{n+1}(k|k = k_i), j) \in N_i$ para $i = 1, \dots, n$;

5. Rotina de otimização para cada veículo $i \Rightarrow u_i(k|k = k_i)$ de acordo com o Lema 3.1;

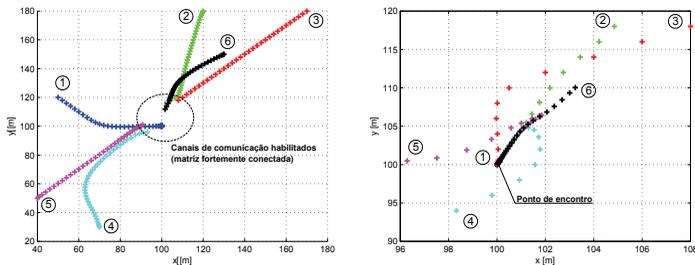
6. Atualização do estado da informação $\xi_i^{(x,y)}$.

4.3.2 Simulação e análise dos resultados

Na continuação são mostrados os resultados obtidos a partir da implementação da rotina (3). Na Figura 4.17 destaca-se o instante quando os veículos encontram-se dentro de um raio de comunicação que define o dígrafo fortemente conectado. E no gráfico ao lado, mesma figura, diferencia-se a posição dos veículos com a dinâmica dos estados da informação, desta forma, o ponto de *rendezvous* é definido com os veículos parados.

No exemplo mostrado nas Figuras 4.17 e 4.18, as trajetórias de consenso para toda a tarefa são mostradas. Em um primeiro momento, os veículos alcançam uma área em comum, na qual todos os veículos podem compartilhar suas informações com os outros integrantes do grupo, vide Figura 4.17(a). Neste momento, os veículos param seu movimento.

No próximo estágio, os veículos compartilham sua visão acerca do ambiente (*i.e.*, estado da informação) para definir mediante consenso o ponto de *rendezvous*. A informação da referência que *a priori* é desconhecida torna-se conhecida para todos os integrantes do grupo.



(a) Etapa definida pelo dígrafo fortemente conectado.

(b) Etapa em que os veículos parados compartilham informação acerca do *estado da informação* para definir o ponto de *rendez-vous*.

Figura 4.17: Dinâmicas do *estado da informação* ξ_i para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da rotina (3) usando a topologia de comunicação A.

Depois deste procedimento, cada veículo pode calcular a trajetória para uma formação pré definida sobre o ponto de encontro.

De forma complementar, nas Figuras 4.19 e 4.20 é mostrado outro exemplo ilustrativo, em que é utilizada a mesma estratégia de controle cooperativo com modificação para cobertura do ponto de *rendez-vous*. Em relação ao exemplo anterior, a diferença é apenas a formação ao redor do ponto de encontro, e aqui é importante ressaltar que esta formação é definida conforme o contexto da aplicação e pode assumir variadas formas.

4.4 Resumo

Neste capítulo apresentaram-se extensões para a estratégia de controle cooperativo baseado em consenso. Admitindo que de fato os veículos estão em movimento conforme andamento da tarefa, a topologia é variante no tempo (comunicação entre os veículos é diretamente proporcional à distância entre os mesmos).

Desta forma, uma restrição de conectividade é adicionada à formulação do problema para garantir a relação de vizinhança entre dois veículos durante toda a tarefa, mesmo com a ocorrência de falhas temporárias de comunicação. Ainda foi apresentada uma solução para o problema de formação sobre o ponto de encontro utilizando a mesma formulação para as trajetórias de consenso.

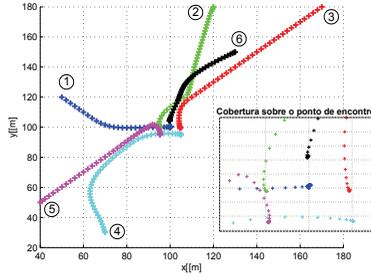


Figura 4.18: Dinâmicas do estado da informação ξ_i para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da rotina (3) usando a topologia de comunicação A. É mostrada toda a tarefa com detalhes sobre a cobertura do ponto de rendezvous.

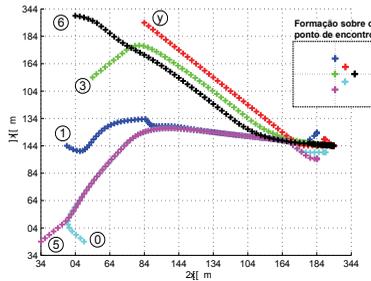


Figura 4.19: Dinâmicas do estado da informação ξ_i para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da rotina (3) usando a topologia de comunicação B. É apresentada a tarefa completa para $\xi_i^x \times \xi_i^y$ com $i = 1, \dots, 6$.

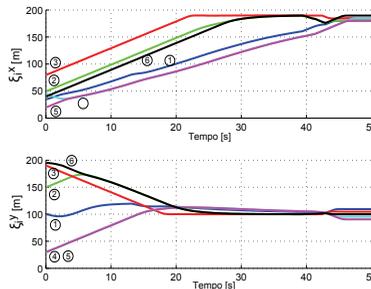


Figura 4.20: Dinâmicas do estado da informação $\xi_i \times t$ para $i = 1, \dots, 6$ como resultado da aplicação da rotina (3) usando a topologia de comunicação B. É apresentada a tarefa completa para $\xi_i^{x,y} \times t$ com $i = 1, \dots, 6$.

Capítulo 5

Aspectos da comunicação na estratégia de controle cooperativo baseado em consenso

Neste capítulo serão discutidos aspectos da comunicação entre os veículos para o controle cooperativo que não foram abordados na estratégia apresentada nos capítulos 3 e 4. A formulação para o problema de *rendezvous* baseada em consenso via controle preditivo foi estendida para a inclusão de uma restrição de conectividade no intuito de manter um raio de comunicação factível para troca de mensagens entre dois veículos vizinhos. Com esta restrição pode-se manter a conexão entre dois vizinhos quando o dispositivo de comunicação de alguns dos veículos falha de forma temporária, resultando em uma formulação para trajetórias de consenso tolerante a este tipo específico de falha na comunicação.

Desta forma, seja r_{com}^i o raio de comunicação do veículo i , garante-se que:

$$\|p_i^{(x,y)}[k+1] - p_j^{(x,y)}[k+1]\|_2 \leq r_{com}^i$$

para todo $j \in N_i$. As posições p_i e p_j são as localizações dos veículos nos eixos coordenados x e y . Como resultado direto desta relação,

os veículos estão aptos a estabelecer um canal de comunicação para compartilhar informação (*i.e.*, $a_{ij} > 0$).

Ainda que se garanta a relação de vizinhança entre um veículo qualquer i e seus vizinhos $j \in N_i$, e que a mesma seja mantida durante toda a tarefa, pode surgir um outro problema relacionado à troca de mensagens para a partilha da informação, que é a colisão de mensagens.

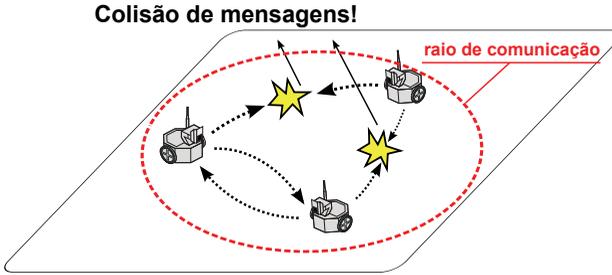


Figura 5.1: Exemplo ilustrativo sobre as faltas nos canais de comunicação como consequência da perda de pacote devido a colisão de mensagens na comunicação sem fio.

Na Figura 5.1 são mostradas faltas nos canais de comunicação como consequência da perda de pacote devido a colisão de mensagens na comunicação sem fio.

Observação 5.1 *É importante notar que a informação acerca da ocorrência de colisão das mensagens e consequente perda de pacotes, não é retornada ao veículo. Deste modo, o veículo i envia seu estado da informação para seus vizinhos $j \in N_i$ sem a confirmação de que tal informação foi recebida pelo respectivo receptor.*

Durante a partilha da informação, admite-se que a probabilidade de colisão aumenta quando as mensagens são enviadas/recebidas ao mesmo tempo, ou aproximadamente isso. Na troca de mensagens utilizando comunicação RF é particularmente difícil alcançar pontualidade devido à exposição do meio e interfaces de comunicação instaladas em cada veículo.

Por este motivo, acrescenta-se à estratégia de controle cooperativo baseado em consenso um protocolo de comunicação. O propósito é aprimorar a pontualidade na troca periódica de informação, minimizando assim, a possibilidade de perda de pacotes devido principalmente as colisões entre as mensagens [52, 69]. Neste contexto, pretende-se

avaliar o impacto que este protocolo pode causar na convergência de consenso para o problema de *rendezvous*.

5.1 Protocolo de comunicação para sincronização de mensagens

Para a realização de tarefas de forma cooperativa os veículos devem necessariamente colaborar com o grupo e, para tal, é preciso compartilhar informação entre os integrantes da equipe. Na partilha de informação via comunicação RF é particularmente difícil alcançar pontualidade entre as mensagens devido principalmente à exposição do meio e diferenças físicas nos interfaces instalados em cada veículo.

Dada esta característica, agrega-se ao problema de *rendezvous* baseado em consenso um protocolo de comunicação descentralizado para proceder a re-sincronização das transmissões entre os veículos. Com isto, objetiva-se minimizar a possibilidade de perda de pacotes causada principalmente pelas colisões de mensagens no acesso ao meio. A comunicação entre os veículos é procedida conforme a Observação 5.2.

Observação 5.2 *Todos os veículos integrantes da equipe transmitem periodicamente informação relevante na obtenção de consenso para o problema de rendezvous.*

Na Figura 5.2 apresenta-se um intervalo de comunicação envolvendo dois veículos quaisquer i e j , com períodos de transmissão T_i e T_j , respectivamente. Por questões técnicas tem-se $T_i \neq T_j$ por uma diferença muito pequena causada por limitações na precisão dos respectivos relógios (*e.g.*, $T_i = 50,01$ ms enquanto $T_j = 49,99$ ms).

Contudo, esta diferença também pode dar-se por atrasos pontuais devidos a circunstâncias inerentes à comunicação RF, como interferências. Em todo caso, com esta diferença entre os períodos de transmissão inevitavelmente ocorrerá um período crítico, $T_{critico}$, durante o qual, a probabilidade de colisão entre as mensagens enviadas é incrementada de forma significativa, resultando em uma degradação acentuada da capacidade de comunicação e, como consequência, perda de informação na partilha entre os veículos.

Para evitar a ocorrência de um período crítico de comunicação propõem-se utilizar um protocolo TDMA para sincronização das transmissões, no qual cada veículo transmite periodicamente durante uma

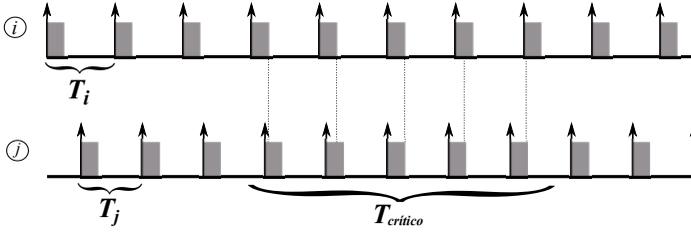


Figura 5.2: Troca de mensagens entre veículos i e j com seus respectivos períodos de transmissão $T_i \neq T_j$ com ocorrência de um período crítico de transmissão.

determinada janela temporal que é determinada de acordo com o número de integrantes do grupo, [52, 55, 69].

A principal característica deste protocolo TDMA é separar as transmissões dos vários veículos no tempo, o máximo possível, sem a utilização de mecanismos globais. Para tal, o veículo i ajusta os seus instantes de transmissão mediante os instantes de recepção das mensagens enviadas pelos seus vizinhos j , provocando uma rotação de fase no ciclo de transmissões.

Nestas circunstâncias, todos os veículos sincronizam seus respectivos períodos de transmissão que ficam iguais entre si, resultando em um período que diz-se de *atualização do grupo*, uma vez que todos os veículos transmitem uma vez nesse período e o qual designa-se por T_{up} . Este período também define a capacidade de resposta e resolução temporal da comunicação global do grupo, sendo dividido igualmente pelo número de integrantes da equipe gerando uma estrutura de *slots* ou janelas. Com *slots* iguais, admitindo que os veículos transmitem no início do *slot* correspondente, tem-se que as transmissões dos vários veículos estarão separadas o máximo possível no tempo. A duração de cada *slot* é computada como $T_{slot}^i = T_{up}/n$, sendo n o número de veículos no grupo.

Conforme a dinâmica da rede e a movimentação dos veículos, cada um destes pode re-sincronizar suas próximas transmissões somente utilizando as mensagens recebidas pelos veículos vizinhos em cada ciclo de atualização. Contudo, esta sincronização pode ser propagada para toda a rede ciclo após ciclo, utilizando as ligações existentes em cada instante.

A cada instante de transmissão, o veículo i define o instante do próximo *slot* para um período depois: $T_i^{prox} = T_i^{atual} + T_{up}$, no qual

<p>Rotina 4: Sincronização após recepção de mensagem no <i>slot</i> m.</p>
<p>1: $T_i^{prox'} = T_i^{atual} + T_i^m - T_{mens}^m + (n - m) \times T_{slot}^i$</p> <p>2: $T_i^{prox} = \max \{T_i^{prox'}, T_i^{prox}\}$</p>

T_i^{atual} é o instante da última transmissão. De forma complementar, a cada recepção de mensagem no *slot* m depois de um tempo T_i^m em relação a última mensagem enviada e com duração T_{mens}^m , o veículo i executa a Rotina (4) para possíveis ajustes no início de sua próxima janela de transmissão.

Na Figura 5.3 são mostradas as diferenças entre os cálculos de T_i^{prox} e $T_i^{prox'}$, no qual, caso ocorra um atraso na transmissão de uma mensagem de um veículo do grupo, os vizinhos respectivos acusarão este atraso. Desta forma, a comunicação entre os integrantes do grupo passa a ter um caráter síncrono obtido de forma descentralizada.

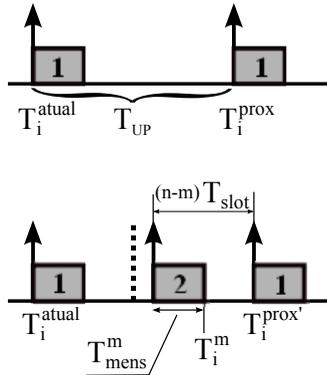


Figura 5.3: Demonstração gráfica para definição dos próximos períodos de transmissão T_i^{prox} e $T_i^{prox'}$.

Na Figura 5.4 é mostrado o princípio de funcionamento do protocolo de comunicação para sincronização das mensagens mediante um exemplo ilustrativo. Os *slots* iniciais estão indicados com uma linha tracejada.

Em linhas gerais, o veículo 1 já inicia sua transmissão com um atraso, o qual somente é detectado pelo veículo 3, que imediatamente posterga este atraso para seu próximo *slot*, originando uma nova li-

nha de transmissão, que está marcada com linhas cheias. Nota-se que os veículos 2 e 4 ainda não têm conhecimento do atraso e continuam transmitindo as mensagens conforme seus *slots* iniciais. Uma vez que o veículo 3 transmite sua mensagem já defasada, o veículo 2 ajusta sua nova linha de transmissão em sintonia com o atraso inicial do veículo 1. Finalmente, o veículo 4 também é sincronizado após receber uma mensagem do veículo 2.

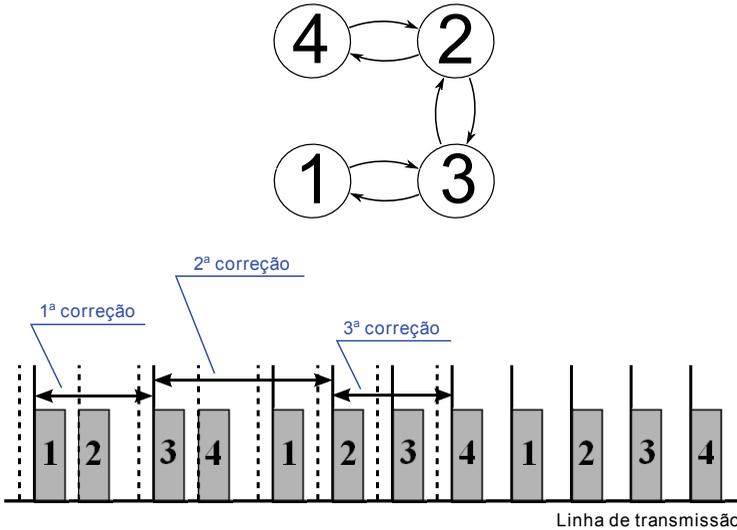


Figura 5.4: Exemplo ilustrativo sobre o princípio de funcionamento do protocolo de comunicação para re-sincronização descentralizada no envio das mensagens por parte dos veículos.

Evidentemente, o sucesso na re-sincronização das respectivas janelas de transmissão de cada veículo da equipe depende da estrutura de comunicação (refletida na topologia do sistema) para que os possíveis ajustes possam ser propagados para toda a rede. Neste ponto, é fundamental definir sobre quais condições a Rotina (4) tem êxito na sincronização das janelas de transmissão.

Qualquer atraso originado por um integrante da equipe deve ser considerado como uma referência para todos os outros veículos, no sentido de que todos ajustem suas janelas de transmissão de acordo com o atraso original. Ora, a condição para que isso ocorra é que o dígrafo G_n relacionado com a estrutura de comunicação seja fortemente conectado (*i.e.*, a partir de qualquer v_i há um caminho orientado para todos os

outros nós de G_n).

5.2 Modelagem da troca de mensagens

Para a partilha de informação entre os integrantes do grupo mediante a troca de mensagens define-se o período de atualização $T_{up} = 50ms$. De forma paralela, admite-se que devido a deficiência técnica nos dispositivos físicos, os referidos períodos para definição de cada janela de transmissão podem variar dentro de uma faixa definida como $T_{up}^i = \{49,9 \rightarrow 50,1\} ms$ para cada veículo $i = 1, \dots, n$. Desta forma, cada integrante da equipe pode atualizar seu *estado da informação* de forma independente.

Nas simulações admite-se a perda de mensagens em razão da colisão das mesmas durante o compartilhamento de informação entre dois veículos quaisquer, com a prerrogativa de que ambos mantêm uma relação de vizinhança, e portanto, estão aptos a estabelecerem um canal de comunicação.

Observação 5.3 *Na perda de mensagens devido a colisão somente considera-se a situação em que os veículos mantêm relação de vizinhança. Desta forma, não admite-se interferência de transmissões relacionadas a veículos não vizinhos sobre os canais de comunicação originados pelo veículo i e seus vizinhos j .*

Basicamente são modeladas duas situações baseadas em uma probabilidade individual de sucesso no envio/recebimento da mensagem para cada canal de comunicação habilitado na estrutura de comunicação. Na primeira define-se aleatoriamente que a probabilidade de sucesso na troca de mensagens entre quaisquer veículos i e j está definida dentro de uma faixa que pode variar entre 80% e 95%, o porquê dessa situação consiste-se principalmente sobre a instabilidade nos equipamentos eletrônicos e ocorrência de eventos imprevisíveis.

Desta forma, cada canal de comunicação entre dois veículos quaisquer i e j pode ser modelado conforme:

$$a_{ij}(p_i) : \Omega_i \rightarrow \mathfrak{R} \quad \text{para } a_{ij} \in \varepsilon \mid \Omega_i = [80\%, 95\%]$$

em que cada canal de comunicação a_{ij} está associado a uma probabilidade de sucesso p_i quando o veículo j envia uma mensagem para o veículo i .

A segunda situação caracteriza-se quando os veículos i e j enviam as respectivas mensagens de forma simultânea, ou próximo disso.

Neste caso, a probabilidade de colisão entre as mensagens aumenta consideravelmente, e por conseguinte, a probabilidade de sucesso p_i é reduzida.

Para definir o período crítico na troca de mensagens associado à simultaneidade no compartilhamento da informação, definem-se os instantes $T_i(t)$ e $T_j(t)$, em que os veículos i e j iniciam a transmissão de suas respectivas mensagens, e mais, define-se T_{mens}^m como o tempo de duração da mensagem. Seja o seguinte equacionamento:

$$\|T_i(t) - T_j(t)\| \leq T_{mens}^m, \quad (5.1)$$

Isto posto, caso a janela de tempo entre duas transmissões consecutivas, referentes aos veículos i e j , seja menor do que o tempo de duração da mensagem T_{mens}^m , a probabilidade de sucesso no envio/recebimento desta mensagem é redefinida para 30%, conforme equacionamento a seguir:

$$a_{ij}(p_{crit}) : \Omega_{crit} \rightarrow \Re \text{ para } a_{ij} \in \varepsilon \mid \Omega_{crit} = 30\%$$

em que cada canal de comunicação a_{ij} com transmissão caracterizada por um período crítico está associado a uma reduzida probabilidade de sucesso p_{crit} .

Estes procedimentos efetivamente podem redefinir a estrutura de comunicação, a qual está refletida na topologia do sistema, de forma temporária, visto que as probabilidades de sucesso p_i e p_{crit} são calculadas individualmente para todos os canais de comunicação a cada iteração da simulação.

5.3 Simulação e análise dos resultados

Em todas as simulações o consenso é obtido utilizando a estratégia de controle cooperativo desenvolvida nos capítulos anteriores. O propósito é explorar de forma mais abrangente os resultados em virtude da perda das mensagens para diferentes situações de consenso, e para tal, nos exemplos utilizam-se diferentes estruturas de comunicação para modelar o compartilhamento de informação entre os integrantes da equipe.

O sistema multi-veículo está composto por cinco integrantes, para os quais, admitindo deficiência técnica nos dispositivos físicos dos respectivos relógios de cada veículo, tem-se diferentes períodos de atualização, T_{up}^i , relacionados à cada janela de transmissão do veículo i . Desta forma, definem-se os seguintes períodos:

$$T_{up}^i = [50, 1; 50; 50, 1; 49, 9; 49, 9] \text{ ms} \quad \text{para : } i = 1, \dots, n.$$

Como consequência direta desta diferença nos períodos de atualização, cada veículo integrante da equipe atualiza seu *estado da informação* de forma independente conforme o prosseguimento da tarefa.

Com o propósito de explorar mais situações para o problema de *rendezvous*, abordam-se duas condições de consenso, a primeira sendo o consenso médio e a segunda o consenso de referência, em que é imposta de forma limitada uma localização final ao grupo.

O objetivo é avaliar estas situações de consenso mediante falhas nos canais de comunicação e perda de mensagens devido a colisão entre as mesmas dado o caráter assíncrono apresentado acima. Em seguida, procura-se estabelecer uma comparação e avaliação entre os resultados quando se utiliza o protocolo para uma re-sincronização das mensagens.

Finalmente, outra questão que surge é a relação entre a densidade da estrutura de comunicação (número de canais disponíveis na topologia do sistema) e a convergência para o consenso frente aos problemas de comunicação (colisão de mensagens, períodos críticos para troca de mensagens e faltas temporárias nos dispositivos).

5.3.1 Consenso médio

O consenso médio caracteriza-se pelo equilíbrio de consenso sendo função das condições iniciais dos *estados da informação* dos integrantes que têm um caminho orientado para todos os outros veículos da equipe. Assim, quando o dígrafo que representa a estrutura de comunicação contém uma árvore de extensão orientada a partir de cada veículo do grupo, o equilíbrio de consenso é a média ponderada de todas as condições iniciais dos *estados da informação* que têm este caminho orientado em encontro aos outros integrantes do grupo [65], ou seja, o dígrafo é fortemente conectado.

As estruturas iniciais de comunicação estão representadas pelas topologias *C* e *D* mostradas na Figura 5.5, as quais são utilizadas nas simulações numéricas. Propositamente, a topologia *D* é análoga à topologia *C*; de fato, *D* está contida em *C*, e por conseguinte, há uma clara diferença na densidade de canais de comunicação entre os veículos. Visualmente, pode-se constatar que a Topologia *C* tem mais fluxo de informação percorrendo entre os integrantes da equipe.

As direções das setas indicam a orientação do fluxo da informação e os nós estão diretamente relacionados com os *estados da informação* dos respectivos integrantes.

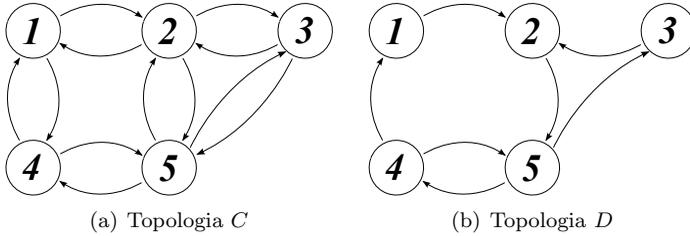


Figura 5.5: Topologias utilizadas para ilustrar a estrutura de comunicação entre os integrantes da equipe no problema de *rendezvous* baseado em consenso médio.

A finalidade deste exemplo é analisar a consequência que a implementação do protocolo de sincronização na troca de mensagens pode ter sobre o desempenho na situação de consenso médio. Destaca-se o fato de que ao não utilizar este protocolo, a partilha de informação fica exposta às colisões de mensagens e conseqüente perda de informação. A eficiência do protocolo é comparada e avaliada mediante a comparação entre dois arranjos para a troca de mensagem. No primeiro utiliza-se o protocolo descrito na Rotina 4 (denominado como *re-sincronizado* para facilidade de citação), e no segundo, identificado como *assíncrono*, não faz-se uso do mesmo protocolo

Para todos os exemplos será mostrado o número médio de iterações necessárias para os veículos convergirem para o ponto de *rendezvous*. Adota-se como critério de convergência a diferença numérica entre o *estado da informação* de um veículo qualquer i para $i = 1, \dots, n$ definido como $\xi_i^{(x,y)}$ e seus vizinhos j conforme equacionamento:

$$\|\xi_i^{(x,y)} - \xi_j^{(x,y)}\|_2 \leq \psi$$

em que, ψ é definido como um critério de parada, em todos os exemplos tem-se $\psi = 0, 1$. Este procedimento é adotado durante a atualização do *estado da informação* $\xi_i^{(x,y)}$.

De forma complementar, o número de colisões entre a troca de mensagens é identificado juntamente com o número de canais de comunicação disponíveis durante o procedimento da tarefa.

Dado o caráter aleatório na definição da colisão das mensagens, e faltas temporárias, são procedidas 1000 simulações para cada exemplo adotado, nas quais a posição inicial dos veículos é definida de forma aleatória em cada processo de simulação.

Para uma comparação e avaliação final, como resultado de cada simulação, mostram-se o valor médio de iteração para cada integrante alcançar o ponto de *rendezvous*, o número médio de colisões ocorridas na rede e o número de canais de comunicação habilitados para a partilha de informação em cada exemplo.

Consenso médio utilizando a topologia C

No primeiro exemplo é utilizada a topologia C para ilustrar a estrutura de comunicação entre os integrantes da equipe. Os resultados mostrados em forma de gráficos nas Figuras 5.6 e 5.7 foram obtidos com a aplicação da estratégia de controle cooperativo baseado em consenso.

O tempo de duração das mensagens é diferente entre as simulações. Note que na Figura 5.6 o tempo de mensagem é $T_{mens}^i = 1 ms$ e na Figura 5.7 é $T_{mens}^i = 2 ms$. Com isso, procura-se avaliar como este aspecto pode influenciar na possível colisão entre as mensagens.

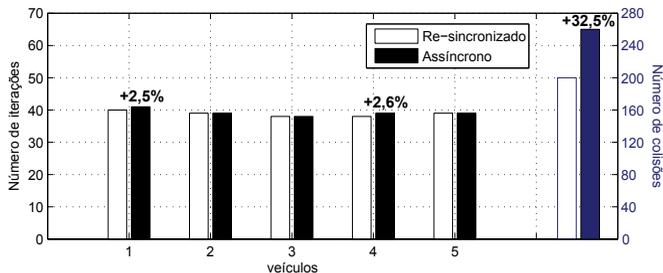


Figura 5.6: Iterações por veículos e colisão de mensagens para as abordagens síncrona e assíncrona com $T_{mens}^i = 1 ms$ utilizando a Topologia C . Para cada simulação foram compartilhadas 1200 mensagens.

De acordo com os gráficos mostrados nas Figuras 5.6 e 5.7, a troca de mensagens de forma assíncrona para o compartilhamento da informação entre os veículos integrantes da equipe, não tem efeito prejudicial significativo frente ao desempenho global para o problema de *rendezvous* baseado em consenso médio.

Evidentemente, o elevado número de caminhos orientados possíveis para manter um fluxo de informação entre os integrantes do grupo contribui para o sucesso na obtenção de consenso médio. Ainda que se tenha um aumento de 32% no número de colisões (as 50 colisões para o re-sincronizado elevaram-se até o patamar de 65 colisões no caso assíncrono), este número tem grandeza aproximada de apenas 5% do

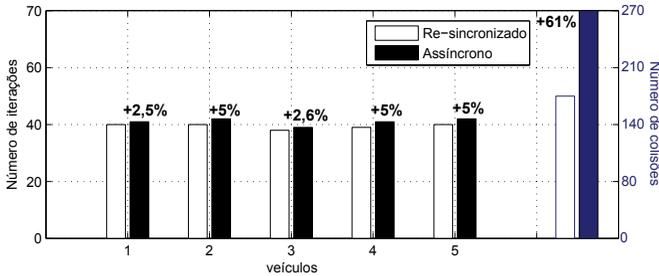


Figura 5.7: Iterações por veículos e colisão de mensagens para as abordagens síncrona e assíncrona com $T_{mens}^i = 2\text{ ms}$ utilizando a Topologia C . Para cada simulação foram compartilhadas 1200 mensagens.

total de mensagens compartilhadas em cada simulação (65 sobre o 1200 mensagens).

Importante notar que se trata de consenso médio, e portanto, qualquer ponto de *rendezvous* que seja combinação dos valores do *estado da informação* dos veículos que têm caminho orientado para todos os outros integrantes da rede pode ser solução do problema, o que explica a convergência de consenso. Desta forma, associado ao aumento do número de colisões na rede, também se tem um grande número de caminhos orientados, e assim, os veículos ainda conseguem manter canais de comunicação para o consenso médio.

Consenso médio utilizando a topologia D

Neste segundo exemplo utiliza-se a topologia D para ilustrar a estrutura de comunicação entre os integrantes da equipe. Os resultados mostrados em forma de gráficos nas Figuras 5.8 e 5.9 foram obtidos com a aplicação da estratégia de controle cooperativo baseado em consenso.

O tempo de duração das mensagens é diferente entre as simulações, note que na Figura 5.8 o tempo de mensagem é $T_{mens}^i = 1\text{ ms}$ e na Figura 5.9 é $T_{mens}^i = 2\text{ ms}$. Com isso, procura-se avaliar como este aspecto pode influenciar na possível colisão entre as mensagens.

Os resultados mostrados nas Figuras 5.8 e 5.9 indicam diferenças maiores para a convergência de consenso entre os modos re-sincronizado e assíncrono. A partilha de informação mediante uma troca de mensagens assíncrona prejudica o desempenho da estratégia de controle cooperativo baseado em consenso médio para o problema de *rendezvous*.

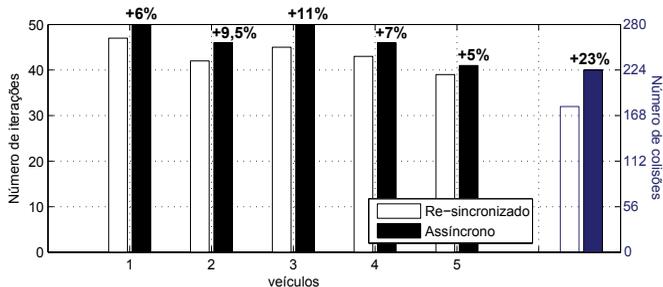


Figura 5.8: Iterações por veículos e colisão de mensagens para as abordagens síncrona e assíncrona com $T_{mens}^i = 1\text{ ms}$ utilizando a Topologia D . Para cada simulação foram compartilhadas 700 mensagens.

Neste caso, o acréscimo no número de colisões na rede repercute diretamente na convergência para o consenso de acordo com o número de iterações necessárias para atingir o objetivo em comum [i.e., ponto de *rendezvous*]. Para a topologia C , obteve-se uma média aproximada de 40 iterações por veículo e, neste exemplo, utilizando a topologia D a média nas iterações por veículo elevou-se para valores em torno de 50 iterações.

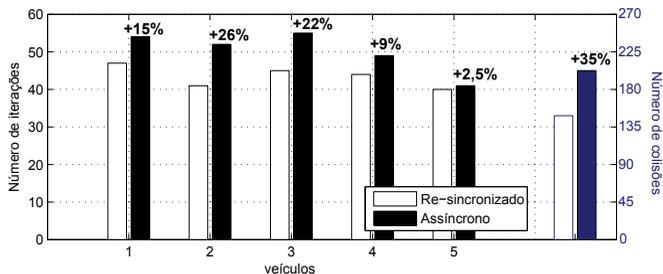


Figura 5.9: Iterações por veículos e colisão de mensagens para as abordagens síncrona e assíncrona com $T_{mens}^i = 2\text{ ms}$ utilizando a Topologia D . Para cada simulação foram compartilhadas 700 mensagens.

A explicação baseia-se na estrutura de comunicação do sistema, que está refletida nas topologias C e D . Há um número de caminhos orientados reduzidos neste exemplo quando compara-se com o exemplo anterior. Desta forma, cada caminho orientado passa a ter uma importância maior na manutenção da comunicação entre os integrantes da

equipe.

Outro aspecto que se diferencia neste exemplo é o fato de que quanto maior o tempo necessário para transmissão da mensagem, o número de colisões na rede em razão da troca de mensagens também aumenta, evidenciando uma relação direta entre o tempo necessário para transmissão e o número de colisões. Este comportamento era esperado, dado o caráter periódico no atraso das mensagens e a definição de período crítico de transmissão.

A utilização do protocolo de comunicação para a re-sincronização das mensagens possibilita melhorar o desempenho global da estratégia de controle cooperativo para o problema de *rendezvous* baseado em consenso.

5.3.2 Consenso de referência

O objetivo do consenso de referência é direcionar todos os *estados da informação*, referentes a cada veículo integrante da equipe, para um estado de referência. A diferença capital em relação ao consenso médio, exemplo anterior em que o valor final de *rendezvous* está relacionado com a topologia de comunicação e os valores iniciais dos *estados da informação* dos veículos, no consenso de referência almeja-se que os *estados da informação* convirjam para um valor de *rendezvous* pré definido e de conhecimento limitado.

Note que neste caso, a concordância entre os integrantes da equipe deve incluir ambas situações de convergência, tanto para um valor acerca do objetivo comum do grupo (consenso médio) como para um valor de referência.

Neste exemplo utiliza-se a topologia E para ilustrar a estrutura de comunicação entre os integrantes da equipe. As direções das setas indicam a orientação do fluxo da informação e os nós estão diretamente relacionados com os *estados da informação* dos respectivos veículos.

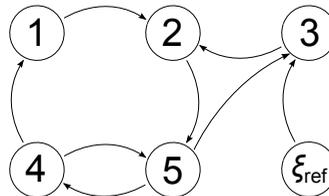


Figura 5.10: Topologia utilizada para modelar a troca de informação entre os veículos no problema de consenso de referência.

Os resultados mostrados em forma de gráficos nas Figuras 5.11 e 5.12 foram obtidos com a aplicação da estratégia de controle cooperativo baseado em consenso de referência. Ao contrário do problema de *rendezvous* baseado em consenso médio, em que, qualquer combinação dos valores do *estado da informação* dos veículos que têm caminho orientado para os outros integrantes pode ser solução do problema, agora o valor de *rendezvous* deve ser necessariamente o valor de referência.

O tempo de duração das mensagens é diferente entre as simulações, note que na Figura 5.11 o tempo de mensagem é $T_{mens}^i = 1\text{ ms}$ e na Figura 5.12 é $T_{mens}^i = 2\text{ ms}$. Com isso, procura-se avaliar como este aspecto pode influenciar na possível colisão entre as mensagens.

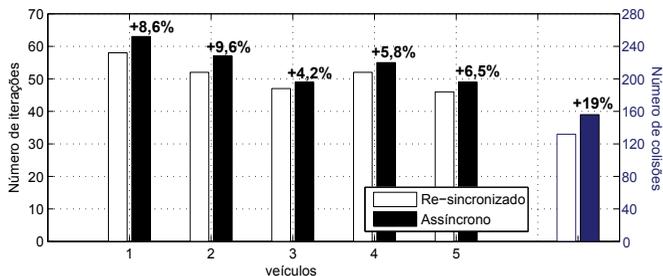


Figura 5.11: Iterações por veículos e colisão de mensagens para as abordagens síncrona e assíncrona com $T_{mens}^i = 1\text{ ms}$ utilizando a Topologia E . Para cada simulação foram compartilhadas 700 mensagens.

Neste contexto, os caminhos orientados a partir de um veículo i qualquer e a informação de referência têm papel fundamental para o sucesso da tarefa. Isto posto, pode-se constatar que colisões de mensagens na troca de informação sobre canais de comunicação (relacionados aos caminhos orientados) devem ocasionar retardos e desvios nas trajetórias de consenso para os integrantes da equipe, uma vez que a informação pode ser perdida devido a colisão.

Os valores médios de iterações necessárias para o consenso de cada integrante são consideravelmente maiores se comparados ao caso do consenso médio. Nas Figuras 5.11 e 5.12 podem-se constatar valores próximos a 50 e 60 iterações, alguns até 70 iterações.

Outro aspecto que pode ser destacado é que devido a característica do consenso de referência, aumenta a importância da aplicação do protocolo de re-sincronização frente ao problema de *rendezvous*, conforme os resultados apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12. Uma comparação entre a quantidade de iterações referentes às duas formas de

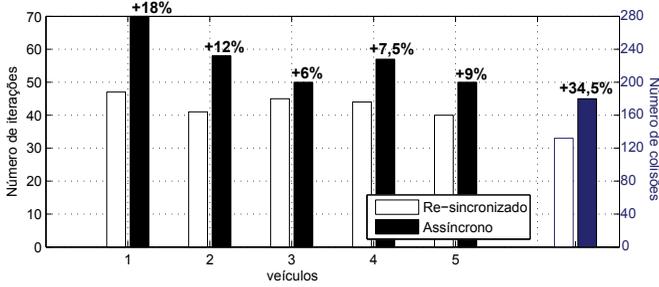


Figura 5.12: Iterações por veículos e colisão de mensagens para as abordagens síncrona e assíncrona com $T_{mens}^i = 2\text{ ms}$ utilizando a Topologia E . Para cada simulação foram compartilhadas 700 mensagens.

compartilhar mensagens indica uma diferença maior para o caso assíncrono, vide as porcentagens em ambas figuras indicadas anteriormente.

5.4 Resumo

Neste capítulo foi abordada a situação em que a vizinhança entre dois veículos é mantida durante toda a tarefa, e mesmo assim, surge outro problema relacionado a partilha da informação, já que o canal de comunicação habilitado é passível . a possibilidade de perda de pacote devido a colisão na troca de mensagens mediante comunicação sem fio, e portanto, pode-se perder informação vital para o consenso.

Por este motivo, acrescentou-se à estratégia de controle cooperativo baseado em consenso um protocolo de comunicação, com o qual é possível melhorar a pontualidade na troca periódica de informação, minimizando a possibilidade de perda de pacotes devido principalmente as colisões entre as mensagens. Ambos problemas de consenso, médio e referência, foram abordados com intuito de avaliar o impacto do protocolo sobre o consenso e a perda de pacotes devido a colisão das mensagens.

Os resultados obtidos neste capítulo referem-se ao período de Doutorado Sanduíche em Portugal. Mediante acordo entre os governos do Brasil e Portugal, sob o projeto CAPES/FCT - Comunicações em Tempo Real em Redes Sem Fio, realizei um estágio como pesquisador visitante na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) sob a supervisão do prof. Luis Almeida, durante o período entre 14/11/11 e 30/05/12.

Capítulo 6

Conclusões

A pesquisa sobre sistemas multi-veículos é bastante diversificada no que diz respeito às várias áreas do conhecimento utilizadas para desenvolvimento de trabalhos no tema. É sabido que o tópico de sistemas multi-veículos pode abranger uma grande variedade de aplicações e problemas conforme apresentado neste documento. Para citar alguns, além da abordagem de consenso para o problema de *rendezvous*, o tema inclui controle da formação de robôs [13, 15, 37, 43], controle de cobertura de sensores [9, 10, 34], controle da conectividade de redes [1, 27, 76] e técnica de enxame [40, 83, 88].

Ao longo desta tese apresentou-se uma discussão acerca de uma estratégia de controle cooperativo baseada em consenso para resolver o problema de *rendezvous* para um grupo multi-veículos. Como caráter essencial de cooperação, os veículos compartilham informação acerca de cada conhecimento individual, o qual está sujeito a complicações decorrentes de falhas na comunicação com origem diversa, desde faltas nos dispositivos de comunicação até perdas de pacote. Como de fato os veículos estão em movimento, a topologia de comunicação é considerada variante no tempo, em que a habilitação de um canal de comunicação entre os veículos é inversamente proporcional à distância entre os mesmos.

Em uma primeira etapa, a estratégia de controle cooperativo consistiu no desenvolvimento de leis de controle descentralizadas para que cada veículo determine sua trajetória de consenso até o ponto de encontro que *a priori* é desconhecido para alguns integrantes da equipe. Para tal, utilizou-se uma abordagem via controle preditivo baseado no princípio do horizonte deslizante. Como consequência, cada veículo

sintetiza uma lei de controle para determinar a trajetória de consenso baseada na otimização de uma função custo, em que considera-se o desempenho sobre requisitos de resposta em concordância com o caráter de cooperação entre os veículos do grupo.

De forma complementar à proposta, adicionou-se à formulação das trajetórias de consenso, um tipo de restrição de conectividade, em que a ideia principal passa por garantir a relação de vizinhança entre dois veículos quaisquer durante toda a tarefa, mesmo com a ocorrência de faltas temporárias nos dispositivos de comunicação. Outros objetivos, que não o problema de *rendezvous*, podem ser adicionados à tarefa sob o mesmo esquema de controle, como por exemplo, a otimização do ângulo de sensoriamento em relação ao ponto de encontro e a formação de cobertura sobre o ponto de referência.

Ainda que os veículos mantenham a relação de vizinhança durante toda a tarefa, esta condição pode não ser suficiente para o consenso, já que há possibilidade de falhas na comunicação com perda de pacotes devido à colisão das mensagens na comunicação sem fio. Portanto, de forma complementar, acrescentou-se à estratégia de controle cooperativo baseado em consenso um protocolo de comunicação, com intuito de melhorar a pontualidade na troca periódica de informação. Deste modo, foi possível minimizar a perda de pacotes em razão principalmente das colisões entre as mensagens.

Outra característica que este protocolo intrinsecamente adiciona à estratégia proposta é que em conjunto com a síntese de leis de controle descentralizadas, a troca de informação não depende de um relógio global, sobre o qual, os veículos definem seus instantes de transmissão. Ao contrário disso, cada integrante da equipe pode atualizar seu *estado da informação* de forma independente, e conforme prosseguimento da tarefa, pode-se proceder uma re-sincronização dos instantes de atualização.

A estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para o problema de *rendezvous* proposta ao longo deste documento faz frente a problemas de comunicação sobre os quais pode-se tomar uma ação, caso da sincronização das mensagens, distância entre os veículos e faltas temporárias nos dispositivos de comunicação.

6.1 Contribuições da tese

As contribuições destacadas desta tese são listadas a seguir.

i) *Formulação de estratégia de controle cooperativo descentralizado para*

geração das trajetórias de consenso, em que se considera:

- *conhecimento e troca de informação limitados, principalmente pela distância.*
 - *fluxo de informação orientado.*
 - *canais de comunicação sujeitos a faltas temporárias, que resulta em topologias variantes no tempo.*
 - *informação do ponto de encontro limitada a parte do grupo.*
- ii)** *Garantia de conectividade (relação de vizinhança) entre dois veículos, que resulta em uma formulação de trajetórias de consenso tolerante a faltas temporárias nos dispositivos de comunicação.*
- iii)** *Extensão da estratégia de controle cooperativo para abordar o problema da otimização do ângulo de sensoriamento em relação ao ponto de encontro e a formação sobre o ponto de rendezvous, que a priori é desconhecido.*
- iv)** *Aplicação de protocolo de comunicação para re-sincronização na troca de mensagens para fazer frente à perda de pacotes devido à colisão e exposição na comunicação sem fio.*
- v)** *Estudo sobre a convergência de consenso para o problema de rendezvous vinculada às ocorrências de colisões de mensagens durante a partilha da informação.*

6.2 Perspectivas de atividades futuras

Conforme apresentado nas Figuras 1.1 e 1.4 há a possibilidade de abordar estratégias de controle cooperativo de forma bastante diversificada. A seguir, procura-se destacar alguns temas para o prosseguimento da linha de pesquisa relacionados à teoria de consenso e o problema de *rendezvous*, e de forma complementar, indicam-se possíveis variações neste contexto que efetivamente podem ser pontos de partida para futuros trabalhos.

- Implementação da estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para geração de trajetórias de consenso em veículos reais, tanto terrestres como aéreos. Desta forma, pode-se avaliar a estratégia proposta em termos de implementação, como o custo computacional para cálculo das leis de controle em tempo real.

- Abordar outros problemas de cooperação modificando a função custo para diferentes objetivos, tais como formação de controle e cobertura. Também podem-se adicionar restrições ao problema considerando limitações espaciais para evitar colisão, consumo de energia na troca de mensagens e tratamento para referência variante no tempo.
- Abordar outras dinâmicas para o *estado da informação*. Na formulação geral para as trajetórias de consenso pode-se incluir a dinâmica desejada conforme o tipo de aplicação, e portanto, pode-se proceder um estudo sobre as vantagens, e desvantagens, que podem surgir com a utilização de outras dinâmicas para o *estado da informação*.
- Abordar o impacto que outros problemas de comunicação, principalmente os eventos com ocorrência imprevisível (presença de obstáculos, faltas desconhecidas nos dispositivos de comunicação), têm sobre o consenso no problema de *rendezvous*. Desta forma, a estratégia de cooperação deve incorporar garantias para o consenso frente a estes problemas na comunicação de forma totalmente descentralizada.
- Adicionar à estratégia um controle da topologia de comunicação de forma descentralizada, ou seja, cada veículo pode habilitar, ou não, seus canais de comunicação disponíveis e conforme o objetivo da tarefa. Desta forma, a distância não é o único critério para definir a região de vizinhança.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Ajorlou, A. Momeni, and A. G. Aghdam. A class of bounded distributed control strategies for connectivity preservation in multi-agent systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55:2828 – 2833, 2010.
- [2] R. W. Beard, T. W. McLain, D. Nelson, D. Kingston, and D. Johanson. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs. *Proceedings of the IEEE*, 94:1306 – 1324, 2006.
- [3] R. Bhattacharya, A. Tiwari, J. Fung, and R. M. Murray. Cone invariance and rendezvous of multiple agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006.
- [4] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [5] E. F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer - Advanced Textbooks in control and signal processing, 2000.
- [6] Y. Cao and W. Ren. Optimal linear-consensus algorithms: An LQR perspective. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40:819 – 830, 2010.
- [7] J.S. Caughman, G. Lafferriere, J.J.P. Veerman, and A. Williams. Decentralized control of vehicle formations. *Systems control letter*, 54:899 – 910, 2005.
- [8] S. Chatterjee and E. Seneta. Towards consensus: Some convergence theorems on repeated averaging. *Journal of Applied Probability*, 14:89 – 97, 1977.

- [9] J. Cortes, S. Martinez, and F. Bullo. Spatially-distributed coverage optimization and control with limited-range interactions. *ESAIM Control, Optimization and Calculus of Variations*, 11:691 – 719, 2005.
- [10] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo. Coverage control for mobile sensing networks. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, D.C., May 2002.
- [11] Academia Brasileira de Letras. *Dicionário escolar da língua portuguesa*. Editora Nacional, Brasil, 2005.
- [12] M. H. DeGroot. Reaching a consensus. *Journal of American Statistical Association*, 69:118 – 121, 1974.
- [13] D. V. Dimarogonas and K. H. Johansson. Stability analysis for multi-agent systems using the incidence matrix: quantized communication and formation control. *Automatica*, 46:695 – 700, 2010.
- [14] D. V. Dimarogonas and K. J. Kyriakopoulos. On the rendezvous problem for multiple nonholonomic agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52:916 – 922, 2007.
- [15] H. B. Duan and S. Q. Liu. Non-linear dual-mode receding horizon control for multiple unmanned air vehicles formation flight based on chaotic particle swarm optimisation. *IET Control Theory and Applications*, 4:2565 – 2578, 2010.
- [16] W. Dunbar and R. Murray. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization. *Automatica*, 42:549 – 558, 2006.
- [17] M. G. Earl and R. D’Andrea. Multi-vehicle cooperative control using mixed integer linear programming. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005.
- [18] M. Egerstedt, S. Martini, M. Cao, K. Camlibel, and A. Bicchi. Interacting with networks. *IEEE control systems magazine*, 8:66 – 73, 2012.
- [19] Real Academia Espanola. *Diccionario de la lengua española*. Espasa libros, S.L.U., 22 ed, España, 2010.
- [20] J. A. Fax and R. M. Murray. Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49:1465 – 1476, 2004.

- [21] M. C. D. Gennaro and A. Jadbabaie. Decentralized control of connectivity for multi-agent systems. In *IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, USA, Dec 2006.
- [22] D. Gu and E. Yang. A suboptimal model predictive formation control. In *International Conference on Intelligent Robots*, Alberta, Canada, Aug 2005.
- [23] V. Gupta, T. H. Chung, B. Hassibi, and R. M. Murray. On a stochastic sensor selection algorithm with applications in sensor scheduling and sensor coverage. *Automatica*, 2004.
- [24] Z.G. Hou, L. Cheng, and M. Tan. Decentralized robust adaptive control for the multiagent system consensus problem using neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 39:636 – 647, 2009.
- [25] A. Jadbabaie, J. Lin, and S. Morse. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48:988 – 1000, 2004.
- [26] D. Jakovetic, J. Xavier, and J. M. F. Moura. Weight optimization for consensus algorithms with correlated switching topology. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58:3788 – 3801, 2010.
- [27] M. Ji and M. Egerstedt. Distributed coordination control of multi-agent systems while preserving connectedness. *IEEE Transactions on Robotics*, 23:693 – 703, 2007.
- [28] E. S. Kazerooni and K. Khorasani. Optimal consensus seeking in a network of multiagent systems: An LMI approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40:540 – 547, 2010.
- [29] E. Klavins. A formal model of a multi-robot control and communication task. In *IEEE Control and Decision Conference*, Maui, USA, December 2003.
- [30] B. Kuipers. Why don't I take military funding? In <http://web.eecs.umich.edu/kuipers/opinions/no-military-funding.html>, 2013.
- [31] Y. Kuwata and J. P. How. Cooperative distributed robust trajectory optimization using receding horizon MILP. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19:423 – 431, 2011.

- [32] J. Lee, J.S. Kim, H. Song, and H. Shim. A constrained consensus problem using MPC. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 9:952 – 957, 2011.
- [33] N. E. Leonard and E. Fiorelli. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups. In *IEEE Control and Decision Conference*, Orlando, USA, Dezembro 2001.
- [34] X. Li and Y. Xi. Distributed connected coverage control for groups of mobile agents. *International Journal of Control*, 83:1347 – 1363, 2010.
- [35] J. Lin, A. S. Morse, and B. D. O. Anderson. The multi-agent rendezvous problem. In *IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, USA, December 2003.
- [36] J. Lin, A. S. Morse, and B. D. O. Anderson. The multi-agent rendezvous problem - the asynchronous case. In *IEEE Conference on Decision and Control*, Atlantis, Bahamas, December 2004.
- [37] P. Lin and Y. Jia. Distributed rotating formation control of multi-agent systems. *Systems & Control Letters*, 59:587 – 595, 2010.
- [38] Z. Lin, M. Broucke, and B. Francis. Local control strategies for groups of mobile autonomous agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49:622 – 629, 2004.
- [39] Z. Lin, B. Francis, and M. Maggiore. Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50:121 – 127, 2005.
- [40] Y. Liu, K. M. Passino, and M. M. Polycarpou. Stability analysis of mdimensional asynchronous swarms with a fixed communication topology. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48:76 – 95, 2003.
- [41] S. Martinez. Practical rendezvous through modified circumcenter algorithms. In *IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, USA, Dec 2007.
- [42] S. Martinez, J. Cortes, and F. Bullo. On robust rendezvous for mobile autonomous agents. In *IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, July 2005.

- [43] F. Morbidi, G. L. Mariottini, and D. Prattichizzo. Observer design via immersion and invariance for vision-based leader-follower formation control. *Automatica*, 46:148 – 154, 2010.
- [44] R. M. Murray. Recent research in cooperative control of multi-vehicle systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129:571 – 584, 2007.
- [45] G. Notarstefano, K. Savla, F. Bullo, and A. Jadbabaie. Maintaining limited range connectivity among second-order agents. In *American Control Conference*, Minneapolis, USA, June 2006.
- [46] P. Ogren, E. Fiorelli, and N. E. Leonard. Cooperative control of mobile sensor networks: adaptive gradient climbing in a distributed environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49:1292 – 1302, 2004.
- [47] R. Olfati-Saber. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51:401 – 420, 2006.
- [48] R. Olfati-Saber, J. Alex Fax, and R. M. Murray. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of IEEE*, 95:215 – 234, 2007.
- [49] R. Olfati-Saber and R. M. Murray. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions. In *IFAC World Congress*, Barcelona, Espanha, Setembro 2002.
- [50] R. Olfati-Saber and R. M. Murray. Consensus protocols for networks of dynamic agents. In *American Control Conference*, Denver, USA, June 2003.
- [51] R. Olfati-Saber and R. M. Murray. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49:1520 – 1533, 2004.
- [52] L. Oliveira, L. Almeida, and F. Santos. A loose synchronisation protocol for managing RF ranging in mobile ad-hoc networks. In *RoboCup Symposium*, Istanbul, Turkey, July 2011.
- [53] B. Ordóñez, U. F. Moreno, J. Cerqueira, and L. Almeida. Generation of trajectories using predictive control for tracking consensus with sensing. *Procedia Computer Science*, 10:1094 – 1099, 2012.

- [54] B. Ordóñez, U. F. Moreno, J. Cerqueira, and L. Almeida. Generation of trajectories using predictive control for tracking consensus with sensing and connectivity constraint. *Studies in Computational Intelligence, Springer*, 00:00 – 00, 2013.
- [55] B. Ordóñez, L. Oliveira, U.F. Moreno, J. Cerqueira, and L. Almeida. Utilização de protocolo de comunicação para sincronização das mensagens para controle cooperativo baseado em consenso. In *Congresso Brasileiro de Automática*, Campina Grande, Brasil, 2012.
- [56] J. Ousingsawat and M. E. Campbell. Establishing trajectories for multi-vehicle reconnaissance. In *AIAA Conference on Guidance, Navigation and Control*, Rhode Island, USA, August 2004.
- [57] A. Pal, R. Tiwari, and A. Shukla. Communication constraints multi-agent territory exploration task. *Applied Intelligence, Springer*, 9:1 – 27, 2012.
- [58] L. E. Parker. Designing control laws for cooperative agent teams. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, USA, Maio 1993.
- [59] L. E. Parker. Alliance: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14:220 – 240, 1998.
- [60] L. E. Parker. Current state of the art in distributed autonomous mobile robots. *Distributed Autonomous Robotic Systems 4*, pages 3 – 12, 2000.
- [61] W. Ren. Consensus tracking under directed interaction topologies: algorithms and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18:230 – 237, 2010.
- [62] W. Ren and R. W. Beard. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50:655 – 661, 2005.
- [63] W. Ren and R. W. Beard. *Distributed Consensus in Multi-vehicle cooperative control - Theory and applications*. Springer - Communications and control engineering, 2008.
- [64] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins. Information consensus in multivehicle cooperative control. *IEEE control systems magazine*, pages 71 – 82, 2007.

- [65] W. Ren, R.W. Beard, and T.W. McLain. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems. In *Cooperative Control: A Post-Workshop Volume 2003 Block Island Workshop on Cooperative Control*, pages 171 – 188, New York: Springer-Verlag, 2005.
- [66] C. W. Reynolds. Herds and school:a distributed behavioral model. In *Computer graphics - SIGGRAPH Conference*, Anaheim, USA, Maio 1987.
- [67] A. Richards, J. Bellingham, M. Tillerson, and J. How. Coordination and control of multiple uavs. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Monterey, USA, Agosto 2002.
- [68] A. Richards and J. P. How. Robust distributed model predictive control. *International Journal of Control*, 80:1517 – 1531, 2007.
- [69] F. Santos, L. Almeida, and L. S. Lopes. Self-configuration of an adaptive TDMA wireless communication protocol for teams of mobile robots. In *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 15 – 18, Hamburg, Germany, September 2008.
- [70] N. Schurr, S. Okamoto, R. Maheswaran, P. Scerri, and M. Tambe. *Evolution of a Teamwork Model*. Cognitive Modeling and Multi-Agent Interactions, Cambridge University Press, USA, 2005.
- [71] E. Semsar-Kazerooni and K. Khorasani. An LMI approach to optimal consensus seeking in multi-agent systems. In *American Control Conference*, St. Louis, USA, June 2009.
- [72] A. Sinha and D. Ghose. Generalization of linear cyclic pursuit with application to rendezvous of multiple autonomous agents. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51:1819 – 1824, 2006.
- [73] S. L. Smith, M. E. Broucke, and B. A. Francis. Curve shortening and the rendezvous problem for mobile autonomous robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52:1154 – 1159, 2007.
- [74] R. Sparrow. Building a better warbot: ethical issues in the design of unmanned systems for military applications. *Science Engineering Ethics*, 15:169 – 187, 2009.

- [75] R. Sparrow. "just say no"to drones. *IEEE Technology and society magazine*, pages 56 – 63, 2012.
- [76] Z. Sun and J. Huang. A note on connectivity of multi-agent systems with proximity graphs and linear feedback protocol. *Automatica*, 45:1953 – 1956, 2009.
- [77] M. Tambe. Towards flexible teamwork. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 7:83 – 124, 1997.
- [78] A. Tiwari, J. Fung, J. M. Carson III, R. Bhattacharya, and R. M. Murray. A framework for lyapunov certificates for multi-vehicle rendezvous problems. In *American Control Conference*, Boston, USA, July 2004.
- [79] A. Tiwari, M. Jun, D. E. Jeffcoat, and R. M. Murray. The dynamic sensor coverage problem. In *IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, July 2005.
- [80] D. Del Vecchio. Discrete dynamic feedback for a class of hybrid systems on a lattice. In *IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design*, Munich, Germany, Outubro 2006.
- [81] D. Del Vecchio, R. M. Murray, and E. Klavins. Discrete state estimators for a systems on a lattice. *Automatica*, 42, 2006.
- [82] W. Wallach and C. Allen. *Moral Machines: Teaching Robots Right from Wrong*. Oxford University Press, USA, 2010.
- [83] J. Xi, N. Cai, and Y. Zhong. Consensus problems for high-order linear timeinvariant swarm systems. *Physica A*, 389:5619 – 5627, 2010.
- [84] W. Yu, G. Chen, M. Cao, and J. Kurths. Second-order consensus for multiagent systems with directed topologies and nonlinear dynamics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40:881 – 891, 2010.
- [85] M. M. Zavlanos and G. J. Pappas. Controlling connectivity of dynamic graphs. In *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Seville, Spain, Dec 2005.
- [86] M. M. Zavlanos and G. J. Pappas. Potential field for maintaining connectivity of mobile networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 43:812 – 816, 2007.

-
- [87] Y. Zhao, B. Li, J. Qin, and H. Gao. Hinf consensus and synchronization of nonlinear systems based on a novel fuzzy model. *IEEE Transactions on Cybernetics*, PP:1 – 13, 2013.
- [88] V. Zhdankin and J. C. Sprott. Simple predator-prey swarming model. *Physical Review E*, 82, 2010.
- [89] W.S. Zhong, G.P. Liu, and C. Thomas. Global bounded consensus of multiagent systems with nonidentical nodes and time delays. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 42:1480 – 1488, 2012.

