



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**BUSCA E EXPLORAÇÃO DE FRONTEIRAS DE CONECTIVIDADE EM
REDES DE SENSORES SEM FIO HÍBRIDAS VISANDO INTEGRAÇÃO
DE NÓS**

WESLLEY ALVES FARIAS

**Orientador: Raimundo Carlos Silvério Freire
Coorientador: Elyson Ádan Nunes Carvalho**

Campina Grande - PB, Maio de 2024



BUSCA E EXPLORAÇÃO DE FRONTEIRAS DE CONECTIVIDADE EM REDES DE SENSORES SEM FIO HÍBRIDAS VISANDO INTEGRAÇÃO DE NÓS

WESLLEY ALVES FARIAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Raimundo Carlos Silvério Freire

Coorientador: Elyson Ádan Nunes Carvalho

Campina Grande - PB, Maio de 2024

F224b

Farias, Wesley Alves Iva.

Busca e exploração de fronteiras de conectividade em redes de sensores sem fio híbridas visando integração de nós / Wesley Alves Farias. – Campina Grande, 2024.

126 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Elyson Ádan Nunes Carvalho".

Referências.

1. Redes de Sensores sem Fios. 2. Redes de Sensores sem Fios Híbridas. 3. Controle e Navegação de Nós Móveis. 4. Conectividade, Cobertura e Emprego de Nós. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Carvalho, Elyson Ádan Nunes. III. Título.

CDU 621.391(043)

**Busca e Exploração de Fronteiras de Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Híbridas
Visando Integração de Nós**

WESLLEY ALVES FARIAS

TESE APROVADA EM 06/05/2024

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador(a)

ELYSON ÁDAN NUNES CARVALHO, D.Sc., UFS
Orientador(a)

ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

EDMAR CANDEIA GURJAO, D.Sc, UFCG
Examinador(a)

LUCAS MOLINA, D.Sc., UFS
Examinador(a)

CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA, D.Sc., UFPB
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 06 DE MAIO DE 2024

(Nº 375)

CANDIDATO(A): **WESLEY ALVES FARIAS**. COMISSÃO EXAMINADORA: ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.SC., UFCG , Presidente Da Comissão, RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, DR., UFCG, ELYSON ÁDAN NUNES CARVALHO, D.SC.,UFS, Orientadores, CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA, D.SC., UFPB ., LUCAS MOLINA, D.SC., UFS e EDMAR CANDEIA GURJÃO, D.SC., UFCG . TÍTULO DA TESE: Busca e Exploração de Fronteiras de Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Híbridas Visando Integração de Nós. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Informação. HORA DE INÍCIO: **14h00** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Leandro Ferreira de Lima, e os membros da Comissão Examinadora. Campina Grande, 06 de Maio de 2024.

LEANDRO FERREIRA DE LIMA

Secretário

ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.SC., UFCG

Presidente da Comissão e Examinador Interno

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, DR., UFCG

Orientador

ELYSON ÁDAN NUNES CARVALHO, D.SC., UFS

Orientador

CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA, D.SC., UFPB

Examinador Externo

LUCAS MOLINA, D.SC., UFS

Examinador Externo

EDMAR CANDEIA GURJÃO, D.SC., UFCG

Examinador Externo

WESLEY ALVES FARIAS

Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado da candidato **WESLEY ALVES FARIAS**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA DE LIMA, SECRETÁRIO (A)**, em 07/05/2024, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDMAR CANDEIA GURJAO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 07/05/2024, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE, PROFESSOR 3 GRAU**, em 07/05/2024, às 15:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cleonilson Protasio de Souza, Usuário Externo**, em 07/05/2024, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elyson Ádan Nunes Carvalho, Usuário Externo**, em 07/05/2024, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JEAN RENE SERRES, COORDENADOR DE POS-GRADUACAO**, em 08/05/2024, às 05:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Alves Farias, Usuário Externo**, em 05/06/2024, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4408779** e o código CRC **62AD7F22**.

Caro Professor
Alexandre Jean Rene Serres
Coordenador do PPgEE/UFCG.

Eu, **LUCAS MOLINA, D.SC., UFS**, na qualidade de membro da comissão examinadora da defesa de tese intitulada “BUSCA E EXPLORAÇÃO DE FRONTEIRAS DE CONECTIVIDADE EM REDES DE SENSORES SEM FIO HÍBRIDAS VISANDO INTEGRAÇÃO DE NÓS”, de WESLEY ALVES FARIAS da qual participei por videoconferência, no dia 06 de Maio de 2024, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo nº [23096.027548/2024-66](#) como documento nº ([4408781](#)), a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS MOLINA**
Data: 07/05/2024 16:25:00-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

LUCAS MOLINA, D.SC., UFS.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CNPJ nº 05.055.128/0001-76
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

DECLARAÇÃO

Processo nº 23096.027548/2024-66

DECLARAMOS para fins de comprovação que, os Professores ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.SC., UFCG, Presidente Da Comissão, RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, DR., UFCG, ELYSON ÁDAN NUNES CARVALHO, D.SC., UFS, Orientadores, CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA, D.SC., UFPB, LUCAS MOLINA, D.SC., UFS e EDMAR CANDEIA GURJÃO, D.SC., UFCG, participaram da Banca de Defesa Final da Tese de Doutorado, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, intitulada **“Busca e Exploração de Fronteiras de Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Híbridas Visando Integração de Nós”**, de autoria do doutorando **WESLEY ALVES FARIAS**, no dia 06 de maio de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JEAN RENE SERRES, COORDENADOR(A)**, em 07/05/2024, às 19:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4408781** e o código CRC **288DA9A7**.

Aos meus pais Roque e Maria José

AGRADECIMENTOS

A caminhada não foi fácil, mas sempre estive acompanhado por uma força divina imensurável, que me pôs de pé dia após dia, me concedendo saúde na busca da realização desse sonho, só podia ser Deus agindo. Essa força também vinha dos familiares e amigos.

À todos que dedicaram seu precioso tempo, amor, carinho e recurso financeiro em minha formação. Aos meus pais Roque e Maria José, aos meus irmãos, Rose Clésia, Flávio, Pablo Diego e Renata, tios, tias, primos e primas, vô e vó, que são também inspirações.

Também é hora de me desculpar com todos pelas ausências e abdições, mas eu já tinha encontrado meu propósito e havia um preço a pagar. Desde muito tempo as frases que mais ouço, são: “Até no feriado vai à universidade?”, “Hoje é domingo, você vai à universidade?”, “Volta que horas? Avisa se for chegar tarde?” Muitas vezes foi tarde, ou cedo do dia seguinte, “O que tanto você faz lá?”, e por aí vai... Não garanto que haverá muitas mudanças nisso não, é um hábito, mas prioridades são prioridades!

Nesta lista também incluo meu agradecimento à sociedade brasileira que financiou meus estudos (ao CNPQ) e as inúmeras pessoas que lutam por uma educação pública, gratuita e de qualidade. Agradeço imensamente aos excelentes professores que tive, meus heróis sem capas, do Colégio Municipal Josué Passos, da Universidade Federal de Sergipe e da Universidade Federal de Campina Grande, as três instituições públicas que me transformaram e me guiaram até aqui. Meu maior objetivo é retribuir a altura tudo que me foi proporcionado.

Especialmente agradeço aos meus orientadores e amigos, Raimundo Freire e Elyson Carvalho por me receberem como doutorando e me apoiarem no desenvolvimento desta tese. Extendo o agradecimento à colaboração de Gilmar Carvalho, Lucas Molina e Eduardo Freire. Muito obrigado à todos pelo exemplo de cidadãos e educadores que são, e pelos ensinamentos dentro e fora da academia. Com a maior certeza, posso dizer que vocês mudaram minha forma de ver o mundo, a educação em nosso país e como se fazer ciência.

Falar do GPR, essa é a parte mais difícil, porque só quem bebe dessa fonte pode entender. Sou eternamente grato pelas inúmeras experiências compartilhadas e as quais fui exposto durante minha formação, pela mistura sadia e pelas amizades criadas. Foram tantas pessoas que convivi neste laboratório, com tanta troca, conversas, discussões e histórias. Pessoas inspiradoras e amigos. Logo quando cheguei conheci Stephanie, Phillipe, Lívia, Phillpinho, Jefferson, depois foram chegando Raphel, Lavínia, Thauanne, seguidos por David, Lázaro, Rodrigo e Petersson. Pós-pandemia, mais dois novos grupos, com Daniel, Beatriz, Vanessa, Xandão, Arthur, Jorge e demais. Agradeço também aos amigos que compõem o grupo de pesquisa em instrumentação, dentre eles, Matheus Oliveira e Graziella Bedenik. Obrigado pela parceria e por tornarem os dias mais leves e alegres. Agradeço a todos que contribuíram no desenvolvimento desta tese de alguma forma, através de discussões de ideias, opiniões e revisões. Vocês fizeram toda diferença.

RESUMO

As redes de sensores sem fio (RSSF) integram um grande número de aplicações nos dias atuais, como o monitoramento de áreas inóspitas, demandando o uso de veículos aéreos na distribuição dos nós sensores, o que pode gerar regiões densamente povoadas de nós e outras escassas. Esse fato pode levar a um subaproveitamento dos nós, com o surgimento de nós e sub-redes localizados além da fronteira de conectividade. Uma solução para gerar maior integração é a inserção de nós móveis à rede estática, constituindo uma rede híbrida, com objetivo de explorar a fronteira, com o intuito de ampliar a área de conectividade. Porém, o processo de busca próximo ao perímetro pode acarretar na desconexão do nó móvel, em virtude da perda de comunicação do nó por entrar em área de sombreamento da rede, além da possibilidade de necessitar desviar de obstáculos, levando o nó a temporariamente se afastar da rede. Essas características ressaltam a necessidade de uma estratégia de controle para retorno à rede. Devido à complexidade da tarefa, a mesma pode ser segmentada em subproblemas ou comportamentos independentes que interagem entre si solucionando o problema global. Uma das metodologias mais difundidas nesse contexto é o Sistema a Eventos Discretos (SED), que apresentam uma implementação sistemática com possibilidade de atribuir restrições na interação entre os nós. O SED é responsável por ditar a regra de chaveamento entre os comportamentos contínuos, representados por controladores, que não pode ser chaveados de forma arbitrária, podendo afetar a estabilidade do sistema. Dessa forma, pretende-se com este estudo contribuir com a criação de uma metodologia de navegação voltada para RSSF no processo de busca e exploração de fronteira para um melhor aproveitamento dos nós sensores distribuídos, ampliação da cobertura da área de interesse e com permissão da desconexão momentânea da rede pelos nós móveis. O método proposto é comparado com abordagens baseadas no Diagrama de Voronoi e Forças Virtuais. Foi verificado que a abordagem proposta apresenta desempenho similar a abordagem de Voronoi, e ambas superior a abordagem baseada em Forças virtuais. Para isto foram exploradas a busca e exploração em cenários com baixa dispersão dos nós, com alta dispersão, situações de topologia não convexa e cenários com obstáculos. No emprego dos nós foi utilizado um modelo proposto que leva em consideração o efeito do vento. O método proposto apresenta vantagens no tratamento da perda de comunicação momentânea, restrito a navegar por um tempo limite nesta condição e coordenado a retornar, capacidade de desviar de obstáculos no ambiente e liberdade de integração de nós em todas as direções e não apenas na área de interesse, resultando numa maior integração de nós mediante maior distância percorrida.

Palavras-chave: Redes de Sensores sem Fios, Redes de Sensores sem Fios Híbridas, Controle e navegação de nós móveis, Conectividade, Cobertura e Emprego de nós.

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSNs) integrate a wide range of applications nowadays, such as monitoring inhospitable areas, requiring the use of aerial vehicles for sensor node distribution, which can result in densely populated and sparse regions of nodes. This fact can lead to underutilization of nodes, with the emergence of nodes and sub-networks located beyond the connectivity boundary. A solution to generate greater integration is the insertion of mobile nodes into the static network, creating a hybrid network, with the aim of exploring the boundary to expand the connectivity area. However, the search process near the perimeter can result in the mobile node's disconnection due to communication loss when the node enters a network shadow area, as well as the possibility of needing to avoid obstacles, leading the node to temporarily move away from the network. These characteristics highlight the need for a control strategy for returning to the network. Due to the task's complexity, it can be segmented into subproblems or independent behaviors that interact to solve the global problem. One of the most widespread methodologies in this context is the Discrete Event System (DES), which offers a systematic implementation with the possibility of imposing constraints on the interaction between nodes. The DES is responsible for dictating the switching rule between continuous behaviors, represented by controllers, which cannot be switched arbitrarily, as it may affect system stability. Thus, this study aims to contribute to the creation of a navigation methodology aimed at WSNs in the process of boundary search and exploration for better utilization of distributed sensor nodes, expansion of the area of interest coverage, and allowing temporary disconnection from the network by mobile nodes. The proposed method is compared with approaches based on the Voronoi Diagram and Virtual Forces. It was verified that the proposed approach shows performance similar to the Voronoi approach, and both are superior to the approach based on Virtual Forces. To this end, search and exploration were explored in scenarios with low node dispersion, high dispersion, non-convex topology situations, and scenarios with obstacles. In employing the nodes, a proposed model that considers the wind effect was used. The proposed method presents advantages in handling temporary communication loss, being restricted to navigating for a limited time under this condition and coordinated to return, the ability to avoid obstacles in the environment, and the freedom to integrate nodes in all directions and not just in the area of interest, resulting in greater node integration over longer distances traveled.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Hybrid Wireless Sensor Networks, Control and navigation of mobile nodes, Connectivity, Coverage and Node Employment.

Sumário

Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivos gerais	4
1.1.2 Objetivos específicos	4
1.2 Estrutura da qualificação	5
2 Fundamentação Teórica	6
2.1 Redes de sensores sem fio	6
2.2 Sistemas a eventos discretos	11
2.2.1 Autômato de estados finitos, linguagem e operações	12
2.2.2 Autômato em bloqueio	16
2.2.3 Sistema supervisorio	17
3 Revisão Bibliográfica	19
3.1 Distribuição espacial de nós	19
3.2 Mobilidade em redes de sensores sem fios	23
3.2.1 Mobilidade de nós sensores	26
3.2.2 Mobilidade do nó <i>sink</i>	27
3.2.3 Mobilidade do fenômeno	28
3.2.4 Mobilidade de dispositivos de suporte	28
4 Abordagem Proposta	41
4.1 Modelo proposto para o emprego de nós	42
4.2 Solução proposta para o problema de integração de nós	43
4.3 Premissas da rede	45
4.4 Definição da rede híbrida	46
4.5 Sistema supervisorio	47
4.5.1 Planta	47

4.6	Casos de mobilidade	48
4.6.1	Caso 1: Busca e exploração sem obstáculo	48
4.6.2	Caso 2: Busca e exploração com obstáculos	49
5	Controladores de Navegação e Controlador Supervisório	53
5.1	Modelo do nó móvel	53
5.2	Controlador de seguir caminho	55
5.3	Controlador de desvio de obstáculo tangencial	58
5.3.1	Controlador de seguir contorno (perda do obstáculo)	61
5.3.2	Controlador de desvio de quinas (obstáculo frontal)	61
5.4	Autômato para o nó móvel (planta)	63
5.5	Autômato de especificação	66
5.6	Sistema supervisório	67
6	Resultados	69
6.1	Emprego de nós sob influência do vento	69
6.2	Considerações para os experimentos	74
6.3	Experimento 1: Cenário com menor dispersão dos nós	76
6.4	Experimento 2: Cenário com maior dispersão dos nós	82
6.5	Experimento 3: Cenários com topologia não convexa	87
6.6	Experimento 4: Cenário 1 com obstáculos	92
6.7	Experimento 5: Cenário 2 com obstáculos	96
6.8	Experimento prático em laboratório	98
6.8.1	Nó móvel	98
6.8.2	Características da rede de sensores sem fios	101
6.8.3	Experimento	102
6.9	Experimento prático 1: Navegação com obstáculos	103
6.10	Experimento prático 2: Navegação com identificação de obstáculo interno à rede	107
6.11	Experimento real 3: Navegação com obstáculo identificado na fronteira . .	110
7	Conclusões	114
8	Produção Bibliográfica	116
	Referências Bibliográficas	117

Lista de Figuras

2.1	Elementos e organização típica de uma RSSF (baseada em [1]).	7
2.2	Rede híbrida composta de nós estáticos e nós móveis, também são destacados o nó <i>sink</i> , o enlace de comunicação entre nós, a área de interesse (AI), região coberta e não coberta pela conectividade da rede, a existência de nós e agrupamentos isolados, bem como a descrição do raio de comunicação R_C e de sensor R_S , elementos essenciais de uma rede (adaptado de [2]).	8
2.3	Topologias de redes de sensores sem fio.	10
2.4	Exemplo de diagrama de transição de estados de um autômato [3].	13
2.5	Exemplo de autômato com bloqueios do tipo <i>deadlock</i> e <i>livelock</i> [4].	16
2.6	SED em malha fechada, baseado em [4].	17
3.1	Tipos de mobilidades aplicadas à rede de sensores sem fio. O bloco em destaque refere-se a mobilidade aplicada ao suporte da rede, como recarga de bateria, reposicionamento e substituição de nós, levantamento de topologia, identificação de perímetro, busca, resgate, dentre outras. . . .	24
3.2	Diagrama de Voronoi para a rede com identificação de buracos dentro da área de interesse não coberto pela conectividade. Em cinza são destacados os buracos nas células de Voronoi.	31
4.1	(a) Nós com enlace e (b) Nós sem enlace.	41
4.2	Disposição aleatória de nós sensores para composição de RSSF, (a) com 20 nós e (b) com 100 nós em uma mesma área.	42
4.3	Busca e exploração sem obstáculos em (a) alvo e nó selecionados e (b) trajetória executada, integração de nós e nova fronteira de conectividade atualizada.	48
4.4	Busca e exploração com obstáculos, (a) seleção do alvo e robô, (b) trajetória de desvio de obstáculo por dentro da rede, (c) trajetória executada com desvio de obstáculo por fora da rede, (d) integração e atualização da fronteira, (e) trajetória com estouro do tempo e (f) trajetória de retorno à rede e atualização de fronteira.	51

4.5	Fluxograma do algoritmo de busca e exploração.	52
5.1	Pose do nó móvel (robô), sistemas de coordenadas global e local, bem como as variáveis de interesse [5].	54
5.2	Descrição do controlador de seguir caminho.	55
5.3	Trajetória executada pelo controlador de seguir caminho.	57
5.4	(a) Velocidades linear e angular do controlador de seguir caminho e (b) Função de energia do mesmo.	57
5.5	Controlador de desvio tangencial de obstáculos, ilustração adaptada de [6].	59
5.6	Desempenho do controlador de desvio de obstáculos com identificação da trajetória executada, nó móvel e referência de menor distância para o obstáculo.	63
5.7	(a) Velocidades linear e angular do controlador de desvio de obstáculos e (b) Função de energia do mesmo.	63
5.8	Autômato G : se refere a planta e descreve as habilidades do nó móvel. . .	64
5.9	Especificação: a partir do estado inicial um robô (ou estado) é acionado por vez (t_x) e individualmente até concluir a navegação (r_x), conduzindo o automato ao estado inicial.	67
6.1	Lançamento a 30 m de altura e variância do vento de 10 m/s , (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.	70
6.2	Lançamento a 30 m de altura e variância do vento de 25 m/s , (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.	70
6.3	Lançamento a 60 m de altura e variância do vento de 10 m/s , (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.	71
6.4	Lançamento a 60 m de altura e variância do vento de 25 m/s , (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.	71
6.5	Distribuições aleatórias de 20 nós. (a) Difusão simples com variância de 10, (b) Difusão contínua com variância na direção y de 10 e (c) Difusão constante.	72
6.6	Distribuições aleatórias de 20 nós. (a) Difusão simples com variância de 25, (b) Difusão contínua com variância em y de 25.	72
6.7	Distribuições aleatórias de 300 nós. (a) Difusão simples com variância de 25, (b) Difusão contínua com variância em y de 25 e (c) Difusão constante.	73
6.8	Experimento 1: Abordagem de Exploração em Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó e disposição final da rede, (e) as ações de controle e (f) a função de Lyapunov.	77

6.9	Experimento 1: Abordagem baseada em diagrama de Voronoi, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó e disposição final da rede e (e) ações de controle.	79
6.10	Experimento 1: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) mínimo local apresentado no acionamento dos demais nós e disposição final da rede e (d) ações de controle.	80
6.11	Experimento 2: Abordagem baseada na Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e disposição final da rede e (f) ações de controle.	83
6.12	Experimento 2: Função de Lyapunov com os picos de cada requisição de nó móvel na exploração.	84
6.13	Experimento 2: Abordagem baseada em diagrama de Voronoi, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó, (e) navegação do quarto nó e disposição final da rede e (f) ações de controle.	85
6.14	Experimento 2: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó, (e) navegação do quarto nó e disposição final da rede e (f) ações de controle.	86
6.15	Experimento 3: Abordagem baseada na Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó e disposição final da rede, (c) ações de controle e (d) função de Lyapunov.	88
6.16	Experimento 3: Abordagem baseada em diagrama de Voronoi, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e disposição final da rede e (f) ações de controle.	89
6.17	Experimento 3: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e disposição final da rede e (f) ações de controle.	90
6.18	Experimento 3: Abordagem baseada na Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó e disposição final da rede, (d) ações de controle, (e) função de Lyaunov com um pequeno crescimento no retorno do nó sem comunicação no tempo 18s.	91

6.19	Experimento 4: Abordagem baseada em Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) ações de controle dos nós e (f) função de Lyapunov.	94
6.20	Experimento 4: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e (f) ações de controle dos nós.	95
6.21	Experimento 5: Abordagem baseada em Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó, (e) navegação do quarto nó e (f) ações de controle dos nós.	97
6.22	Experimento 5: Função de Lyapunov da abordagem baseada em Exploração de Fronteira. Em azul (V1) tem-se a função de Lyapunov do controlador de seguir caminho e em vermelho (V2) a função de Lyapunov associada ao controlador de desvio de obstáculos.	98
6.23	Robô utilizado como nó móvel, em (a) tem-se os seus módulos, (b) vista em perspectiva sem a cobertura de identificação, (c) vista em perspectiva com a cobertura de identificação do nó e (d) coberturas utilizadas para os nós.	100
6.24	Pacote de comunicação adotado para o sistema de múltiplos nós móveis (robôs), apresentando o campo de inicialização da mensagem (a) e três campos para cada nó que definem o sentido de giro do movimento requerido (b) e as velocidades da roda direita e esquerda (c e d).	101
6.25	(a) Nó sensor, (b) transmissor/receptor e (c) computador utilizado como supervisor.	102
6.26	Configuração do experimento.	103
6.27	Cena da configuração experimental obtida com a câmera. Em verde, tem-se os obstáculos, os símbolos de '+' representam os limites da área de interesse e os pontos pretos em menor proporção a posição dos nós estáticos definidos manualmente.	103
6.28	Experimento 1, (a) inicialização da rede, (b) disposição inicial em ambiente real, (c) disposição final da rede, (d) disposição final em ambiente real e (e) ações de controle.	105
6.29	Experimento 1, (a) Funções de Lyapunov, (b) Funções de Lapunov atenuada, (c) Estados e (d) eventos dos nós móveis.	106
6.30	Experimento 2, (a) inicialização da rede, (b) disposição inicial em ambiente real, (c) disposição final da rede, (d) disposição final em ambiente real e (e) ações de controle.	108

6.31	Experimento 2, (a) Funções de Lyapunov, (b) Funções de Lapunov atenuada, (c) Estados e (d) eventos dos nós móveis.	109
6.32	Experimento 3, (a) inicialização da rede, (b) disposição inicial em ambiente real, (c) disposição final da rede, (d) disposição final em ambiente real e (e) ações de controle.	111
6.33	Experimento 3, (a) Funções de Lyapunov, (b) Funções de Lapunov atenuada, (c) Estados e (d) eventos dos nós móveis.	112

Lista de Tabelas

3.1	Resumo bibliográfico.	39
3.2	Resumo bibliográfico (Continuação).	40
5.1	Parâmetros da planta e da especificação (autômatos G and E). As abreviações C , nC , O , e M referem-se variáveis controláveis, não controláveis, observáveis e estados marcados, respectivamente.	64
6.1	Parâmetros de simulação no emprego de nós sob influência do vento, Equação (4.2).	69
6.2	Parâmetros adotados na sintonia dos controladores.	76
6.3	Experimento 1: Comparação entre métodos com menor dispersão dos nós.	81
6.4	Experimento 2: Comparação entre métodos com maior dispersão dos nós.	87
6.5	Experimento 3: Comparação entre métodos em cenário com fronteira não convexa.	92
6.6	Experimento 4: Comparação entre métodos em ambiente com obstáculos.	96
6.7	Parâmetros adotados na sintonia dos controladores.	99
6.8	Experimentos reais.	112

Abreviaturas

ADEF	Autômato Determinístico de Estado Finito
AI	Área de Interesse
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês <i>Global Positioning System</i>)
LAN	<i>Local Area Network</i>
MANET	Rede Ad Hoc Móvel (do inglês <i>Mobile Ad Hoc Network</i>)
PDF	Função densidade de probabilidade
QoS	Qualidade de Serviço (do inglês <i>Quality of Service</i>)
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
RSSI	Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (do inglês <i>Received Signal Strength Indicator</i>)
SED	Sistema a Evento Discreto
SSLF	Função de Lyapunov para Sistemas Chaveados (do inglês <i>Switched Systems Lyapunov Function</i>)
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
WLAN	Rede sem fio local (do inglês <i>Wireless Local Area Network</i>)
WPAN	Rede de sensores sem fio de área pessoal (do inglês <i>Wireless Personal Area Network</i>)
ID	Identificação de cada nó da rede de sensores sem fio
C	Evento controlável
nC	Evento não controlável
O	Evento observável
Vr	Função SSLF da rede de sensores sem fio
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

Símbolos

R_c	Alcance de comunicação
R_s	Alcance do sensor
G	Autômato determinístico de estado finito
X	Espaço de estados discretos do autômato
Σ	Conjunto finito de eventos do autômato
f	Função de transição de estados
Γ	Função que determina os eventos ativos em cada estado
X_0	Estado inicial
X_m	Conjunto de estados marcados
Σ^*	Conjunto de todas as palavras compostas de elementos de Σ
$L(\cdot)$	Linguagem gerada do autômato
$\bar{L}(\cdot)$	Linguagem prefixo fechado
$L^*(\cdot)$	Linguagem fechamento Kleene
$L_m(\cdot)$	Linguagem marcada do autômato
$\parallel$	Composição paralela
Σ_c	Conjunto de eventos controláveis
Σ_u	Conjunto de eventos não controláveis
E	Autômato de especificação (ou restrição)
S	Autômato supervisor não bloqueante
τ	Constante de tempo para o sistema atender a estabilidade clássica
$\dot{x}$	Espaço de estados do sistema chaveado
$f_\sigma(\cdot)$	Função de transição entre os subsistemas do sistema chaveado
σ	Índice associado ao subsistema ativo do sistema chaveado
$V(\cdot)$	Função candidata de Lyapunov
t_0	Tempo inicial
t	Tempo atual
ρ	Taxa de decaimento de convergência
AI	Área de interesse
l	Lado do quadrado da área de interesse
N	Número de nós na rede
f	Conjunto de pontos que representam a fronteira de conectividade

F_{ij}	Força entre nós i e j
F_{if}	Força entre o i -ésimo nó e a menor distância para a fronteira
F_{io}	Força entre o i -ésimo nó e o obstáculo mais próximo
F_{ir}	Força de atração de buracos na área de interesse atuante sobre o i -ésimo nó
N_r	Número de buracos na área de interesse
k_r	Coefficiente de repulsão da força entre nós
k_a	Coefficiente de atração da força entre nós
d_{th}	Limiar de atuação da força entre nós
k_o	Coefficiente de repulsão para o obstáculo
d_{seg}	Distância segura para obstáculos
k_f	Coefficiente de repulsão de fronteira
d_{sf}	Distância segura para a fronteira
k_{ai}	Coefficiente de atração para área de buraco
B_{ai}	Tamanho do maior buraco atual da rede
v_v	Velocidade do vento
ρ	Densidade das abreviações
A	Área frontal do nó sensor
C_a	Coefficiente de arrasto
u	Velocidade do nó
u_x, u_y, u_z	Componentes de velocidade do nó
v_{vx}, v_{vy}, v_{vz}	Componentes da velocidade do vento
α	Flag de sentido de direção de movimento do nó
d_{ns}	Distância de segurança para a fronteira de conectividade
u_{max}	Velocidade linear máxima do nó móvel
ω_{max}	Velocidade angular máxima do nó móvel
t	Tempo máximo sem comunicação
L	Lado da área de interesse (quadrada)
R_s	Raio de sensoramento do nó
S_E	Conjunto de nós estáticos
S_M	Conjunto de nós móveis
n	Número de nós estáticos
m	Número de nós móveis
d_{ij}	Distância entre nós
S_T	Conjunto total de nós da rede
S_{Mr}	Subconjunto de nós móveis atuando como roteador
m'	Número de elementos de S_{Mr}
S_{Ea}	Subconjunto de nós estáticos ativos na rede
n'	Número de elementos de S_{Ea}
S_{rede}	Conjunto de nós ativos na rede

C_{con}	Conectividade da rede
C_{cob}	Cobertura da rede
ω	Velocidade angular do nó móvel
u	Velocidade linear do nó móvel
ϕ	Ângulo de orientação do robô
ρ	Distância para o destino
α	Erro de orientação entre o robô e o ponto de destino atual
θ_{obs}^{10}	Ângulo com a parede
d_{obs}	Distância para o obstáculo
$\tilde{\theta}$	Erro de orientação do controlador de desvio de obstáculo
$\tilde{d}$	Erro de posição para a distância desejada do obstáculo
d_{des}	Distância desejada para o obstáculo
$K_{\tilde{d}}$	Função de ajuste do controlador de desvio de obstáculo
$K_{\tilde{\theta}}$	Parâmetro de sintonia associado ao erro angular
$k_{\tilde{\theta}}$	Parâmetro de sintonia da $\tanh$ associada ao erro angular
R	Raio de circunferência para contorno de obstáculo
$\tilde{d}_{perda}$	Última medida para a parede antes de perder a referência
$\theta_{circular}$	Ângulo projetado para contornar obstáculo
$d_{impacto}$	Limiar para distância frontal
d_{frente}	Medida dos sensores frontais
θ_d	Ângulo projetado para desvio de parede frontal

Capítulo 1

Introdução

Consideráveis conquistas tecnológicas do século XX se deram no campo da aquisição, do processamento e da distribuição de informações. Desde então, a Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) tem sido explorada extensivamente por pesquisadores das áreas de comunicação, redes e robótica, por se tratar de um campo de pesquisa multidisciplinar, que envolve, em sua essência, instrumentação dos nós sensores, comunicação em rede, processamento e planejamento.

As RSSFs são, frequentemente, utilizadas para operar de forma autônoma em ambientes controlados e não controlados. Os ambientes não controláveis ou não estruturados ou inóspitos elevam, consideravelmente, o desafio de mecanismos de monitoramento e gerenciamento. Os ambientes inóspitos são caracterizados como regiões com alta dinâmica ambiental (chuvas, ventos, etc), mata fechada, regiões vulcânicas, geleiras, solo marinho, áreas de desastres com escombros, etc. Os terrenos podem apresentar características pedregosa, com areia, lama, vegetação rasteira, declive, aclave, dentre outras. Portanto, esses ambientes são considerados uma área de aplicação muito promissora para redes que tem como finalidade coletar diversas informações do ambiente com a utilização de nós sensores sem fio. Logo, as principais questões associadas à rede envolvem o procedimento de coleta e a distribuição da informação de maneira eficiente [7].

As aplicações militares foram propulsoras das RSSFs, em atividades como monitoramento de tropa e equipamentos, detecção de ataques nuclear, químico e biológico e observação de campos de batalha [1, 8]. Com os avanços tecnológicos em comunicações sem fio e a evolução dos sistemas microeletromecânicos, houve uma redução no custo de produção de nós sensores, no consumo energético e no espaço que ocupam [9]. Outras características que avançaram ao longo dos anos foram a escalabilidade, flexibilidade, precisão e alcance de comunicação, com algumas tecnologias atuais que podem atingir alcance da ordem de quilômetros entre nós.

No decorrer dessa evolução, houve o surgimento de diversas outras aplicações, como o controle, gerenciamento e automação de sistemas industriais, automotivos e de manufatura, robótica distribuída, controle de tráfego (terrestre e aéreo), exploração

espacial, assistência a desastres, monitoramento de fronteira nacional, monitoramento ambiental sobre vários aspectos, como solo, flora, animais, clima, poluição, enchentes e, de forma preventiva, de fenômenos naturais ou não, como as erupções vulcânicas, tsunamis, incêndios florestais e prevenção a pragas [10–12]. As aplicações na área da saúde envolvem o auxílio em exames e monitoramento em tempo real de diversos parâmetros funcionais do organismo humano com a possibilidade de proporcionar diagnóstico antecipado de doenças e auxiliar no tratamento [8]. As aplicações em edificações e residências estão associadas à otimização de recursos, conforto e segurança, como controle de consumo de energia e água, elevadores inteligentes, sistemas de controle para aquecimento, ventilação e ar-condicionado, controle de acesso, supervisão de iluminação, detecção de fogo e alarme, sistemas de vigilância por vídeo e detecção de presença, além das aplicações da internet das coisas em diversos cenários [8, 13] e o surgimento das cidades inteligentes.

Uma RSSF pode ser constituída por nós sensores estáticos, por nós sensores móveis ou pela atuação conjunta desses dois tipos de nós, que constituem as chamadas redes híbridas. Uma rede composta por nós estacionários é indicada para ambientes controláveis por sua facilidade de instalação e manutenção realizadas por profissionais. Trata-se de uma rede centralizada e com processo de instalação dado com a alocação dos nós definida previamente, o que facilita o processo de troca de bateria e substituição de nós.

Para ambientes não estruturados e inóspitos leves, como campos de batalha, exploração espacial, área de desastre, regiões urbanas com consideráveis índices de poluição e risco, dentre outras, pode ser aplicada uma rede constituída apenas por nós móveis, considerados robôs, que têm por objetivo otimizar a cobertura e a conectividade da Área de Interesse (AI) [13, 14], aumentar o tempo de vida da rede [15] e coletar dados enquanto desvia de outros agentes [16]. A navegação desses agentes pode ser regida de forma centralizada ou distribuída, cujo objetivo é espalhar os nós pelo ambiente partindo de um determinado ponto de acesso. Esse tipo de rede apresenta uma maior flexibilidade que a anterior, pois permite autoalocação e autorrealocação na rede durante seu tempo de vida. Todavia, seu custo pode ser muito elevado e é indicada para aplicações de curta duração, como na realização de buscas e levantamento de parâmetros ambientais.

A rede híbrida também é adequada para ambientes não estruturados ou inóspitos. A mobilidade nesse tipo de rede se dá com um número reduzido (mas adequado ao ambiente) de nós móveis em seu suporte. O auxílio fornecido oferece adaptabilidade à rede na ocorrência de diversos eventos [1], a exemplo de saídas de nós da rede, quebra de conjuntos de enlaces, otimização do tempo de vida da rede por meio do posicionamento ou navegação do nó concentrador de dados (ou *sink*) a fim de reduzir o número de saltos [17], cobrir buracos criados na inicialização ou durante a operação da rede [11], bem como no suporte à recarga de baterias [18, 19], na substituição e localização de nós [20].

A localização de nós estáticos após a sua distribuição em ambiente inóspito é um tópico relevante devido à característica peculiar desse tipo de rede, a qual requer

um processo de distribuição por meio de lançamentos na AI com técnicas que não garantem o posicionamento desejado, a exemplo do lançamento aéreo. Nesse sentido, atributos associados à qualidade de serviço (do inglês *Quality of Service* - QoS) da rede, como cobertura, conectividade e expectativa de vida, não são controláveis, pois o lançamento sofre com intempéries ambientais, como o vento, correntes marítimas e com topologias irregulares do terreno. Essas influências fazem com que surjam regiões com cobertura densa e outras esparsas [21], até mesmo com a presença de nó ou sub-redes sem conectividade. Consequentemente, uma rede deve ser construída de modo que sua escalabilidade e as mudanças dinâmicas no emprego dos nós ou na arquitetura [13] possam ser gerenciadas durante seu tempo de vida.

Quando surgem esses agrupamentos não uniformes ou a cobertura desejada não é atingida, a solução mais elementar é o aumento da densidade dos nós estáticos na região de interesse, pois quanto maior o número de nós lançados, maior a probabilidade de ser atingido um alto nível de conectividade [22]. Esta solução é motivada devido ao baixo custo dos nós sensores, entretanto, a inserção de nós estáticos adicionais gera problema de redundância e latência na comunicação, além de elevar o custo associados a vôos aéreos e pessoal nessa nova distribuição na AI sem ter uma garantia de que a cobertura e conectividade desejada será atingida [9, 12].

Outra solução pode levar em consideração a mobilidade dos nós que compõem a rede híbrida. Os nós móveis atribuem à rede a capacidade de autorrealocação ou autocura quando há sub-redes ou em condições adversas causadas pela dinâmica do ambiente. A atividade de navegação (ou movimentação) pode influenciar na desconexão do nó móvel através da atenuação do sinal de comunicação e da necessidade de navegar fora da região de conectividade, que geralmente forma topologias não convexas, necessitando de uma estratégia de controle para retorno à rede. Portanto, a mobilidade controlada de nós móveis e a comunicação são problemas essenciais, principalmente no processo de localização e integração de nós [23, 24], pois necessita da navegação próxima a regiões de fronteira de conectividade buscando criar enlaces com nós e sub-redes isoladas, oriundas do processo de distribuição de nós.

A mobilidade controlada de nós móveis em RSSF é um aspecto pouco explorado e soluções atuais apresentam restrições para aplicações práticas, como a restrição de comunicação e coordenação de movimento. Nesta tese será aplicada a mobilidade nas tarefas de localização e integração que se caracteriza como um problema complexo exigindo alguns comportamentos distintos que atuam de forma independente, de acordo com a dinâmica do ambiente. Cada comportamento do nó móvel pode ser representado por uma estratégia de controle de navegação, como se mover para o destino, evitar obstáculo, seguir parede, encontrar o próximo ponto, vagar, dentre outros [25, 26]. Uma das metodologias mais difundidas para a coordenação desse tipo de sistemas são os Sistemas a Eventos Discretos (SED), utilizados na modelagem de sistemas híbridos [27, 28]. O sistema híbrido

é representado por um conjunto de controladores contínuos, cada um resolvendo um problema particular da navegação, trabalhando em cooperação, através de transições entre eles, para solucionar um problema maior [29]. As principais vantagens da aplicação de SED é sua implementação sistemática e possibilidade de integrar à modelagem do sistema restrições na interação entre robôs (considerados nós móveis) durante a tarefa.

Outro tipo de restrição que surge nos sistemas híbridos diz respeito à parte discreta ser composta por um componente de decisão que recebe como entrada os eventos, os quais ditam a regra de chaveamento entre os comportamentos contínuos, como em [30]. Todavia, não é possível fazer estas transições de forma arbitrária, pois os controladores apresentam objetivos e dinâmicas distintas, podendo afetar a estabilidade do controle do sistema híbrido.

Com base no exposto, nesta tese é proposta a coordenação de nós móveis para a busca e integração de nós ou sub-redes que estejam fora do alcance inicial da rede, por meio da exploração das fronteiras de conectividade da rede. Para tanto, o sistema será coordenado por um supervisor descrito por SED isento de condições de bloqueios.

O problema em questão é um tópico relevante para a obtenção de um maior aproveitamento dos nós lançados, dado que se conhece o número total e quantos estão ativos na rede. Por meio deste estudo, pretende-se contribuir sob dois aspectos: o primeiro está associado à criação de uma metodologia de navegação de nós móveis em RSSF guiada por um supervisor não bloqueante no processo de integração e ampliação da conectividade; e, o segundo é a possibilidade de desconexão momentânea da rede pelos nós móveis no avanço da exploração próxima à região da fronteira de conectividade. Estes dois aspectos de estudo são novos para a área de RSSF.

Nas seções seguintes serão apresentados os objetivos gerais e específicos, bem como a estrutura do texto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

O objetivo geral desta tese de doutorado é propor uma metodologia de integração de nós à topologia de rede de sensores sem fio. Para tanto, será considerada a integração de nós móveis à rede estática, constituindo uma rede híbrida com a função de explorar a fronteira de conexão da rede, assim como a modelagem dos comportamentos dos agentes móveis por autômatos de estados finitos, visando a busca e reconexão de nós ou sub-redes que estejam inicialmente fora do alcance da rede.

1.1.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos desta tese de doutorado:

- Desenvolver modelos baseados em Sistemas a Eventos Discretos para coordenação dos nós móveis na busca por nós além da fronteira de conectividade;
- Analisar a controlabilidade e observabilidade do SED, condições para evitar bloqueios;
- Propôr um novo modelo de emprego de nós considerando ambiente inóspito sobre a influência do vento;
- Comparar o modelo de emprego de nós proposto com métodos clássicos encontrados na literatura;
- Comparar a abordagem proposta com abordagens clássicas utilizadas na ampliação de conectividade e cobertura; e,
- Realizar simulações e testes experimentais envolvendo as ferramentas propostas para obter conclusões sobre o desempenho.

1.2 Estrutura da qualificação

O presente texto está estruturado da seguinte maneira: neste primeiro capítulo foi abordada uma introdução sobre RSSF e a contribuição da mobilidade de nós, ressaltando suas vantagens, limitações e objetivos; no capítulo 2 serão destacados conceitos teóricos empregados no trabalho, como redes e sistemas a eventos discretos; no capítulo 3 será apresentada a revisão bibliográfica sobre a mobilidade de nós, funções, cobertura e conectividade; enquanto que no capítulo 4 será apresentada a metodologia empregada, bem como considerações e hipóteses; no capítulo 5 serão apresentados os controladores, a planta e restrições para o desenvolvimento do controle supervisorio; os resultados experimentais e discussões serão apresentadas, no capítulo 6; e, por fim, as conclusões expostas no capítulo 7.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Nesse capítulo será apresentada uma fundamentação teórica ilustrando conceitos necessários para o desenvolvimento desta tese. Será iniciada com uma explanação a respeito de redes de sensores sem fio, seguida por um aprofundamento sobre sistemas a evento discreto com destaque para a modelagem de autômatos de estados finitos.

2.1 Redes de sensores sem fio

Uma rede de sensores sem fio convencional é constituída sobre uma área de interesse por um conjunto de nós sensores inteligentes sem fio, nós roteadores e um ou mais nós concentradores de dados, também conhecidos como *sinks nodes*, como apresentado na Figura 2.1. Os nós sensores são caracterizados em sua maioria por serem estáticos, pequenos e com recursos computacionais, de memória e de energia relativamente limitados [1, 8]. Apesar dos nós poderem funcionar de forma isolada e autônoma, possuem capacidade para se agruparem (ou seja, se autoconfigurarem) e constituírem redes de grandes dimensões, com o objetivo de monitorar um conjunto de fenômenos físicos [1].

As funções atribuídas ao nó sensor são medir, armazenar, pré-processar (se necessário) e transmitir suas medições (diretamente ou por intermédio de saltos, que o atribui a característica adicional de roteador) até o nó *sink*, que possui a função de coletar os dados medidos e repassar para seu usuário ou supervisor analisá-los. Esse último procedimento é realizado com o envio das informações para outra rede, geralmente, a Internet. Para isso, é utilizado um *gateway* que pode ser integrado ao nó *sink*.

Tipicamente, um nó sensor é constituído por quatro subsistemas, o de alimentação, o sensorial, o de processamento e o de comunicação [1]. O subsistema de alimentação tem por finalidade o fornecimento de energia ao nó. No subsistema sensorial encontra-se todos os sensores que compõem o nó. O tipo e o número de sensores adotado depende da aplicação e pode levar em consideração na sua escolha, o consumo energético e o custo final do nó. O subsistema de processamento é constituído por um microcontrolador responsável pela programação das funcionalidades do nó. Por fim, o subsistema de comunicação,

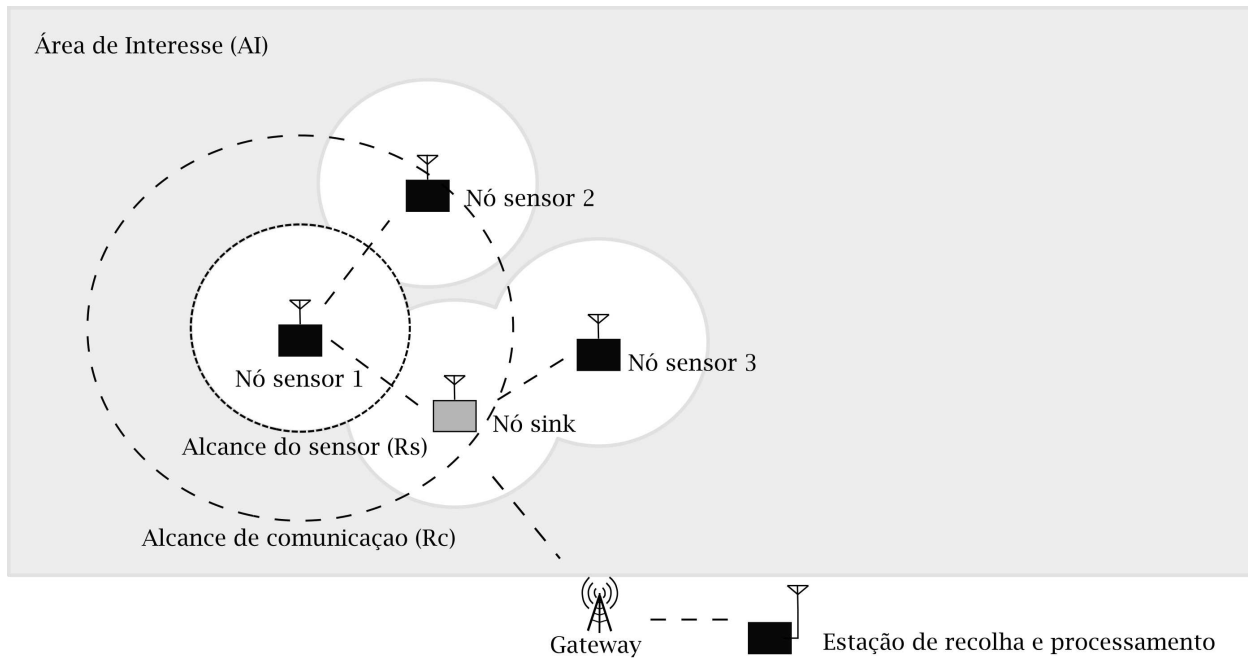


Figura 2.1: Elementos e organização típica de uma RSSF (baseada em [1]).

constituído pelo rádio e pela antena, é responsável pela transmissão e recepção de dados. Adicionalmente, o nó pode apresentar outros componentes, por exemplo, painéis solares para carregamento, sistema GPS (Sistema de Posicionamento Global) e outros *hardwares* para suporte a localização dos nós. Um considerável número de protocolos podem ser encontrados para aplicações em RSSF como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa [13], Sigfox, LTE-M, dentre outros. Também é possível destacar o esforços do IEEE para formalização de um padrão, desde o início dos anos 2000, com o IEEE 802.11 para o desenvolvimento de redes locais (do inglês wireless local area networking - WLAN) e possibilitar que produtos de diferentes fabricantes possam atuar conjuntamente.

O alcance de leitura dos nós sensores cria a chamada área de cobertura de rede, que geralmente é diferente do alcance dos enlaces de comunicação entre nós que, por sua vez, é influenciado pela tecnologia sem fio aplicada e denominada conectividade da rede. Por exemplo, o nó 1 mostrado na Figura 2.1, apresenta enlaces com o nó 2 e o nó *sink*. O nó *sink* envia as informações recebidas dos nós sensores para a estação de recolha e processamento (externa à rede através do *gateway*) e recebe dela os pacotes com informações para encaminhar novamente aos nós que possuam funções de atuadores. Na ilustração também é mostrado que para o nó 2 se comunicar com o nó *sink* é necessário, primeiramente, encaminhar seus dados ao nó 1, o que representa uma comunicação por saltos. Diferentemente, o nó 3 apresenta enlace direto com o *sink*, que representa um custo energético menor para a rede.

A cobertura e conectividade são considerados critérios de QoS da rede associados ao monitoramento da AI e aproveitamento do nó, bem como o protocolo adotado e o número

de mensagens impactam no tempo de vida rede.

Neste trabalho será abordada a cobertura e conectividade de rede em conjunto numa rede híbrida, composta por nós estáticos e móveis como mostrado na Figura 2.2. Uma rede é dita conectada se existe pelo menos um trajeto entre o nó *sink* e cada um dos nós sensores. A conectividade pode ser de enlace simples ou múltiplos. O caminho simples indica a existência de um enlace direto entre algum sensor da rede e o nó *sink*, a exemplo da topologia estrela. Caso haja múltiplos caminhos para a comunicação entre algum sensor e o *sink*, é dito que a rede apresenta conectividade- k , sendo k , associada ao número de caminhos por nó [31].

Área de Interesse (AI)

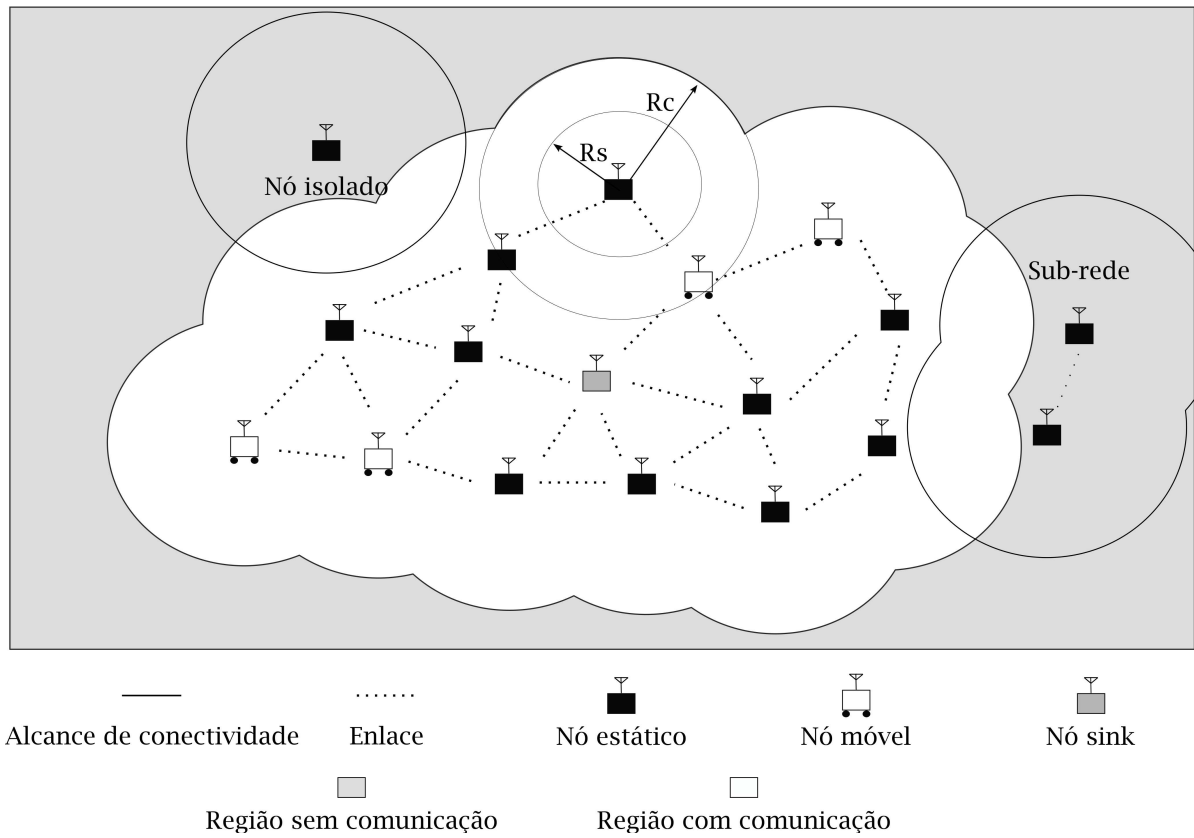


Figura 2.2: Rede híbrida composta de nós estáticos e nós móveis, também são destacados o nó *sink*, o enlace de comunicação entre nós, a área de interesse (AI), região coberta e não coberta pela conectividade da rede, a existência de nós e agrupamentos isolados, bem como a descrição dos raios de comunicação R_C e de sensor R_S , elementos essenciais de uma rede (adaptado de [2]).

O enlace de comunicação, responsável por garantir a conectividade, é influenciado pelo alcance de comunicação dos nós sensores. Esta propriedade garante que todo nó sensor está conectado ao nó *sink* diretamente ou por multissaltos.

A cobertura é influenciada pelo alcance do sensor. Enquanto a cobertura pode ser incrementada através do afastamento mútuo dos sensores, a conectividade opera como uma restrição para que os nós não se afastem a ponto de perder a conexão. Logo, uma

cobertura sem conectividade reduz a qualidade da rede devido os dados transmitidos não possuírem um roteamento até o *sink* [31]. Isto indica que há nó incomunicável.

Para melhor entender as etapas que envolvem a aplicação de uma RSSF é preciso analisar os seus estágios de vida útil, que é dividido em quatro: inicialização, manutenção, atualização e encerramento. O primeiro estágio, lida com o emprego dos nós, se aleatório ou manual, com a configuração inicial e parametrização dos agentes. Nessa etapa são atribuídos parâmetros associados à qualidade de serviço da rede facilitados pela alocação manual. O segundo estágio, soluciona problemas associados a transmissão de informação atentando para o roteamento, maximização do tempo de vida, cobertura e agregação de dados. O terceiro estágio foca em como entregar de forma eficiente novas informações ou atualizações a cada nó da rede. Por fim, o último estágio envolve a retirada de operação de todos os nós sensores. De acordo com [32], muitos trabalhos têm dado atenção ao estágio de manutenção. Esta proposta atuará no estágio de inicialização aleatória dando suporte quanto à integração de nós fora da área de conectividade.

A topologia, seja de instalação manual ou aleatória (também chamada de desestruturada), pode ser definida como plana ou hierárquica. A topologia plana, constitui, na maioria dos casos, uma topologia mais flexível e cada nó desempenha funções semelhantes a dos seus vizinhos, a exemplo da topologia estrela e malha, como mostrado na Figura 2.3 (a) e (b). Já na topologia hierárquica, os nós são organizados por níveis ou camadas, atribuindo, muitas vezes, aos nós das camadas superiores, funções de agregação da informação vinda das camadas inferiores com destino ao nó *sink*. Essa topologia pode apresentar algumas variantes: árvore, *cluster* e multicamadas ou *multi-tier*, como apresentado nas Figuras 2.3 (c) e (d). Na topologia em árvore, cada nó comunica com o seu superior hierárquico e com os seus nós descendentes. Na topologia *cluster*, os nós organizam-se em grupos elegendo um nó para assumir a responsabilidade de receber a informação vinda dos outros nós do seu grupo ou *cluster*. Então, esse nó terá que processar e enviar as informações para o nó *sink* ou para um nó hierarquicamente superior. O diferencial da topologia *multi-tier* é que cada nó pode também comunicar com nós vizinhos do mesmo nível hierárquico.

A topologia apresenta a distribuição dos nós com base nos enlaces de dados, por outro lado a cobertura da rede está associada a distribuição espacial desses nós na área de interesse. Os arranjos de cobertura encontrados na literatura são classificados como cobertura de área ou manta, cobertura de ponto, cobertura de barreira [33] e cobertura por varredura [21]. A cobertura de área pode ser do tipo simples, cobertura- k ou cobertura- q . A cobertura simples não lida com a falha de nós, pois utiliza apenas um nó monitorando uma determinada área. Ao se atribuir redundância, surge a cobertura- k , na qual cada ponto deve ser monitorado por pelo menos k sensores. Já a cobertura- q é similar à cobertura- k exceto pelo número de sensores que variam em cada ponto. Isso permite atribuir maior redundância em pontos de maior interesse. A cobertura pontual é requerida para monitorar

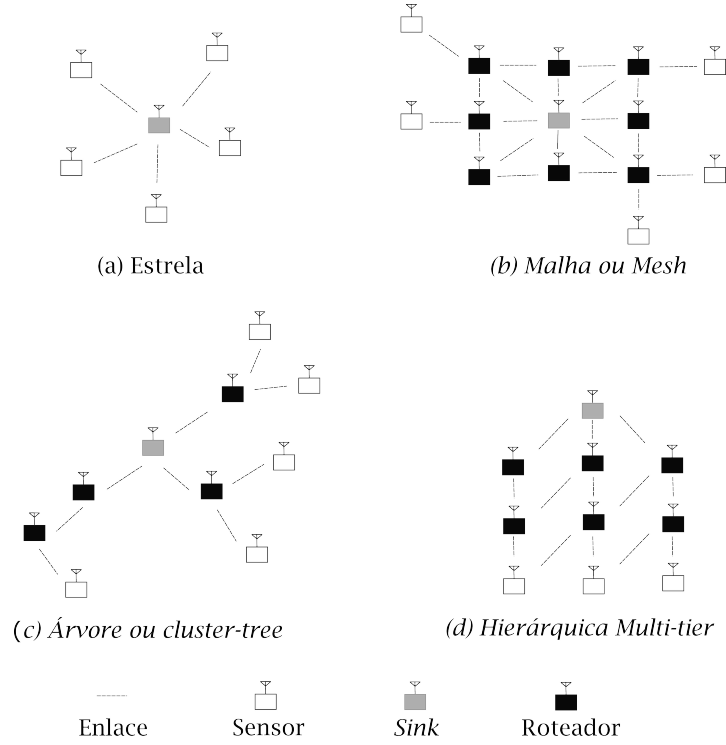


Figura 2.3: Topologias de redes de sensores sem fio.

somente pontos específicos de interesse, característica comum após uma alocação aleatória. A cobertura de barreira monitora invasões e, por fim, a cobertura em varredura, utiliza-se da movimentação de nó(s) de varredura pelo ambiente realizando o sensoriamento.

As RSSFs de interesse no presente trabalho se enquadram como rede sem fio de área pessoal, do inglês *Wireless Personal Area Network* (WPAN), ou rede sem fio local, do inglês *Wireless Local Area Network* (WLAN), que podem ser subcategorizadas, de acordo com [8], em rede de sensores sem fio *Ad Hoc* (considerada desestruturada) e *Mesh* ou malha (considerada estruturada). A maior limitação na seleção do tipo de rede é o acesso à área de aplicação. Na implantação estruturada é necessário um ambiente controlado, no qual cada nó é colocado num local exato e irá desempenhar funções predeterminadas. Esse tipo de rede apresenta maior confiabilidade e menor custo. Já as redes desestruturadas estiveram presentes nas primeiras propostas de RSSF e são indicadas para ambientes inóspitos e de difícil acesso. Nela, seus nós são distribuídos na área de interesse com auxílio de veículos aéreos, podendo apresentar capacidade de auto-organização, que os permitem constituir uma determinada topologia e assumir diferentes funções entre si.

As redes desestruturadas não possuem infraestrutura de rede fixa ou suporte administrativo. A topologia dessas redes muda dinamicamente à medida que novos nós são agregados ou os antigos deixam a rede, ou ainda os enlaces de rádio entre os nós se tornam inutilizados. Estes fatores ressaltam a necessidade de uma permanente adaptação e reconfiguração de rotas. Associado a este fato, limitações de largura de banda e de energia das baterias dos nós tornam o roteamento, principalmente o multiponto, um desafio para a

engenharia e pesquisadores. Todavia, este tipo de rede é atualmente considerada a solução mais avançada para suporte às técnicas de supervisão, controle e monitoramento.

A movimentação de nós (ou robôs) em uma rede aumenta consideravelmente a dinâmica do sistema. O roteamento e a reconfiguração da rede são considerados um proeminente paradigma para elevar o desempenho da rede e permitir consideráveis avanços na experiência com o usuário [34]. Esse paradigma está diretamente associado a um dos principais critérios de desempenho e manutenção de uma rede que é a sua auto-organização, característica que lhe oferece maior funcionalidade, confiabilidade e segurança. Este tópico acaba ultrapassando os limites da robótica convencional, no sentido que existe a necessidade, para este tipo de sistema heterogêneo, de uma relação explícita entre a comunidade de robôs considerados nós móveis, nós sensores estáticos e supervisor.

A seguir serão apresentados outros aspectos fundamentais para o desenvolvimento desta proposta com um aprofundamento sobre os aspectos de sistema a evento discreto.

2.2 Sistemas a eventos discretos

Um Sistema a Eventos Discretos (SED) é caracterizado como um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência de eventos físicos assíncronos [4]. A teoria de SED é apresentada como pertencente, dentre outras áreas, à teoria de controle. O espaço de estados de um SED é limitado a um conjunto enumerável que descreve os comportamentos do sistema. O comportamento global é descrito por uma função que relaciona o estado a uma lista de eventos responsáveis pelas transições entre estados, podendo permanecer um tempo arbitrariamente longo em um mesmo estado.

Existem vários modelos para sua implementação, como redes de Petri, cadeias de Markov, teoria das filas, mas nenhum tomado como universal, pois cada um deles permite abordar diferentes objetivos dos sistemas em estudo [4]. Aqui será tomada como referência a teoria de linguagens e autômatos na síntese de uma lógica de controle.

A modelagem de controladores baseados em SED necessita do conhecimento das características do sistema a controlar. Essas informações são incorporadas na obtenção de um modelo para a planta desenvolvido de forma sistemática.

A planta é, em geral, composta de um conjunto de subsistemas que devem trocar informações com um elemento de controle centralizado de modo que o comportamento coordenado seja o desejado. A obtenção do modelo para o sistema global (ou planta) a ser controlado passa então ser pensado como uma composição de modelos de seus subsistemas.

Adicionalmente, essa síntese pressupõe um modelo adequado para as especificações de comportamento. Essas especificações são definidas por um conjunto de restrições que determinam como deve ser a operação coordenada dos subsistemas que compõem o sistema global. Além disso, é desejável que o controle não leve o sistema a situações de bloqueio, ou seja, garanta o cumprimento de tarefas de forma fluida.

A seguir, é apresentada a definição de autômatos finitos, linguagens e operações clássicas.

2.2.1 Autômato de estados finitos, linguagem e operações

Como citado anteriormente, a planta de um sistema pode ser representada por um autômato cujas mudanças de estado são ditadas pela ocorrência de eventos [4]. Essa abordagem é aplicada quando o espaço de estado de um sistema é, naturalmente, descrito por um conjunto discreto e transições de estados observadas em pontos discretos no tempo, sendo essas transições associadas a eventos, atendendo aos critérios da abordagem comportamental desejada para o sistema multiagente que será proposto neste trabalho. Em suma, um autômato é um modelo matemático de máquinas de estados, podendo apresentar entradas e saídas discretas, que reconhecem um conjunto de palavras sobre um dado alfabeto que representa os eventos possíveis.

Um autômato pode ser definido por uma sêxtupla, descrita por

$$G = (X, \sum, f, \Gamma, x_0, X_m), \quad (2.1)$$

em que:

- X é o espaço de estados do sistema;
- $\sum$ é o conjunto finito de eventos associados a G ;
- $f : X \times \sum \rightarrow X$ é a função de transição de estados;
- $\Gamma : X \rightarrow 2^\sum$ é a função que determina os eventos ativos em um estado, ou seja, é o conjunto de todos os eventos $e \in \sum$ para os quais $f(x, e)$ é definido;
- x_0 é o estado inicial; e,
- $X_m \subseteq X$ é um subconjunto de X , denominado de conjunto dos estados marcados.

Quando X é um conjunto finito, diz-se que G é um autômato determinístico de estado finito (ADEF).

O autômato pode ser representado por um grafo ou diagrama de transição como apresentado na Figura 2.4, na qual os nós representam os estados e os arcos representam as transições entre estados. A função do grafo é representar o comportamento dinâmico do autômato. As letras dos arcos são elementos do conjunto de eventos (alfabeto), $\sum = \{a, b, g\}$, por exemplo. O conjunto de estados (apresentado na Figura 2.4) é representado por $X = \{1, 2, 3\}$, com 1 representando o estado inicial (marcado com uma flecha) e o conjunto de estados marcados (representados com círculos duplos) $\{1, 2\}$ que representam condições de parada ou conclusão de tarefa. Como exemplos de palavras para

este autômato tem-se a , ag , agb que conduzem o autômato a se manter no estado 1 (a) ou transitar para o estado 2 e se manter no mesmo (ag , agb).

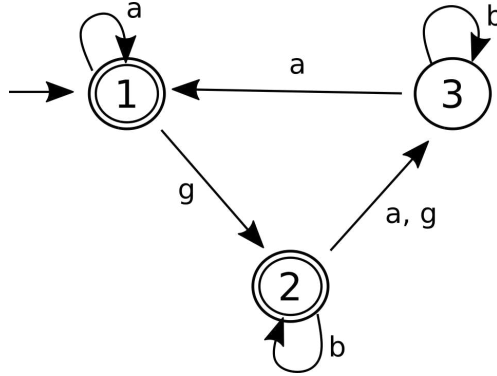


Figura 2.4: Exemplo de diagrama de transição de estados de um autômato [3].

O autômato é um dispositivo capaz de representar uma linguagem de acordo com regras bem definidas. O termo linguagem é aplicado devido ao fato de se considerar o conjunto de eventos (Σ) como um alfabeto e a sequência (finita) de eventos como palavras [3].

Os níveis de abstração em um SED está associado a linguagem não temporizada ou lógica, linguagem temporizada e linguagem temporizada estocástica [3]. A linguagem adequada ao propósito deste trabalho, navegação de múltiplos nós móveis, é a linguagem lógica, composta exclusivamente por um conjunto de eventos.

Denota-se por Σ^* o conjunto finito de todas as palavras compostas de elementos de Σ , incluindo a palavra vazia ϵ . A operação '*' é chamada de fechamento Kleene que será definida posteriormente. Em particular, ϕ (que representa um conjunto vazio), Σ e Σ^* são linguagens [3].

As operações de conjuntos são usualmente aplicáveis à linguagem de autômatos, a exemplo da união, interseção, diferença e complemento com respeito a Σ^* . Além destas, podem ser definidas:

i) Concatenação: seja $L_a, L_b \subseteq \Sigma^*$, então

$$L_a L_b = \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b) \text{ e } (s_a \in L_a) \text{ e } (s_b \in L_b)\};$$

ii) Prefixo fechado: seja $L \subseteq \Sigma^*$, então

$$\bar{L} = \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*) [st \in L]\}$$

iii) Fechamento Kleene: seja $L \subseteq \Sigma^*$, então

$$L^* = \{\epsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \cup \dots$$

A conexão entre linguagens e autômato é facilmente interpretada pela inspeção do diagrama de transição do autômato ou pelas linguagens marcada e gerada.

A linguagem gerada para G é dada por

$$L(G) := \left\{ s \in \sum^* : f(x_0, s) \text{ é definida} \right\}, \quad (2.2)$$

e a linguagem marcada para G é

$$L_m(G) := \{ s \in L(G) : f(x_0, s) \in X_m \}. \quad (2.3)$$

A linguagem gerada $L(G)$ representa todos os trajetos diretos, que podem ser seguidos pelo diagrama de transição, iniciando no estado inicial. A linguagem marcada $L_m(G)$ é um subconjunto de $L(G)$, contendo somente as palavras s em que $f(x_0, s) \in X_m$, tal que, a palavra corresponde ao trajeto que finaliza em um estado marcado. Essas linguagens também são responsáveis por inserir restrições de coordenação, pois representam cadeias de eventos permissíveis ao sistema [4].

Algumas operações adicionais têm o papel de alterar o diagrama do autômato. São elas a acessibilidade, co-acessibilidade e a operação trim. A acessibilidade induz a eliminação em G de todos os estados que não são acessíveis ou atingíveis partindo-se de x_0 por uma palavra em $L(G)$, sem afetar a linguagem gerada e marcada de G . Quando um estado é removido, todas as transições que levam a ele também deixam de existir. Em relação a co-acessibilidade, um estado x de G é dito co-acessível para X_m , se existe um caminho no diagrama de transições de G que parte do estado x para algum estado marcado. A operação de co-acessibilidade remove todos os estados que não atendem esta condição e está intimamente ligada ao conceito de bloqueio. Por fim, um autômato é dito trim, quando é acessível e co-acessível, simultaneamente.

A linguagem regular delimita a representação do autômato, como pode ser expresso pelo seguinte teorema.

Teorema de Kleene [4]: se L é regular, existe um autômato G com número finito de estados tal que $L_m(G) = L(G)$. Se G tem um número finito de estados, então $L_m(G)$ é regular. Por outro lado, G é dito ser co-acessível se, a partir de qualquer um de seus estados, existir ao menos um caminho que leve para um estado marcado. A condição de co-acessibilidade de um autômato determinístico de estados finitos pode ser descrita por

$$L(G) = \overline{L_m(G)}. \quad (2.4)$$

De forma geral, um autômato determinístico de estado finito pode ter estados inacessíveis, isto é, estados que jamais podem ser alcançados, a partir do estado inicial. Formalmente, um estado $x \in X$ é dito ser acessível se $x = f(x_0, s)$ para algum $s \in \sum^*$. Já o autômato G é dito ser acessível se x é acessível para todo $x \in X$.

Em geral, um SED complexo pode ser visto como a composição de subsistemas, atuando sob ações de um controlador (denominado de supervisor) que impõe restrições

de coordenação ao sistema. A abordagem local de modelagem parte do princípio de construir modelos locais para cada subsistemas e restringir sua coordenação (através de f e Γ). Posteriormente, é possível realizar a composição dos autômatos da planta e das restrições (ou especificações), a fim de obter o supervisor. A modelagem dos subsistemas, sugere uma maior facilidade na obtenção de modelos de sistemas de grande complexidade, a exemplo de sistemas de navegação de múltiplos nós móveis, facilitando o projeto. Dado que o comportamento de cada agente individualmente pode ser descrito por um autômato, bem como as restrições de interação entre eles. Além disso, permite pressupor que alterações num subsistema ou em alguma restrição, somente exija uma mudança no modelo correspondente. Este fato auxilia na integração de novos comportamentos ao robô e adequações na modelagem.

Dado dois autômatos $G_1 = (X_1, \sum_1, f_1, \Gamma_1, x_{01}, X_{m1})$ e $G_2 = (X_2, \sum_2, f_2, \Gamma_2, x_{02}, X_{m2})$ define-se a composição paralela síncrona (em que ' Ac ' representa a acessibilidade do sistema) $G_1 \parallel G_2$ como:

$$G_1 \parallel G_2 = Ac(X_1 \times X_2, \sum_1 \cup \sum_2, f_{1||2}, \Gamma_{1||2}, (x_{01}, x_{02}), X_{m1} \times X_{m2}), \quad (2.5)$$

em que

$$\Gamma(x_1, x_2) = (\Gamma(x_1) \cap \Gamma(x_2)) \cup (\Gamma(x_1) \setminus \sum_2) \cup (\Gamma(x_2) \setminus \sum_1), \quad (2.6)$$

e

$$f_{1||2} : (X_1 \times X_2) \times (\sum_1 \cup \sum_2) \rightarrow (X_1 \times X_2), \quad (2.7)$$

ou seja,

$$f_{1||2} : ((X_1, X_2), \sigma) = \begin{cases} (f_1(x_1, \sigma), f_2(x_2, \sigma)) & \text{se } \sigma \in \sum_1 \cap \sum_2 \text{ e } \sigma \in \sum_1 \cup \sum_2 \\ (f_1(x_1, \sigma), x_2) & \text{se } \sigma \in \sum_1 \text{ e } \sigma \notin \sum_2 \text{ e } \sigma \in \sum_1(x_1) \\ (x_1, f_2(x_2, \sigma)) & \text{se } \sigma \in \sum_2 \text{ e } \sigma \notin \sum_1 \text{ e } \sigma \in \sum_2(x_2) \\ \text{indefinido} & \text{caso contrário} \end{cases}. \quad (2.8)$$

Portanto, um evento comum a $\sum_1$ e $\sum_2$ só pode ser executado de forma síncrona nos dois autômatos, os demais ocorrem assincronamente, ou seja, de modo independente em cada autômato. Se os alfabetos são iguais ($\sum_1 = \sum_2$), a composição é completamente síncrona, isto é, todos os eventos estão sincronizados, o que implica que $G_1 \parallel G_2 = G_1 \times G_2$. No caso oposto, $\sum_1 \cap \sum_2 = \phi$ não existe nenhuma sincronização entre os eventos dos dois autômatos.

2.2.2 Autômato em bloqueio

As linguagens gerada e marcada de um autômato além de permitirem a interpretação do funcionamento do sistema, também possibilitam a análise da existência ou não de bloqueios no mesmo. A definição de bloqueio em autômatos, bem como suas características serão aqui apresentadas.

Em relação às condições de bloqueio em um autômato G , a primeira delas é ocasionada no decorrer dos eventos que levam a um estado $x_i \in X$, no qual $\Gamma = \phi$, com $x_i \notin X_m$. Nesse caso, nenhum evento pode ser executado e o sistema fica preso no estado x_i , não conseguindo alcançar mais um estado marcado. Este fenômeno é denominado *deadlock*.

Outra forma de bloqueio a ser considerado é quando existe um conjunto de estados não marcados em G que formam um conjunto de estados não marcados particular, no qual podem ser alcançados entre si, porém, não há ocorrência de nenhum evento que leve o sistema a um estado (marcado) fora desse conjunto. Esta característica é denominada *livelock*.

É apresentado na Figura 2.5 um exemplo de autômato em que há estados não-coacessíveis, que conduzem ao bloqueio. De fato, a partir dos estados 3, 4 e 5, o sistema não pode completar nenhuma tarefa, ou seja, não há transições que leve a um estado marcado (estados 0 ou 2) que representa a conclusão de uma tarefa. Tal situação indica que há *deadlock* no estado 5 e *livelock* entre o conjunto de estado formado por 3 e 4.

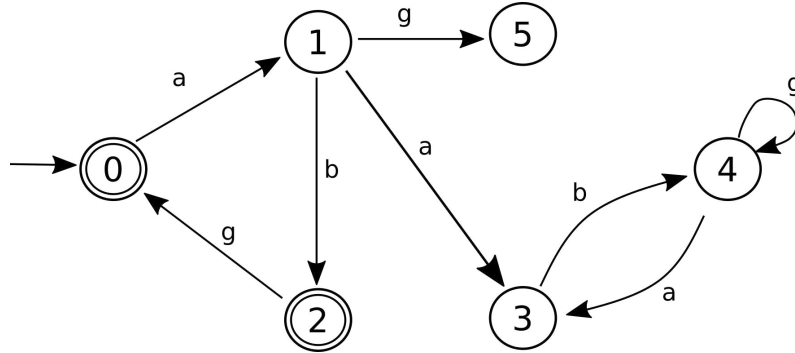


Figura 2.5: Exemplo de autômato com bloqueios do tipo *deadlock* e *livelock* [4].

Nesses dois casos é dito que o autômato possui bloqueio e

$$\overline{L_m(G)} \subseteq L(G). \quad (2.9)$$

Quando não há bloqueio tem-se

$$\overline{L_m(G)} = L(G). \quad (2.10)$$

Esta condição representa que o prefixo fechamento da linguagem $L_m(G)$, ou seja, qualquer cadeia possível composta por prefixos de $L_m(G)$ incluindo a cadeia vazia é também cadeia de $L(G)$.

2.2.3 Sistema supervisório

Em geral, um sistema a ser controlado corresponde a um conjunto de subsistemas que quando atuando em conjunto com os demais deve ter seu comportamento restringido de forma a cumprir a tarefa global [4]. A composição dos comportamentos de cada subsistema pode então ser identificado como a planta G , com comportamentos gerado e marcado definidos como $L(G)$ e $L_m(G)$, respectivamente.

O conjunto de restrições das ações a serem tomadas na ocorrência de eventos define uma especificação E a ser obedecida, e pode ser interpretada como segue. As linguagens $L(G)$ e $L_m(G)$ contêm cadeias indesejáveis de eventos por violarem alguma condição que se deseja impor ao sistema. Pode ser o caso de estados proibidos em G , por provocarem bloqueio ou por serem inadmissíveis como o caso de uma colisão entre robôs.

Com o objetivo de coordenar a atuação conjunta de subsistemas, introduz-se um agente de controle denominado supervisor. Considera-se que o supervisor interage com a planta, numa estrutura em malha fechada (como mostrado na Figura 2.6) em que se observa os eventos ocorridos da planta e define que eventos, dentre os fisicamente possíveis de ocorrerem no estado atual, são permitidos de ocorrerem a seguir. Mais precisamente, o supervisor tem uma ação desabilitadora de eventos. Portanto, o conjunto de eventos habilitados num dado instante pelo supervisor define uma entrada de controle que é atualizada a cada nova ocorrência de evento observada na planta [4].

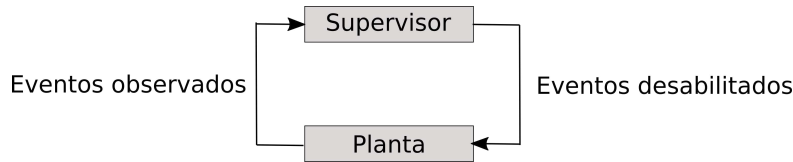


Figura 2.6: SED em malha fechada, baseado em [4].

O conjunto de eventos que afeta a planta G é particionado num conjunto de eventos controláveis $\sum_c$ (passível de desabilitação) e um conjunto de eventos cuja natureza não permite a desabilitação $\sum_u$, denominados não controláveis. Logo, uma planta representada por um ADEF G com comportamento definido sobre um conjunto $\sum$, pode ser representado por

$$\sum = \sum_c \cup \sum_u. \quad (2.11)$$

O problema de controle de um SED pode ser definido, de acordo com [4], da seguinte forma. Dada uma planta G , com comportamento $L(G)$, $L_m(G)$ e estrutura de controle Γ , definidos sobre um conjunto de eventos $\sum$; e especificações definidas por $A \subseteq E \subseteq \sum^*$; deseja-se encontrar um supervisor não bloqueante S para G tal que

$$A \subseteq L_m(S) \subseteq E. \quad (2.12)$$

Para o presente trabalho proposto, os autômatos serão responsáveis por descrever individualmente os comportamentos atribuídos a cada nó móvel da rede. A composição deles gerará a planta que representará um sistema multiagente. Todavia, poderá haver conflitos nessa composição que devem ser sanados por especificações. Portanto, será proposto um sistema supervisor para a coordenação dos eventos que podem ser realizados em cada estado. Esse sistema requerirá a verificação de não bloqueios.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, será realizada uma revisão sobre a distribuição espacial de nós sensores e a utilização de nós móveis no estudo de RSSF.

3.1 Distribuição espacial de nós

A distribuição espacial de nós sensores pode ser classificada como aleatória ou determinística [12]. Técnicas determinísticas permitem definir a posição desejada da alocação dos nós sensores na área de interesse por um profissional. Já o processo aleatório (ou estocástico) se dá em ambiente de difícil acesso e de larga escala, os quais caracterizam um ambiente inseguro para um profissional atuar. Neste caso, a distribuição dos nós pode envolver a utilização de uma aeronave, um projétil de artilharia, foguete, míssil, catapultado de um navio, dentre outras.

O desempenho da rede é degradado se a distribuição estocástica não atingir parâmetros desejáveis, como conectividade, cobertura ou estimativa de tempo de vida, gerando redundância e subaproveitamento dos nós por estarem desconectados devido ao afastamento entre eles. A degradação é observada se uma área é coberta sem uma requerida conectividade dos nós lançados na AI ou se possui alta conectividade e pouca cobertura [35, 36]. Portanto, após a distribuição e inicialização da rede, é importante considerar como fatores de qualidade a cobertura e conectividade conjuntamente, de modo a evitar irregularidades na rede como buracos (áreas sem cobertura na AI) e sub-redes.

Uma rede com buracos na cobertura é mais susceptível a falhas, ataques maliciosos e dificulta o transporte de dados [11]. O buraco pode ser oriundo da distribuição dos nós, do processo de realocação, condições ambientais e gasto energético desbalanceado e excessivo. Poucas discussões são abordadas acerca de fatores que impactam na baixa cobertura do sistema, como a distribuição aleatória, realocação e gasto energético [11, 13]. Em [11] são abordados métodos de identificação de buracos na cobertura, classificando-os em abordagens geométricas, alto-organização, algoritmos baseados no Diagrama de Voronoi e verificação da cobertura- k , sendo os buracos classificados em internos ou externos à

fronteira.

Como requerimentos adicional a presença de buracos de uma RSSF, em [13] foi apontada a necessidade de auto-organização perante mudanças dinâmicas, bem como habilidade de se configurar e se manter autonomamente. Sendo a cobertura e conectividade tópicos fundamentais e relevantes que devem ser abordadas nas propostas de algoritmos de distribuição de nós [14].

As mudanças dinâmicas causadas por fontes externas ou pela própria rede pode prejudicar o roteamento, a localização, gerando atrasos, causar cobertura incompleta da área de interesse, dificuldade na detecção de falha, dentre outras. As redes, em geral, não estão preparadas para alterações dinâmicas, pois são programadas previamente.

A aplicação do aprendizado de máquina ou inteligência artificial pode auxiliar a rede a decidir o número ideal de nós para cobrir a área de interesse, auxiliar no gerenciamento de energia para aumento do tempo de vida, pode modificar o posicionamento dos nós influenciado por fatores internos e externos, auxiliar na eficiência do roteamento visando incrementar o tempo de vida, e na identificação e tratamento em caso de falha de nó sem intervenção humana ou necessidade de reprogramação [37]. Três tipos de aprendizados podem ser aplicados [37], sendo apresentados na sequência do texto.

O aprendizado de máquinas pode ser supervisionado, quando utilizado dados de entradas e saídas, com objetivo de encontrar a relação entre eles. Isso envolve métodos como regressão, redes neurais artificiais e árvores de decisão. Os algoritmos de aprendizado que requerem dados para rodar *online* apresentam limitações, devido requerem uma centralização dos dados e demandam alta capacidade computacional. Como abordagens não supervisionada podem ser aplicados métodos baseados em *k*-means, agrupamentos hierárquicos e lógica *fuzzy*. Por fim, também podem ser aplicados métodos de aprendizado por reforço e computação evolutiva.

Motivado pela falha de nós da rede e necessidade de restauração da conectividade, um algoritmo baseado em otimização foi proposto em [12]. A proposta sugere a distribuição de nós na AI com o uso de robô, drone ou nó móvel, considerando sistema de localização embarcado e alocando os nós com um planejamento *a priori* visando maximizar a cobertura. Ao considerar que a falha leva a criação de sub-redes, são criados polígonos conectando-as. Desse modo, visa suprir esses buracos com novos nós distribuídos de forma determinística. Essa abordagem considera conectividade, cobertura e energia conjuntamente.

Um processo de otimização foi aplicado em [14] através do desenvolvimento de um algoritmo de controle de cobertura e conectividade. Cosidera-se uma rede AD HOC em que o controle de cobertura com restrição de comunicação descreve o problema de distribuição ótima de nós que partem da sua localização inicial para o local ótimo de forma arbitrária, sem uma navegação. O diagrama de Voronoi e grafo são utilizados no processo. Os autores defendem que este tipo de solução se torna útil em cenários de desastre natural,

monitoramento de ambiente e controle de ambientes inseguros. Em contrapartida, nestes cenários, a discussão sobre como os nós devem se locomover são de extrema importância e não são discutidos.

Um algoritmo de otimização baseado no agrupamento de baleias é proposto em [38] com a finalidade de atingir uma cobertura de 100% da área de interesse. A otimização multi-objetivo leva em consideração 3 parâmetros para a função de avaliação (ou função de custo), a cobertura, o número total de sensores e o consumo de energia. A abordagem calcula as posições para onde os nós devem se deslocar a cada iteração da otimização baseada em grade. O critério de parada usado foi o número de iterações, o que limita a abordagem. Seria interessante usar critérios de QoS da rede como critério de parada, como a cobertura, foco do estudo.

O algoritmo MOEA/P (Otimização Multi-Objetivo baseada em Algoritmo Evolutivo em projeção plana) foi proposto em [39], com possibilidades de otimizar a distribuição dos nós da rede, maximizar conectividade, cobertura, minimizar o consumo e o custo da rede e maximizar o tempo de vida, foi adotado a maximização da cobertura e minimização do custo, simultaneamente. Esta abordagem objetivou definir o posicionamento de nós *sinks* na rede.

Uma análise sobre a cobertura- k é apresentada em [40]. A abordagem considera um modelo probabilístico para o sensor, no qual a probabilidade de detecção cai com o afastamento para o sensor. No trabalho foi proposto um esquema de distribuição de nós determinístico para minimizar o número de sensores requisitados enquanto garante a qualidade da cobertura. Utiliza uma abordagem geométrica para definir camadas na direção z que geram sub-redes em cada nível, proporcionando a cobertura- k . Essa abordagem gera facilidade no posicionamento dos nós e definição do número de nós necessários para a cobertura da AI.

Em [41], os nós sensores distribuídos através de lançamento apresentam paraquedas e um sistema de comunicação ativo que permite cada dispositivo chavear entre dois estados, queda livre e planar. No estado planar, o nó usa a informação da densidade de nós vizinhos para coordenar seu movimento (de maneira controlada) e se distribuir pela AI. A distribuição de nós numa rede 3D subaquática foi considerada em [42], no qual a distribuição recebe influência de correntes e atrasos na comunicação.

Como pôde ser visto até aqui, muitas soluções propostas para o processo de distribuição de nós adotam abordagens voltadas para otimização com objetivo de realocar os nós após ou durante o emprego na área de interesse. Este emprego se caracteriza como uma distribuição de nós sensores estocástica, na qual modelos probabilísticos representam o procedimento de distribuição através da definição da posição dos nós sensores por uma função densidade de probabilidade (abreviada em inglês como PDF). Dependendo da estratégia de distribuição, as coordenadas x e y da posição do nó sensor podem ser modeladas por distribuições distintas. De acordo com [43, 44], a distribuição de nós

sensores estocástica pode ser classificada como simples e composta. A distribuição simples é uma variação da difusão simples e a distribuição composta realiza repetidas difusões simples.

A difusão simples emula o lançamento a partir de uma aeronave e, geralmente, os nós ficam concentrados ao redor do nó *sink* ou posição central na AI. Este processo pode ser modelado por uma equação de difusão linear, na qual a solução é uma distribuição normal 2D.

Um estudo sobre a influência da gaussiana 2D aplicada à distribuição de nós foi apresentada em [45]. O objetivo foi avaliar o efeito da variância sobre a cobertura e o tempo de vida da rede através da análise de dois modelos, um com as variâncias nas direções x e y iguais e outro com variâncias distintas. Diferentemente, de outros trabalhos que se utilizam da distribuição de nós aleatória sem explicitar a distribuição de probabilidade utilizada, este apresenta tais modelos e discute seu impacto na cobertura e tempo de vida da rede.

Alguns métodos de difusão simples são definidos como contínuos e descontínuos. A difusão contínua emula uma aeronave sobrevoando o centro da área de interesse, sendo os nós sensores lançados sobre essa linha central imaginária, realizando uma distribuição uniforme ao longo da direção de voo e uma distribuição gaussiana na direção ortogonal. A difusão descontínua segmenta o lançamento de um número de nós de tempos em tempos enquanto percorre a linha central.

Uma difusão composta é baseada na realização de difusões simples de forma sequencial com diferentes médias e variâncias. Esta estratégia requer um número significativo de vôos sobre a AI para representar cada um dos lançamentos. Por outro lado, esta distribuição pode ser vista como um lançamento com planejamento de trajetória se utilizado um veículo aéreo não tripulado (VANT) com controle de posicionamento. Quando os sensores são lançados com densidade constante, denomina-se o processo como distribuição por difusão constante. Outros métodos de difusão composta compreende a *R-random*, uma distribuição radial que emula uma explosão e espalhamento, a *Power-law*, na qual a densidade de sensores é alta próxima do *sink* e decai seguindo uma lei de potência, outra é a difusão exponencial que segue uma distribuição exponencial e, por fim, a *Sensor* que utiliza uma abordagem de grade, segmentando o ambiente em células e sorteando um nó em cada uma delas, proporcionando uma maior uniformidade na distribuição.

É possível verificar que algumas das abordagens de distribuição de nós citadas permitem a concentração de nós, geralmente no entorno do nó *sink* e, em outras, busca-se uma maior cobertura, e aproveitamento dos nós, minimizando a redundância criada.

Portanto, quando se trata de distribuição de nós, dois pontos devem ser destacados, a metodologia de emprego, que pode impactar na qualidade de serviço da rede ou ter o custo aumentado com a necessidade de nós extras, e os parâmetros do modelo que impactam a QoS desejada (cobertura, conectividade, redundância, tempo de vida) [45].

Estas metodologias apresentam uma representação da distribuição dos nós no ambiente real. Diferentemente, em [46] foi proposto um modelo de distribuição físico, considerando massa, forças e correntes sobre os nós em uma distribuição aquática, com ojetivo de explicar melhor o processo de emprego de nós.

A autosuficiência e robustez da conectividade da rede resultante de uma distribuição aleatória unificada é investigada em [47]. O estudo considera o número de sensores que monitoram com redundância uma região como critério de robustez a conectividade da rede quando aplicada uma distribuição aleatória. Unindo a isso, considera-se o alcance variável de comunicação. Neste estudo, 1000 redes foram geradas com alcance de transmissão variável em área e número de nós fixos para encontrar a conectividade- k (associada à redundância) que informa quão segura é a rede em caso de falha. Contudo, não são investigadas diferentes variáveis aleatórias.

Alguns modelos estocásticos têm sido propostos para representar a distribuição de nós sensores em larga escala e em áreas abertas [35, 48]. O termo áreas abertas é usado para regiões de larga escala, de difícil acesso e perigosas. Mas também é usado para pequenas áreas com cobertura pontual [49]. Como citado, os principais modelos são baseados em distribuições normal e uniforme, representando a distribuição estocástica de nós sem processo de realocação. Estes modelos representam o conjunto de incertezas geradas pelas condições do ambiente que afetam a distribuição dos nós.

3.2 Mobilidade em redes de sensores sem fios

Uma forma de interagir com a rede para melhoria na integração, minização da ocorrência de buracos e falhas ou com objetivo de atingir critérios como conectividade, cobertura ou gasto energético, é através do emprego de nós móveis. Portanto, será apresentada uma revisão sobre a aplicação da mobilidade de nós em RSSF levando-se em consideração uma classificação baseada em [1]. Esta classificação caracteriza a mobilidade de acordo com a função do nó móvel na rede, sendo sugerido adicionalmente um novo agrupamento denominado mobilidade de dispositivos de suporte, como apresentado na Figura 3.1. Nessa nova classe, o nó móvel não necessariamente é um sensor móvel, mas pode operar como roteador. O objetivo dessa classe é reunir propostas de trabalhos que utilizam a mobilidade de robôs no suporte à rede. Nesse sentido, as atividades envolvidas nessa categoria contemplam a recarga de bateria, reposicionamento e substituição de nós, levantamento de topologia, identificação de perímetro, busca, resgate, dentre outras.

O interesse da comunidade científica pela mobilidade em rede de sensores pode ser verificado pelos vários protocolos e mecanismos propostos para QoS e para realizar a formalização de redes híbridas [50]. Porém, ainda há margem para pesquisas direcionadas às redes estáticas, como em [51], que direcionam seus estudos para o tempo de vida da rede utilizando programação não linear inteira, como forma de melhor alocar nós roteadores e

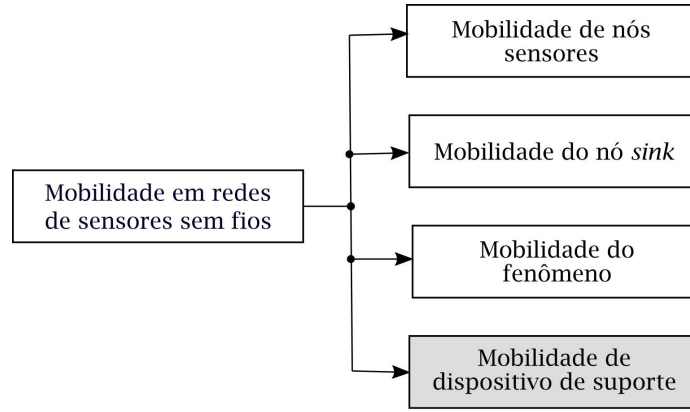


Figura 3.1: Tipos de mobilidades aplicadas à rede de sensores sem fio. O bloco em destaque refere-se a mobilidade aplicada ao suporte da rede, como recarga de bateria, reposicionamento e substituição de nós, levantamento de topologia, identificação de perímetro, busca, resgate, dentre outras.

melhorar o fluxo de informação entre sensores acústicos submersos. O ambiente aquático geralmente exige uma abordagem com controle de posicionamento dos nós devido a maior dificuldade com a mobilidade e recarga de baterias.

Por outro lado, os nós móveis podem auxiliar a rede no suporte à mesma, ou seja, a movimentação melhora o balanço de carga reduzindo a quantidade de mensagens que chegam ao nó *sink* em determinada região da rede [52], melhorando a eficiência. Em contrapartida, a mobilidade causa mudanças imprevisíveis na topologia da rede, com quebra de enlaces no roteamento, demandando com frequência uma nova busca de rotas para troca de informações. Em geral, os protocolos e sistemas supervisórios devem lidar com estas mudanças na topologia para realização do controle e acompanhamento de atividades dos nós móveis e/ou estáticos com largura de banda e alcance limitados.

A relação de cooperação entre nós estacionários e robôs (considerados nós móveis) pode ser separada em dois grupos, o primeiro quando os robôs dão suporte à rede estática e o segundo quando os nós estáticos dão suporte aos robôs. No primeiro grupo, os robôs possibilitam a alocação de sensores e reposicionamento [53], o transporte e coleta de dados [51, 54] e a otimização da rede (na recarga de baterias, reconfiguração da rede, realocação de nós ou atuante como sensor) [17–19, 52, 55, 56]. No segundo caso, a rede estática colabora na localização do robô no ambiente [54], no auxílio a navegação [57], na recarga de bateria do próprio robô, os coordenando até postos de recarga [18] e colabora na cobertura e conectividade [58, 59].

A mobilidade dos nós, de acordo com [52], pode ser classificada como aleatória, predita e controlada. No primeiro caso, os dispositivos se movem com padrão aleatório. A mobilidade aleatória é bastante difundida e com propostas de algoritmos de operação tais como, *Random Waypoint*, *Random Direction*, *Random Walk*, *Random Gauss-Markov*, *Boundless Simulation Area*, *Freeway*, *Manhattan*, *Column*, *Nomadic*, *Pursue* e *Reference*

Point Group, que trabalham a mobilidade individual e de grupos de nós [60]. Na mobilidade predita a movimentação obedece um padrão conhecido, o que permite executar tarefas simples, geralmente consideram padrões geométricos definidos no ambiente para movimentação dos nós. Já na abordagem de mobilidade controlada, de interesse neste estudo, são utilizados dispositivos móveis na rede com movimentação específica para atingir objetivos traçados, como otimizar a cobertura, posicionar nós, reduzir o consumo energético, devido comunicações excessivas em determinada região, dentre outras atividades. O movimento do nó pode ser influenciado pelo consumo de energia, pela ocorrência de eventos na rede ou pela atividade de navegação a ser desempenhada, como posicionar e reposicionar nós.

A mobilidade imposta a nós da rede pode gerar implicações no controle de movimento e no monitoramento de um grupo de robôs, devido à necessidade de uma efetiva comunicação e conhecimento do roteamento. Esses fatores muitas vezes impõem que o controlador seja robusto a incertezas, à alta dinâmica do ambiente e possa lidar com comunicação imperfeita, limitação de alcance e perdas. De maneira mais ampla, pode ser dito que a própria rede pode contribuir para o sucesso ou falha do sistema [61].

O controle de movimento de robôs, também conhecido como controle de navegação, é um tópico de pesquisa da comunidade robótica bem explorado. Se refere à coordenação individual ou coletiva de robôs para atingir um determinado objetivo e apresenta uma numerosa aplicabilidade. A coordenação de múltiplos agentes requer comunicação, informações do ambiente e o desenvolvimento de estratégias de controle para planejar suas ações ou reagir a eventos. Esses aspectos são cobertos por uma vasta literatura, com resultados teóricos e práticos em teoria de controle. No âmbito das RSSFs, somente a algumas poucas décadas é que o controle de mobilidade passou a ser estudado no escopo de redes híbridas, principalmente, com o objetivo de aumentar o tempo de vida da rede [17–19, 52, 55, 56], que pode até quadruplicar, se comparada a uma rede totalmente estática [52].

Uma RSSF em operação requer uma garantia de conectividade entre dispositivos durante seu tempo de vida, principalmente quando são utilizados dispositivos móveis em seu suporte, pois o monitoramento em tempo real não tolera a ocorrência de falhas e mudanças topológicas da rede de maneira grosseira. Além disso, um posicionamento não adequado dos nós móveis pode transformar os efeitos positivos da mobilidade controlada em um desempenho ruim da rede [52].

As abordagens utilizadas para aumentar o tempo de vida de RSSF, de acordo com [56], são alocação de recurso, esquemas de transmissão elaborado, formação de *clusters*, mobilidade de nós roteadores e de nós *sinks*, tratamento da cobertura e conectividade, métodos para coleta dos dados, correlação de dados e colheita de energia. A partir das sessões seguintes, será possível identificar as características de mobilidade utilizadas em RSSF para otimizar estas operações.

3.2.1 Mobilidade de nós sensores

Na categoria de mobilidade de nós sensores, os nós apresentam mobilidade durante o processo de distribuição, que pode levar a um melhor posicionamento sobre a área de interesse e requerer um número de nós reduzido.

Em [62] foi proposto um protocolo de roteamento para redes *AD HOC* que utilizam o roteamento de fonte dinâmico. O roteamento de fonte é uma técnica em que o emissor conhece a rota de tráfego até o destino quando os nós são estáticos. A proposta apresenta um protocolo reativo, ou seja, quando o nó *sink* se movimenta, rapidamente as tabelas de roteamento são alteradas. Esse protocolo trata de uma das primeiras propostas dinâmicas em contraponto a protocolos convencionais que utilizam algoritmos de roteamento tipo vetor de distância ou enlace de estados (*state link*), os quais requerem roteamento periódico. No primeiro, uma mensagem é enviada em *broadcast* para todos seus vizinhos a uma certa distância. O segundo, verifica o estado de cada um de seus enlaces adjacentes da rede, se está ativo, e cada roteador calcula a menor distância para o *sink* baseada na topologia mais recente.

Os protocolos em RSSF podem ser classificados como reativo, ou seja, opera sob demanda, como a citação anterior, proativo, no qual planeja a rota com base nas tabelas de roteamento), e híbrido, que une características das duas anteriores [50]. Alguns exemplos de protocolos evoluídos das estruturas de roteamento citadas anteriormente são, DSR (*Dynamic Source Routing*), DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*), AODV (*Ad Hoc On-demand Distance Vector*) e MAODV (*Multicast Ad-hoc On-demand Distance Vector*), dentre outros [50]. Todos eles foram propostos para atuar em redes Ad Hoc móveis (com sigla do inglês, MANET) e possuem como características, inicialização automática, adaptação às mudanças nas condições da rede e busca por novas rotas multissaltos da fonte para o destino.

Em [55] foi utilizado um algoritmo genético para otimizar a topologia da rede MANET, com o objetivo de melhorar a confiabilidade de transmissão. Nesse sentido, pôde ser verificada a influência do número de saltos na transmissão e seu impacto negativo na confiabilidade. Pois, quanto maior o número de saltos, menos confiáveis são as transmissões, devido aos efeitos de mobilidade e desconstrução de enlaces durante a comunicação.

Em [53] foi proposto um algoritmo de cobertura descentralizado com prova de convergência e com característica de inicialização aleatória para uma rede composta por sensores móveis. Esta abordagem visa, posteriormente, distribuir uniformemente os nós de modo que cada nó esteja conectado a pelo menos um outro. Utilizando-se das informações de vizinhos para criar triangulações e se posicionar a distâncias equidistantes.

3.2.2 Mobilidade do nó *sink*

A mobilidade imposta aos nós concentradores ou *sinks* objetiva otimizar o tempo de vida da rede através do seu melhor posicionamento, reduzir saltos, ou realizar a tarefa de coleta de dados através de uma rotina de visitas aos nós sensores estáticos.

Com o objetivo de incrementar o tempo de vida da rede, em [63] foi abordado o controle de movimento de múltiplos nós *sinks*. Uma programação linear inteira foi utilizada para otimizar as tomadas de decisões de um sistema de controle centralizado para o sistema multiagente. O sistema considera que os nós *sinks* possuem capacidades de mobilidade sem influência energética (uma idealização), alto recurso computacional e de memória, e com interface de comunicação. Os nós sensores apresentam perdas energéticas no envio de pacotes por multissaltos. Durante a movimentação, os nós *sinks* desativam a recepção de dados e pelo menos um nó *sink* da rede deve se manter ativo/parado durante este período. A abordagem centralizada proposta foi confrontada com uma abordagem ótima, estática e outra com movimentação aleatória. A abordagem centralizada é 2% menos eficiente que a ótima, por apresentar conjuntos sub-ótimos e em relação a estática, e melhorou o tempo de vida da rede em 335%. Em [64] foi proposta a movimentação de roteadores para minimizar o gasto energético no encaminhamento de dados do nó sensor ao *sink*. A abordagem não requer um planejamento complexo de movimento e utiliza-se de otimização para definir posições para os roteadores se estabelecerem. Em [65] foi proposta uma rede de sensores com nós *sinks* móveis, para uma aplicação na qual uma viatura policial, que representa o nó *sink*, coleta imagens de nós sensores alocados às margens de uma rodovia. O objetivo da mobilidade do nó *sink* é minimizar o gasto energético no qual a comunicação possa ser dada por um único salto com o nó *sink* funcionando como "mula", ou seja, a transmissão se dá quando o nó *sink* está dentro do alcance de comunicação do nó sensor. Considera-se que o nó *sink* utiliza GPS e conhece a posição de todos os nós estáticos da rede.

A tarefa de coleta de dados pelo nó *sink*, frequentemente, resulta em congestionamento de dados nos nós sensores próximos, uma vez que esses são utilizados como roteadores para entregar os dados de nós distantes. Isto causa uma rápida descarga da bateria devido ao excesso de transmissões resultante do desbalanceamento no fluxo de mensagens. Um método benéfico para contornar este problema é a mobilidade controlada, tanto dos nós sensores roteadores quanto do nó *sink* [56]. Nesse sentido, em [54] foi apresentado um método de coleta de dados em RSSF de grandes áreas utilizando Veículos Aéreos não Tripulados (VANT). A contribuição do trabalho é dada pela cooperação entre VANT e rede. A rede auxilia na definição do plano de voo e a trajetória definida incrementa o desempenho da coleta. Esta abordagem foi aplicada em atividade real em Sevilha, Espanha.

Em [66] foi aplicada a movimentação de nós *sinks* para coleta de dados. Um algoritmo hierárquico baseado em agrupamentos (do inglês *clusters*) foi utilizado para fornecer os

dados a um nó *sink* móvel. A mobilidade é dada para evitar inundação de dados em uma região da rede e necessidade do uso de GPS. O objetivo foi encontrar o trajeto de roteamento até o nó concentrador, obedecendo a hierarquia proposta, em que os líderes dos *clusters* se comunicam diretamente com o *sink* e os nós do *cluster* se comunicam entre si e com o seu líder, minimizando o gasto energético. Essa abordagem também permite a redução na busca por novos roteamentos.

Já em [67], foi apresentada uma abordagem para maximizar o tempo de vida em RSSF utilizando nós *sinks* móveis com tolerância à latência na comunicação. Essa abordagem permite que o nó aguarde o melhor momento para transmitir seus dados ao *sink*. Para definir o momento de comunicação foi utilizada otimização. O método proposto utiliza um ordenamento de visitas a ser executado pelo nó *sink*, que é restrito a se movimentar dentro da área de cobertura da rede.

Como visto, a coleta de dados realizada por nós móveis está associada à otimização energética da rede, através da redução do número de saltos nas transmissões. A mobilidade é controlada para evitar latência na entrega de dados, permitir maior cobertura, menor taxa de transferência e erros, além de aumentar a segurança por meio do suporte fornecido. Porém, um dos maiores desafios é a atualização da topologia diante da movimentação de nós [68].

3.2.3 Mobilidade do fenômeno

Na categoria em que a mobilidade é dada pelo fenômeno a ser monitorado, os nós sensores podem ser estáticos e acompanhar a mobilidade do fenômeno ou pode também apresentar mobilidade com objetivo de capturá-lo, a exemplo da tarefa de monitoramento de invasores de fronteira.

Diferentemente, em [57] foi proposto um sistema de navegação baseado em rede de sensores para auxiliar robôs móveis na navegação em ambiente industrial dinâmico. Sensores *laser* de distância espalhados pelo ambiente, atuando em rede, realizam varredura do espaço para encontrar obstáculos (estacionários e dinâmicos) e planejar a navegação global. O robô disponibiliza sua localização através da rede ao sistema central. O algoritmo de controle baseia-se em uma nova adaptação à técnica de campo potencial, incluindo forças de afastamento do último ponto amostrado e com restrições não holonômicas. A velocidade linear do robô é mantida constante e apenas submetido ao controle angular.

3.2.4 Mobilidade de dispositivos de suporte

Esta categoria engloba atividades de nós móveis diferentes das apresentadas anteriormente no suporte técnico às RSSF. Incluindo tarefas que vão além da movimentação de nós *sinks* ou roteadores, como por exemplo, a movimentação para

realizar a recarga de nós, a ampliação da cobertura e da conectividade ou reduzir o consumo energético com seu posicionamento, dentre outras.

Em [51] foram utilizados dispositivos móveis para recarga de nós sensores e coleta de dados, sendo proposto um algoritmo baseado em rede com o objetivo de definir o número de nós móveis necessários para realizar a tarefa de recarga e manter a rede sempre ativa. A proposta considera um sistema distribuído em que cada nó descobre seu destino individualmente. O planejamento também leva em consideração a energia dos nós sensores para garantir sua recarga antes da descarga total. Em [18] foi abordada a transferência de energia sem fio na recarga periódica de nós com o uso de robôs móveis. O trabalho apresenta uma metodologia de otimização na qual também é permitida a transferência de energia entre robôs. Já em [19], foi analisado o problema de recarga por demanda com a utilização de apenas um robô móvel, de modo que os nós sensores fazem requerimentos para sua recarga através da rede. A tomada de decisão para recarga leva em consideração a distância e o tempo. O sistema foi avaliado por simulação e de forma analítica teve a taxa de transferência e latência de recarga analisadas.

Uma abordagem voltada para a coleta de dados é apresentada em [16]. A abordagem tem como objetivo lidar com as incertezas na navegação de um veículo não tripulado (VANT) na presença de outros VANTs não cooperativos no ambiente. Estes outros VANTs, que prejudicariam suas ações, proporcionam características reais de auto-defesa de colisão e interferência no sistema de comunicação. A abordagem é voltada para o planejamento de caminho robusto para um sistema descentralizado. No planejamento de caminho, é aplicado aprendizado por reforço para maximizar a coleta levando-se em consideração restrições de energia, colisão, realização da tarefa, cinemática e posições inicial e final.

Considerando o aspecto realístico da desconexão em redes, [22] aponta que efeitos ambientais, padrões de irradiação das antenas dos nós, distribuição aleatória, efeitos temporais, como saída e/ou entrada de nós e a movimentação, afetam a conectividade. Nesse trabalho, a desconexão em redes de larga escala foi analisada através de métodos de reparos robóticos adaptativos e de baixo custo que utilizam informações de intensidade do sinal recebido para atuar na navegação. Os experimentos utilizam este conceito para manter o robô dentro da área de conexão, fornecer confiabilidade na movimentação e posicionar roteadores entre nós, conectando-os. Os autores ressaltam que muitas desconexões em RSSF podem ser reparadas com apenas um nó colocado como roteador.

Na sequência serão discutidas aplicações associadas ao emprego de nós, que podem ser classificadas de acordo com seu objetivo em quatro categorias, segundo [69]: incrementar a cobertura; incrementar a conectividade; incrementar a eficiência energética; e, multi-objetivos, que implementa combinações das categorias citadas. Será dado foco nas abordagens que visam incrementar a cobertura e conectividade, tópicos associados a esta tese.

Trabalhos em RSSF, como visto nas seções apresentadas, em sua maioria contemplam

a conexão contínua entre nós estáticos e móveis da rede, desconsiderando as abordagens que permitem a desconexão dos nós móveis. De acordo com [70], a conectividade pode ser classificada em contínua, periódica e recorrente. Características também associadas à operação de robôs, se centralizada, distribuída ou híbrida.

A conectividade contínua é uma maneira de atribuir restrição de comunicação mantendo a conectividade continuamente entre todos nós e o nó *sink*, seja diretamente ou por multissaltos. Já a conectividade periódica permite que os nós explorem regiões de forma autônoma, e repasse à base seus dados periodicamente. Pode-se dizer que esta abordagem requer um esquema de reconexão periódica. Por fim, a conectividade recorrente é uma abordagem assíncrona em que o nó móvel só necessita se conectar ou comunicar quando identificar eventualidades. Desse modo, os robôs podem se desconectar arbitrariamente por longos períodos de tempo enquanto navegam ou exploram.

Motivado pela conectividade contínua, [71], utiliza-se deste modelo de comunicação para permitir que o robô avance em um processo de exploração em caverna. A comunicação entre o explorador e a base (externa à caverna) é dada por um conjunto de robôs móveis que se distribuem em linha, formando uma corrente entre a base e o explorador para receber os novos dados coletados. Essa navegação é regida por uma programação linear que define a movimentação dos roteadores responsáveis pela coleta requerendo sempre sua conexão com a rede e limitando a exploração ao número de nós móveis disponíveis e alcance da tecnologia de comunicação aplicada.

Em [30] foi proposta a navegação no patrulhamento de fronteira num cenário com obstáculos móveis, fora do escopo de RSSF. O sistema é analisado matematicamente para comprovar a convergência, observada com os experimentos simulados e reais. Utilizou-se de um modelo de robô não holonômico que se move com velocidade linear constante coordenado por um controlador modo deslizante que chaveia entre os comportamentos de ir para o destino e desviar de obstáculo, comportamentos básicos e essenciais em atividades robóticas para operar de forma segura em ambientes desconhecidos e dinâmicos. O projeto proposto se adequa ao monitoramento de movimento e deformação de fronteira. Os autores apontam que trabalhos anteriores se restringem a sistemas multiagentes e ambientes estáticos.

Algumas abordagens clássicas utilizam o autoemprego de nós móveis em redes compostas unicamente por robôs com objetivo de atingir uma maior cobertura- k possível. As metodologias pioneiras neste sentido foram baseadas em campo potencial [72], forças virtuais [46, 73, 74], grafo como Voronoi [75, 76], geometria computacional [77, 78], otimização e aprendizado [36, 37, 44, 59, 79].

Em [76] foi proposta uma das primeiras abordagens de RSSF composta de nós fixos e nós móveis. O objetivo proposto foi utilizar os nós móveis para ampliar a cobertura da rede impulsionando os nós móveis para as regiões de buracos resultantes do processo de lançamento de nós estáticos na área de interesse. Para isso, uma abordagem geométrica

foi desenvolvida, isto é, um algoritmo baseado em requisição de nós móveis, no qual os nós estáticos detectam buracos na região de interesse utilizando um Diagrama de Voronoi e, posteriormente, se encarrega de requisitar nós móveis disponíveis para cobrir essas áreas.

O diagrama de Voronoi é resultante da partição da região de interesse pelos sensores estáticos, vide Figura 3.2. O diagrama é constituído levando-se em consideração que cada ponto da região está mais próximo a um dos sensores estáticos, constituindo a célula de Voronoi. Logo, o diagrama apresenta um número de células iguais ao número de nós estáticos contidos na rede. Assim, cada sensor pode detectar buracos através da avaliação da sua célula e do alcance de conectividade proporcionada, ou seja, toda região pertencente a célula fora do alcance de conectividade, mas contida na área de interesse é definida como buraco e sua respectiva área torna-se o peso de requisição de cobertura da área. As regiões em cinza (na Figura 3.2) apontam os buracos da rede para algumas das células.

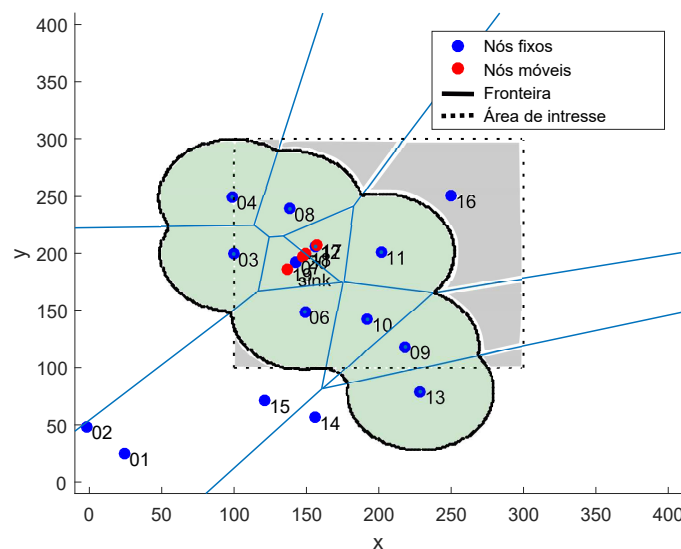


Figura 3.2: Diagrama de Voronoi para a rede com identificação de buracos dentro da área de interesse não coberto pela conectividade. Em cinza são destacados os buracos nas células de Voronoi.

Os nós estáticos realizam requisições de acordo com as áreas de seus respectivos buracos, que correspondem a pesos, e os nós móveis os compara com o seu custo de movimentação atual ou peso, fato que conduz a uma prioridade por buracos maiores. Cada nó móvel recebe um preço por sua mobilidade na inicialização da rede, podendo ser zero. Caso a requisição seja maior que o custo de movimentação do robô, ele se deslocará para a projeção do centróide do buraco sobre a fronteira de conectividade. Ao finalizar a movimentação, o nó móvel adota como preço de movimentação o valor da área de requerimento e passa a operar como roteador no destino. O custo de movimentação indica se é viável ou não cobrir uma área requisitada. Caso algum outro nó móvel tenha custo de mobilidade menor ele poderá ser direcionado para as regiões de buraco pendentes. Esta característica diminui a possibilidade de uma movimentação recorrente de um mesmo nó.

Esta abordagem apresenta como limitações a ampliação de cobertura e conectividade apenas dentro da região de interesse. Portanto, nós na vizinhança da região de interesse podem não ser integrados à rede. Uma segunda limitação diz respeito à possibilidade da movimentação criar buracos maiores, isso permite que o peso seja maior e o robô possa receber nova tarefa. Em alguns casos, isso pode gerar requisições recorrentes (um típico caso de mínimo local) na rede, não finalizando a tarefa. Por fim, esta abordagem negligencia a navegação conduzindo o nó para as posições de centróides identificadas.

Alguns algoritmos propostos utilizam apenas características geométricas para encontrar o melhor arranjo dos nós sensores, como em [80] que propoz um algoritmo chamado *Prioritized geometric area coverage* (PGAC), para ajustar a direção que o nó com sensoriamento direcional deve monitorar, com objetivo de maximizar a cobertura e minimizar a sobreposição entre vizinhos. Outra abordagem que utiliza diretamente o centroide da célula de voronoi é apresentada em [81], nela não é considerado obstáculo e a rede é móvel. [82] foi proposto o algoritmo *Voronoi-based Cooperative Node Deployment* (VCOND), o qual utiliza a informação apenas dos vizinhos para evitar redundâncias na cobertura formada pela rede móvel.

Em [75] também foi proposta uma estratégia baseada no diagrama de Voronoi para maximizar a cobertura de sensoriamento, em que cada sensor é movido para um ponto dentro da célula de Voronoi respeitando o esquema de ampliação da cobertura regido por um algoritmo de otimização baseado em gradiente. Com o mesmo objetivo, uma rede neural sintonizada por algoritmo genético é aplicada no controle de mobilidade dos agentes [59]. A abordagem faz com que surja uma interação entre os agentes na presença de obstáculos sem a necessidade do conhecimento do ambiente a priori. Em [83] também é levado em consideração obstáculos no ambiente. O algoritmo de autoalocação proposto é baseado em computação geométrica com o objetivo de incrementar a cobertura e manter a conectividade. O protocolo sugerido é executado em períodos discretos, paralelamente à movimentação dos nós de forma distribuída. Durante esse período, é realizado o processo de identificação dos nós vizinhos e definição do próximo destino. Na etapa seguinte, os nós se movem com velocidade constante em direção a um ponto virtual centrado na AI.

Outras abordagens utilizam técnicas distintas de otimização, como [84] que propôs o *Bio-inspired Self-organizing Network* (BISON) para otimizar o posicionamento do nó em ambiente desconhecido e com obstáculos, sem restrição de conectividade. A rede é considerada do tipo AD HOC. O algoritmo evolui, inserindo nós móveis, até cobrir toda a área e remover nós desconectados dado que a movimentação entre centros de voronoi gera novos buracos. Em [85] uma melhoria no algoritmo BISON foi proposta trabalhando com drones (UAV *swarm*), utiliza algoritmo genético (AG) pra reduzir o tempo do emprego e ampliar a cobertura, em que os nós são direcionados a irem para os centróides da célula de Voronoi. [86] otimiza a cobertura utilizando células de Voronoi, *K-means* e *Glowworm Swarm Optimization* movendo o menor número de nós ativos após o emprego aleatório.

Um AG também é utilizado em [87] para definir a posição dos nós sendo a inicialização da população dada pelo VD após o emprego aleatório.

Em [88] é apresentado um modelo de gerenciamento hexagonal em substituição aos comuns modelos radiais, com o objetivo de ampliar a cobertura, minimizando a sobreposição de nós. A área de interesse é dividida em hexágonos que melhoram a cobertura devido as conexões entre eles e apresentam dimensões relacionadas ao raio de comunicação. Cada célula deve conter pelo menos um nó sensor, caracterizando uma cobertura simples. O algoritmo requer o posicionamento e percepção de vizinhos. Dentro de cada célula, um líder é selecionado e todos os nós internos se tornam escravos. Esse líder é responsável por espalhar os nós escravos, os enviando para células vazias. Quando um nó escravo chega a uma célula vazia ele se torna líder.

Robôs são utilizados para alterar a topologia de rede em [89] alocando os nós sensores estáticos em posições desejadas com objetivo de aumentar a conectividade e cobertura. Emprega uma abordagem geométrica que divide o ambiente em células e visa minimizar os buracos apresentados. Os nós apresentam GPS e um planejador de caminho baseado em programação evolutiva, usado para definir o caminho entre início e fim da navegação. O algoritmo A* coordena a movimentação considerando obstáculos no ambiente. O nó móvel leva nós estáticos redundantes de uma posição para outra, expandindo a cobertura, mas não é investigada a recuperação de nós, o objetivo se restringe a cobrir regiões que representam buracos e diminuir redundâncias de nós. Todavia, não se discute a comunicação e navegação fora da área de cobertura da rede.

Em [90] também são abordados obstáculos na AI que criam buracos na cobertura devido a má distribuição dos nós na vizinhança gerando agrupamentos, logo, nós móveis são adicionados para visitar os agrupamentos e coletar os dados. Os agrupamentos são criados com círculos aglomerados. A abordagem propõe um algoritmo para encontrar um caminho para o nó móvel realizar a coleta e entregar os dados ao nó *sink*. O algoritmo é avaliado por meio de dois cenários, um com o uso de um único nó móvel e outro com múltiplos. Múltiplos nós móveis trocam mensagens entre eles diminuindo o tráfego e navegação enquanto que o único nó móvel, visita cada agrupamento. A triangulação de Delaunay é usada para gerar os pontos de interesse para a movimentação. Os pontos de quinas dos obstáculos são tomados como referências e os centros das células definem os pontos para navegação proporcionando o desvio dos obstáculos. Esta abordagem se restringe ao conhecimento do mapa/ambiente e disposição dos obstáculos no ambiente.

Em [91] é abordada a reconexão em redes por eventuais falhas ou percas de nós durante a operação da rede, que podem gerar falhas significativas na rede com a interrupção do fluxo de dados ao *sink*. Como solução são utilizados nós roteadores móveis. Foi aplicada otimização para definir o posicionamento e indicar o número de nós móveis roteadores necessários. Três estratégias de otimização bioinspiradas foram avaliadas no problema, por enxame de mariposas, algoritmo de busca interior e o algoritmo de morcego. Por se

tratar de uma rede híbrida, é necessário para a otimização saber o posicionamento de todos os nós estáticos lançados aleatoriamente, o que nem sempre é possível. Com o objetivo de sanar buracos com a mínima movimentação, em [92] foi proposto um algoritmo distribuído com a função de encontrar o posicionamento de nós roteadores adicionais. Cada buraco é solucionado de maneira independente, no qual um dos nós da fronteira do buraco é responsável por rodar o algoritmo híbrido de cura. Uma lista de configurações dos agentes móveis é definida utilizando o diagrama de Voronoi e uma programação linear é adotada para minimizar as possibilidades. Esse processo é repetido até que todos os vértices de Voronoi estejam cobertos. Os resultados mostraram que o algoritmo consegue lidar com diferentes formas e tamanhos de buracos na rede e reduz o número de sensores adicionais se comparado a outros algoritmos, como baseado em Perímetro, triangulação de Delaunay, Voronoi puro e Árvores. A proposta apresenta melhor resultado com relação a taxa de cobertura e número de nós requeridos se comparada a esses métodos. Porém, esse estudo não aborda a conectividade da rede.

As soluções dadas ao problema de buracos estão associadas ao tipo de rede, se estática, móvel ou híbrida [92]. Em redes estáticas, muitas soluções requerem um processo de detecção de buracos e são aplicados algoritmos de emprego incremental, em que são adicionados os nós um a um até atingir a cobertura desejada. Em redes móveis, muitas soluções utilizam algoritmos de autoalocação e/ou autorrealocação para preencher buracos sem ou com a necessidade de descobri-los. Os nós móveis podem mover-se e auto-organizar-se em posições desejadas ampliando a cobertura gradualmente. Em redes híbridas, são utilizadas informações dos nós estáticos para definir o número e locais para posicionamento dos nós móveis com base em alguma heurística.

Em [93] foi abordada a cobertura com regiões de prioridade declaradas através de uma função que representa a área de interesse. Um diagrama de Voronoi multiplicativo ponderado é aplicado para encontrar os buracos na rede. Cada sensor detecta a região de buraco na sua região do diagrama de Voronoi. Três algoritmos são propostos para descrever a mobilidade dos nós, *Maximum Weighted Vertex* (MWV), no qual cada nó se move através dos vértices do diagrama, *Maximum Weighted Point* (MWP), no qual os sensores movem-se para o ponto de maior peso da função de AI, e *Maximum Distance Weight* (MDW), que considera o caso em que a função de prioridade é constante. Os algoritmos anteriores não resolvem o problema, pois não há máximos. Nesse sentido, foi criada a métrica de distância máxima entre nós. A ideia dos algoritmos é mover os nós iterativamente para que os pesos sejam incrementados, até que não haja mais incremento significativo. Os nós se movem de forma distribuída, mas consideram o conhecimento da função de prioridade. Assim se reduz a troca de mensagens entre agentes. É assumido que a rede possui sensores com capacidades de sensoriamento distintas.

Em [94] foi abordada a minimização de movimento para atingir cobertura e conectividade em uma cobertura discreta (ou pontual) oriunda do emprego aleatório. A

cobertura e conectividade são tratadas como problemas individuais, tendo suas soluções compostas ao final. Um método de otimização combinacional (Método Húngaro) é aplicado para a cobertura e para a conectividade duas heurísticas são avaliadas, um algoritmo básico, que minimiza o número de nós a se mover e um algoritmo denominado *TV-Greedy* que minimiza o movimento considerando agrupamento e envio de acordo com a proximidade ao destino em um Diagrama de Voronoi. Todo planejamento é centralizado e utiliza as informações dos destinos evitando o replanejamento do diagrama. A rede é composta apenas por nós móveis. O estudo considera cobertura-1 (ou seja, aborda uma cobertura simples em que um nó deve cobrir determinado ponto) e desconsidera o número de saltos, fatores que afetam o gasto energético, além da mobilidade.

Em [72] a abordagem de campo potencial foi aplicada para autoalocação de uma MANET com o objetivo de maximizar a cobertura com a restrição de cada nó se manter conectado a outros k -nós. Essa restrição, por um lado, proporciona maior segurança e por outro gera redundância, custo e dificuldade no roteamento. Minimizando esses efeitos negativos, foi aplicado em [95] no controle de movimentação de nós móveis com a aplicação de otimização para correlacionar a navegação e evitar congestionamentos no roteamento.

Outra forma clássica de alocação de nós móveis é através de forças virtuais fundamentadas nas características de projeto, em que os nós móveis são considerados partículas que podem gerar forças atrativas ou repulsivas entre eles, bem como em relação a obstáculos e fronteiras de comunicação. A força virtual com objetivo de diminuir buracos é aplicada em [96] que propõe o *Vampire Bat and Improved Virtual Force Algorithm* (VB-IVFA). A abordagem divide o ambiente em grade e o algoritmo *Vampire Bat* otimiza o posicionamento dos nós, adicionalmente, uma força virtual complementa o arranjo como ruído. O trabalho considera nós sensores com raios de cobertura diferentes. [97] propôs uma abordagem baseada em otimização com a incorporação de forças virtuais e diagrama de voronoi conjuntamente. As forças virtuais atuantes são todas repulsivas entre nós, gasto energético devido a movimentação e de fronteira e obstáculos. Um algoritmo para ambientes 3D foi proposto por [98], denominado *Improved Virtual Force Coverage* (3D-IVFC), no qual considera um random deployment. A força virtual resultante sobre o nó envolve forças entre nós, atrativa e repulsiva e uma força de repulsão para fronteira com uma margem de segurança. Em [99] foi proposta uma abordagem chamada *Virtual Force-directed Ant Lion Optimization Algorithm* (VF-IALO). O método define aleatoriamente o deslocamento do nó, e é utilizada a força para gerar incerteza. A força virtual é composta pela força repulsiva entre vizinhos, atrativa para o ponto central de uma grade e repulsão de fronteira. Por fim, [100] apresentou o *Virtual Force-directed Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Dempster-Shafer Evidence Theory* (VF-PSO-DS), uma otimização para o emprego de nós, baseada em enxame de partículas e força virtual sintonizada por um modelo de probabilidade do sensor baseado no evidência D-S (*Dempster-Shafer*). Neste caso, a força é responsável apenas por afastar os nós uns dos

outros.

Este tipo de algoritmo considera dois tipos de componentes principais, forças atrativas e forças repulsivas, exercidas sobre os nós sensores móveis. Os principais componentes encontrados na literatura levam em consideração a repulsão entre nós sensores (F_{ij}), de obstáculos (F_{io}) e da fronteira (F_{if}), para evitar desconexão com a rede, e de atração para a área de interesse menos povoada ou com buracos (F_{ir}) [46, 73]. Esses componentes unidos permite realizar, cura de buracos (regiões não cobertas na AI), busca e integração de nós com desvio de obstáculo e evitando a perda de comunicação. A força resultante pode ser expressa por

$$\vec{F} = \sum_{i=j=1 \dots N, r=1 \dots N_r, i \neq j}^k \vec{F}_{ij} + \vec{F}_{if} + \vec{F}_{io} + \vec{F}_{ir}, \quad (3.1)$$

em que $i = j = 1, 2, \dots, N$, são os identificadores dos nós e N o número de nós da rede, f o conjunto de pontos que representam o perímetro de conectividade da rede (ou seja, pontos da fronteira) e $\vec{F}_{if}$ a força referente a menor distância entre a fronteira e o nó i , $\vec{F}_{io}$ a força para o obstáculo mais próximo e $r = 1, 2, \dots, N_r$ representa o número de buracos na região de interesse.

Esta abordagem por natureza possibilita o surgimento de mínimos locais, prejudicando o melhor posicionamento dos nós móveis e, adicionalmente, a navegação do nó é negligenciada, ou seja, são utilizadas equações que indicam o novo posicionamento do nó baseada no conhecimento da posição atual e na intensidade resultante da força sobre o mesmo.

A seguir são apresentadas as descrições dos componentes da força resultante adotada para o sistema:

- Força de atração e repulsão entre nós [46]

$$\vec{F}_{i,j} = \begin{cases} k_r \frac{1}{d_{i,j}}, & 0 < d_{i,j} < d_{th} \\ 0, & d_{i,j} = d_{th} \\ k_a(d_{i,j} - d_{th}), & d_{th} < d_{i,j} < R_c \end{cases}, \quad (3.2)$$

em que k_a e k_r são constantes de ponderação da força atrativa e repulsiva, respectivamente, $d_{i,j}$ é a distância Euclidiana entre o nó móvel i e os demais, d_{th} é o alcance de metade do raio de comunicação ($R_c/2$) e indica o limiar de atuação entre a força repulsiva (distância entre nós menores que d_{th}) e atrativas (distância entre nós maiores que d_{th}), sendo R_c é o raio de comunicação e limite máximo da força de atração.

- Força repulsiva para obstáculo [73]

$$\vec{F}_{io} = \begin{cases} k_o(d_{min} - d_{seg}) & d_{min} \leq d_{seg} \\ 0 & d_{min} > d_{seg} \end{cases}, \quad (3.3)$$

em que $k_o > 0$ é uma constante de ponderação da força, d_{min} é a distância mínima medida para algum obstáculo e d_{seg} é a distância de segurança para algum obstáculo, ou seja, trata-se de uma constante de sintonia que limita o alcance de atuação da força.

- Força de repulsão da fronteira de conectividade [46]

$$\vec{F}_{if} = \begin{cases} k_f(d_{minf} - d_{sf}), & d_{minf} \leq d_{sf} \\ 0, & d_{minf} > d_{sf} \end{cases}, \quad (3.4)$$

em que $k_f > 0$ é o coeficiente de repulsão, d_{minf} é a menor distância entre o nó e a fronteira e d_{sf} é o limite ótimo para a fronteira, isso engloba segurança contra a atenuação de sinal e limite máximo de atuação da força.

- Força de atração para buracos na área de interesse [73]

$$\vec{F}_{ir} = \begin{cases} k_{ai}B_{ai}, & B_{ai} > 0 \\ 0, & \text{outros casos} \end{cases}, \quad (3.5)$$

em que k_{ai} é uma constante de sintonia e B_{ai} é o tamanho do buraco (indica prioridade e importância).

Como apresentado, o desafio fundamental após o processo de distribuição aleatória de nós é a cobertura e conectividade da rede, que é um dos fatores de qualidade de serviço, e como pôde ser observado nas citações anteriores, algumas soluções apresentadas mantêm os nós móveis executando tarefas de expansão da cobertura e estruturação da rede sem perda de conectividade em nenhum momento. Outra característica relevante é que alguns algoritmos sempre consideram o conhecimento da localização dos nós, sejam estáticos ou móveis, independente do processo de localização utilizado. As aplicações que envolvem otimização permitem definir, em alguns casos, o número de nós móveis com função de roteador necessário para a rede, em especial, para sanar o número de falhas tipo buracos encontradas. É notória a aplicação de sistemas centralizados nesta atividade de suporte à rede com abordagens, em sua maioria, dadas pela otimização dos destinos dos nós móveis, sem levar em consideração aspectos da navegação dos agentes, bem como, algumas estratégias não lidam com obstáculos no ambiente.

A seguir é apresentado, na Tabela 3.1, um resumo bibliográfico dos tipos de mobilidade apresentados, classificando o objetivo da rede, contribuição, tipo de rede, quantidade de dispositivos móveis, tipo de mobilidade, estratégia de controle e esquema de controle.

O tipo de rede é classificado como estruturada ou desestruturada. Quanto ao dispositivo móvel e quantidade, pode ser definido como apenas o nó *sink*, os nós sensores terminais, todos os nós, só os nós roteadores móveis, ou um nó específico. O tipo de mobilidade pode ser classificada como aleatória, planejada ou adaptativa. A estratégia de

controle do agente móvel pode ser diversas, inclusive não apresentar controle, dado que alguns trabalhos trazem apenas as configurações dos nós na AI a cada iteração fornecida pelo processo de otimização. Por fim, o esquema de controle pode ser definido como centralizado, distribuído ou descentralizado.

Tabela 3.1: Resumo bibliográfico.

Referência	Objetivo da movimentação	Tipo de rede	Dispositivo móvel	Tipo de mobilidade	Estratégia de controle	Esquema de controle
Mobilidade dos nós sensores						
[53]	cobertura	desestruturada	todos	aleatória	consenso	descentralizado
Mobilidade da estação base						
[17]	otimização energética	desestruturada	múltiplos nós sinks	sem controlador	programação linear	centralizado
[64]	otimização energética	desestruturada	nós roteadores	planejada	otimização	centralizada e descentralizada
[63]	otimização energética	desestruturada	nó sink	planejada	programação linear	centralizada e descentralizada
[101]	descoberta de rota e manutenção	estruturada	nó sink	aleatória	<i>random waypoint</i>	distribuído
[67]	otimização energética	desestruturada	nó sink	aleatória	<i>random waypoint</i>	centralizado
Mobilidade do fenômeno a ser monitorado						
[57]	navegação industrial	estruturada	robô específico	adaptativa	campo potencial	centralizado
Mobilidade de dispositivo de suporte						
[51]	recarga e coleta	estruturada e desestruturada	algum nó	programada	velocidade constante	distribuído
[30]	patrulhamento de borda	-	robô específico	adaptativa	modo deslizante	centralizado
[65]	coleta	desestruturada	nó <i>sink</i>	programada	controle humano	centralizado
[66]	coleta	desestruturada	nó <i>sink</i>	planejada	aleatório	distribuído
[72]	cobertura	desestruturada	todos	programada	campo potencial	centralizado

Tabela 3.2: Resumo bibliográfico (Continuação).

Referência	Objetivo da movimentação	Tipo de rede	Dispositivo móvel	Tipo de mobilidade	Estratégia de controle	Esquema de controle
Mobilidade de dispositivo de suporte - Continuação						
[58]	cobertura	desestruturada	todos	adaptativa	otimização	distribuído
[59]	cobertura	desestruturada	todos	adaptativa	rede neural	distribuído
[83]	cobertura e conectividade	desestruturada	todos	adaptativa	velocidade constante	distribuído
[88]	autoalocação para cobertura	desestruturada	todos	-	-	centralizado
[91]	conectividade	desestruturada e híbrida	roteadores	-	-	centralizado
[94]	cobertura e conectividade	desestruturada	todos	programada	-	centralizado
[92]	cobertura	desestruturada e híbrida	roteadores	adaptativa/iterativa	-	centralizado
[93]	cobertura	desestruturada	todos	adaptativa/iterativa	-	distribuído
[16]	coleta	híbrida	um ou mais	adaptativa	aprendizado por reforço	descentralizado
[38]	cobertura, tempo de vida e consumo energético	desestruturada	todos	adaptativa	otimização	centralizado
[102]	localização	híbrida	âncora	programada	-	distribuído
[103]	barreira	desestruturada	todos	programada	-	centralizado
[77]	autoalocação	híbrida	alguns nós	programada	A*	centralizado
[90]	coleta	híbrida	nós específicos	programada	-	centralizado

Capítulo 4

Abordagem Proposta

A aplicação de RSSF em ambiente inóspito resulta no emprego de nós sensores sobre esta área de interesse sem nenhum controle preciso, devido a influência de intempéries ambientais, como vento, correntes marítimas, desníveis topológicos, vegetação, dentre outras. Esse processo gera uma distribuição irregular sobre o terreno, apresentando regiões densamente povoadas e outras escassas. A adição de nós com novos lançamentos melhora a cobertura e a conectividade, porém, sem garantia que esses dois parâmetros sejam atendidos de forma satisfatória, além de gerar maiores redundâncias, latência no encaminhamento de dados até o nó *sink* e gasto energético com roteamentos desnecessários.

Duas situações elementares no processo de cobertura pontual (na qual um nó monitora determinada área) são mostradas na Figura 4.1, elas dizem respeito a comunicação entre nós. É apresentado na Figura 4.1(a) a existência do enlace de comunicação, uma vez que os nós sensores estão dentro do raio de comunicação R_c um do outro. Já na Figura 4.1(b), os nós estão incomunicáveis por não respeitarem esta restrição. Neste último caso, a inserção de um nó roteador entre os nós apresentados, mais precisamente na região destacada em cinza, os conectaria.

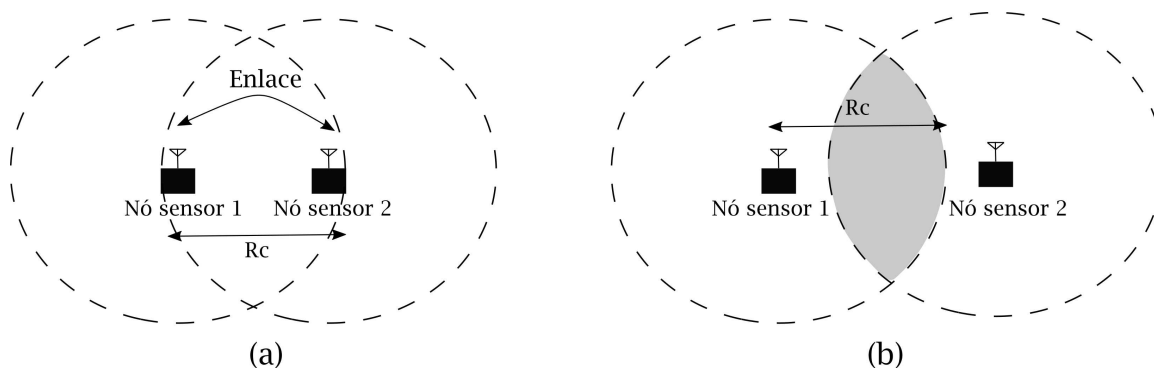


Figura 4.1: (a) Nós com enlace e (b) Nós sem enlace.

Na Figura 4.2 é apresentado o levantamento topológico de uma distribuição aleatória de nós em uma AI com objetivo de representar todas as incertezas envolvidas no processo

de distribuição. Na Figura 4.2(a) é apresentada uma distribuição aleatória de 20 nós sensores estáticos, enquanto na Figura 4.2(b) tem-se 100 nós. Através da Figura 4.2(a) é observado que uma menor densidade de nós gera nós isolados e pequenas sub-redes às margens da rede macro, que podem ser integradas com apenas um roteador alocado próximo à região de fronteira. A alocação deve ser realizada na área de interseção com esses nós e subagrupamentos. Na Figura 4.2(b) é apresentada uma distribuição com conectividade superior ao caso anterior, com a presença de redundâncias na rede, em que dois nós podem fornecer a mesma informação. Através das ilustrações é possível concluir que com o aumento da densidade de nós na AI aumenta a integração sem atender a critérios de desempenho da rede como roteamento, gasto energético e cobertura.

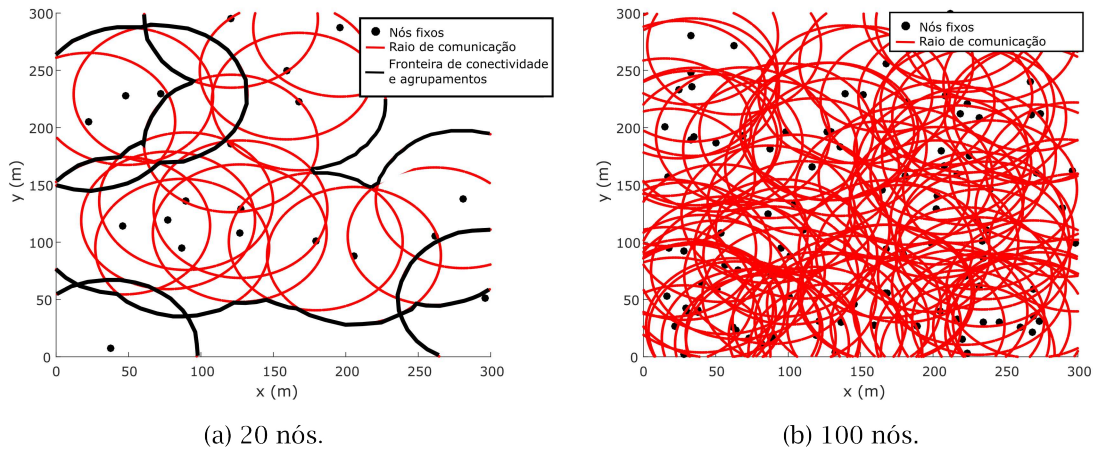


Figura 4.2: Disposição aleatória de nós sensores para composição de RSSF, (a) com 20 nós e (b) com 100 nós em uma mesma área.

4.1 Modelo proposto para o emprego de nós

Diante dos modos de emprego encontrados na literatura e limitações causadas pela generalização quanto as influências de intempéries ambientais, é proposto um novo modelo para o emprego de nós em ambiente inóspito. O modelo leva em consideração a massa do nó sensor, gravidade, força de arrasto do ar, intensidade do vento e velocidade inicial do nó quando lançado. Sendo os nós representados por lançamentos independentes, a força de arrasto causada que impacta no nó é expressa por

$$F_a = -\frac{1}{2}v_v^2\rho AC_a, \quad (4.1)$$

em que v_v (m/s) é a velocidade do vento, ρ (kg/m^3) é a densidade do ar, A (m^2) é a área do nó sensor exposta à força e C_a é o coeficiente de arrasto.

Como o vento pode contribuir no lançamento de forma favorável ou não (momentaneamente), ele foi aplicado de modo a gerar uma velocidade diferencial (entre a

velocidade do nó e do vento), em (4.1). A força do vento é considerada apenas nas direções $\mathbf{x}$ e $\mathbf{y}$, na direção $\mathbf{z}$ apenas a força de arrasto atua como uma restrição ao movimento. Portanto, o modelo que descreve o lançamento do nó é dado por

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \alpha_1 \frac{\rho AC_a}{2m} (v_{vx} - v_x)^2, & \alpha_1 = \begin{cases} 1, & \text{se } v_{vx} \geq v_x \\ -1, & \text{se } v_{vx} < v_x \end{cases} \\ \frac{dv_y}{dt} = \alpha_2 \frac{\rho AC_a}{2m} (v_{vy} - v_y)^2, & \alpha_2 = \begin{cases} 1, & \text{se } v_{vy} \geq v_y \\ -1, & \text{se } v_{vy} < v_y \end{cases} \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{\rho AC_a}{2m} (v_z)^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

em que $\vec{v} = v_x \vec{x} + v_y \vec{y} + v_z \vec{z}$ é o vetor de velocidade do nó, $\vec{v}_v = v_{vx} \vec{x} + v_{vy} \vec{y} + v_{vz} \vec{z}$ é o vetor de velocidade do vento, ambas em função das componentes $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ e $\mathbf{z}$, por fim, α_1 e α_2 indicam a mudança de sentido causada quando a velocidade do vento supera a velocidade do corpo/nó nas direções x e y , respectivamente. A força de arrasto causada durante o deslocamento é uma função da diferença entre a velocidade do vento e a do objeto. Por outro lado, o deslocamento vertical é influenciado somente pela gravidade e arrasto.

Serão apresentados experimentos no Capítulo 6, sendo explorada a variação de altura de lançamento e alteração na variância de velocidade do vento. Este modelo considera uma alocação planejada (determinística em forma de matriz) em que o veículo aéreo paira sobre o ponto em que se deseja alocar o nó, todavia, o vento pode modificar a cada lançamento. Portanto, é adotada uma distribuição normal de média nula para a velocidade do vento a cada lançamento de nó, emulando as incertezas que podem ocorrer com esse tipo de lançamento durante a queda dos nós e permitindo alterações no comportamento do vento.

4.2 Solução proposta para o problema de integração de nós

São propostas como soluções metodologias que utilizam nós sensores móveis ou nós roteadores móveis para ampliar a cobertura e a conectividade, com o intuito de eliminar nós e sub-redes isoladas. Geralmente são utilizadas duas abordagens, uma com permissão de desconexão pelos nós móveis e outra em que a conexão não pode ser perdida em nenhum momento. Quando permitida a desconexão, considera-se que o agente móvel em algum momento conseguirá se reconectar à rede de forma independente, ou seja, sem uma garantia comprovada matematicamente.

Tendo em vista essa limitação, esta tese propõe utilizar nós móveis que não necessariamente operam como nós sensores, podendo operar como nós roteadores em meio aos nós estáticos, constituindo uma rede híbrida com a finalidade de ampliar a área de conectividade após o processo de distribuição de nós. A abordagem envolverá a

permissão temporária da desconexão do nó explorador e através do supervisorio proposto será possível analisar e avaliar se tal condição será atendida com o retorno do nó móvel.

O processo de expansão é dado inicialmente pelo levantamento da topologia da rede e de um mapa de conectividade aproximado por um modelo de antena isotrópica. O mapa de conectividade é representado por uma grade de ocupação de modo que o nó móvel só perderá a comunicação ao ultrapassar o alcance nominal de comunicação dado por R_c . O caminho de fronteira atribuído a navegação do robô é dado por uma distância de segurança d_{ns} , um pouco menor que R_c , que cria uma fronteira de segurança e evita perdas recorrentes ao navegar pela fronteira de conectividade.

A dinâmica do algoritmo de busca e integração é dada inicialmente pela verificação do critério de parada, se a quantidade de nós sensores estáticos na rede é equivalentemente ao número de nós utilizados no lançamento e a mobilidade de algum agente móvel não seja possível, ou seja, caso não haja algum nó que não esteja em operação como roteador para algum agrupamento. Caso estas condições sejam atendidas, o algoritmo é encerrado, caso contrário, o procedimento se dá pela seleção aleatória de um ponto de fronteira e o agente móvel mais próximo (que não esteja operando como roteador) recebe este ponto como destino para a tarefa de navegação sobre a fronteira de segurança. A definição do ponto de destino de forma aleatória induz o processo de busca por qualquer direção da rede, não apenas em horizontes dentro da AI. Isso permite integrar nós e agrupamento que se encontram na vizinhança da AI.

Durante a navegação pela fronteira, o nó móvel pode encontrar pelo caminho um obstáculo que o fará acionar o controlador de desvio de obstáculos. Neste momento, o nó móvel pode contorná-lo por dentro da rede, mantendo a comunicação ou, por fora da rede sem comunicação.

O processo de reconexão do nó móvel é regido por uma permissão dada ao nó de navegar sem conexão durante um tempo máximo que é função da velocidade máxima do agente u_{max} e do alcance nominal de comunicação R_c , expresso por $t = R_c/u_{max}$. Decorrido esse tempo, o nó explorador (nó móvel) deve interromper sua busca e retornar ao último ponto de contato com a rede, onde permanecerá fixo, atuando como roteador. A restrição de parada de movimento nesta região permite a ampliação da cobertura no local de perda de comunicação, possibilitando maior oportunidade de contornar obstáculos ou encontrar novos agrupamentos de nós sensores. Caso o nó retorne à rede (cruzando a fronteira) antes de atingir o tempo limite, esse temporizador é zerado e o controlador de seguir caminho é acionado.

O controle e gerenciamento de toda essa rotina é dado por um sistema supervisorio baseado em sistemas híbridos e descrito por um sistema a eventos discretos. Para geração do supervisorio, um autômato isomorfo é responsável por descrever as competências do nó móvel. Autômatos isomorfos referem-se aos autômatos com características iguais, exceto pela nomeação dos eventos que, individualmente, apresentam uma identificação para o

nó. Um segundo autômato tem o objetivo de restringir a interação entre robôs, fazendo com que o supervisor bloqueie ações indesejadas e impossíveis de ocorrerem em ambiente real. Um supervisor não bloqueante é resultante da composição paralela de x autômatos isomorfos que representam a planta e a especificação.

Na coordenação das habilidades atribuídas ao nó móvel, o autômato utiliza-se de eventos para ativar transições entre estados ou comportamentos contínuos representados por controladores de navegação. Os eventos podem ser controlados ou não e alguns deles dependem diretamente das variáveis de estados dos robôs.

Para ilustrar os aspectos de conectividade e cobertura de interesse no trabalho, são apresentadas a seguir as premissas adotadas e uma definição formal de uma rede híbrida voltada para a busca e integração de nós. Na constituição da rede híbrida, os nós móveis são integrados à rede após a distribuição dos nós estáticos de modo a realizarem a busca e se tornarem roteadores para os novos agrupamentos encontrados.

4.3 Premissas da rede

As premissas levadas em consideração sobre a RSSF e a área de interesse 2D são:

- i - Sendo a AI definida como ambiente inóspito. Os nós são distribuídos com um planejamento de posição definido, dado pelo modelo de distribuição de nós proposto na área de interesse (AI) sob a influência de vento e velocidade inicial de lançamento, gerando uma incerteza no posicionamento dos nós;
- ii - A área de interesse é quadrada de lado L ;
- iii - Os nós estáticos e móveis são homogêneos com relação ao alcance de comunicação e de sensoriamento;
- iv - O modelo de nó sensor adotado é um disco booleano¹ de raio R_s ;
- v - O modelo de comunicação, de raio R_c , é representado por uma antena isotrópica booleana², sendo $R_c > R_s$;
- vi - O alcance de comunicação de cada nó sensor é muito menor que a área de interesse, AI ;
- vii - A comunicação entre dois nós ocorre quando a distância Euclidiana entre eles é menor ou igual ao raio de comunicação (R_c);

¹Caracteriza uma área circular de raio limitado R_s que define o alcance de leitura do nó sensor.

²Caracteriza uma área circular de raio limitado R_c que define o alcance de comunicação do nó sensor.

- viii - Cada nó sensor conhece sua própria posição ou pose, caso seja nó móvel. Pose se refere a um vetor de 3 elementos contendo a posição do robô (x, y) e orientação (φ) no sistema de coordenada global do ambiente;
- ix - Cada nó sensor possui um ID único;
- x - O gerenciamento da RSSF é centralizado e alocado fora da rede;
- xi - Os nós sensores não são danificados com o lançamento;
- xii - A comunicação entre nós e *sink* pode ser com enlace direto ou por multissaltos;
- xiii - A cobertura da rede é do tipo pontual, na qual pontos específicos sobre a área de interesse são amostrados por meio dos nós sensores;
- xiv - O planejamento e transmissão de instruções para o agente móvel são realizadas com acesso a informações necessárias da rede (como, a posição dos nós sensores); e,
- xv - Devido a necessidade de um suporte dinâmico e robusto à mudanças na topologia da rede no processo de integração, o protocolo *AD HOC On-demand Distance Vector Routing Protocol* (AODV) foi adotado nas simulações [104]. O AODV opera na camada de rede do modelo OSI e usa o protocolo *Medium Access Control* (MAC) IEEE 802.11.

4.4 Definição da rede híbrida

A descrição seguinte objetiva formalizar as definições de conectividade e cobertura para a rede híbrida com base em definições de conjuntos.

Seja S_E e S_M o conjunto de nós sensores estáticos e móveis, respectivamente, com o número de elementos dado por n e m , respectivamente. Qualquer dois sensores S_i e S_j podem se comunicar um com o outro se a distância entre eles $d_{ij} = \|P(S_i) - P(S_j)\|_2$ é menor ou igual ao raio de comunicação R_C , em que $P(\cdot)$ retorna o vetor posição com coordenadas x e y do nó sensor.

Seja S_T o conjunto de nós na rede, incluindo todos os nós estáticos e móveis, em que $S_T = S_E \cup S_M$. Seja S_{Mr} o subconjunto de nós móveis atuando como roteador fixo conectado a rede e a subredes ou que retornou após a perda de comunicação com estouro do tempo de busca, em que $S_{Mr} \subseteq S_M$, com o número de elementos dado por m' . Seja S_{Ea} o subconjunto de nós estáticos ativos (ou seja, em comunicação) na rede em dado momento, em que $S_{Ea} \subseteq S_E$, com número de elementos dado por n' . Então, os nós que contribuem para a cobertura são dados pelo conjunto $S_{rede} = S_{Ea} \cup S_{Mr}$, em que $S_{rede} \subseteq S_T$.

Esse trabalho considera que a conectividade e cobertura são dadas por círculos de raio R_C e R_S , respectivamente, ao redor da posição de cada nó sensor. A conectividade é definida por $C_{con}(S_{rede})$ que corresponde ao número total de elementos de S_{rede} , $n' + m'$.

Seja $C_i = \{p \in \mathbb{R}^2 \mid \|p - p_i\| \leq R_C\}$, em que $p_i = P(S_i)$ é o vetor com as coordenadas de posição do i -ésimo sensor pertencente a S_{rede} . C_i representa a área de cobertura do sensor i . Seja $C_{rede} = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{m'+n'}$ a área de cobertura dada por todos os sensores ativos. A área de interesse é definida como $AI(L) = \{r \in \mathbb{R}^2 : \|r\|_\infty \leq L/2\}$, para todo $L \in \mathbb{R}_+$, em que L é o lado do quadrado que forma a AI. Portanto, a área de cobertura de interesse é dada por $C_{cob} = AI \cap C_{rede}$.

A seguir são apresentados mais detalhes sobre a metodologia proposta acerca do sistema supervisorio, planta dos nós móveis (ou autômato isomorfo) e alguns casos de mobilidade que surgem no processo de busca e exploração.

4.5 Sistema supervisorio

O sistema híbrido supervisor proposto, caracterizado como um sistema centralizado, utiliza a conectividade dos nós estáticos da rede para coleta das informações das variáveis de estados dos nós móveis imersos na rede e envio de comandos, possibilitando seu controle no processo de expansão.

O autômato que descreve o comportamento requerido pelos nós móveis na execução da tarefa de exploração de fronteira requer alguns comportamentos específicos para a navegação, como ficar parado com comunicação, seguir caminho (fronteira), desviar de obstáculos e atuar como roteador fixo. Estes são comportamentos elementares para o problema em questão. Neste sentido, as transições entre comportamentos dependem dos estados do robô, necessários para tomada de decisão da tarefa e da informação de conectividade do agente móvel com a rede.

A composição de autômatos isomorfos gera um autômato com todas as combinações possíveis de estados. Naturalmente, surgem condições de operação indesejáveis ou impossíveis, que o autômato de especificação restringe de ocorrer.

O supervisor resultante da composição entre os autômatos do robô (planta) e o autômato de especificação tem a função de observar os eventos ocorridos e habilitar e desabilitar a ocorrência de eventos em cada estado, solucionando os conflitos que possam ocorrer e condições não realizáveis. O conjunto de eventos habilitados num dado instante pelo supervisor define as ações de controle dos robôs dentro da rede.

4.5.1 Planta

A planta ou autômato do nó móvel é responsável por descrever seus papéis de operação de maneira global. Os papéis que o nó móvel pode assumir são explorador, roteador e inativo.

- Inativo - esta condição ocorre quando o nó móvel é colocado na área de interesse e ainda não recebeu mensagem para integrar a rede;

- Roteador - este papel é realizado quando o nó móvel encontra um novo nó, ou agrupamentos, ou retornou após perder a comunicação por um período de tempo superior ao permitido;
- Explorador - este modo de operação permite ampliar a área de conectividade; dois controladores base são utilizados durante a navegação, o controlador de seguir caminho e o de desvio de obstáculos.

A seguir são apresentados dois casos de mobilidade que podem ser identificados durante o processo de busca e exploração.

4.6 Casos de mobilidade

Os casos de mobilidade que podem ser observados pelo sistema se resumem a presença ou não de obstáculos no ambiente. Em seguida são descritos os tratamentos dado pela abordagem proposta para essas condições.

4.6.1 Caso 1: Busca e exploração sem obstáculo

Na Figura 4.3 é apresentado o primeiro caso para o processo de ampliação da rede. A dinâmica de expansão da cobertura e conectividade se inicia com a seleção de um alvo na fronteira de segurança dada pelo limiar d_{ns} da fronteira de conectividade da rede estimada por um modelo de comunicação dado por uma antena isotrópica booleana. Posteriormente, é verificado o nó móvel mais próximo contido na rede, que não esteja operando como roteador, e é acionado seu controlador de seguir o caminho para navegar sobre a fronteira.

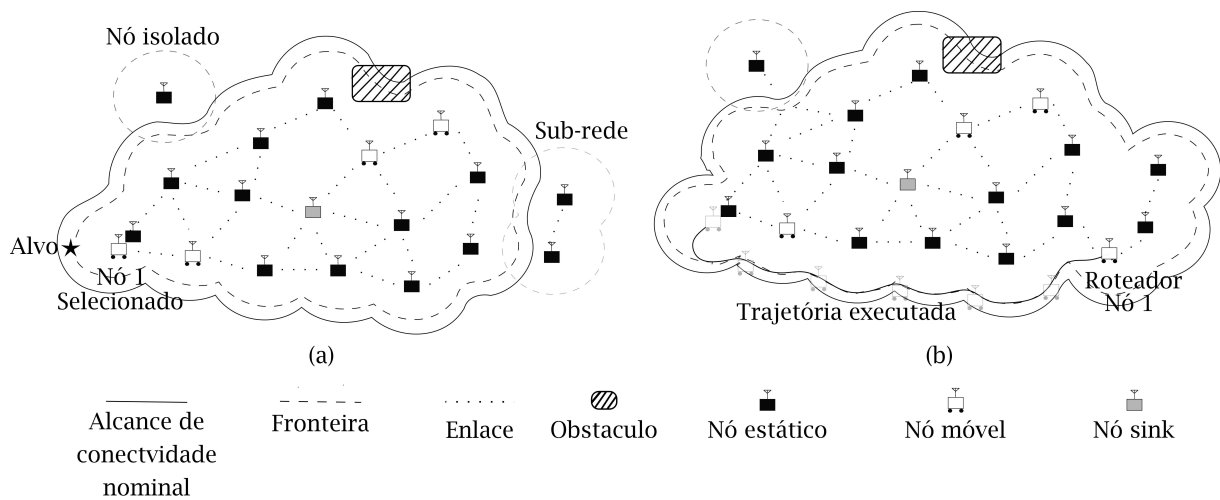


Figura 4.3: Busca e exploração sem obstáculos em (a) alvo e nó selecionados e (b) trajetória executada, integração de nós e nova fronteira de conectividade atualizada.

Na Figura 4.3(a) é apresentado um alvo gerado no alcance de um nó fixo qualquer, portanto, o deslocamento do nó 1 até o alvo selecionado não gera desconexão. A Figura 4.3(b) representa o resultado da navegação do nó 1, aproximação da fronteira em direção ao alvo sorteado e seguindo a fronteira até encontrar a sub-rede (com 2 nós sensores), tornando-se roteador. Nela também é possível verificar a nova área coberta gerada e a conectividade com os novos nós. Concluída esta etapa, são verificados se há nós desaparecidos (neste caso há 1) e se há possibilidade de mobilidade de outro agente móvel (neste caso há mais 3 nós móveis a serem utilizados). Sendo atendidas ambas as condições, um segundo alvo na fronteira pode ser gerado e selecionado o nó mais próximo, como apresentado no Caso 2 a seguir.

4.6.2 Caso 2: Busca e exploração com obstáculos

A Figura 4.4(a) apresenta o caso em que o nó móvel 2 é selecionado e necessita contornar o obstáculo. Na Figura 4.4(b) é observado que o mesmo ativa o controle de desvio de obstáculo tangencial conduzindo o nó móvel a contornar o obstáculo por dentro da rede. O próprio robô decide a direção com base no sensoramento, buscando um caminho na direção oposta a menor distância para o obstáculo. Para explorar a contribuição da proposta do trabalho é avaliada a perda de comunicação com a rede.

Na Figura 4.4(c) é observado que o nó móvel ativa o controle de desvio de obstáculo tangencial conduzindo para saída da área de cobertura da rede. Durante a desconexão com a rede, é permitido o robô navegar por um tempo t proporcional ao raio de comunicação (ressaltando, $t = R_c/u_{\max}$). Ao retornar à rede sem decorrer o tempo máximo, o tempo é zerado e o nó continua a busca pela fronteira até encontrar o nó estático isolado (que poderia ser também um subagrupamento) e torna-se um roteador para ele. A cobertura e conectividade são atualizadas na Figura 4.4(d).

A Figura 4.4(e) representa o estágio em que é decorrido o tempo t na navegação do nó 2, momento em que o agente interrompe sua movimentação de exploração e retorna para o seu último ponto de contato com a rede, refazendo o caminho feito enquanto estava sem comunicação. Dado que, considerando as habilidades físicas e dinâmicas requeridas do nó móvel para navegar num ambiente inóspito, sempre será possível retornar pelo caminho executado, independente do tempo necessário para o retorno. Ao reconstituir o enlace com a rede, o robô passa a atuar como roteador. A Figura 4.4(f) apresenta a nova área coberta pelo nó 2. Posteriormente, é realizada a checagem dos critérios de parada, se todos os nós desaparecidos foram recuperados ou se todos os nós móveis estão operando como roteadores.

O Fluxograma apresentado na Figura 4.5 representa os requerimentos e a dinâmica apresentada nestes casos de mobilidade. Nele é apresentada a dinâmica do processo de busca e integração. Com base nos nós ativos na rede (S_{sa}), é verificado se o conjunto

$S_{sa} < n$, o que indica que há nós estáticos sem comunicação, portanto, se o conjunto de nós ativos não contemplar todos nós lançados e houver nós móveis fora do conjunto de roteadores S_{MA} , a fronteira de conectividade é gerada com base em S_{sa} , um alvo é definido aleatoriamente sobre essa fronteira e o nó móvel mais próximo ao alvo, apto a navegar é selecionado para realizar o processo de busca e navegação pela fronteira. O procedimento é realizado até que os conjuntos de nós ativos atinja o número de nós ligados ou todos os nós móveis estejam operando como roteador para algum nó ou agrupamento encontrado.

Para a navegação, duas variáveis são importantes e estão associadas a perda de comunicação, o temporizador do tempo sem comunicação e o tempo limite sem comunicação T que restringe o afastamento do nó e induz ao retorno à rede.

Ao definir o nó móvel a navegar, o controlador de seguir caminho é acionado, até que seja identificado um obstáculo na fronteira, ou durante a aproximação da mesma, que leva ao acionamento do controlador de desvio de obstáculos. Se identificada a perda de comunicação com a rede o temporizador é iniciado e armazenado o último ponto de contato. Caso o tempo sem comunicação ultrapasse o limite definido (T), a fronteira atual recebe a trajetória executada pelo nó com o alvo sendo definido como o último ponto de contato, retomando o controle de seguir caminho. Também são verificados se o nó percorreu todo o perímetro da fronteira e se é encontrado um novo agrupamento que indicam o momento de parada deste nó. Estas duas informações, torna o robô roteador e atualiza os conjuntos S_{sa} e S_{Mr} . De posse dessa atualização, é atualizada a fronteira e são verificados os critérios de parada, caso não tenham sido atingidos, é selecionado um novo alvo e nó para dar continuidade ao processo de busca. Caso o critério de parada seja atingido.

Durante a navegação, parâmetros como a identificação do nó móvel, alvo, fronteira e pose do nó móvel que está a navegar devem ser observáveis. Na inicialização da navegação é projetada uma reta da posição do nó ao alvo inicial sorteado e armazenados os parâmetros para uso no desvio de obstáculo. Este alvo é alterado a medida que o robô vai navegando sobre os pontos da fronteira mantendo o alvo sempre a uma distância fixa com orientação dada pelo ponto seguinte.

Ao identificar um obstáculo, o mesmo é classificado como de fronteira ou interno, e as condições de saída do controlador de desvio para seguir caminho é dado pelo cruzamento da fronteira ou da linha que leva até o alvo na fronteira. O controlador de seguir caminho é ativado na ausência de obstáculos, e quando o nó está desviando de obstáculo e cruza a reta projetada (para o contorno dos obstáculos internos) ou quando encontra a fronteira (para obstáculos na fronteira).

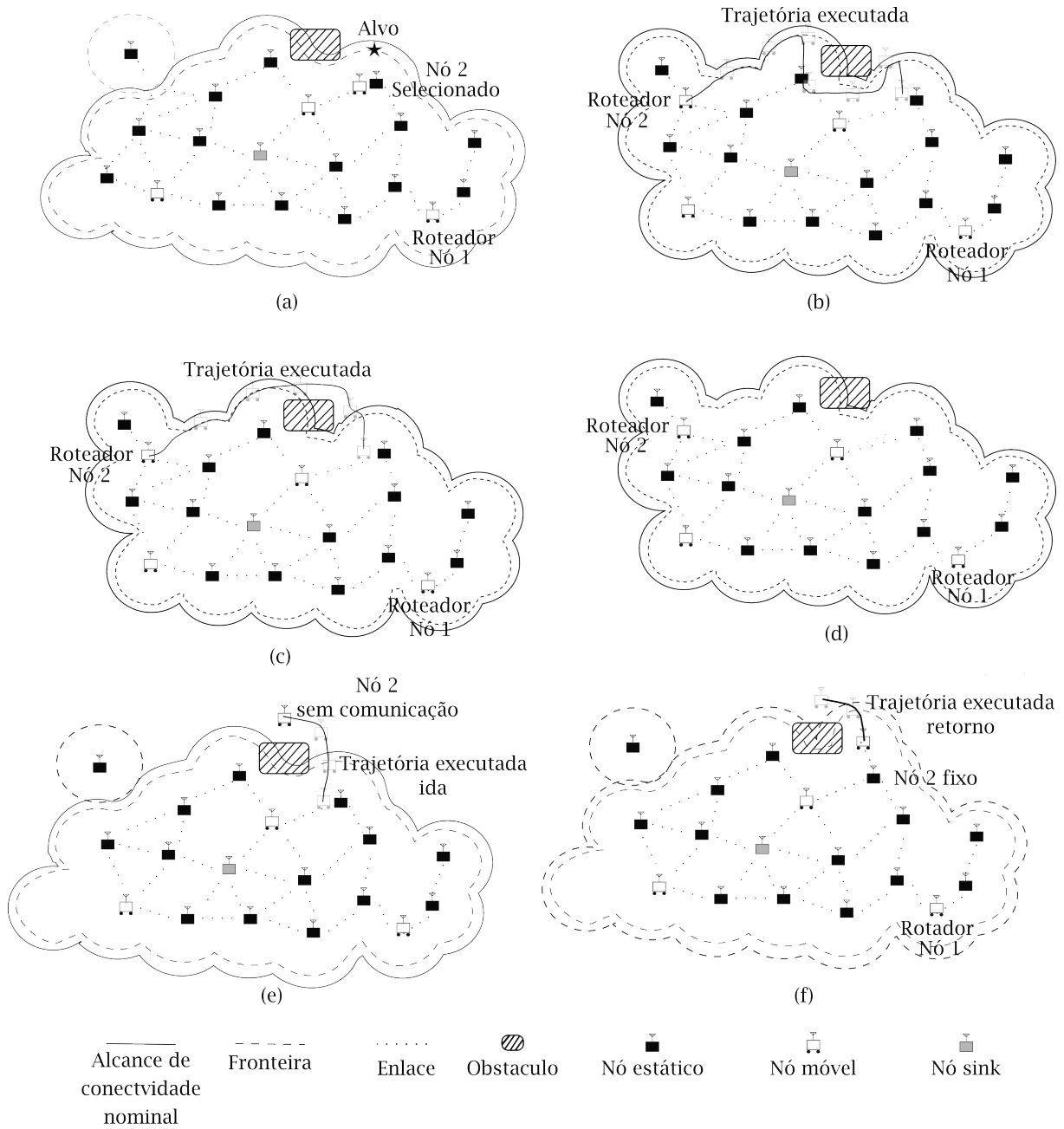


Figura 4.4: Busca e exploração com obstáculos, (a) seleção do alvo e robô, (b) trajetória de desvio de obstáculo por dentro da rede, (c) trajetória executada com desvio de obstáculo por fora da rede, (d) integração e atualização da fronteira, (e) trajetória com estouro do tempo e (f) trajetória de retorno à rede e atualização de fronteira.

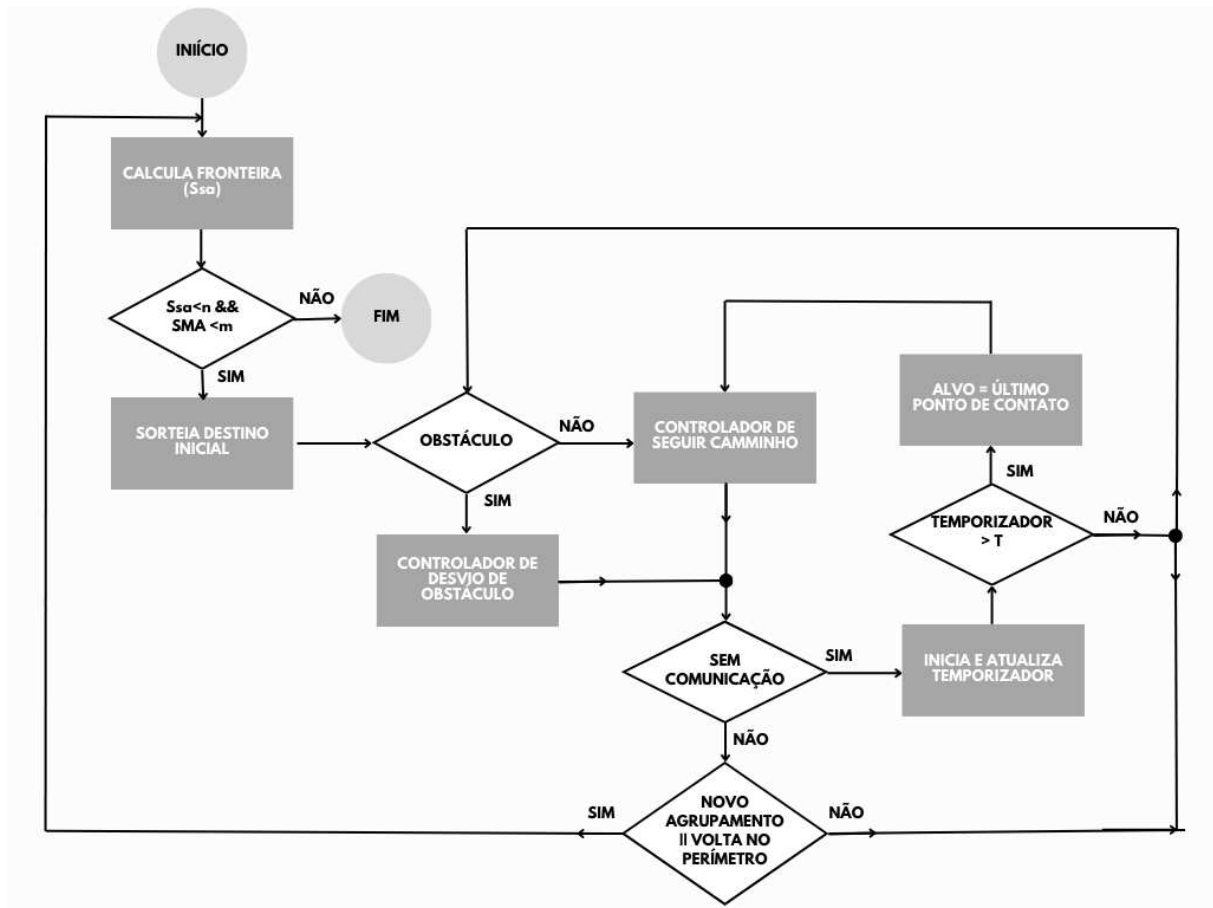


Figura 4.5: Fluxograma do algoritmo de busca e exploração.

No Capítulo 5 será apresentado o autômato responsável por executar os comportamentos descritos, os controladores exigidos para seguir fronteira e desviar de obstáculos, bem como o procedimento de síntese do supervisor.

Capítulo 5

Controladores de Navegação e Controlador Supervisório

Neste capítulo serão apresentados os controladores que dão suporte à navegação do nó móvel, bem como o autômato da planta (ou seja, do agente móvel), o autômato de restrição e o processo de síntese do supervisório para a abordagem proposta de exploração da fronteira.

A consideração de um ambiente inóspito, por natureza, requer que o robô possua habilidades específicas para navegar. Nesta tese foi desconsiderado os efeitos dinâmicos sobre a navegação do robô, em virtude das possibilidades de se realizar experimentos práticos em laboratório, sendo considerada dinâmica apenas na distribuição dos nós estáticos através do modelo de lançamento proposto, das ações de controle e chaveamento entre os controladores. Com isso, é possível destacar como contribuição o desenvolvimento de um sistema de navegação para nós móveis aplicados a RSSFs. Portanto, o sistema proposto atua no controle de alto nível do nó móvel realizando o tratamento apenas da coordenação de movimento. De modo que, a metodologia proposta poderia ser utilizada por veículos não tripulados executando o mesmo procedimento, assim, evitando as características oriundas da navegação em superfície, como a composição e inclinação do terreno, derrapagens de rodas, erros de odometria, erros no sensoriamento de obstáculos, dentre outras.

5.1 Modelo do nó móvel

Este trabalho considera o nó móvel como um robô de tração diferencial conforme apresentado na Figura 5.1. Para melhor entendimento das variáveis envolvidas no sistema, considere o robô posicionado a uma distância diferente de zero do sistema de coordenadas de destino $\langle g \rangle$. O movimento do robô na direção de $\langle g \rangle$ é impulsionado pela ação combinada tanto da velocidade angular ω quanto da velocidade linear u , a qual está

sempre na direção de um dos eixos do sistema de coordenadas $\langle a \rangle$ que está acoplado ao robô.

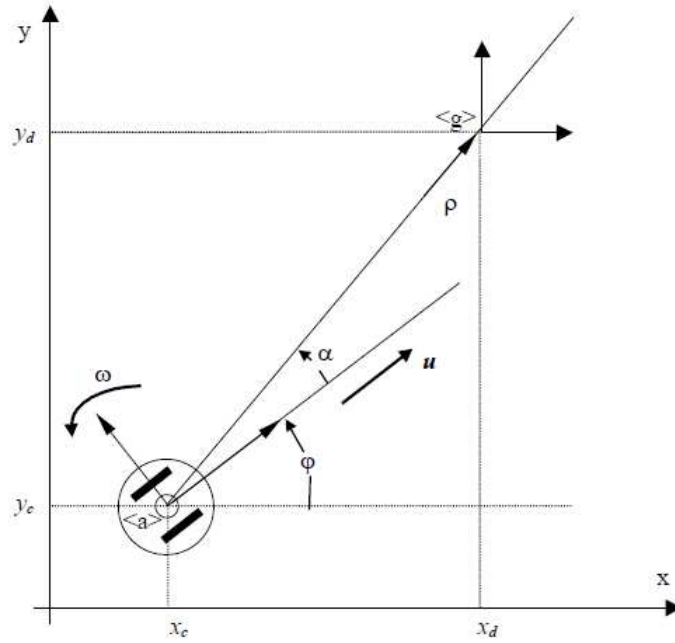


Figura 5.1: Pose do nó móvel (robô), sistemas de coordenadas global e local, bem como as variáveis de interesse [5].

O modelo considera nós sensores pontuais que fornecem medidas de 360° , com resolução de um grau e limitados a um alcance de 1 m .

O conjunto usual de equações cinemáticas, as quais envolvem a posição em coordenadas cartesianas (x, y) do robô e seu ângulo de orientação φ , consistem em

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\varphi) \\ \dot{y} = u \sin(\varphi) \\ \dot{\varphi} = \omega \end{cases} \quad (5.1)$$

em que x , y e φ unidas compõem a pose do robô $[x, y, \varphi]$. As ações de controle u e ω representam, as velocidades linear e angular, respectivamente.

Neste projeto foram aplicados dois controladores de baixo nível que são chaveados para coordenação do nó móvel ao longo da fronteira de segurança. Um controlador de seguir caminho que coordena a navegação sobre a fronteira e um controlador de desvio de obstáculo tangencial [6]. Ambos serão analisados em detalhes, incluindo uma discussão quanto a estabilidade individual.

5.2 Controlador de seguir caminho

O controlador de seguir caminho é responsável pela aproximação e condução do robô sobre o caminho definido como fronteira de conectividade e será provada sua estabilidade. Este controlador, inicialmente, apresenta uma posição de destino inicial fixa (d_{ref}) da fronteira e ao se atingir ela, o destino é mantido a esta distância do nó móvel indefinidamente, vide Figura 5.2.

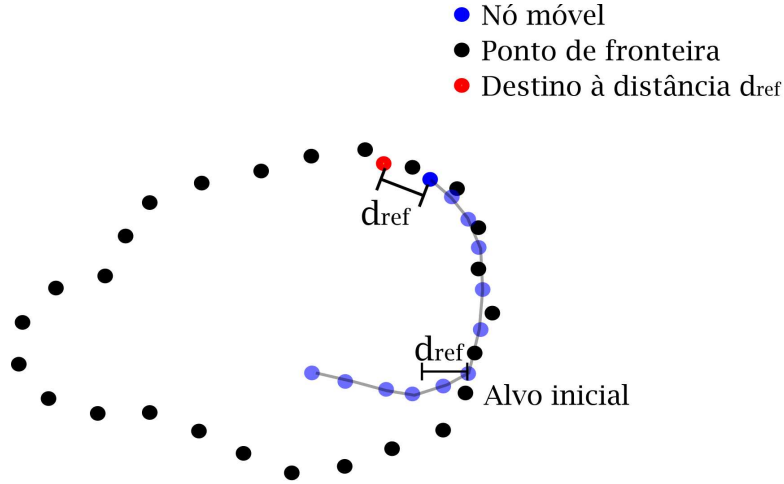


Figura 5.2: Descrição do controlador de seguir caminho.

Seja o robô posicionado a uma distância diferente de zero do sistema de coordenadas de destino $\langle g \rangle$, conforme a Figura 5.1. Seu movimento em direção a $\langle g \rangle$ é governado pela ação combinada da velocidade angular ω e do vetor velocidade linear u .

Assume-se que as variáveis de estado do sistema (vide Figura 5.1), são: ρ , que é a distância entre o robô e o destino e α é o erro de orientação entre o robô e o ponto de destino atual. Logo, o sistema de equações que descreve o movimento do robô em termos destas duas variáveis de estado é dado por

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -u \cos(\alpha) \\ \dot{\alpha} = \omega \end{cases} \quad (5.2)$$

O erro de posição é dado por

$$\begin{cases} \tilde{x} = x_d - x - d_{ref} \cos(\alpha) \\ \tilde{y} = y_d - y - d_{ref} \sin(\alpha) \end{cases} \quad (5.3)$$

e deve tender a zero com o tempo, em que x_d e y_d são as coordenadas do ponto de destino, x e y definem a posição atual do nó móvel, d_{ref} é a distância fixa à frente do nó e α é o erro de orientação entre o robô e o destino atual.

Ainda na Figura 5.1, podem ser visualizadas as variáveis de estado do controlador, que são o erro de posição ρ e orientação do robô em relação ao alvo α . O erro de orientação

é dado, ao iniciar o seguimento da fronteira, pelo ponto seguinte mais próximo do robô. Estas variáveis são definidas como

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2} \\ \alpha = tg^{-1}\left(\frac{\tilde{y}}{\tilde{x}}\right) \end{cases} \quad (5.4)$$

Os sinais de controle são descritos por

$$u = k_a \cos(\alpha), \quad (5.5)$$

$$\omega = -k_b \alpha, \quad (5.6)$$

e as equações de malha fechada correspondentes são:

$$\dot{\rho} = -k_a \cos^2(\alpha), \quad (5.7)$$

$$\dot{\alpha} = -k_b \alpha, \quad (5.8)$$

em que k_a é uma constante de sintonia para a velocidade linear, associada a velocidade máxima do agente móvel, e k_b é uma constante de proporcionalidade para a velocidade angular. Este controlador deve, então, conduzir a um sistema assintoticamente estável.

A função candidata de Lyapunov associada a este controlador é

$$V_1 = \frac{\rho^2 + \alpha^2}{2}, \quad (5.9)$$

em que ρ é a distância entre o robô e o ponto de destino e α é o erro de orientação do robô para o destino (vide Figura 5.1).

Para verificar que o sistema é assintoticamente estável é necessário avaliar os critérios de Lyapunov para a função candidata (5.9). O primeiro deles é se a função candidata apresenta derivadas parciais definidas e contínuas. A seguir é apresentada a sua derivada, a qual atende a esta condição,

$$\dot{V}_1 = \rho \dot{\rho} + \alpha \dot{\alpha}. \quad (5.10)$$

Pode-se notar também que a função candidata (5.9) é zero quando as variáveis de distância e erro angular para o destino são zero. Por fim, substituindo as equações de malha fechada (5.7) e (5.8) em (5.10), é possível verificar que $\dot{V} < 0$,

$$\dot{V}_1 = -\rho k_a \cos^2(\alpha) - k_b \alpha^2 < 0, \quad \forall k_a > 0 \text{ e } k_b > 0. \quad (5.11)$$

Logo, é verificado que o controlador é assintoticamente estável.

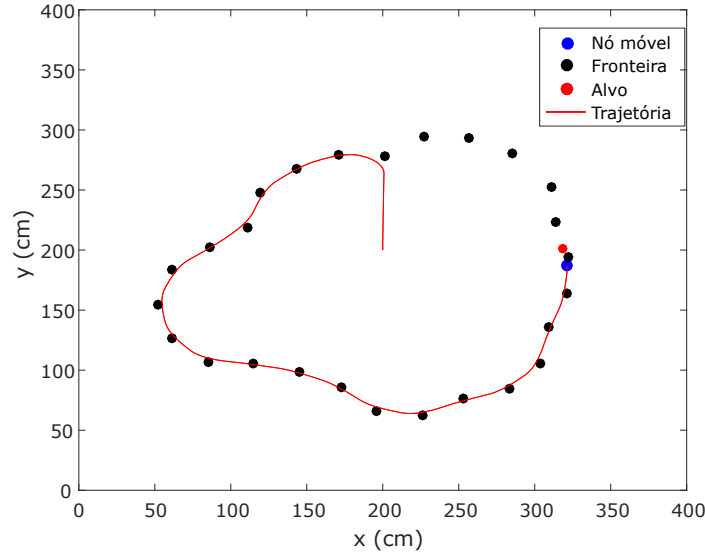
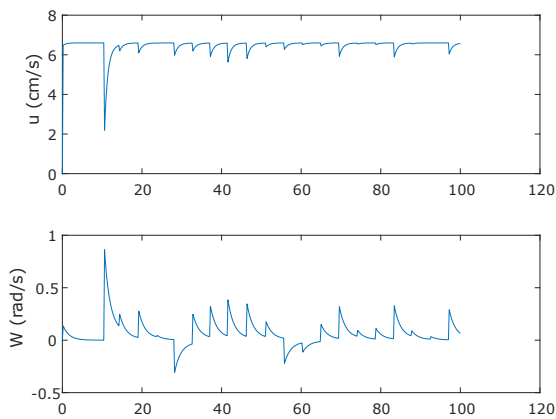
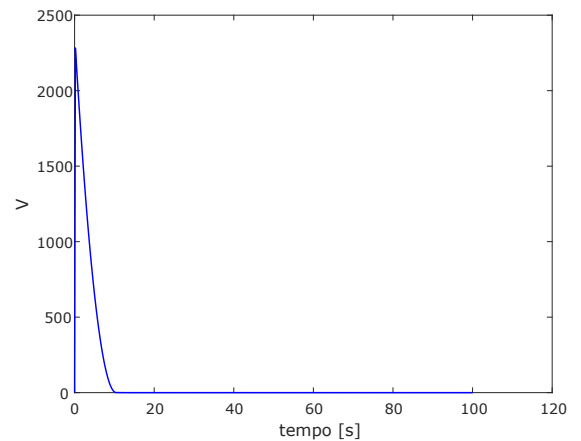


Figura 5.3: Trajetória executada pelo controlador de seguir caminho.

A seguir é avaliado o comportamento do controlador proposto. Na Figura 5.3 é apresentado o comportamento do controlador de seguir caminho, apresentando uma trajetória condizente com o desejado no seguimento da fronteira. Enquanto as Figura 5.4(a) e Figura 5.4(b) apresentam, respectivamente, as ações de controle, velocidades linear e angular, bem como o comportamento da função de Lyapunov adotada. Através dela é possível observar a velocidade linear constante do controlador, as variações da componente angular diante da alteração do destino durante o percurso sobre a fronteira e também é possível observar o decaimento da função de Lyapunov na aproximação da fronteira e manutenção em zero ao percorrer o perímetro, uma vez que o erro angular tem amplitude baixa, e se torna menos expressivo no gráfico.



(a)



(b)

Figura 5.4: (a) Velocidades linear e angular do controlador de seguir caminho e (b) Função de energia do mesmo.

5.3 Controlador de desvio de obstáculo tangencial

O objetivo deste controlador é evitar obstáculos mediante a execução de trajetórias paralelas a estes. Foi adotado no projeto o controlador apresentado em [6]. Uma vez que há um obstáculo no caminho durante a navegação, o controlador de desvio tangencial é acionado. Duas situações podem ocorrer, a primeira quando o nó móvel está se aproximando da fronteira e encontra um obstáculo em seu caminho, isso faz com que seja projetada uma linha até o alvo e ao contornar o obstáculo e cruzar essa linha (similar a proposta do algoritmo Bug2, também aplicado em [105]), segue para o destino, com o controlador de seguir caminho ativado. O segundo caso ocorre quando o nó já navega sobre a fronteira e encontra um obstáculo, nessa condição o desvio de obstáculo é realizado até contorná-lo e retornar à fronteira, dando continuidade a navegação com retorno ao controlador de seguir caminho. Nesta situação há a possibilidade de o robô optar por contornar o obstáculo por fora da rede, sendo iniciado o contador de tempo sem comunicação. Quando o tempo t máximo sem comunicação é decorrido, o controle de seguir caminho assume a coordenação do nó móvel conduzindo de volta para a rede pela trajetória executada enquanto estava sem comunicação.

Este controlador também apresenta dois estados, o ângulo formado entre a orientação do robô e o obstáculo e a distância do robô para o obstáculo. A estimação do ângulo com o obstáculo usa apenas dois sensores momentaneamente, um perpendicular à orientação do robô d_0 e outro a 10° na direção frontal do robô. Este ângulo pode ser obtido por

$$\theta_{obs}^{10} = \text{atan} \left(\frac{-\Delta y}{-\Delta x} \right) = \text{atan} \left(\frac{y_{10} - y_0}{x_{10} - x_0} \right), \quad (5.12)$$

em que y_0 e y_{10} são as coordenadas y das leituras sensoriais de 0° e 10° , respectivamente, e x_0 e x_{10} são as coordenadas x para os mesmos ângulos.

A distância para o obstáculo d_{obs} é dada portanto

$$d_{obs} = d_0 \cos(\tilde{\theta}), \quad (5.13)$$

em que $\tilde{\theta}$ é a diferença entre a orientação do robô em coordenada global e o ângulo estimado do obstáculo θ_{obs}^{10} , e d_0 é a distância perpendicular ao robô. Se o obstáculo estiver do lado esquerdo do robô o sensor acionado deve ser o d_{180} ao invés do d_0 .

A referência para o controlador é a distância de segurança desejada para o obstáculo d_{des} . As equações do erro (com base na Figura 5.5) são definidos da seguinte maneira

$$\tilde{d} = d_{des} - d_{obs}, \quad (5.14)$$

$$\tilde{\theta} = \theta_{obs}^{10} - \theta, \quad (5.15)$$

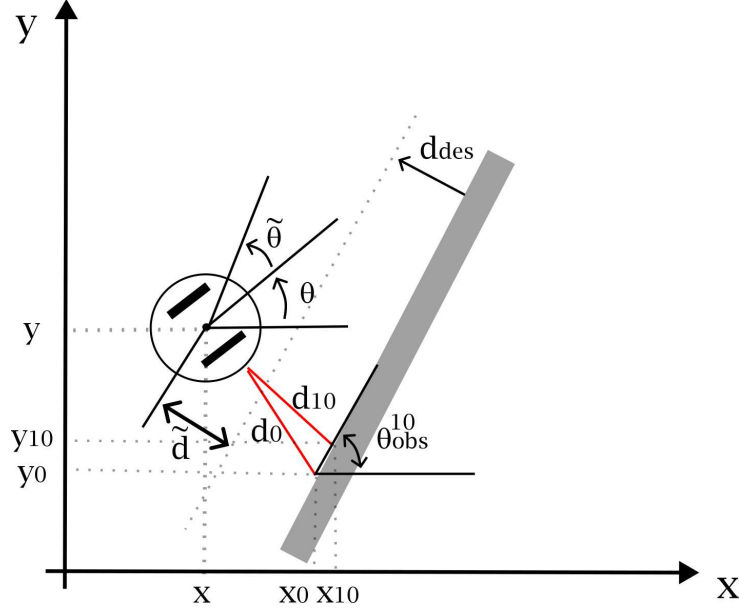


Figura 5.5: Controlador de desvio tangencial de obstáculos, ilustração adaptada de [6].

em que $\tilde{d}$ é erro de posição para referência da parede, $\tilde{\theta}$ é o erro de orientação para a mesma referência, d_{des} é a distância desejada para a parede, d_{obs} a distância para o obstáculo, θ_{obs}^{10} a estimativa do ângulo de orientação global da parede e θ a orientação do robô.

Na Equação (5.14) é apresentado o erro entre a distância atual do obstáculo e a distância desejada, enquanto em (5.15) representa o erro de orientação entre o ângulo estimado da parede e a orientação do robô no sistema de coordenada global.

As ações de controle em função do tempo são dadas por

$$\dot{\tilde{d}} = -u \sin(\tilde{\theta}), \quad (5.16)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta}_{obs} - \omega, \quad (5.17)$$

em que $\dot{\tilde{\theta}}$ é a variação temporal do erro de orientação para o obstáculo, ou seja, a velocidade angular ω e u a velocidade linear.

Levando em consideração a análise do sistema de controle, classificado como globalmente positivo definido e ilimitado radialmente, a sua função candidata de Lyapunov proposta é

$$V_2 = \frac{1}{2} \tilde{\theta}^2 + \int_0^{\tilde{d}} k_{\tilde{d}}(\xi) \xi d\xi, \quad (5.18)$$

em que $k_{\tilde{d}}(\tilde{d})$ é definido como

$$k_{\tilde{d}} = \frac{k_1}{1 + |\tilde{d}|} \geq 0, \quad (5.19)$$

em que $\tilde{d}$ é o erro de posição para a distância de referência da parede.

A derivada da função candidata de Lyapunov é

$$\dot{V}_2 = \tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} + k_{\tilde{d}}\dot{\tilde{d}}. \quad (5.20)$$

Logo, as ações de controle propostas são

$$u = k_{u1} \geq 0, \quad (5.21)$$

$$\omega = \dot{\theta}_{obs} + K_{\tilde{\theta}} \tanh(k_{\tilde{\theta}}\tilde{\theta}) + k_{\tilde{d}}\tilde{d}u \frac{\sin(\tilde{\theta})}{\tilde{\theta}}, \quad (5.22)$$

em que k_{u1} é a velocidade linear desejada; $K_{\tilde{\theta}} \geq 0$ é uma constante positiva definida, e $k_{\tilde{\theta}}$ é uma constante que indica o desvio da função $\tanh(\cdot)$, a qual pode ser ajustada com $K_{\tilde{\theta}}$ para limitar a ação de controle neste valor de saturação. Substituindo (5.16) e (5.17) em (5.20) a derivada da função candidata de Lyapunov se torna

$$\dot{V}_2 = -K_{\tilde{\theta}}\tilde{\theta}\tanh(k_{\tilde{\theta}}\tilde{\theta}). \quad (5.23)$$

A Equação (5.23) comprova que o sistema de controle é estável segundo Lyapunov, mas não assintoticamente estável. Para provar a estabilidade assintótica a natureza autônoma do sistema em malha fechada é considerada. As equações em malha fechada podem ser obtidas pela substituição de (5.21) e (5.22) em (5.16) e (5.17), respectivamente, como

$$\dot{\tilde{d}} = -k_{u1}\sin(\tilde{\theta}), \quad (5.24)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = -K_{\tilde{\theta}}\tilde{\theta}\tanh(k_{\tilde{\theta}}\tilde{\theta}) - k_{\tilde{d}}\tilde{d}k_{u1} \frac{\sin(\tilde{\theta})}{\tilde{\theta}}, \quad (5.25)$$

em que k_{u1} , $K_{\tilde{\theta}}$, $k_{\tilde{\theta}}$, $k_{\tilde{d}}$ são parâmetros constantes de sintonia.

Através da aplicação do teorema de LaSalle, com base em [6], foi concluído que a origem do espaço de estados é globalmente uniformemente assintoticamente estável.

Este controlador é indicado para paredes contínuas, logo requer ajustes para identificação de perdas de parede que são identificadas com variações abruptas nas leituras dificultando o cálculo do ângulo com a parede, e identificação de parede à sua frente, formando quinas de 90°. Neste sentido, dois controladores (ou subsistemas) adicionais são inclusos nessa abordagem [6], criando um sistema chaveado na definição do comportamento mais genérico para desvio de obstáculos.

5.3.1 Controlador de seguir contorno (perda do obstáculo)

Este controlador tem o objetivo de seguir o contorno do obstáculo que já vinha sendo seguido. O controlador segue a teoria de sistemas chaveados e o evento que leva ao acionamento deste controlador monitora a variação abrupta do sensoramento lateral, que prejudica a estimação de $\tilde{\theta}$ e $\tilde{d}$, simultaneamente.

A solução proposta descreve uma trajetória circular de raio $R = \tilde{d}_{perda}$ no sentido da parede que vinha sendo seguida até encontrar o obstáculo novamente. Neste subsistema apenas o erro de orientação é considerado

$$\tilde{\theta} = \theta_{circular} - \theta, \quad (5.26)$$

em que $\theta_{circular}$ é uma referência para proporcionar o contorno, dado portanto por

$$\theta_{circular} = \pm \frac{u_{max}}{R} t. \quad (5.27)$$

A derivada de $\tilde{\theta}$ é expressa por

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta}_{circular} - \omega = \pm \frac{u_{max}}{R} t - \omega. \quad (5.28)$$

Com o objetivo de analisar a estabilidade deste subsistema de controle a seguinte função candidata de Lyapunov é adotada

$$V_{\tilde{\theta}} = \frac{\tilde{\theta}^2}{2}, \quad (5.29)$$

e as ações de controle propostas são

$$u = k_{u2}, \quad (5.30)$$

$$\omega = \pm \frac{k_{u2}}{R} + K_{\tilde{\theta}} \tanh(k_{\tilde{\theta}} \tilde{\theta}), \quad K_{\tilde{\theta}} > 0, \quad k_{\tilde{\theta}} > 0, \quad (5.31)$$

em que k_{u2} é a velocidade linear desejada.

Sendo o sistema de controle assintoticamente estável e dependente apenas da ação de controle angular.

5.3.2 Controlador de desvio de quinas (obstáculo frontal)

O controlador é acionado quando uma zona de segurança frontal é ultrapassada, que indica risco de colisão. Os sensores mais a frente do robô d_{frente} são responsáveis por indicar o risco e o evento para esse subssistema é ativado quando $d_{impacto} < d_{frente}$, sendo $d_{impacto}$ a menor distância para o obstáculo dita segura para o robô e d_{frente} é a distância da medida atual. $d_{impacto}$ recebe o mesmo valor de referência lateral para o obstáculo (d_{des}).

O objetivo deste comportamento é girar o robô até não ter nada em sua frente (que caracteriza uma área segura), permitindo o chaveamento para o controlador principal de seguir parede tangencialmente. Analogamente ao controlador anterior, é assumido $\dot{\tilde{d}} = 0$.

É requisitado que o robô gire determinado ângulo $\theta_d = \pm 90^\circ$, sendo sua orientação definida como

$$\tilde{\theta} = \theta_d - \theta. \quad (5.32)$$

A sua derivada em função do tempo

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\omega. \quad (5.33)$$

A estabilidade assintótica deste controlador é dada pela mesma função candidata de Lyapunov anterior para as seguintes ações de controle

$$u = 0, \quad (5.34)$$

$$\omega = K_{\tilde{\theta}} \tanh(k_{\tilde{\theta}} \tilde{\theta}), \quad K_{\tilde{\theta}} > 0. \quad (5.35)$$

A seguir é avaliado o comportamento do controlador de desvio de obstáculos. A Figura 5.6 apresenta o comportamento do controlador, o qual apresenta uma trajetória condizente, contornando o obstáculo e passando pelos três subsistemas que o compõe. Enquanto as Figura 5.7(a) e Figura 5.7(b) apresentam, respectivamente, as ações de controle, velocidades linear e angular, bem como o comportamento da função de Lyapunov adotada. É possível observar que quando a ação de evitar colisão frontal é acionada, momento em que a velocidade vai a zero, rapidamente ela retorna para o controlador de seguir parede. Dois picos podem ser observados quando o robô perde a parede e realiza movimento circular, que faz com que a função de energia, momentaneamente cresça, devido ao afastamento da distância de segurança para parede e o erro angular durante esse percurso. Neste cenário, as variações angulares apontada pelas medidas sensoriais, geram pequenos ruídos no gráfico da função de Lyapunov e na velocidade angular.

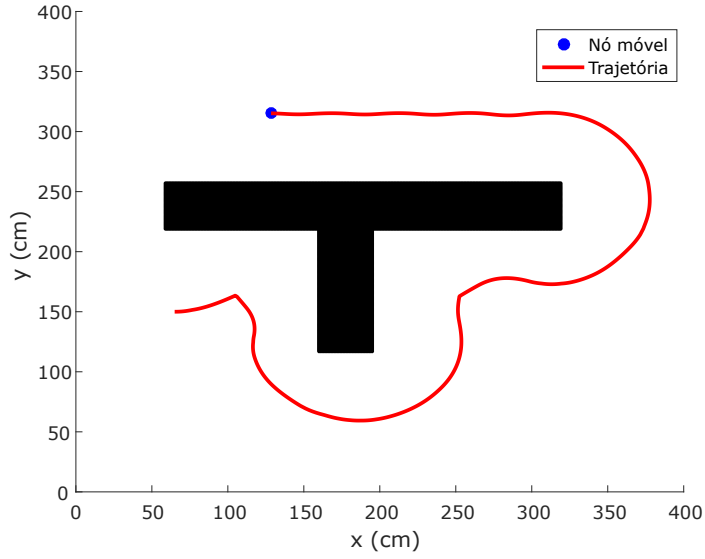


Figura 5.6: Desempenho do controlador de desvio de obstáculos com identificação da trajetória executada, nó móvel e referência de menor distância para o obstáculo.

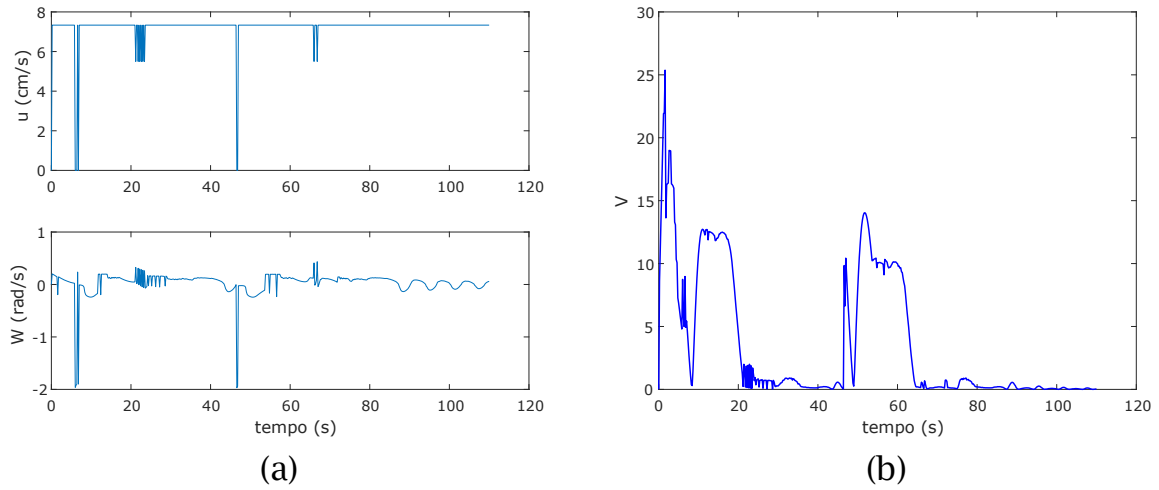


Figura 5.7: (a) Velocidades linear e angular do controlador de desvio de obstáculos e (b) Função de energia do mesmo.

5.4 Autômato para o nó móvel (planta)

A planta, descrita pelo autômato G apresentado na Figura 5.8, representa as habilidades do agente que pode ser segmentadas em inativo, explorador e roteador, como apresentado no Capítulo 4.

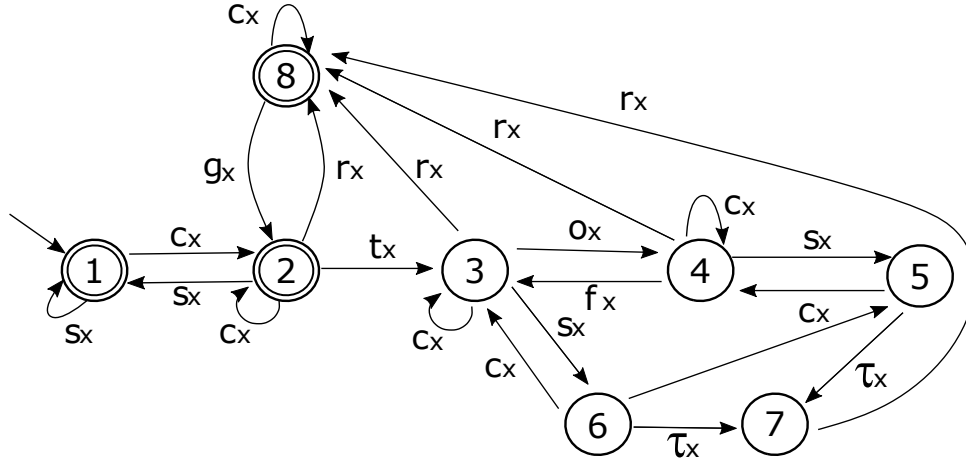


Figura 5.8: Autômato G : se refere a planta e descreve as habilidadess do nó móvel.

Na Tabela 5.1, são apresentados os estados e eventos referentes ao autômato G . Esta representação permite atingir o comportamento requerido e o subscrito ' x ' refere-se ao identificador (ID) de cada nó móvel.

Tabela 5.1: Parâmetros da planta e da especificação (autômatos G and E). As abreviações C , nC , O , e M referem-se variáveis controláveis, não controláveis, observáveis e estados marcados, respectivamente.

-	Índice	Descrição
Estados	1 (M)	Inativo - estado inicial
	2 (M)	Conectado/Inativo
	3	Navegação exploratória (com comunicação)
	4	Desviar de obstáculo (com comunicação)
	5	Desviar de obstáculo (sem comunicação)
	6	Navegação exploratória (sem comunicação)
	7	Estouro do tempo sem comunicação
	8 (M)	Roteador
Eventos	c_x	Conectado (nC/O)
	s_x	Desconectado (nC/O)
	t_x	Iniciar navegação exploratória (C/O)
	o_x	Desviar de obstáculo (nC/O)
	r_x	Roteador (nC/O)
	g_x	Deixa de ser roteador (nC/O)
	x_x	Estouro do tempo sem comunicação (nC/O)
	f_x	Cumpriu o desvio de obstáculo (nC/O)

A linguagem gerada e marcada são expressas por:

$$L(G) = \left\{ \begin{array}{l} s^*, s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g), s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g)^*tc^*(\epsilon + \dots \\ (rc^*gt)^*), s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g)^*tc^*(\epsilon + (rc^*gt)^*) \dots \\ (o(\epsilon + c^*)f)^*, s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g)^*tc^*(\epsilon + (rc^*gt)^*) \dots \\ (o(\epsilon + c^*)f)^*(sc)^*, s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g)^*tc^*(\epsilon + (rc^*gt)^*) \dots, \\ (sc)^*, s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g)^*tc^*(\epsilon + (rc^*gt)^*)((sc)^* + \dots \\ (o(\epsilon + c^*)f)^*(sc)^*)x(\epsilon + r(\epsilon + c^*)) \end{array} \right. \quad (5.36)$$

$$L_m(G) = \left\{ \begin{array}{l} s^*, s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g), s^*cc^*(r(\epsilon + c^*)g)^*(rc^* + tc^*(\epsilon + \dots \\ (rc^*gt)^*)((sc)^* + (o(\epsilon + c^*)f)^*(sc)^*)x(\epsilon + r(\epsilon + c^*))) \end{array} \right. \quad (5.37)$$

Pode ser observado em (5.37) que o prefixo fechado da linguagem marcada fornece a linguagem gerada (5.36), ou seja, $L(G) = \overline{L_m(G)}$, isso implica que o autômato é acessível, de modo que partindo de qualquer estado é possível chegar a um estado marcado sem bloqueios, o isentando de *Livelock* e *Deadlock*.

Na Figura 5.8 o agente inicia no estado 1, modo inativo, no qual o agente móvel configura-se sem comunicação com a rede, em que é considerado que não foi recebida a mensagem de inicialização. Nesse estado pode ocorrer o evento s_x de realimentação indica que permanece incomunicável, ou seja, o robô não responde a mensagem de inicialização. O evento c_x do estado 1 para o 2 indica que o nó móvel respondeu ao contato e integra a rede, passando para o estado conectado sem atividade (estado 2). O evento s_x que parte do estado 2 para o 1, indica que o robô parou de se comunicar.

No estado 2 recorrentemente o evento c_x deve ser gerado para informar que o nó continua conectado à rede, o evento t_x do estado 2 para o 3 indica que é requisitada uma tarefa de busca e o nó deve iniciar a navegação pelo destino indicado. O evento g_x do estado 8 para o 2 indica remoção do nó da operação como roteador, permitindo passar novas tarefas a ele, bem como trazer o robô de volta para uma posição inicial ou de recolhimento.

O estado 3 se refere a navegação sobre a fronteira na qual o controlador de seguir caminho se mantém ativo. O evento c_x do estado 3 para o 3 checa a manutenção da comunicação com a rede. O evento r_x do estado 3 para o 8 indica que foi encontrado novos nós tornando-se roteador. O evento o_x do estado 3 para 4 indica que um obstáculo foi detectado e o controlador é chaveado para o controlador de desvio tangencial, o evento s_x do estado 3 para 6 indica a perda de comunicação causada pela topologia da própria rede (por ser convexa) que leva o robô a iniciar o contador para estipular o tempo fora da rede. O evento c_x do estado 6 para o 3 indica o retorno do robô à rede antes do estouro do tempo, zerando o cantador. O evento f_x do estado 4 para o 3 indica que o robô ao contornar o obstáculo reencontrou a fronteira ou cruzou a linha imaginária para o alvo na

fronteira e volta a navegar sobre ela comandado pelo controlador de seguir caminho.

O estado 4, citado anteriormente, indica que o robô está desviando de obstáculo interno à rede ou por dentro da rede, mantendo a sua conexão com a mesma. O evento s_x de 4 para 5 indica que, durante o desvio, o robô perdeu a comunicação com a rede, o controlador de desvio tangencial é mantido ativo e o temporizador que indica quanto tempo está sem comunicação é acionado. O evento r_x do estado 4 para o 8 indica que o robô durante o desvio tangencial (com comunicação) encontrou novos nós e torna-se roteador. O evento c_x do estado 5 para o 4 indica que o robô, antes do estouro do tempo, retomou a cobertura da rede e o temporizador é zerado mantendo o desvio de obstáculo.

O estado 5 refere-se a navegação com desvio de obstáculo sem comunicação com a rede. O evento x_x do estado 5 para 7 indica o estouro do tempo sem comunicação.

O estado 6 indica que o robô navega com o controlador de seguir caminho sem comunicação com a rede na atividade de busca. O evento x_x do estado 6 para o 7 indica que o tempo sem comunicação estorou. Esse fato pode ocorrer devido a característica não convexa da fronteira formada, em que a ligação entre dois pontos é dada por uma reta fora da rede, neste sentido um ponto de fronteira pode conduzir o robô a realizar esse trajeto de aproximação por fora da rede. O evento c_x do estado 6 para o 3 indica que o nó reconectou-se à rede antes do estouro do tempo, dando continuidade a exploração.

O estado 7, além de indicar o estouro de tempo sem comunicação, também indica a ativação do controlador de posição final para retornar à rede pelo mesmo caminho feito enquanto estava sem comunicação. Ao retornar à rede torna-se roteador neste ponto de contato, momento em que o evento r_x é gerado conduzindo a transição do estado 7 para o 8. Por fim, no estado 8 o robô permanece parado operando como roteador.

5.5 Autômato de especificação

Na Figura 5.9 é apresentada a restrição ao sistema de modo que apenas um nó se mova por vez. Portanto, este autômato apresenta um estado inicial e x -estados adicionais associados a cada um dos nós móveis da rede ($x = 2, 3, 4, 5, \dots, X$). Essa estrutura permite a escalabilidade da abordagem para a inserção de mais nós móveis ao sistema de forma simples, uma vez que o agente móvel opera de forma independente dos demais enquanto navega. O autômato pode ser descrito da seguinte forma, o estado inicial 1 permite o acionamento de qualquer agente. Ao ser gerada uma requisição de busca um dos x -nós, o mais próximo ao destino é acionado através do evento t_x que permite o nó x executar a busca até cumprir sua navegação, verificado através do evento r_x que conduz o autômato ao estado inicial e apenas os nós restantes podem receber tarefas, dado que o evento t_x não é habilitado enquanto o nó se encontra no estado 8 da planta, atuando como roteador.

A linguagem gerada e marcada do autômato de especificação são dadas por

$$L(G) = L_m(G) = t_1(\epsilon + r_1), t_2(\epsilon + r_2), t_3(\epsilon + r_3), t_4(\epsilon + r_4), t_x(\epsilon + r_x) \quad (5.38)$$

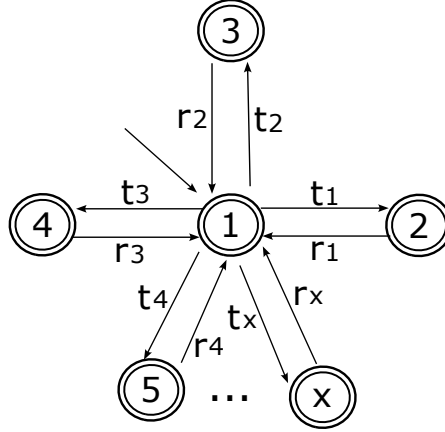


Figura 5.9: Especificação: a partir do estado inicial um robô (ou estado) é acionado por vez (t_x) e individualmente até concluir a navegação (r_x), conduzindo o automato ao estado inicial.

5.6 Sistema supervisorio

O sistema supervisorio proposto caracteriza-se como um sistema centralizado que utiliza-se dos nós estáticos que operam como roteadores para se ter acesso as informações dos nós móveis e comandá-los.

Para gerar o supervisorio, foram adotados quatro autômatos G_i (similar a Figura 5.8) com $x = 1, 2, 3$ e 4 sendo compostos paralelamente, $G_{1||2||3||4} = G_1||G_2||G_3||G_4$, que representa o sistema com quatro nós móveis. O número de nós móveis ou autômatos impacta no tamanho da máquina de estados que representa o supervisorio, o qual cresce rapidamente. Posteriormente, o autômato resultante é composto paralelamente com o autômato de especificação E similar a Figura 5.9, para gerar o autômato $R = G_{1||2||3||4}||E$. Finalmente, o comportamento menos restritivo possível é obtido através da função do DESUMA para gerar a linguagem suprema que satisfaz a especificação. O DESUMA¹ é um *software* gratuito e muito utilizado para análise e desenvolvimento de sistemas a eventos discretos. O supervisorio gerado apresenta todas as possíveis transições e são interpretados pelo MATLAB.

A interação com os robôs é dada pela identificação do estado atual de cada robô no autômato supervisor, uma vez que cada estado implica em um comportamento particular. Cada estado do controle supervisorio é representado por uma composição dos estados

¹O endereço eletrônico para download do *software*: <http://bit.ly/3sdcUC6>. A versão 3.0 para Windows foi utilizada.

individuais dos nós móveis e através da identificação (1-8) é possível checar as transições permitidas (eventos habilitados).

As condições de *Livelock* e *Deadlock* foram avaliadas através do *software* DESUMA através da função de controlabilidade e observabilidade.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao modelo de distribuição de nós sob o efeito de vento, avaliação da abordagem proposta comparada as abordagens que empregam Forças Virtuais e o diagrama de Voronoi e os experimentos práticos em laboratório.

6.1 Emprego de nós sob influência do vento

Nesta sessão será realizada uma comparação visual entre o modelo de distribuição de nós proposto, que leva em consideração a influência do vento, e modelos probabilísticos para a distribuição de nós de forma aleatória, a exemplo da difusão simples, difusão conjunta e difusão constante.

Inicialmente são apresentadas duas avaliações do modelo proposto referente a dois níveis de alturas distintas, 30 m e 60 m . É apresentada na Tabela 6.1 a parametrização das constantes aplicadas ao modelo sob influência do vento, dado por (4.2).

Tabela 6.1: Parâmetros de simulação no emprego de nós sob influência do vento, Equação (4.2).

Parâmetros/Unidade	Valor
Altura [m]	30 e 60
Raio do nó sensor (uma esfera) [m]	0,035
Largura e comprimento do robô [m]	0,400
Massa do nó sensor [kg]	0,056
Massa do robô [kg]	10
Densidade do ar (ρ) [kg/m^3]	1,225
Coeficiente de arrasto (C_a)	0,5
Gravidade (g) [m/s^2]	9,8

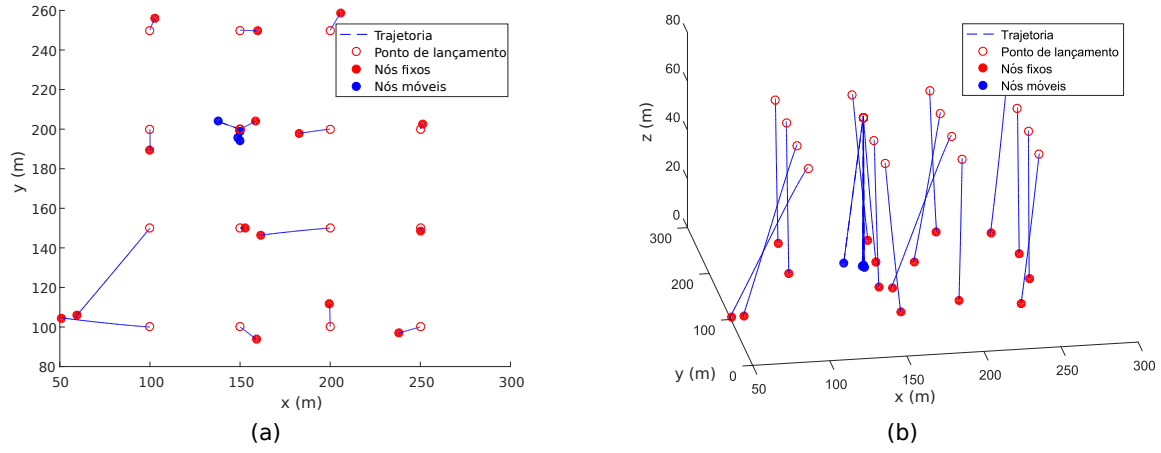


Figura 6.1: Lançamento a 30 m de altura e variância do vento de 10 m/s , (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.

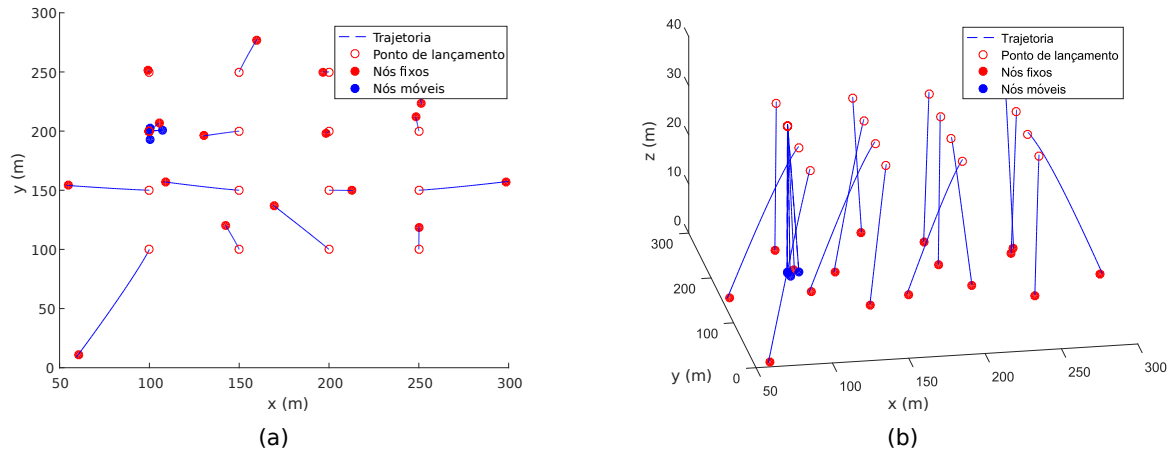
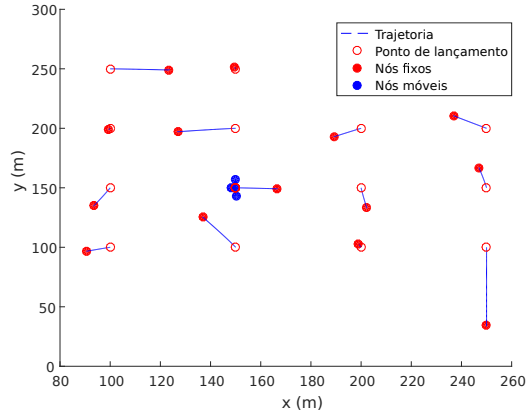
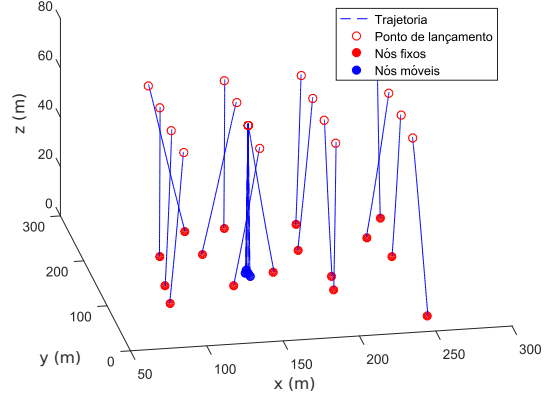


Figura 6.2: Lançamento a 30 m de altura e variância do vento de 25 m/s , (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.

Nas Figuras 6.1 e 6.2 são apresentados os lançamentos de 20 nós (entre estáticos e móveis) de uma altura de 30 m e variâncias do vento de 10 m/s e 25 m/s , respectivamente, dado que foi utilizado um modelo gaussiano de média nula para a definição da velocidade do vento a cada lançamento de nó independente. A diferença entre as variâncias permite observar diferentes condições de velocidade do vento, quanto maior a variância maior a velocidade do vento. Isso implica numa maior dispersão dos nós. Como resultado, quanto maior a influência dada pelo vento maior a dificuldade da rede em atender critérios de QoS, como a cobertura e a conectividade. Pode ser observado que o lançamento proposto segue um arranjo matricial de pontos de lançamento, influenciado pelo efeito do vento durante a queda do nó.

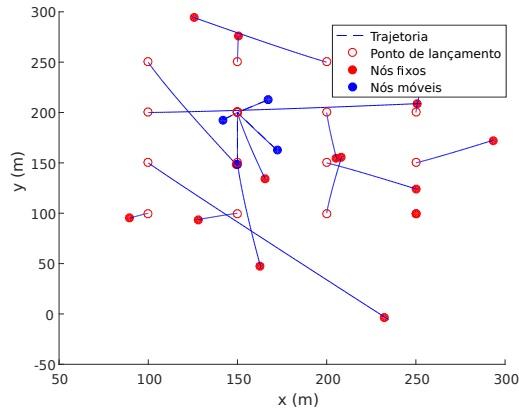


(a)

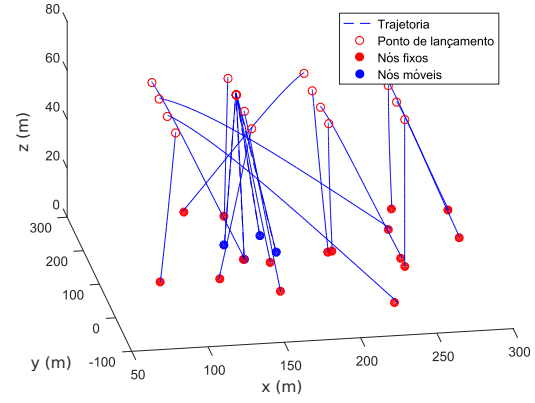


(b)

Figura 6.3: Lançamento a 60 m de altura e variância do vento de 10 m/s, (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.



(a)



(b)

Figura 6.4: Lançamento a 60 m de altura e variância do vento de 25 m/s, (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.

Já nas Figuras 6.3 e 6.4 são apresentados os lançamentos para uma altura de 60 m com as variâncias de 10 m/s e 25 m/s, respectivamente. Neste sentido, a altura maior implica num maior tempo de exposição ao vento, causando uma desorganização maior na distribuição.

São apresentados, em seguida, os modelos de distribuição aleatória comumente encontrados na literatura. Na Figura 6.5 são apresentados os modelos de difusão simples na Figura 6.5(a), contínua na Figura 6.5(b) e constante na Figura 6.5(c) para 20 nós considerando variância de 10, similar aos lançamentos com efeito do vento anteriormente apresentado, exceto para o modelo de difusão constante que apresenta uma distribuição

uniforme sobre a AI. Pode-se notar visualmente que cada uma dessas distribuições aleatórias pode afetar a qualidade de serviço da rede, não atendendo a critérios de qualidade, como cobertura e conectividade, implicando em redundância excessiva causada pela concentração de nós em determinada região. O método que apresenta melhor cobertura do ambiente é o de difusão constante, o qual utiliza distribuição uniforme nas direções x e y . Para os modelos de difusão simples e contínua, também foi aplicado vento com variância de 25, que implica numa maior dispersão. Este experimento é exposto através da Figura 6.6, na qual foi observada uma ligeira dispersão, mantendo baixa eficácia no emprego, por apresentar uma centralização no entorno de pontos médios da AI.

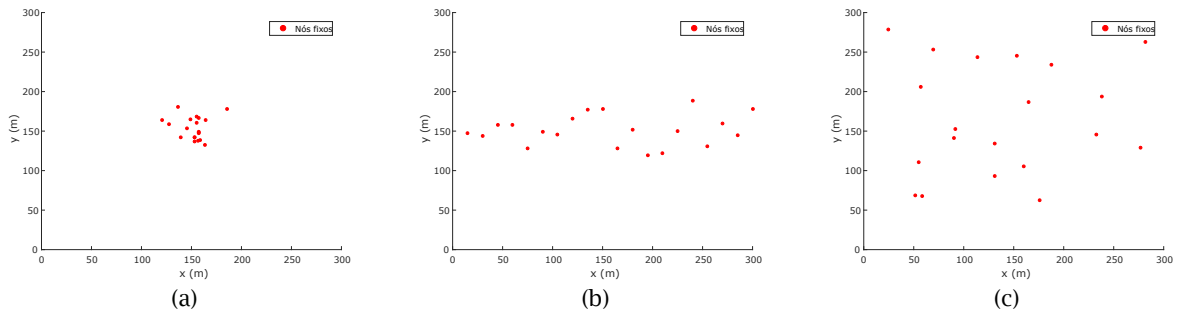


Figura 6.5: Distribuições aleatórias de 20 nós. (a) Difusão simples com variância de 10, (b) Difusão contínua com variância na direção y de 10 e (c) Difusão constante.

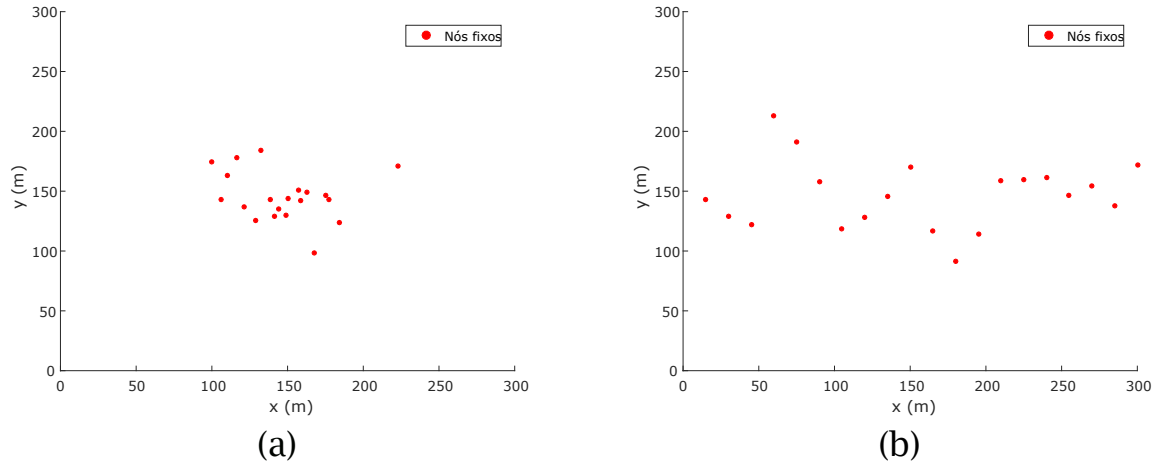


Figura 6.6: Distribuições aleatórias de 20 nós. (a) Difusão simples com variância de 25, (b) Difusão contínua com variância em y de 25.

Para melhor visualizar o comportamento desses modelos probabilísticos foi realizado um teste com o lançamento de 300 nós na mesma área mantendo a variância de 25, como apresentado na Figura 6.7. Este experimento evidencia a má cobertura proporcionada

pelos modelos de difusão simples Figura 6.7(a) e contínuo Figura 6.7(b) por não cobrir a AI e concentrar os nós numa determinada região. Já a difusão constante, representa uma melhor distribuição sobre o ambiente com algumas redundâncias em diversos locais, sendo indicada para simulações e testes em RSSF. A representação mais próxima à cenários reais são os métodos de difusão simples e contínua.

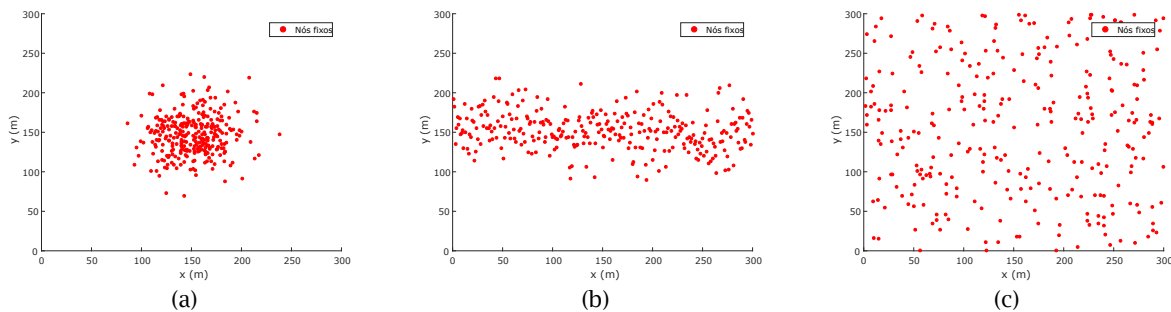


Figura 6.7: Distribuições aleatórias de 300 nós. (a) Difusão simples com variância de 25, (b) Difusão contínua com variância em y de 25 e (c) Difusão constante.

Pode ser observado com esses experimentos simulados, que mudanças impostas na variância podem melhor representar a cobertura da área, espalhando mais os nós, sem atender a critérios de desempenho da rede. Estes modelos probabilísticos não somente são analisados pelo seu efeito na conectividade e cobertura, como também em outros fatores que impactam a rede, como o tempo de vida, redundância e roteamento, de modo a compreender os impactos dos lançamentos na área de interesse.

Por outro lado, o modelo de lançamento sob efeito do vento apresenta uma nova linha de estudos para o emprego de nós através de modelos físicos, podendo ser estendido para receber outros efeitos no lançamento, como choques com obstáculos ou solo, bem como características de lançamentos em ambiente marinho, ou ainda emular o emprego determinístico com uso de veículos aéreos não tripulados (como drones), melhorando o posicionamento dos nós.

A seguir será discutida a comparação entre a metodologia proposta, denominada de Exploração de Fronteira, e as abordagens baseadas no Diagrama de Voronoi e em Força Virtual com o propósito de busca e integração. Os experimentos realizados foram propostos para avaliar pequena dispersão no emprego dos nós, dispersão mais grosseira, fronteira não convexa e a presença de obstáculos no cenário. Através desses experimentos poderá ser verificada a distinção entre a abordagem proposta que ao explorar a fronteira consegue integrar nós que se encontram dentro e fora da área de interesse, enquanto as demais abordagens restringem-se a busca e integração apenas dentro da região de interesse, induzidas pelos buracos internos identificados. Outra característica da abordagem proposta a ser observada é o tratamento quanto a perda de comunicação do

nó móvel não tratada nas abordagens baseada no diagrama de Voronoi e Forças Virtuais.

6.2 Considerações para os experimentos

Os experimentos simulados foram realizados no *software* MATLAB. Neste *software*, os nós móveis foram representados pelo modelo cinemático (5.1). Nele também foi realizada uma descrição dos autômatos para reconhecimento de seus estados e eventos, bem como do supervisor. Os autômatos foram desenvolvidos com a utilização do *software* DESUMA, o qual também foi responsável pelas composições paralelas e geração do supervisor.

As métricas adotadas para as análises são: cobertura ao final do processo de busca e exploração; cobertura incrementada (relação percentual entre a cobertura final e inicial); conectividade, que representa o quantitativo percentual de nós lançados que estão em atividade após o processo de busca; conectividade incrementada (relação percentual entre a conectividade final e inicial); número de nós integrados; tempo total de navegação (que proporciona uma estimativa de gasto energético no cumprimento da tarefa); número de movimentos; e, distância total percorrida pelos nós móveis (que também fornece uma estimativa de gasto energético).

Os experimentos foram conduzidos utilizando 16 nós sensores estáticos e quatro nós móveis. A área de interesse estipulada foi de $200 \times 200 \text{ cm}^2$ com um raio de comunicação $R_c = 50 \text{ cm}$. O robô apresenta diâmetro de 16 cm , diâmetro de roda $3,3 \text{ cm}$, velocidade linear máxima de 22 cm/s , velocidade angular máxima de $2,84 \text{ rad/s}$ e alcance sensorial de 100 cm (com resolução de 1°). Dez distribuições de nós foram realizadas com o modelo proposto, ou seja, dez redes distintas foram criadas e avaliadas com base na média e desvio padrão quanto ao desempenho dos algoritmos através das métricas.

Todas as simulações foram realizadas por um computador de 64 bits com sistema operacional Windows 10 Pro, com as seguintes configurações: Processador AMD Ryzen 7 5700G com Radeon Graphics; CPU 3.80 GHz; e memória de 16 GB.

O sistema supervisor foi avaliado quanto ao bloqueio através da análise da linguagem marcada e gerada que obedece o critério de acessibilidade ($Lm(G) = L(G)$) e das funções de controlabilidade e observabilidade do DESUMA, sendo atestado que o controle supervisor não apresenta *Deadlock* e *Livelock*.

Duas abordagens distintas serão utilizadas a critério de comparação com a metodologia proposta. Uma delas é baseada em células definidas pelo diagrama de Voronoi que auxiliam na identificação de regiões não cobertas dentro da célula contida na área de interesse, gerando demanda para o nó móvel cobrir tais áreas, e uma outra baseada em Forças Virtuais atrativas e repulsivas sobre o nó móvel auxiliando em sua navegação e posicionamento em áreas com menor densidade de nós e próximos às regiões de buracos na AI.

A abordagem de Voronoi baseada em [76] não contempla a estratégia de navegação

em direção aos buracos identificados na AI, considerando apenas a localização e reposicionamento dos nós em tais posições. Portanto, foi implementado um controlador de posição final que coordena os nós móveis até os destinos gerados, com a restrição que cada nó móvel só pode ser acionado uma única vez, pois o mesmo pode apresentar mínimos locais, ou seja, ao buscar minimizar um buraco pode gerar um outro maior, permitindo nova requisição do mesmo nó móvel. O controlador adotado é baseado em posição final definido por

$$\begin{cases} u = k_1 \rho \cos(\alpha) \\ \omega = \alpha + k_1 \sin(\alpha) \cos(\alpha) \end{cases}, \quad (6.1)$$

em que k_1 é um parâmetro de ajuste e α é o erro de orientação para o destino.

Na implementação da abordagem baseada em Forças Virtuais foi necessário unir componentes de forças apresentados em dois trabalhos diferentes, dado que um deles era voltado apenas para o afastamento dos nós uns dos outros, o que permite explorar o ambiente em qualquer direção e restringindo a aproximação da fronteira de conectividade, e o outro contempla a atração para a região de buracos e a repulsão de obstáculos. Portanto, foram adotadas de [46] as descrições de componente de força entre nós (3.2) e de fronteira (3.4). Já a força de repulsão de obstáculos (3.3) e atração para a região de interesse (3.5) foram baseadas em [73]. Essa composição de abordagens gera um sistema mais completo para a atividade de navegação do nó móvel, condizente com o processo de busca e integração de nós, mesmo sendo impulsionada à operação dentro da AI, de forma simular à abordagem de Voronoi. Para estipular o buraco na rede, foi utilizado o mesmo procedimento que na abordagem de Voronoi, com a segmentação da AI pelo diagrama de Voronoi e os nós estáticos indicando a dimensão do buraco em sua célula.

A incorporação desse sistema de controle baseado em forças para navegação foi unida à restrição de um nó se mover por vez na rede, evitando a necessidade do tratamento de conflitos ligados à navegação mútua. A força resultante sobre o nó (dada por 3.1) induz a um posicionamento de equilíbrio na rede. É comum encontrar este tipo de abordagem aplicados a redes *AD HOC* (com todos nós móveis), como em [73].

Vale destacar que essa abordagem baseada em Forças Virtuais não apresenta componentes normalizados, fato que gera dificuldade na ponderação das constantes de sintonia. Na Tabela 6.2 são apresentados os parâmetros de sintonia de todos os controladores utilizados no trabalho, referenciando as equações respectivas.

Os experimentos serão apresentados nas seções seguintes. Os dois primeiros avaliam intensidades de ventos distintas. Sendo que o segundo experimento envolve alta intensidade de vento, que causa uma maior dispersão dos nós, portanto, um maior desafio na integração dos nós. O terceiro experimento avalia a região não-convexa formada pela topologia da rede. Esta topologia induz os nós móveis a saírem da rede, comportamento não tratado na abordagem de Voronoi, mas incluso nas abordagens de Exploração de

Tabela 6.2: Parâmetros adotados na sintonia dos controladores.

Equação	Parâmetros de sintonia
Controlador posição final	
6.1	$k_1 = 1,0$
Controlador de forças virtuais	
3.2	$k_r = 18, k_a = 0,5, d_{th} = 0,5R_c, (R_c = 50\text{ cm})$ $k_0 = 25, d_{seg} = R_c$ $k_f = 25, d_{sf} = 0,3R_c$ $k_{ai} = 0,05$
3.3	
3.4	
3.5	
Controlador de seguir caminho	
5.5	$k_a = 6,6$
5.6	$k_b = 0,7$
Controlador de desvio de obstáculos	
5.21	$k_{u1} = 0,5u_{max}, (u_{max} = 22\text{ cm/s})$ $K_{\tilde{\theta}} = 2,2, k_{\tilde{\theta}} = 0,3, k_1 = 0,05$ $k_{u2} = 0,5u_{max}$ $K_{\tilde{\theta}} = 0,5, k_{\tilde{\theta}} = 0,3$ $K_{\tilde{\theta}} = 2,8, k_{\tilde{\theta}} = 0,6$
5.22	
5.30	
5.31	
5.35	

Fronteira e Forças Virtuais. Por fim, o quarto experimento avalia a presença de obstáculos no ambiente. Novamente, apenas o algoritmo de Voronoi não contempla esta habilidade.

6.3 Experimento 1: Cenário com menor dispersão dos nós

Este experimento tem como objetivo explorar os algoritmos diante do cenário com baixa dispersão dos nós, sendo aplicado ao vento uma variância de 10 m/s ($\mathcal{N}(0, 10)$) a 60 m de altura. Na Figura 6.8 é apresentado o processo de busca e integração do algoritmo de Exploração da Fronteira de conectividade. Através da Figura 6.8 pode ser observado que foram requisitadas três movimentações de nós móveis para atingir a conectividade total da rede.

Já na Figura 6.8(e) são apresentadas as ações de controle realizadas, em que a velocidade linear dos agentes é mantida praticamente constante, e na Figura 6.8(f) é apresentado o comportamento da função de Lyapunov durante o procedimento, em que cada pico refere-se ao acionamento de um nó móvel e sua aproximação até a fronteira, sendo mais representativo o terceiro pico da função devido a distância percorrida pelo nó até a fronteira durante seu deslocamento em linha reta atravessando a rede. Esse comportamento é útil, pois permite com o sorteio de um ponto aleatório na fronteira explorar inicialmente qualquer direção de vizinhança e também proporciona redução nos roteamentos com os nós próximos da fronteira que causariam maior gasto energético dos nós presentes nessa região. Este experimento explora apenas o controlador de seguir

caminho.

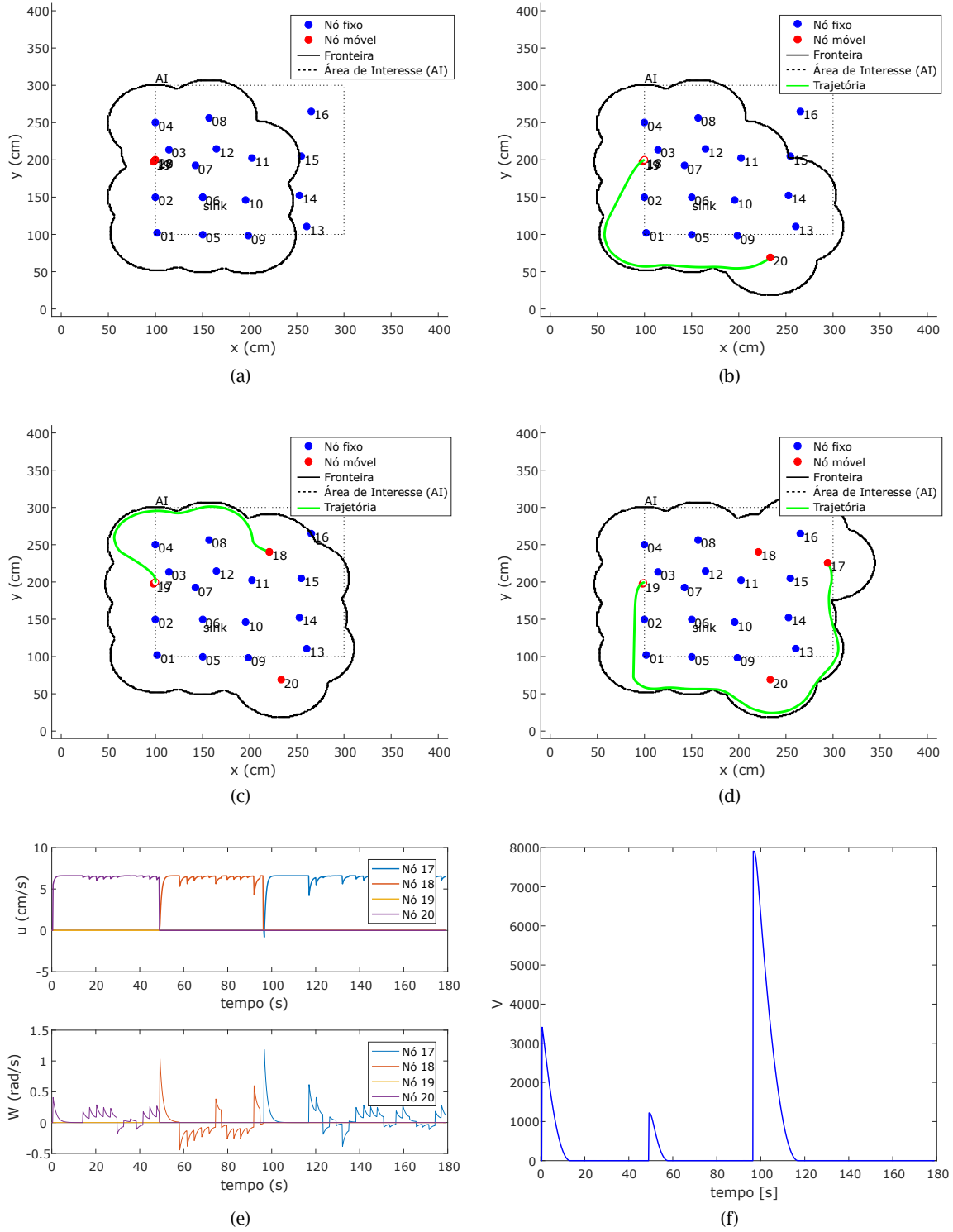


Figura 6.8: Experimento 1: Abordagem de Exploração em Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó e disposição final da rede, (e) as ações de controle e (f) a função de Lyapunov.

É apresentada na Figura 6.9 a evolução da abordagem baseada no Diagrama de Voronoi. Este algoritmo utiliza o controlador de posição final. O resultado e a capacidade de integração se apresenta efetiva comparada com a abordagem proposta, sendo requisitada a movimentação de apenas três nós para atingir a conectividade total. As ações de controle são apresentadas na Figura 6.9(e), ressaltando a saturação da velocidade linear do agente em 22 cm/s . Já a abordagem baseada em Forças Virtuais, apresentada na Figura 6.10, traz uma de suas limitações, com a presença de mínimo local, fazendo com que apenas o nó 17 realize a busca e expansão condizente com o esperado. O mínimo local é causado pela ação resultante das forças utilizadas e dos pesos atribuídos as mesmas. Através das ações de controle apresentadas na Figura 6.10(d) é possível notar que todos os nós foram acionados.

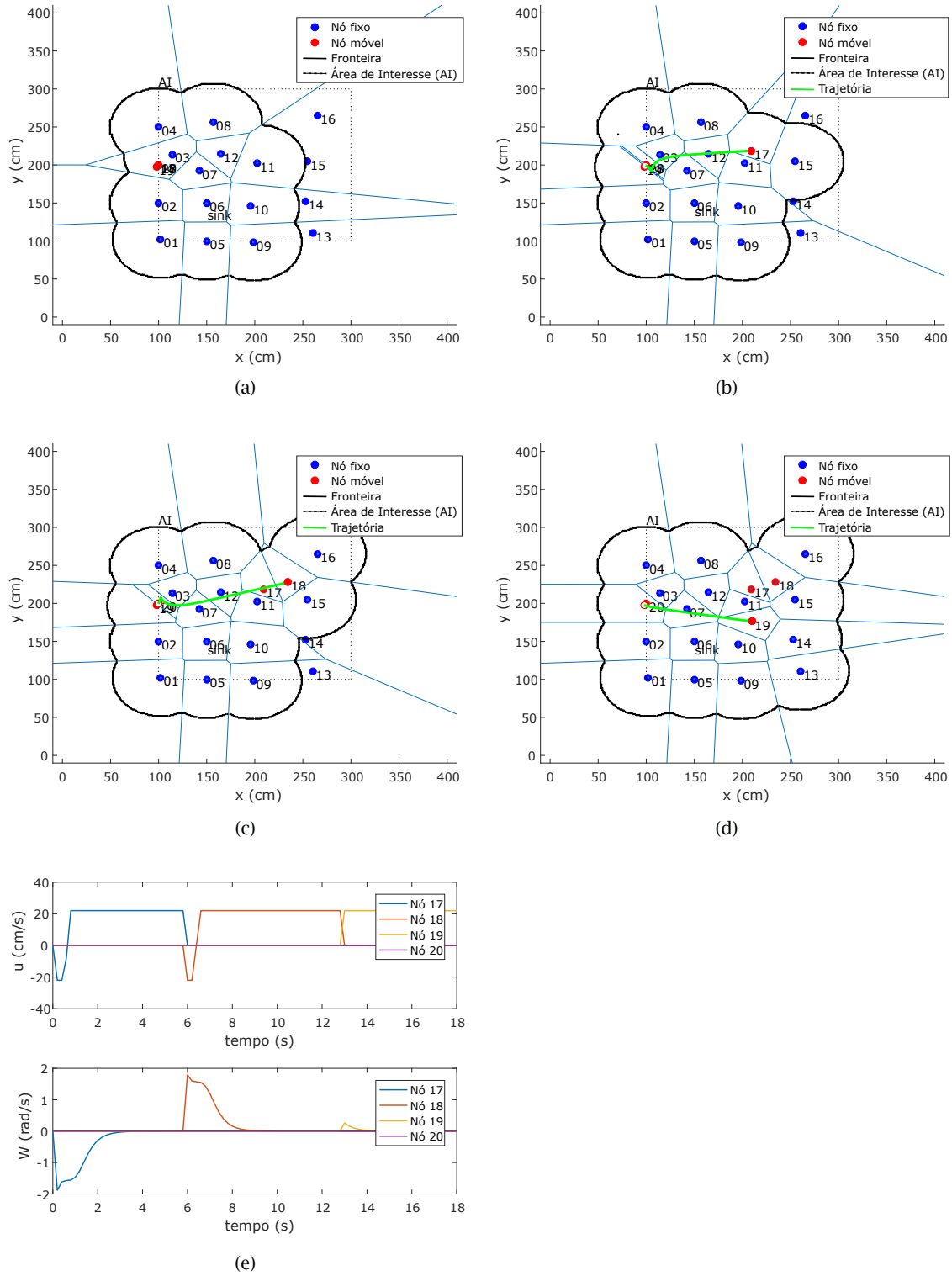


Figura 6.9: Experimento 1: Abordagem baseada em diagrama de Voronoi, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó e disposição final da rede e (e) ações de controle.

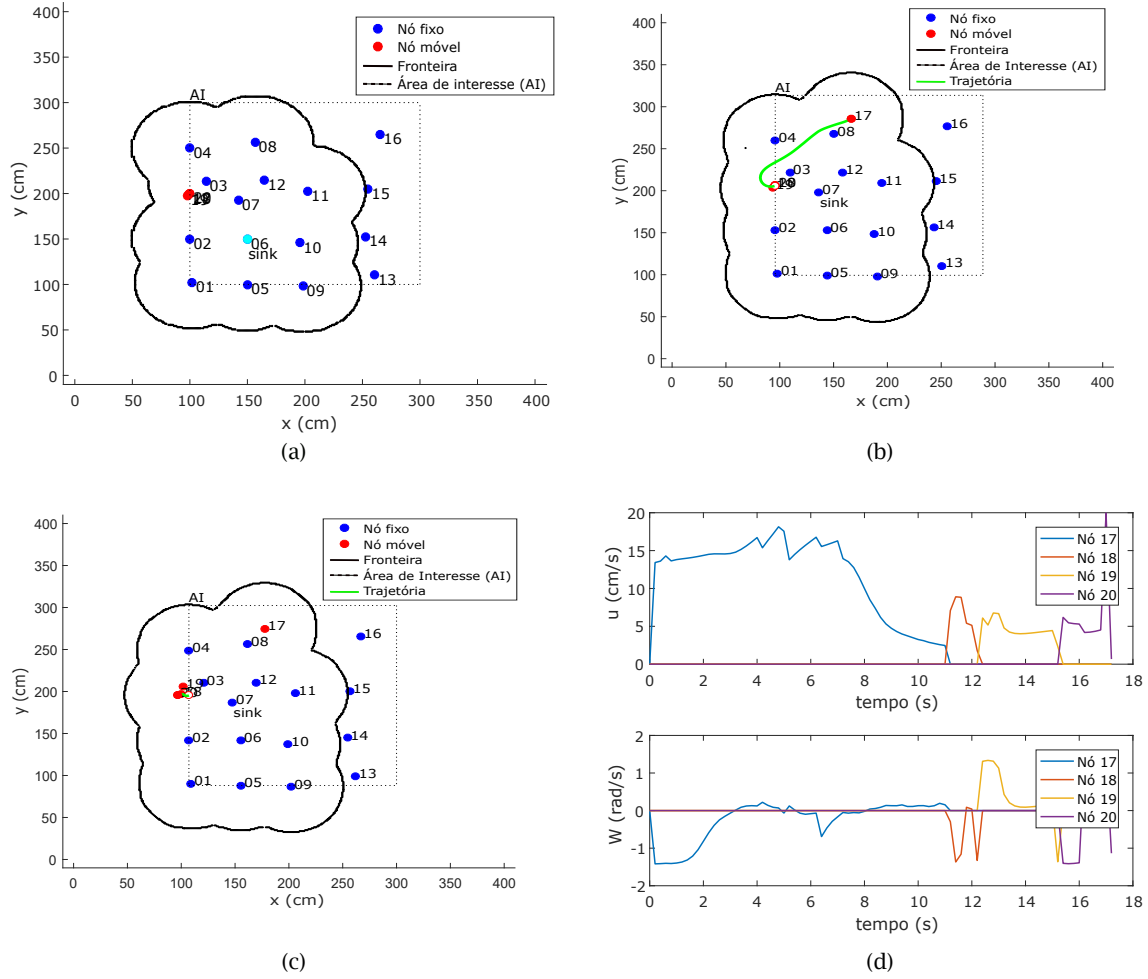


Figura 6.10: Experimento 1: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) mínimo local apresentado no acionamento dos demais nós e disposição final da rede e (d) ações de controle.

Na Tabela 6.3 é apresentada a comparação entre os três métodos de expansão de conectividade e cobertura. Com ela, é possível observar que o método proposto apresenta desempenho similar a abordagem de Voronoi e ambas, apresentam significativa superioridade quanto a abordagem baseada em Forças Virtuais que apresenta limitações devido aos mínimos locais que surgem durante o progresso da atividade, pois surgem com frequência, prejudicando a busca. Outro mínimo local observado na abordagem de Força Virtual foi a navegação em círculos (o robô se mantém girando em um pequeno espaço) na proximidade à fronteira, causado devido ao conflito entre a atração do buraco na AI e a repulsão da fronteira.

É importante salientar que a abordagem proposta apresenta um deslocamento do nó móvel maior que as demais abordagens. O maior deslocamento, está intrinsecamente ligado ao gasto energético da rede para acompanhamento e coordenação da atividade,

aspecto não abordado no escopo deste trabalho. Em contrapartida, apresenta maior segurança quanto a perda de robôs, uma das contribuições da proposta. As demais abordagens permitem a perda de comunicação do agente durante a atividade, sem levar em consideração um tratamento devido.

A perda de comunicação da abordagem de Voronoi é causada principalmente pela topologia não convexa da fronteira de conectividade, que em alguns momentos conduz a uma navegação por fora da rede. Como não há uma garantia comprovada de retorno, devido as condições do ambiente durante o trajeto, o mais seguro é abortar a atividade logo após a desconexão ou tratar o seu retorno. Já a abordagem baseada em Forças Virtuais é afetada pela força resultante sobre o nó, principalmente pela força de atração para buracos que condiciona o nó a navegar em direção à fronteira e caso haja um desbalanceamento entre os pesos das forças atuantes, pode ocasionar a desconexão.

Outro ponto que merece destaque é que a abordagem proposta apresenta uma maior integração de nós desaparecidos com a utilização de um número menor de nós móveis, isso se pronuncia devido a abordagem realizar busca e exploração dentro e fora da área de interesse.

Tabela 6.3: Experimento 1: Comparação entre métodos com menor dispersão dos nós.

Métricas	Exploração de Fronteira	Voronoi	Força Virtual
Cobertura (%)	$95,5 \pm 3,3$	$96,6 \pm 1,4$	$83,4 \pm 8,6$
Incremento da Cobertura (%)	$70,5 \pm 35,5$	$75,3 \pm 41,6$	$35,5 \pm 26,9$
Conectividade (%)	$96,5 \pm 4,9$	$95,5 \pm 5,4$	$84,5 \pm 8,4$
Incremento da conectividade (%)	$100,4 \pm 37,4$	$98,6 \pm 39,1$	$41,1 \pm 16,1$
Número de nós integrados	$9,3 \pm 1,7$	$8,1 \pm 1,9$	$2,2 \pm 2,0$
Tempo de execução da tarefa (s)	$156,9 \pm 67,3$	$20,2 \pm 4,2$	$30,1 \pm 13,7$
Distância percorrida dos nós (cm)	$989,2 \pm 429,5$	$418,7 \pm 89,0$	$380,1 \pm 223,6$
Número de movimentos dos nós	$3,0 \pm 0,8$	$3,8 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,4$

6.4 Experimento 2: Cenário com maior dispersão dos nós

Este segundo experimento, visa explorar a interação com uma maior dispersão dos nós, sendo aplicado ao vento uma variância de 30 ($\mathcal{N}(0, 30)$) a 60 m de altura. Este emprego dificulta o processo de integração e cobertura da AI. Na Figura 6.11 é apresentada a dinâmica de busca e expansão do método de Exploração de Fronteira. Nota-se que a rede inicia com um número pequeno de nós causado pela distribuição inicial. Esta abordagem consegue conectar os nós na vizinhança da rede ampliando a cobertura e conectividade. Sendo que a distribuição apresenta nós muito afastados (a exemplo dos nós 3, 4 e 8), que para sua conexão requeriria mais nós móveis no sistema. Nessas situações, as abordagens de Voronoi e de Forças Virtuais naturalmente ignoram estes nós, pois a busca é voltada somente para os buracos internos da AI.

Na Figura 6.11(f) são apresentadas as ações de controle e na Figura 6.12 a função de Lyapunov. Nas ações de velocidade angular nota-se variações associadas a mudança na referência angular de destino ao seguir a fronteira, esse erro de orientação gerado é refletido também na função de Lyapunov, porém o fator distância para o destino durante a aproximação da fronteira é mais representativo e mascara tal efeito. No segundo requerimento de nó móvel há um pequeno platô associado ao giro do robô para corrigir a orientação para o destino.

A metodologia baseada em Voronoi, Figura 6.13, apresenta conectividade e cobertura inferiores para esta distribuição de nós apresentada. A abordagem baseada em Forças Virtuais, apresentada na Figura 6.14, apresentou um desempenho ruim devido a força atrativa para a região de buracos na AI impulsionar os nós a saírem da rede em duas requisições de nós dentre as quatro realizadas. Também é possível observar a saturação da velocidade linear durante a tarefa, que é resultante dos pesos atribuídos na sintonia do controlador (pesos das componentes da força resultante).

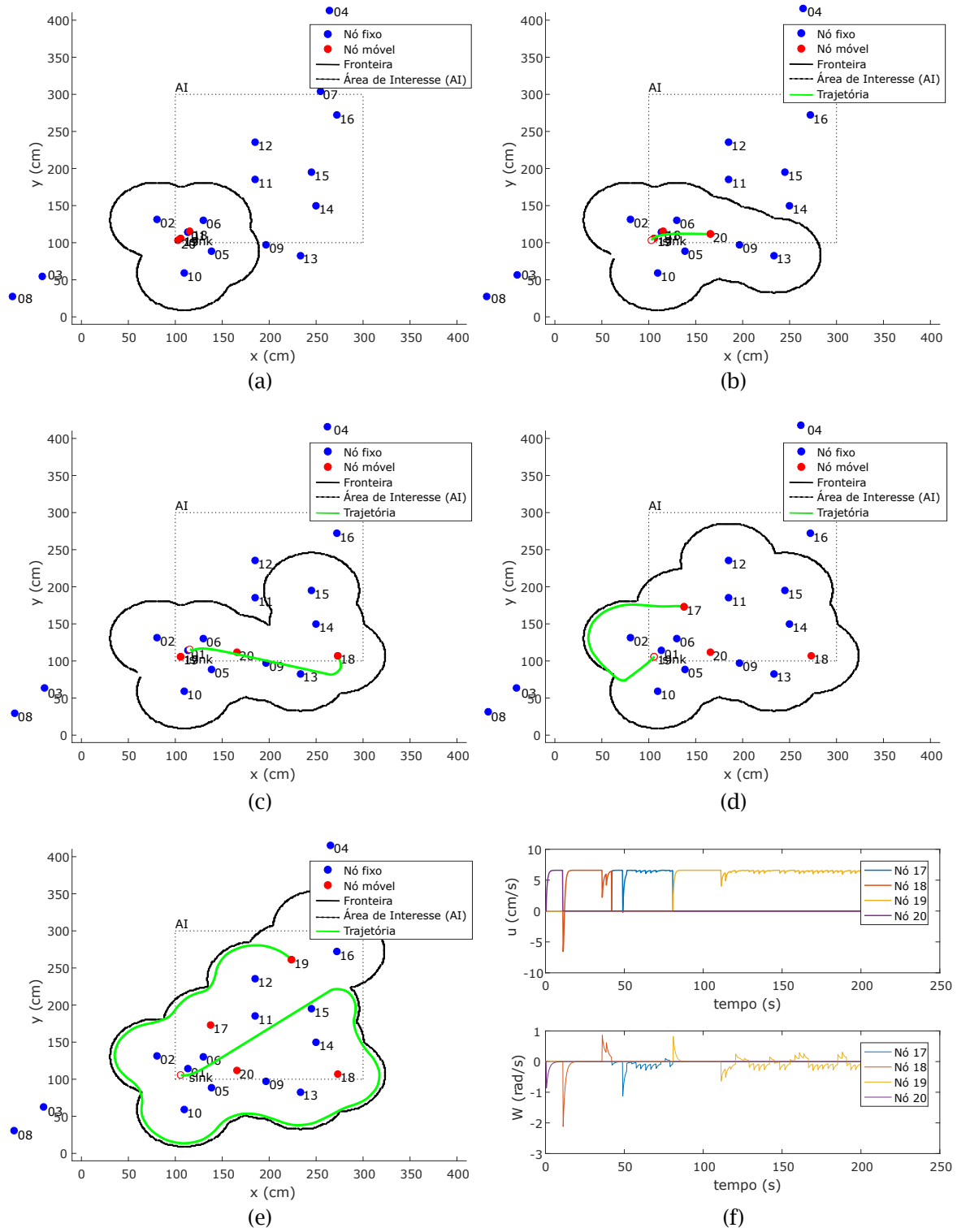


Figura 6.11: Experimento 2: Abordagem baseada na Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e disposição final da rede e (f) ações de controle.

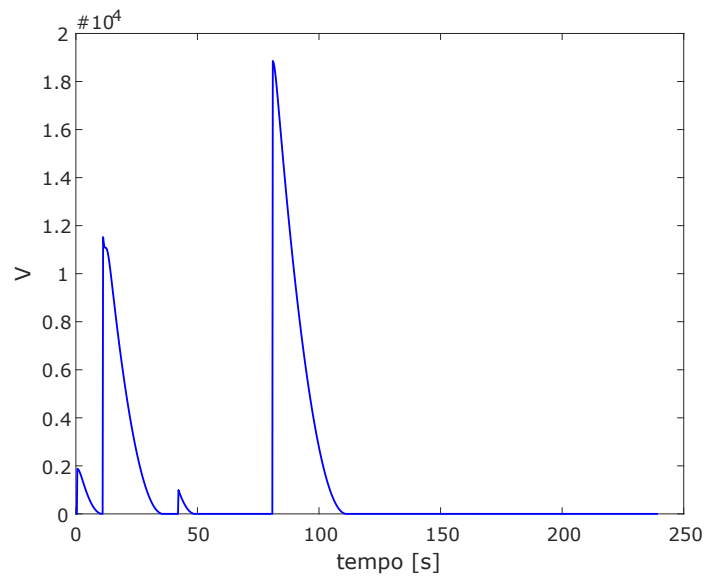


Figura 6.12: Experimento 2: Função de Lyapunov com os picos de cada requisição de nó móvel na exploração.

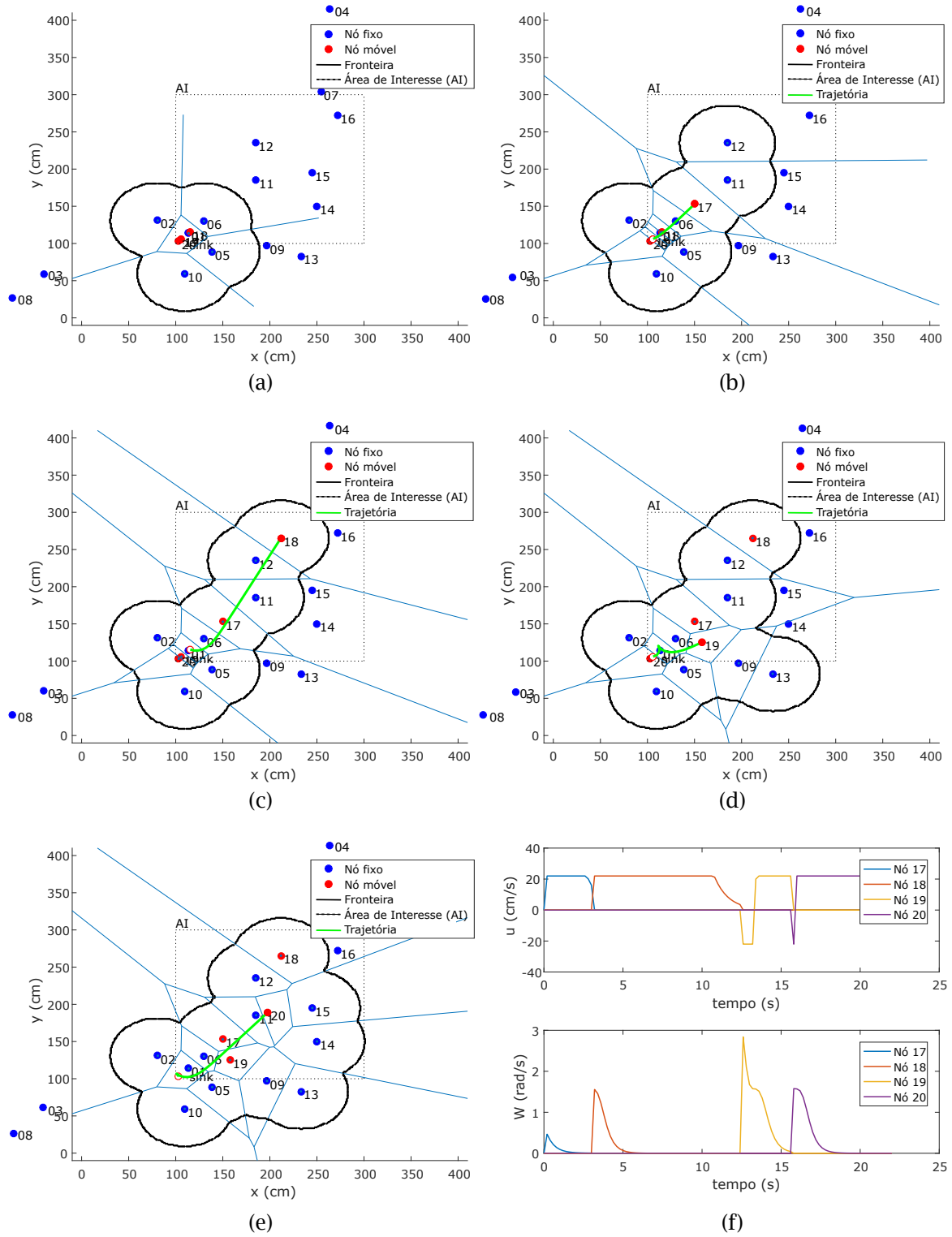


Figura 6.13: Experimento 2: Abordagem baseada em diagrama de Voronoi, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó, (e) navegação do quarto nó e disposição final da rede e (f) ações de controle.

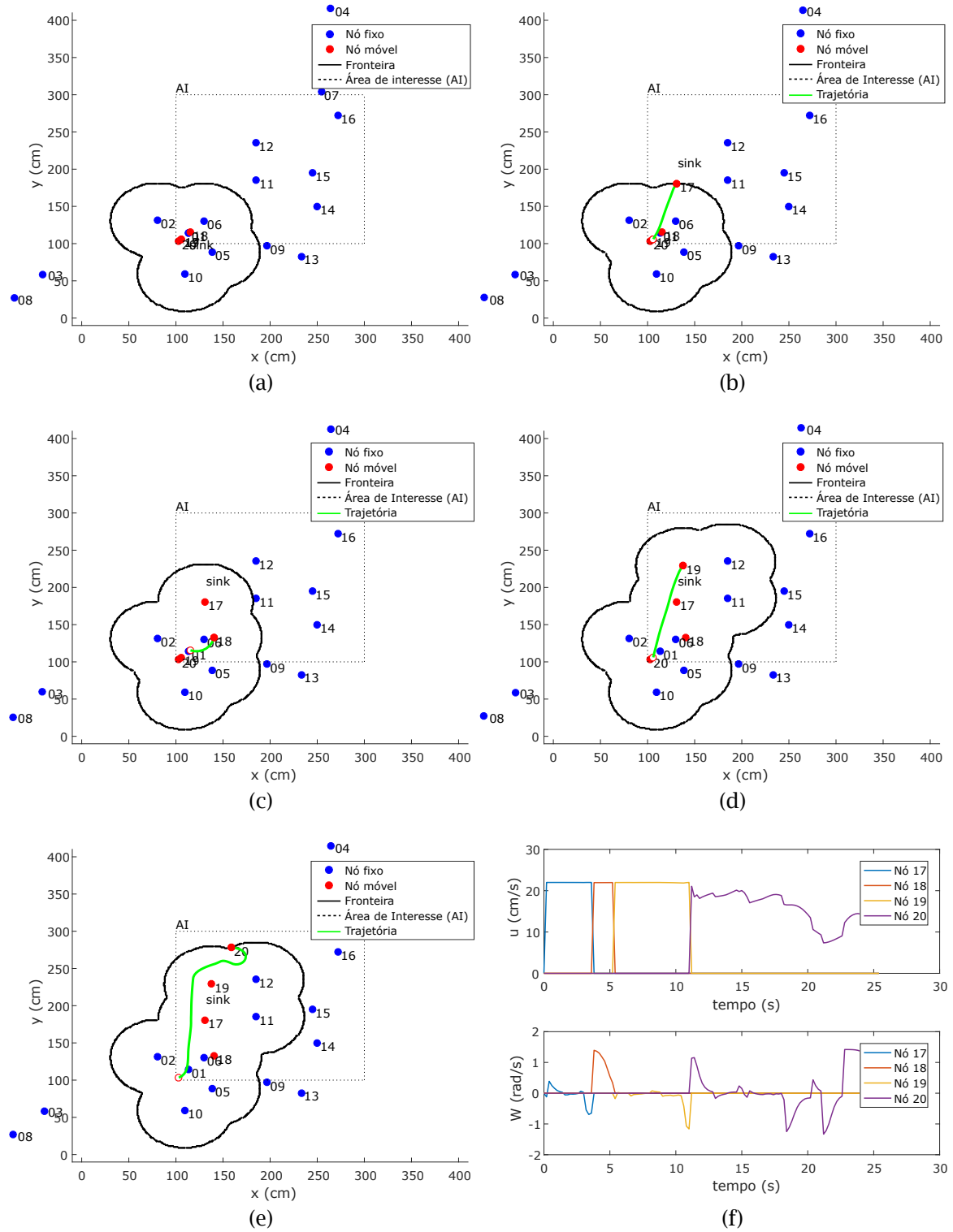


Figura 6.14: Experimento 2: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó, (e) navegação do quarto nó e disposição final da rede e (f) ações de controle.

Em suma, neste segundo experimento, observa-se que novamente a abordagem

proposta apresenta desempenho similar a abordagem de Voronoi, com destaque para a métrica de conectividade que ressalta um número maior de integrações realizadas, como apresentado na Tabela 6.4. Como já é esperado, mantendo a característica de maior deslocamento dos nós e tempo para execução da tarefa em comparação as outras abordagens. Já a abordagem de Forças Virtuais apresenta o pior desempenho dentre os três métodos.

Tabela 6.4: Experimento 2: Comparação entre métodos com maior dispersão dos nós.

Métricas	Exploração de Fronteira	Voronoi	Força Virtual
Cobertura (%)	$85,7 \pm 5,2$	$85,8 \pm 6,7$	$75,0 \pm 11,3$
Incremento da Cobertura (%)	$152,2 \pm 85,1$	$154,2 \pm 74,8$	$100,5 \pm 53,3$
Conectividade (%)	$75,5 \pm 9,6$	$70,5 \pm 8,5$	$63,0 \pm 11,0$
Incremento da conectividade (%)	$165,9 \pm 48,3$	$149,0 \pm 48,3$	$23,2 \pm 13,8$
Número de nós integrados	$8,8 \pm 1,2$	$6,8 \pm 1,6$	$2,2 \pm 1,3$
Tempo de execução da tarefa (s)	$140,0 \pm 43,2$	$21,6 \pm 3,8$	$25,4 \pm 8,0$
Distância percorrida dos nós (cm)	$875,7 \pm 276,4$	$428,8 \pm 80,3$	$471,3 \pm 111,6$
Número de movimentos dos nós	$3,9 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,0$	$4,0 \pm 0,0$

6.5 Experimento 3: Cenários com topologia não convexa

Como pôde ser notado nos experimentos anteriores, a fronteira de conectividade estimada, geralmente, se configura como uma região não convexa, que faz com que em alguns pontos, o nó necessite sair da rede para atingir um ponto da fronteira.

Esse efeito foi minimizado na abordagem proposta, utilizando um *offset* para a fronteira, pois, para um controlador de seguir caminho a suavidade de sua resposta de atuação torna-se lenta à mudança de direção brusca do caminho que acarretaria em saídas recorrentes da rede. Porém, é inevitável a saída ao sortear qualquer destino na fronteira, bem como alguns destinos apontados pela detecção de buracos, que afeta as abordagens de Voronoi e Forças Virtuais.

Este terceiro experimento visa explicitar tal situação que algoritmos que visam a busca e integração de nós em RSSF devem levar em consideração.

Na Figura 6.15 é apresentada a evolução da abordagem de Exploração de Fronteira no cenário não convexo. Na situação apresentada, o sorteio do ponto de destino direciona o agente móvel a encontrar rapidamente a fronteira e ao segui-la consegue encontrar os demais nós utilizando apenas um nó móvel. Também são apresentadas as ações de controle Figura 6.15(c) e o comportamento da função de Lyapunov Figura 6.15(d).

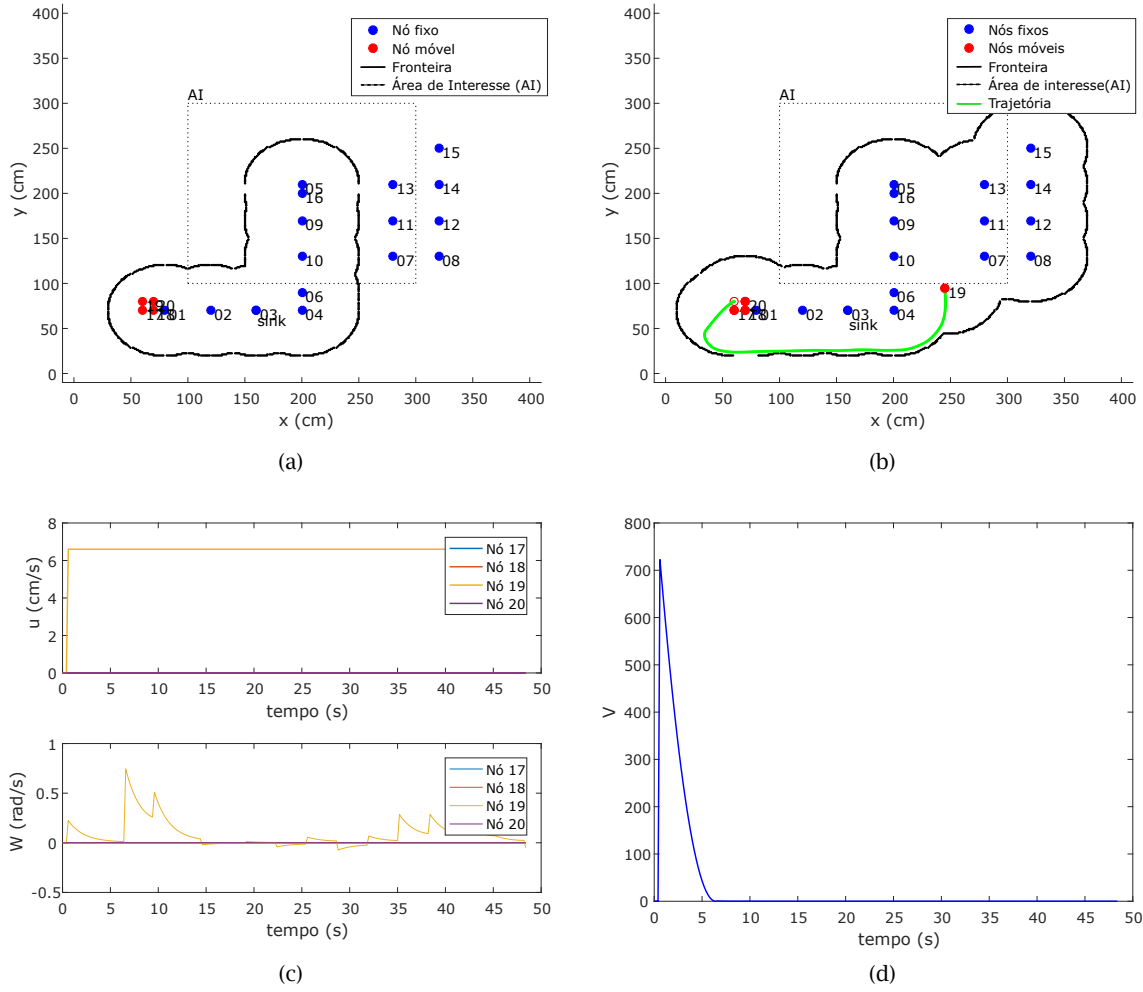


Figura 6.15: Experimento 3: Abordagem baseada na Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó e disposição final da rede, (c) ações de controle e (d) função de Lyapunov.

Já na Figura 6.16 é apresentada a dinâmica para a abordagem baseada em Voronoi. É possível observar que a região de buraco atrai o nó móvel para fora da rede, devido a característica não convexa, em que o destino gerado para o agente é na fronteira próximo ao nó estático 5. O comportamento dos agentes móveis apresentam perdas e reconexões proporcionadas por movimentações subsequentes. Este mesmo comportamento, impulsionado pelo buraco na cobertura da AI, pode ser observado na Figura 6.17, que apresenta o comportamento da abordagem baseada em Forças Virtuais para o mesmo cenário.

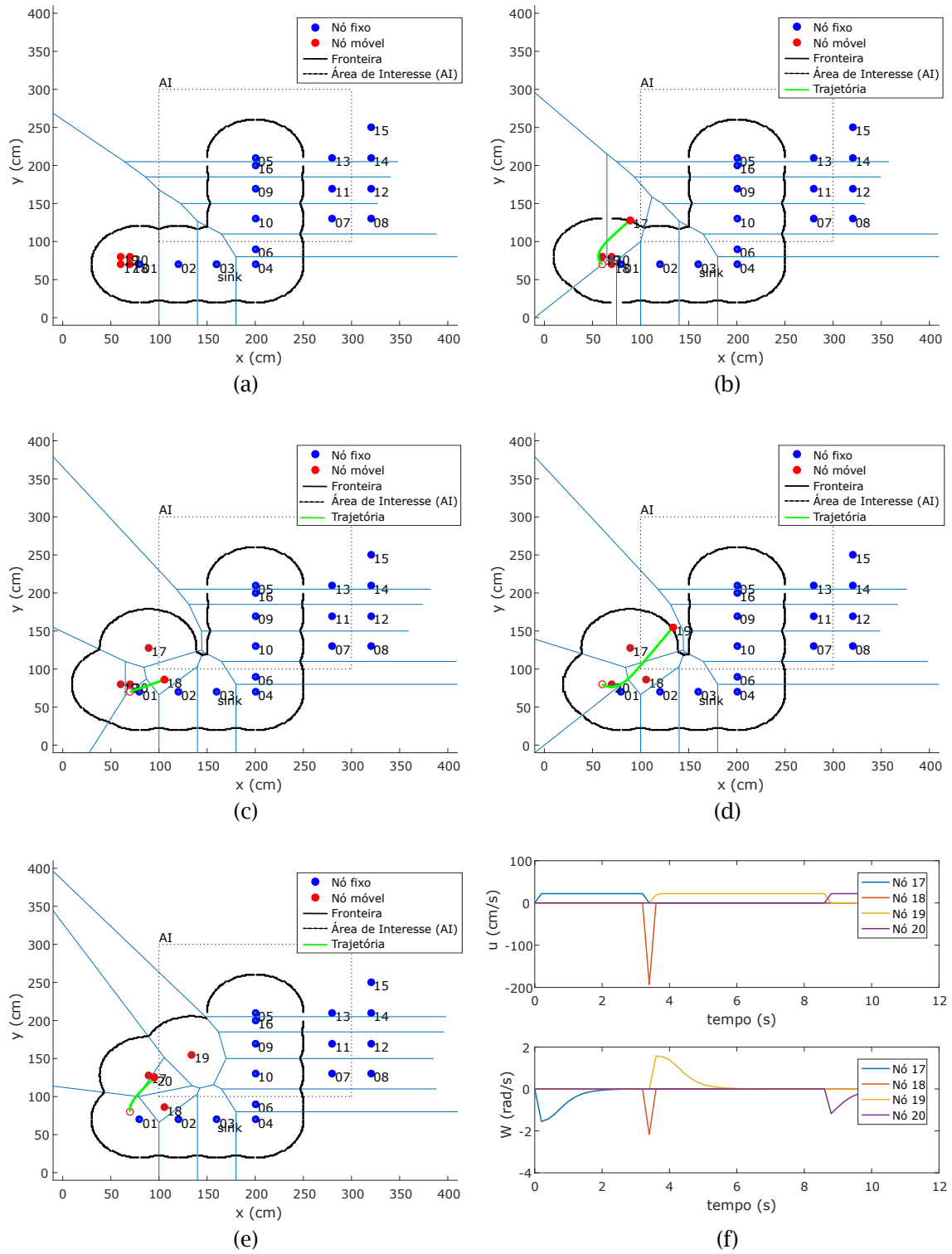


Figura 6.16: Experimento 3: Abordagem baseada em diagrama de Voronoi, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e disposição final da rede e (f) ações de controle.

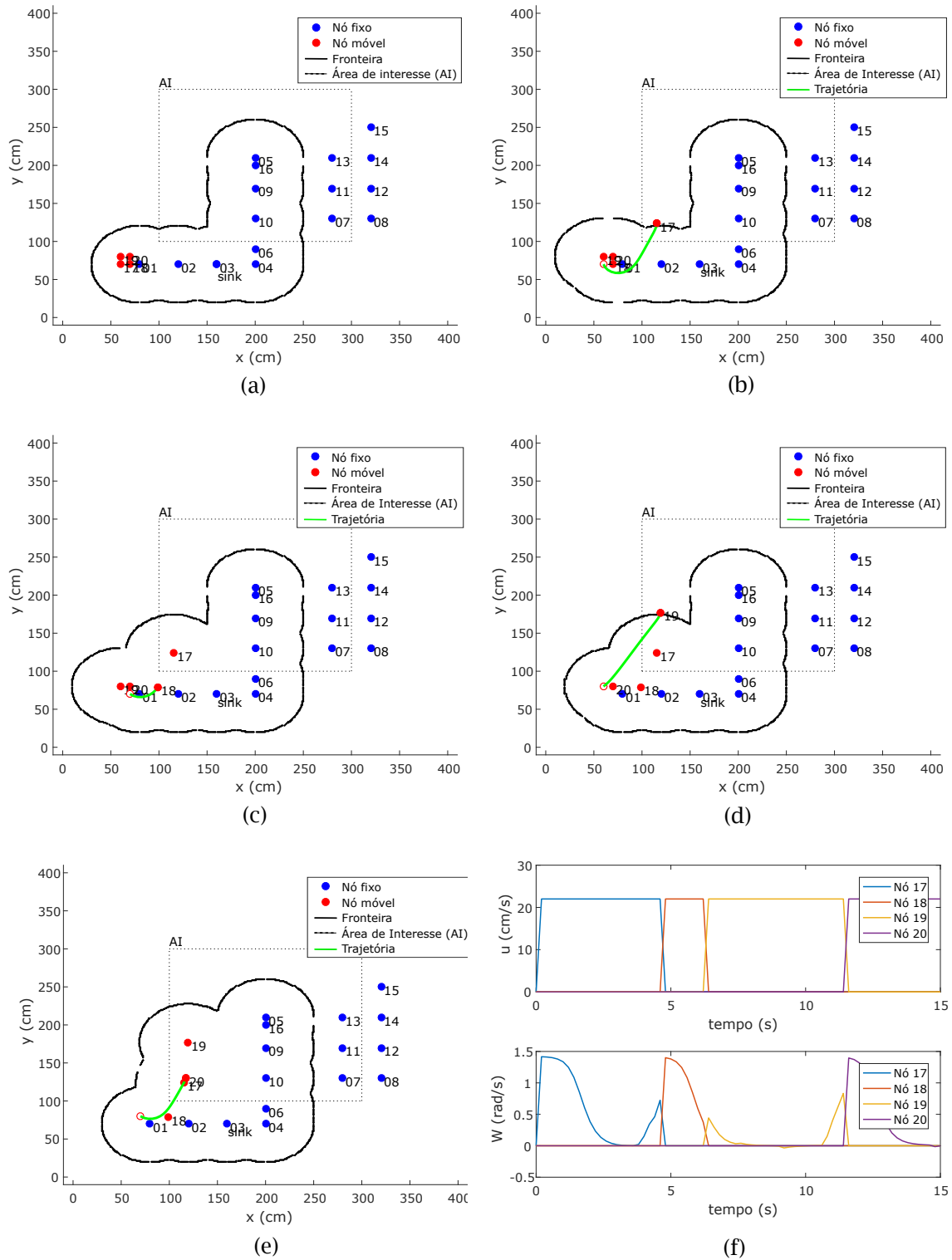


Figura 6.17: Experimento 3: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e disposição final da rede e (f) ações de controle.

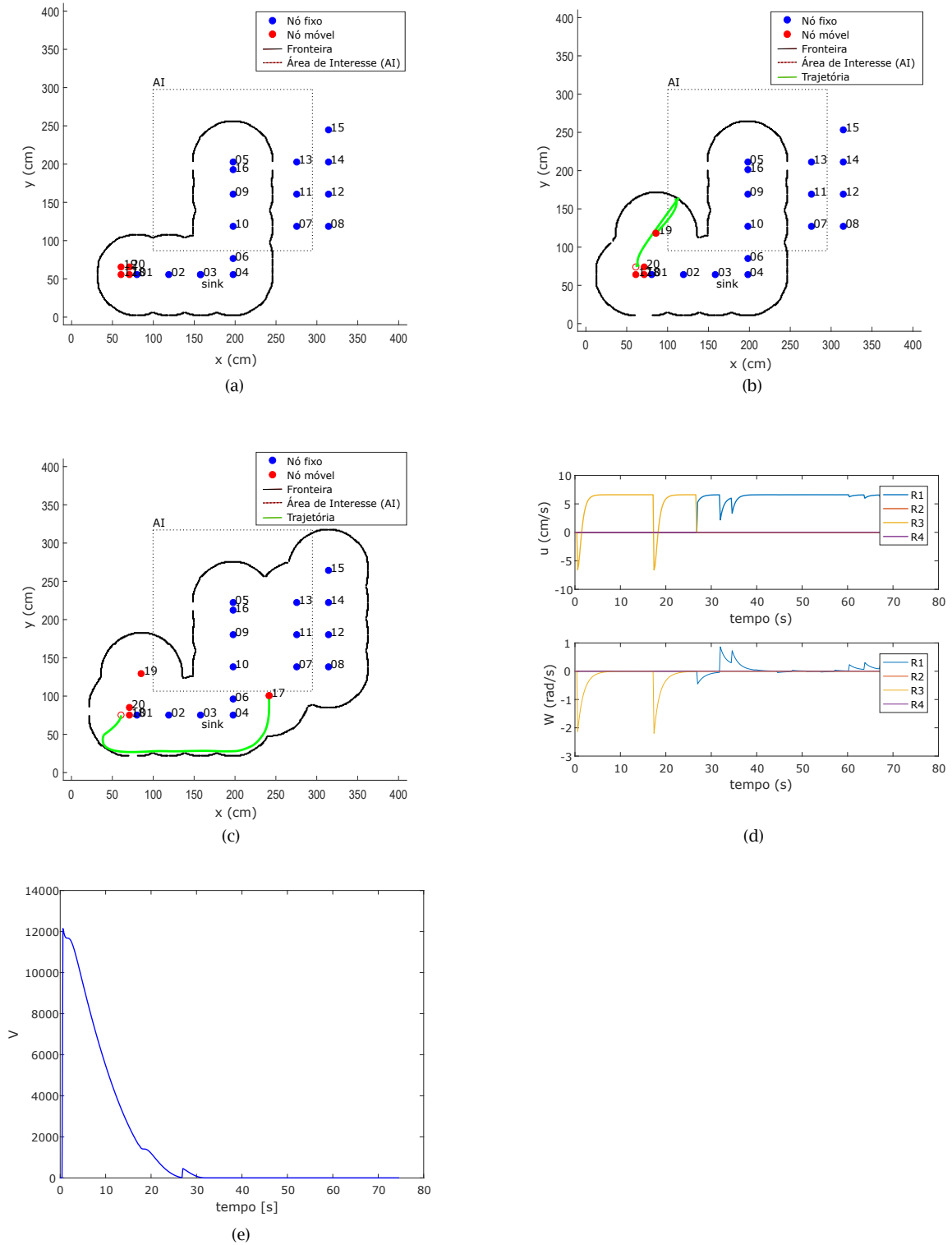


Figura 6.18: Experimento 3: Abordagem baseada na Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó e disposição final da rede, (d) ações de controle, (e) função de Lyaunov com um pequeno crescimento no retorno do nó sem comunicação no tempo 18s.

Uma comparação entre os métodos é apresentada na Tabela 6.5, utilizando-se apenas da disposição dos nós apresentada, a qual ressalta o desempenho superior da abordagem proposta, levando-se em consideração a conectividade, cobertura e número de movimentos requisitados dos nós móveis, sendo apenas necessário neste cenário uma movimentação.

De modo a expôr o método de Exploração de Fronteira a saída do nó móvel da rede, foi realizado o experimento apresentado na Figura 6.18. Foi definido o primeiro alvo da abordagem manualmente, em um destino próximo ao nó 5, forçando a movimentação do nó pela fronteira não convexa, causando a saída. A abordagem proposta permite que o nó móvel navegue durante um tempo máximo sem comunicação com a rede, decorrido este tempo, ele retorna ao último ponto de contato com a rede como apresentado na Figura 6.18(b) e torna-se roteador. No segundo sorteio o algoritmo passa a operar independentemente no sorteio do alvo de destino e seguindo o caminho formado pela fronteira conecta os demais nós, finalizando a tarefa.

Tabela 6.5: Experimento 3: Comparação entre métodos em cenário com fronteira não convexa.

Métricas	Exploração de Fronteira	Voronoi	Força Virtual
Cobertura (%)	61, 2	58, 9	50, 3
Incremento da Cobertura (%)	57, 4	32, 2	29, 4
Conectividade (%)	100, 0	65, 0	65, 0
Incremento da conectividade (%)	122, 2	44, 4	0, 0
Número de nós integrados	11, 0	4, 0	0, 0
Tempo de execução da tarefa (s)	48, 4	12, 4	16, 0
Distância percorrida dos nós (cm)	316, 8	272, 8	352, 0
Número de movimentos dos nós	1, 0	4, 0	4, 0

6.6 Experimento 4: Cenário 1 com obstáculos

Este experimento tem como objetivo avaliar a abordagem proposta quanto a presença de obstáculo, explorando o chaveamento para o comportamento de desvio de obstáculo, e compará-la com a abordagem baseada em Forças Virtuais, dado que o algoritmo baseado no Diagrama de Voronoi não contempla a capacidade de desvio de obstáculos. Neste cenário será exigido do nó móvel o comportamento de seguir caminho e desviar de obstáculos, bem como o tratamento da perda de comunicação.

Na Figura 6.19 é apresentada a dinâmica da abordagem baseada na Exploração de Fronteira diante de obstáculos no ambiente, nota-se que o segundo movimento, associado ao nó 19 necessita desviar do obstáculo, e aciona o controlador correspondente. Isso permite alguns chaveamentos dentre os dois controladores do sistema, em direção ao ponto

de destino. Na Figura 6.19(f) é apresentado a função de energia, indicando os momentos em que ocorre tais chaveamentos, mas conduzindo o robô ao destino, sendo realizada uma nova integração de nós. Neste experimento, os pesos da função de Lyapunov do controlador de desvio de obstáculos resulta numa amplitude menos significativa, não se pronunciando devidamente.

Já na Figura 6.20 é apresentada a dinâmica da abordagem de Forças Virtuais. Nota-se que a força de atração para região de buracos e a de fronteira não estão balanceadas a ponto de permitir a recorrência de saída dos nós da rede. Nota-se também a atuação favorável da força a fim de evitar obstáculos. Essa abordagem se mostra ineficiente requerendo um maior esforço nas definições das constantes, bem como uma possível normalização. A Tabela 6.6 reflete o desempenho superior da metodologia de Exploração de Fronteira, conseguindo contornar obstáculos e realizando a integração de nós, ampliando a conectividade e cobertura da rede. Portanto, a abordagem proposta se mostra mais efetiva neste tipo de cenário.

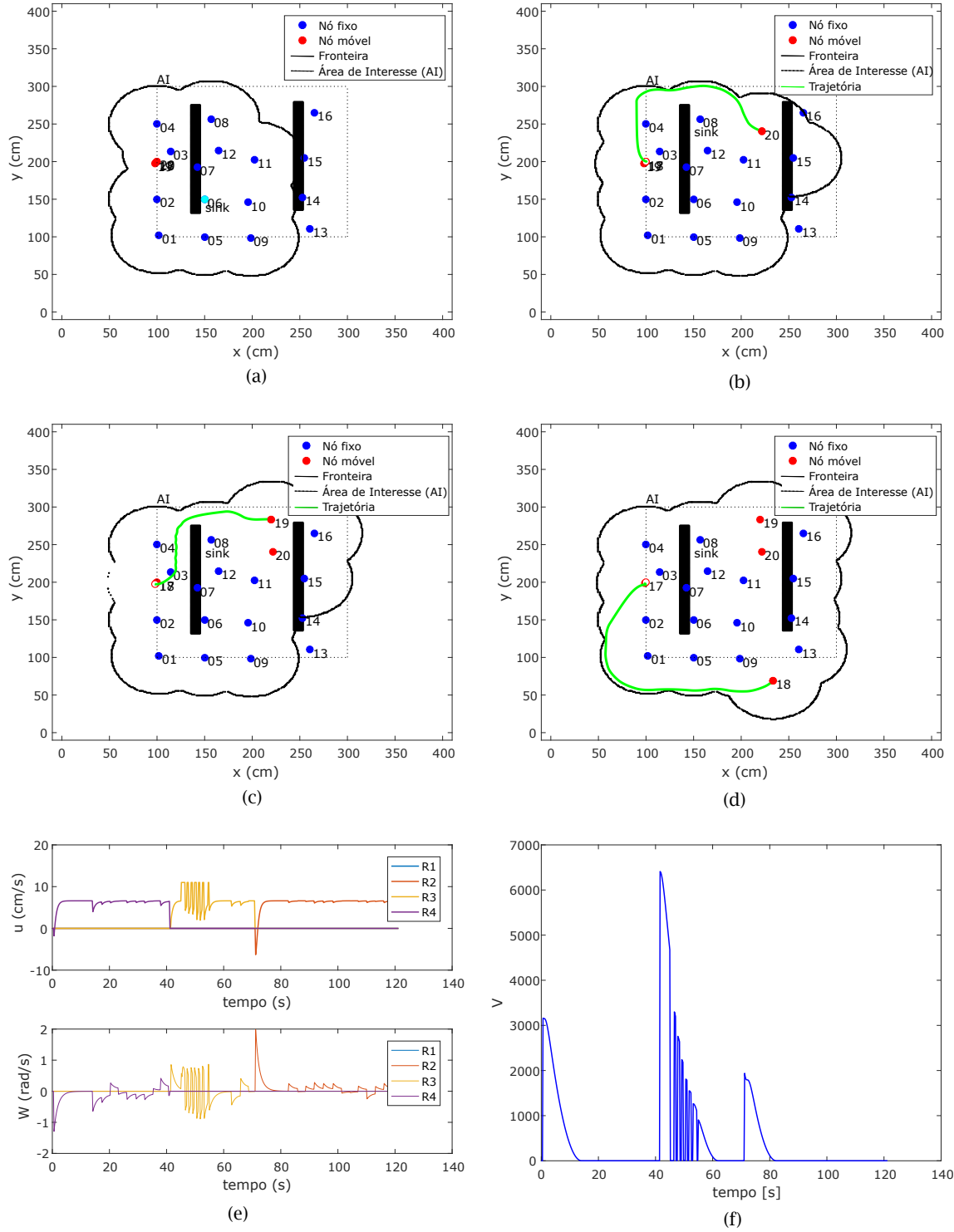


Figura 6.19: Experimento 4: Abordagem baseada em Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) ações de controle dos nós e (f) função de Lyapunov.

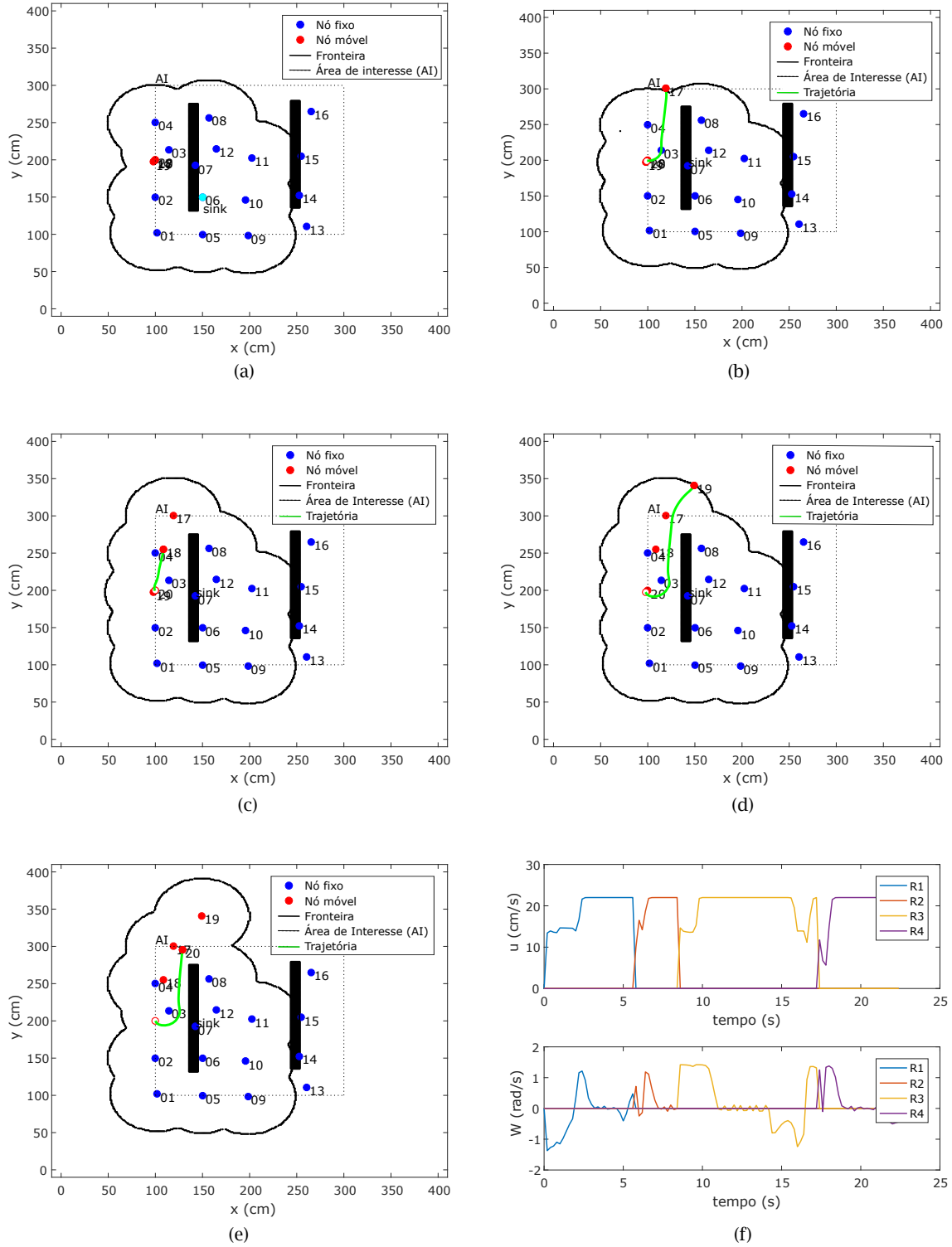


Figura 6.20: Experimento 4: Abordagem baseada em Forças Virtuais, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro, (e) navegação do quarto e (f) ações de controle dos nós.

Tabela 6.6: Experimento 4: Comparação entre métodos em ambiente com obstáculos.

Métricas	Exploração de Fronteira	Força Virtual
Cobertura (%)	99,7	67,5
Incremento da Cobertura (%)	49,6	1,3
Conectividade (%)	100,0	80,0
Incremento da conectividade (%)	66,7	0,0
Número de nós integrados	8,0	0,0
Tempo de execução da tarefa (s)	121,2	22,4
Distância percorrida dos nós (cm)	768,3	442,3
Número de movimentos dos nós	3,0	4,0

6.7 Experimento 5: Cenário 2 com obstáculos

Na Figura 6.21 é apresentado outro cenário com um obstáculo distinto cujo objetivo é exigir a saída da rede durante a navegação. Neste caso, é explorada a classificação do obstáculo como interno ou de fronteira. Na primeira movimentação, Figura 6.21(b), o nó desvia do obstáculo interno sem sair da rede. Na Figura 6.21(c) o nó móvel encontra o obstáculo antes de chegar à fronteira, que o conduz a sair da rede para contorná-lo, porém, o tempo máximo sem comunicação é ultrapassado e o mesmo retorna ao último ponto de contato seguindo pela trajetória executada. No terceiro movimento, Figura 6.21(d) o obstáculo novamente induz a saída do nó, e mesmo com ampliação do movimento anterior, o nó navega sem comunicação pelo tempo limite e retorna à rede. Devido as ampliações proporcionadas anteriormente o quarto movimento (Figura 6.21(e)) permite o contorno do obstáculo e por consequência a integração de nó.

É apresentada na Figura 6.22 a função de energia do sistema durante o experimento. Nela, as funções de Lyapunov do controlador de seguir caminho são representadas por V_1 e o controlador de desvio de obstáculo por V_2 . Neste experimento a variável referente ao erro de posição (ρ) foi considerada em metros em ambas as funções de Lyapunov de modo a diminuir a amplitude resultante e visualizar melhor a influência do erro de orientação (que varia de poucos radianos). É possível notar que ambos os subsistemas conduzem as funções de Lyapunov para zero, com pequenas variações no entorno do zero originadas pelas mudanças de orientação do nó. Em alguns momentos surgem platôs durante o desvio de obstáculos (visualizado em V_2) durante a perda da parede e realização do movimento radial, que gera uma variação temporária no erro de orientação e afastamento da referência para a o obstáculo causando um erro de posição mais significativo.

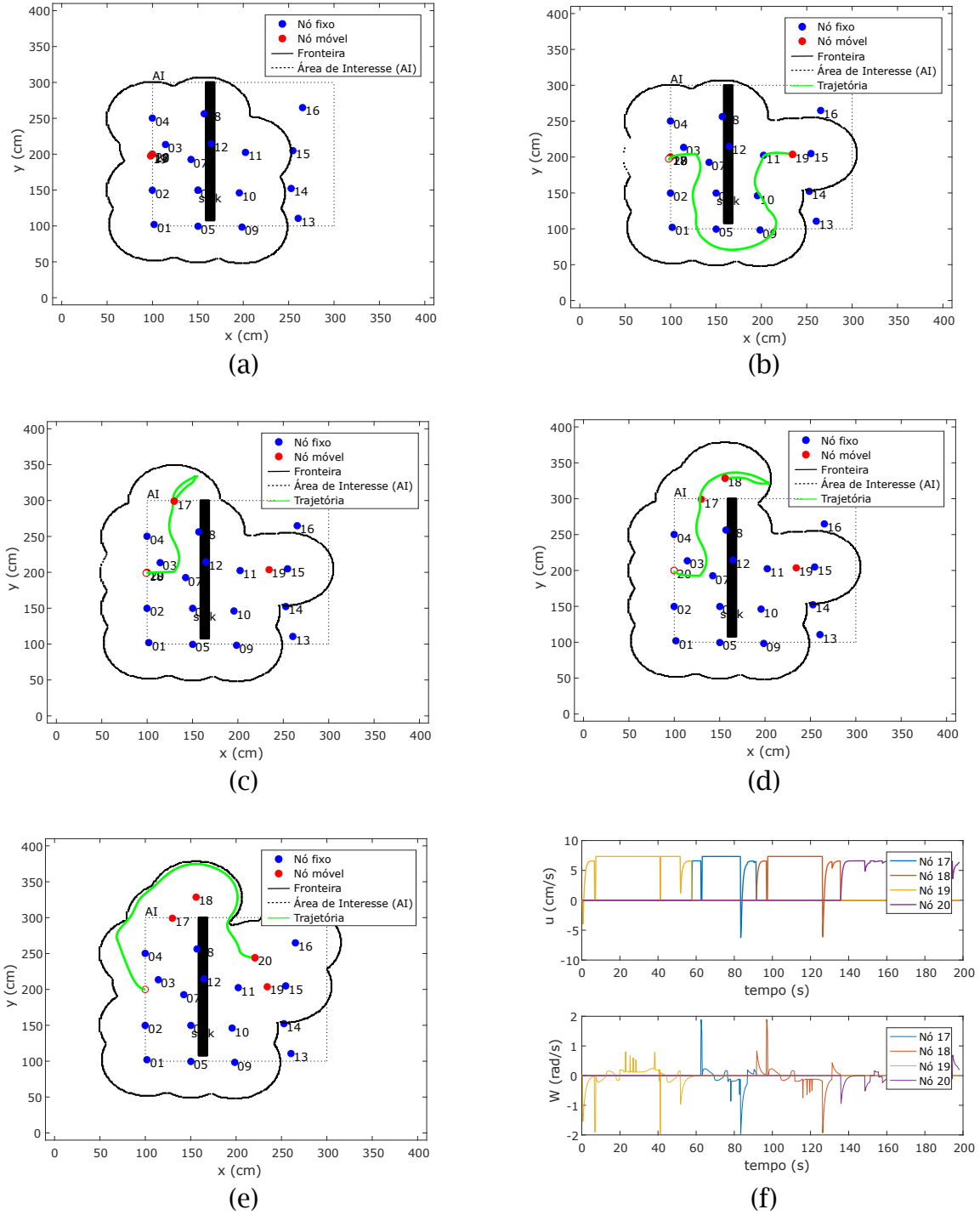


Figura 6.21: Experimento 5: Abordagem baseada em Exploração de Fronteira, (a) inicialização da rede, (b) navegação do primeiro nó, (c) navegação do segundo nó, (d) navegação do terceiro nó, (e) navegação do quarto nó e (f) ações de controle dos nós.

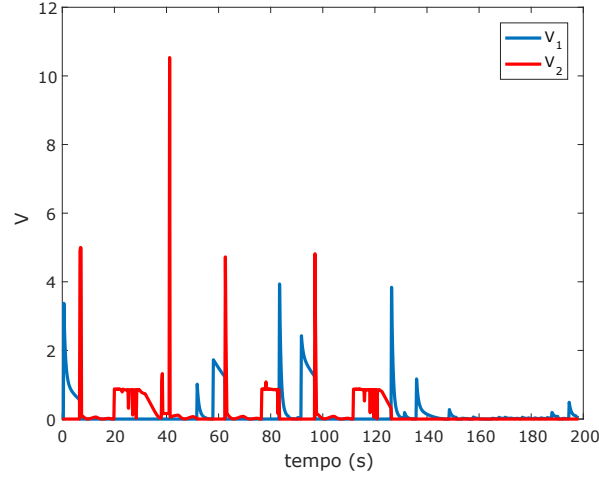


Figura 6.22: Experimento 5: Função de Lyapunov da abordagem baseada em Exploração de Fronteira. Em azul (V_1) tem-se a função de Lyapunov do controlador de seguir caminho e em vermelho (V_2) a função de Lyapunov associada ao controlador de desvio de obstáculos.

6.8 Experimento prático em laboratório

Os experimentos práticos foram realizados em cooperação com o Grupo de Pesquisa em Robótica da Universidade Federal de Sergipe (GPR-UFS) que cedeu o espaço e a estrutura para tal. Uma rede híbrida baseada em ESP-NOW foi desenvolvida utilizando o ESP32 DEVKITV1 contemplado tanto os nós estáticos quanto os nós móveis.

6.8.1 Nó móvel

O nó móvel foi caracterizado como um robô de tração diferencial, o mesmo é composto por dois motores de passo 28BYJ-48 com módulo de controle ULN2003 gerenciado por um ESP32 que também integra a rede. Apresenta uma estrutura circular feita em madeira MDF com diâmetro de 15 cm. Por meio de uma única mensagem da estação base são enviadas as instruções de velocidades a serem executadas por todos os robôs durante a navegação, sendo atribuída velocidade zero aqueles nós que não estão em atividade de navegação. Cada um dos nós móveis, com base em uma identificação pessoal (ID), lê parte do pacote com seus respectivos comandos de velocidade de roda direita e roda esquerda descritos por números de passos que variam entre $[0-255]$. Os limites das ações de controle são relacionados à velocidade linear e angular estimadas para o robô.

As equações de conversão das velocidades de rodas adotadas são:

$$\begin{cases} v_e = 255 \frac{u + \omega L}{u_{max} + \omega_{max} L} \\ v_d = 255 \frac{u - \omega L}{u_{max} - \omega_{max} L} \end{cases}, \quad (6.2)$$

em que v_e e v_d são as velocidades da roda esquerda e direita em função do número de pulsos, respectivamente, L representea o raio do robô, u_{max} , ω_{max} , são as velocidades angular e linear máximas levantadas ($u_{max} = 3,6$ cm/s e $\omega_{max} = 0,4$ rad/s), u e ω são as velocidades linear e angular instantâneas, respectivamente, fornecidas pelo controlador ativo. A Tabela 6.7 apresenta os parâmetros de sintonia dos controladores de desvio de obstáculo e seguir caminho utilizados nos experimentos reais.

Tabela 6.7: Parâmetros adotados na sintonia dos controladores.

Equação	Parâmetros de sintonia
Controlador de seguir caminho	
5.5	$k_a = 2, 2$
5.6	$k_b = 0, 5$
Controlador de desvio de obstáculos	
5.21	$k_{u1} = 2, 4$
5.22	$K_{\tilde{\theta}} = 0, 32, k_{\tilde{\theta}} = 0, 3, k_1 = 0, 025$
5.30	$k_{u2} = 2, 2$
5.31	$K_{\tilde{\theta}} = 0, 28, k_{\tilde{\theta}} = 0, 5$
5.35	$K_{\tilde{\theta}} = 0, 32, k_{\tilde{\theta}} = 0, 5$

Na Figura 6.23 é apresentado o robô que caracteriza o agente móvel da rede. Na Figura 6.23(a) são apresentados os módulos que compõem o nó móvel, bateria, micorontrolador ESP32 DEVKITV1 e o *driver* dos motores de passo. Já nas Figuras 6.23(b) e Figuras 6.23(c) são apresentadas vistas em perspectiva do nó com e sem cobertura utilizada na identificação dos nós. Cada nó recebe uma cobertura circular composta por dois semicírculos, um na cor amarela e outro com uma cor distinta, vide Figura 6.23(d). A cobertura é responsável por identificar a pose do robô (x, y, φ) no ambiente através de processamento de imagem, uma vez que os nós não contemplam nenhuma estratégia de posicionamento embarcada implementada. Para cada nó móvel são calculados os centroides das cores de cada semicírculos e através da média destes centróides encontra-se as coordenadas de posição x e y do nó no ambiente (que representa o seu centro de massa) e por intermédio da reta que os conectam, encontra-se a orientação φ do nó. Estas variáveis são fundamentais para o controle de movimento do nó pela área de busca e seu monitoramento durante a atividade.

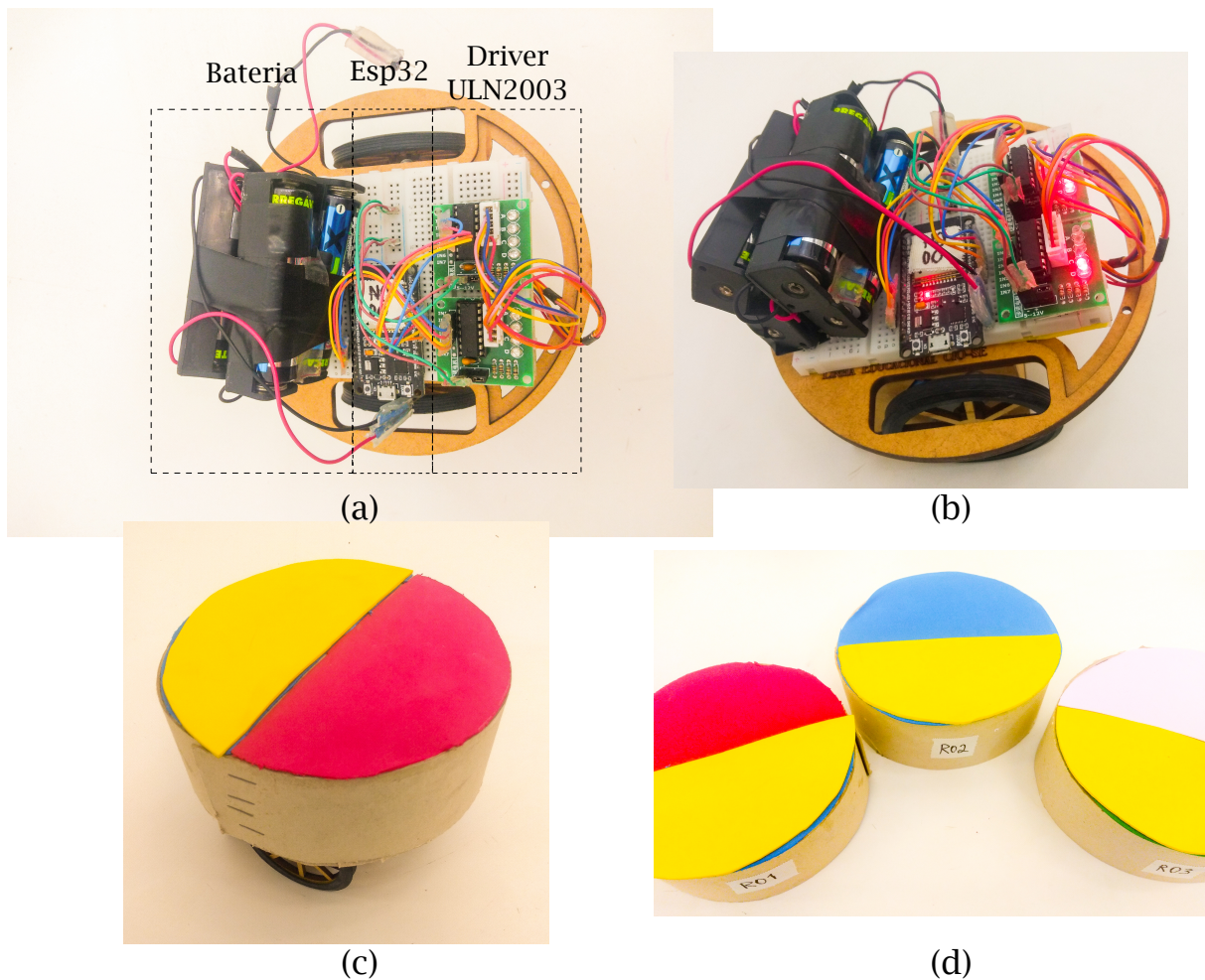


Figura 6.23: Robô utilizado como nó móvel, em (a) tem-se os seus módulos, (b) vista em perspectiva sem a cobertura de identificação, (c) vista em perspectiva com a cobertura de identificação do nó e (d) coberturas utilizadas para os nós.

O pacote de comunicação adotado, apresentado na Figura 6.24, é composto por um caracter de inicialização, seguido, para cada um dos nós móveis, por um byte associado ao sentido de giro das rodas (dado pela composição de sentidos horário e anti-horário necessários para gerar os movimentos andar frente, andar fundo, girar para direita ou girar para esquerda) e, posteriormente, as velocidades de roda direita e esquerda. O sistema de alimentação do nó é dado por um conjunto de baterias de lítio 18650 de 3,7 V 3800 mAh. Sendo os *drivers* do motor alimentados por 3 (três) baterias em série e uma quarta que supri o microcontrolador.

Vale ressaltar que a execução entre pulsos requer um tempo de 2 ms, as ações de controle de velocidade variam entre 0-255 pulsos levando um tempo de 510ms para executar o comando. Sendo assim foi obtido um tempo de amostragem de 720ms para contemplar os demais processamentos por parte do supervisor.

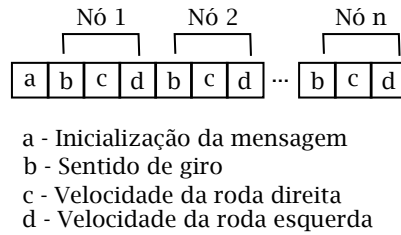


Figura 6.24: Pacote de comunicação adotado para o sistema de múltiplos nós móveis (robôs), apresentando o campo de inicialização da mensagem (a) e três campos para cada nó que definem o sentido de giro do movimento requerido (b) e as velocidades da roda direita e esquerda (c e d).

6.8.2 Características da rede de sensores sem fios

A rede híbrida desenvolvida adota o protocolo ESP-NOW. O posicionamento dos nós estáticos foi definido manualmente sobre a área de interesse (área disponível para experimentos do laboratório) de modo a ter uma subrede e nós isolados. Outra restrição é que toda a disposição dos nós pudessem ser capturada pela câmera de monitoramento e identificação dos nós. Um computador externo funciona como uma central de recolhimento e processamento, sem uso de *gateway*. O computador é responsável por enviar requerimentos de comunicação aos nós estáticos e móveis que retornam um *byte* de confirmação indicando que está na rede. A abordagem adotada para as comunicações foi direcionada a enviar uma mensagem direta para cada um dos nós e aguardar o seu retorno, o tempo de envio e recepção para cada um dos nós da rede de modo a ter uma comunicação confiável foi obtido experimentalmente com tempo de 10 *ms* entre mensagens. Como objetivo foi planejado ter 10 nós totais na rede, isso levaria a 100ms, que é um tempo inferior, se comparado a realização das ações de comando de velocidade.

O nó sensor estático é apresentado na Figura 6.25(a) e contempla o microcontrolador, transmissor, antena e sua respectiva bateria, dado que o experimento está voltado apenas a sua comunicação, não sendo considerada a instrumentação para o sensoriamento de alguma variável de ambiente. Os nós estáticos foram omitidos, para reduzir a quantidade de obstáculos na cena, dado que os robôs rastejam e poderiam deslocá-los durante os experimentos. Isso permite dá foco a estratégia de navegação proposta. Na Figura 6.25(b) é apresentado o transmissor e receptor de dados para o supervisor que faz uso do computador, Figura 6.25(c).

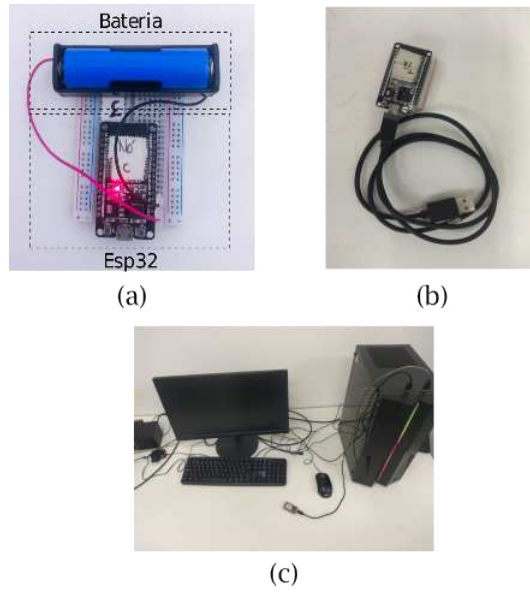


Figura 6.25: (a) Nó sensor, (b) transmissor/receptor e (c) computador utilizado como supervisor.

6.8.3 Experimento

A configuração experimental é apresentada através da Figura 6.26. Nela pode ser observado o computador que aloca o sistema supervisor, o transmissor/receptor da rede, a câmera que auxilia na identificação da pose dos nós móveis, bem como na identificação dos obstáculos fixos e acompanhamento da navegação durante o processo de busca e integração. Já na Figura 6.27 é apresentada uma cena com os obstáculos identificados na cor verde, a área de interesse limitada pelos símbolos + e os nós estáticos pelos pontos pretos.

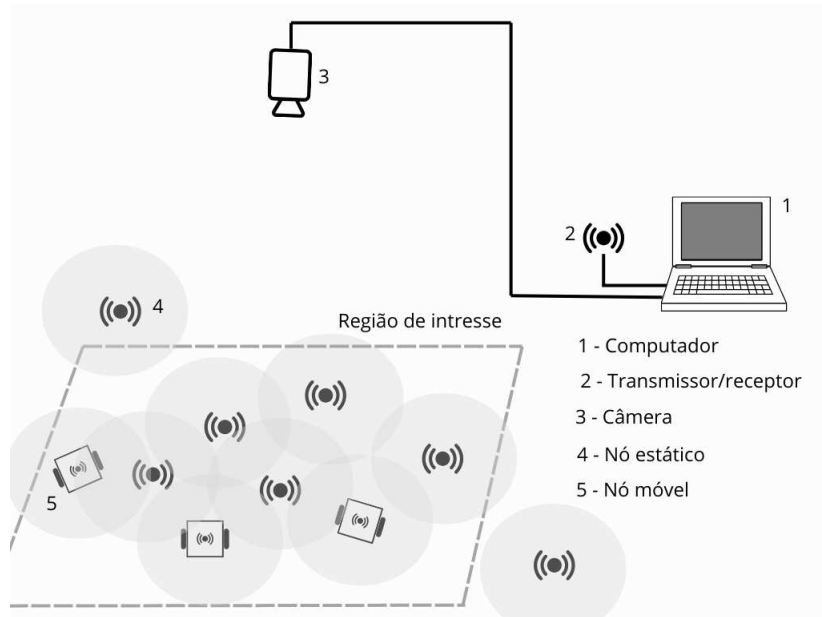


Figura 6.26: Configuração do experimento.



Figura 6.27: Cena da configuração experimental obtida com a câmera. Em verde, tem-se os obstáculos, os símbolos de '+' representam os limites da área de interesse e os pontos pretos em menor proporção a posição dos nós estáticos definidos manualmente.

6.9 Experimento prático 1: Navegação com obstáculos

Este experimento visa avaliar a integração no cenário com obstáculos. Dois nós móveis são inseridos na rede. Na Figura 6.28(a) é apresentada a inicialização da rede e na Figura 6.28(b) tem-se a disposição em ambiente real. Nas Figura 6.28(c) e Figura 6.28(d) são apresentadas a navegação de cada um dos nós móveis. Na Figura 6.28(e) é apresentada a disposição final fornecida pelo sistema de monitoramento após a navegação e integração

em ambiente real. Por fim, a Figura 6.28(f) traz as ações de controle linear e angular realizadas pelos nós móveis, durante a navegação no processo de busca e integração. Sendo que pode ser observado que o nó 9 apresenta ações de controle angular mais variantes em virtude do controlador de desvio de obstáculo.

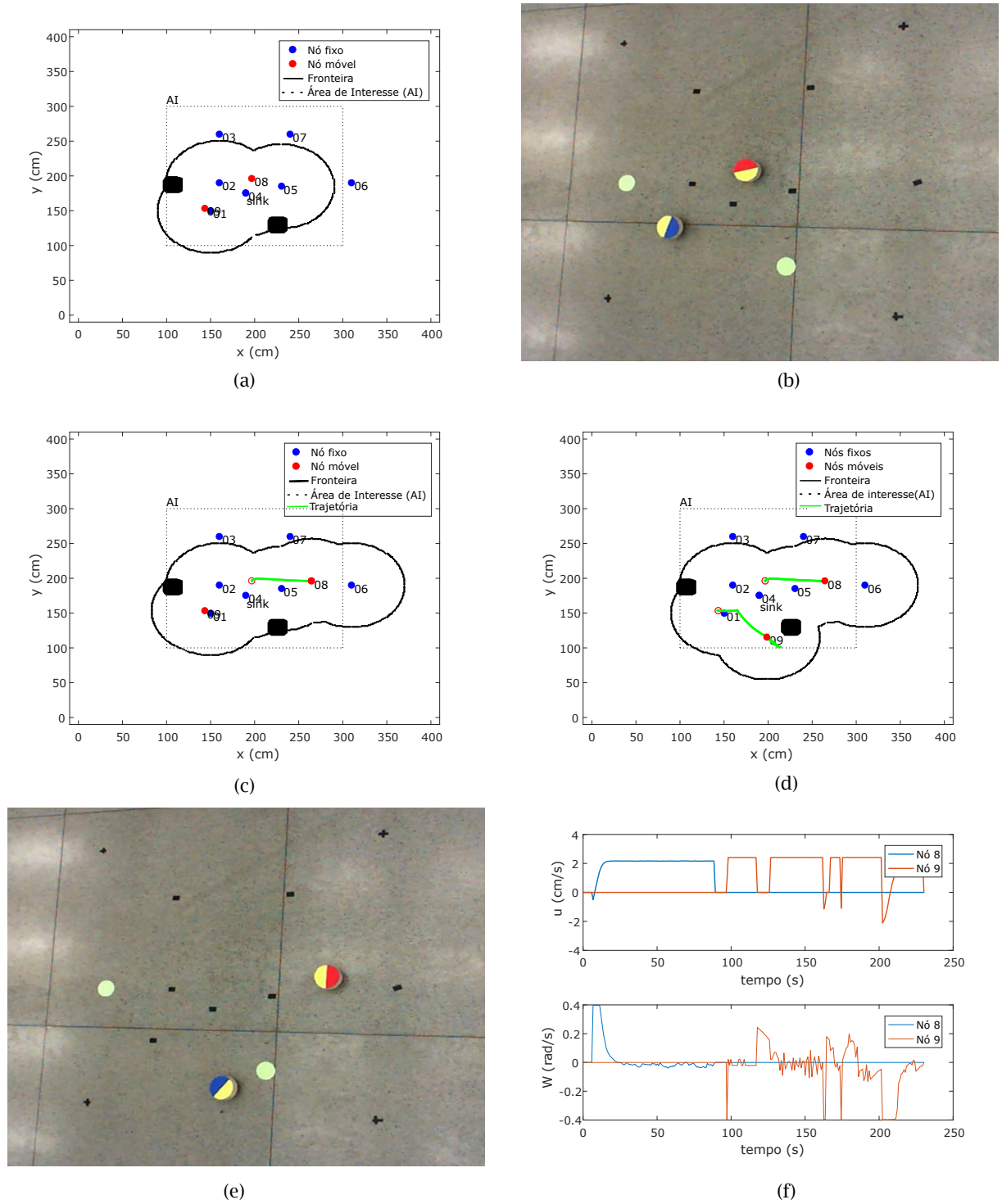


Figura 6.28: Experimento 1, (a) inicialização da rede, (b) disposição inicial em ambiente real, (c) disposição final da rede, (d) disposição final em ambiente real e (e) ações de controle.

Por meio da Figura 6.29(a) são apresentadas as funções de Lyapunov durante o experimento, na qual pode ser observado o acionamento do controlador de seguir caminho, representado por V_1 , e o controlador de desvio de obstáculo V_2 . Na Figura 6.29(b) é

apresentada a função de Lyapunov com a componente de distância ρ dividida por 100, isso permite retratar melhor o efeito da componente angular durante o experimento e alterações em seu *setpoint*. Dado que sua parcela na função de Lyapunov é o erro angular que varia de $[0 - 2\pi]$, valor muito pequeno quando comparado com as distâncias obtidas entre o nó móvel e a fronteira. Por conseguinte, na Figura 6.29(c), são apresentados os estados que cada nó móvel executou durante o experimento, como os estados 1 (não integrado à rede), 2 (integrado à rede), 3 (em navegação) e 8 (atuando como roteador), sendo que o segundo agente perdeu a comunicação passando pelo estado estado 5 (desviar de obstáculo sem comunicação com a rede), e ultrapassando o tempo limite estipulado, acionando o estado 7 de retorno à rede. Já na Figura 6.29(d) os eventos disparados condizem com as transições para os estados anteriormente descritos.

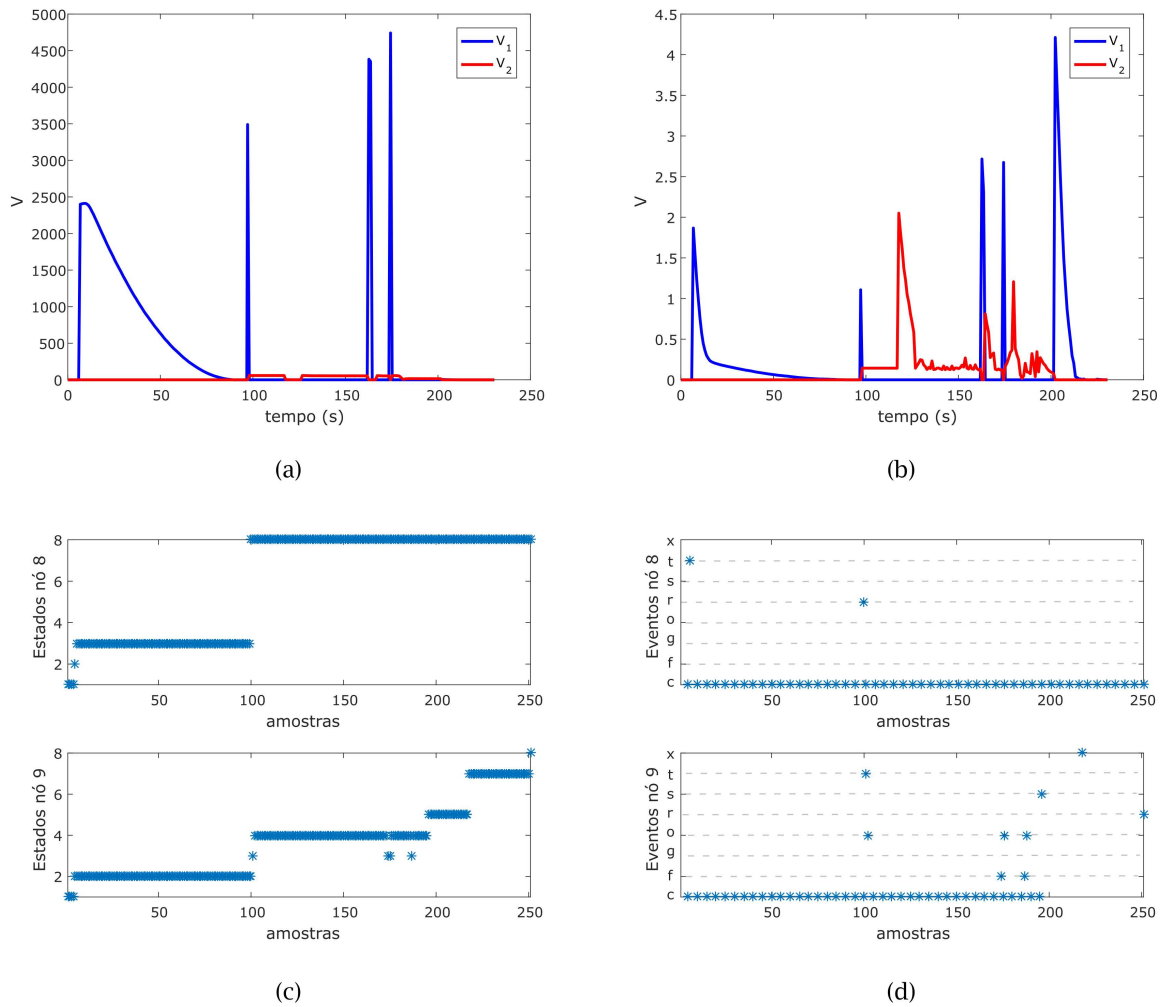


Figura 6.29: Experimento 1, (a) Funções de Lyapunov, (b) Funções de Lapunov atenuada, (c) Estados e (d) eventos dos nós móveis.

Na Tabela 6.8 são apresentadas as métricas para este experimento, denominado Exp1, na qual observa-se um incremento na cobertura de 59,1%, na conectividade de 16,7% com

a integração de 1 nó. O tempo de navegação foi de 230,5s e a distância total percorrida pelos nós foi de 199,4 *cm*.

6.10 Experimento prático 2: Navegação com identificação de obstáculo interno à rede

Este experimento 2 objetiva avaliar a integração no cenário no qual o algoritmo considera o segundo agente móvel como obstáculo fixo interno à rede, desviando do mesmo. Na Figura 6.30(a) é apresentada a inicialização da rede e na Figura 6.30(b) tem-se a disposição em ambiente real. Nas Figura 6.30(c) e Figura 6.30(d) são apresentadas a navegação de cada um dos nós móveis, na Figura 6.30(e) é apresentada a disposição final fornecida pelo sistema de monitoramento após a navegação em ambiente real. Por fim, a Figura 6.30(f) traz as ações de controle linear e angular realizadas pelos nós móveis, durante a navegação no processo de busca e integração. Sendo que pode ser observado que o nó 9 apresenta ações de controle angular mais expressivas em virtude das transições de *setpoints* enquanto navega sobre a fronteira de conectividade.

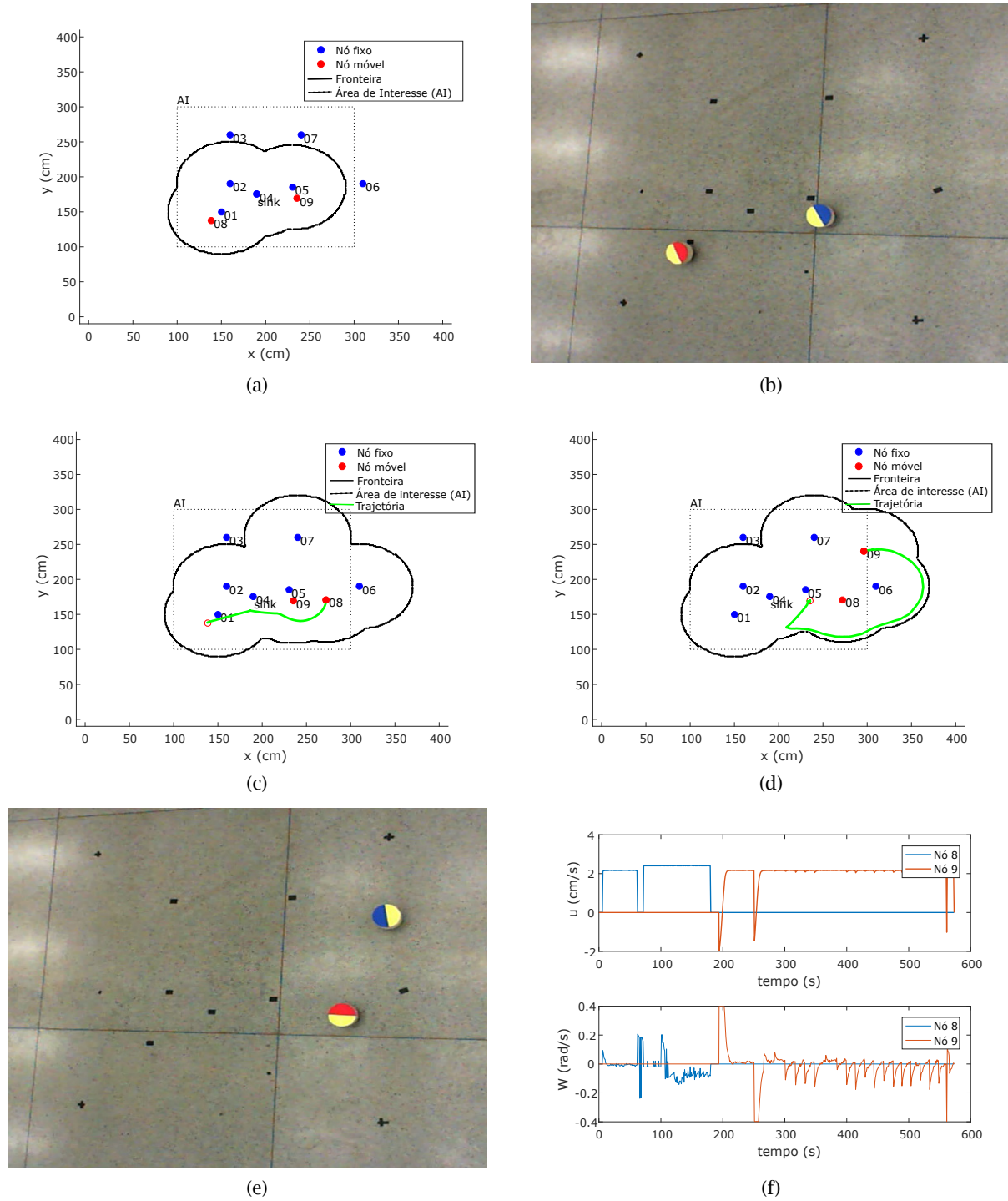


Figura 6.30: Experimento 2, (a) inicialização da rede, (b) disposição inicial em ambiente real, (c) disposição final da rede, (d) disposição final em ambiente real e (e) ações de controle.

Mediante a Figura 6.31(a) são apresentadas as funções de Lyapunov durante o experimento, na qual pode ser observado os acionamentos expressivos (amplitudes elevadas) do controlador de seguir caminho, representado por V_1 , que refere-se ao início da navegação de cada agente móvel. Na Figura 6.31(b) é apresentada a função de Lyapunov

atenuada, em que pode ser observado que apenas o nó 8 utilizou o controlador de desvio de obstáculos. Na Figura 6.31(c), são apresentados os estados que cada nó móvel transitou durante o experimento, destacando os estados 1 (não integrado à rede), 2 (integrado à rede), 3 (em navegação), 4 (desvio de obstáculo em comunicação com a rede) e 8 (atuando como roteador). Já na Figura 6.31(d) tem-se os eventos disparados condizentes com as transições para os estados anteriormente descritos.

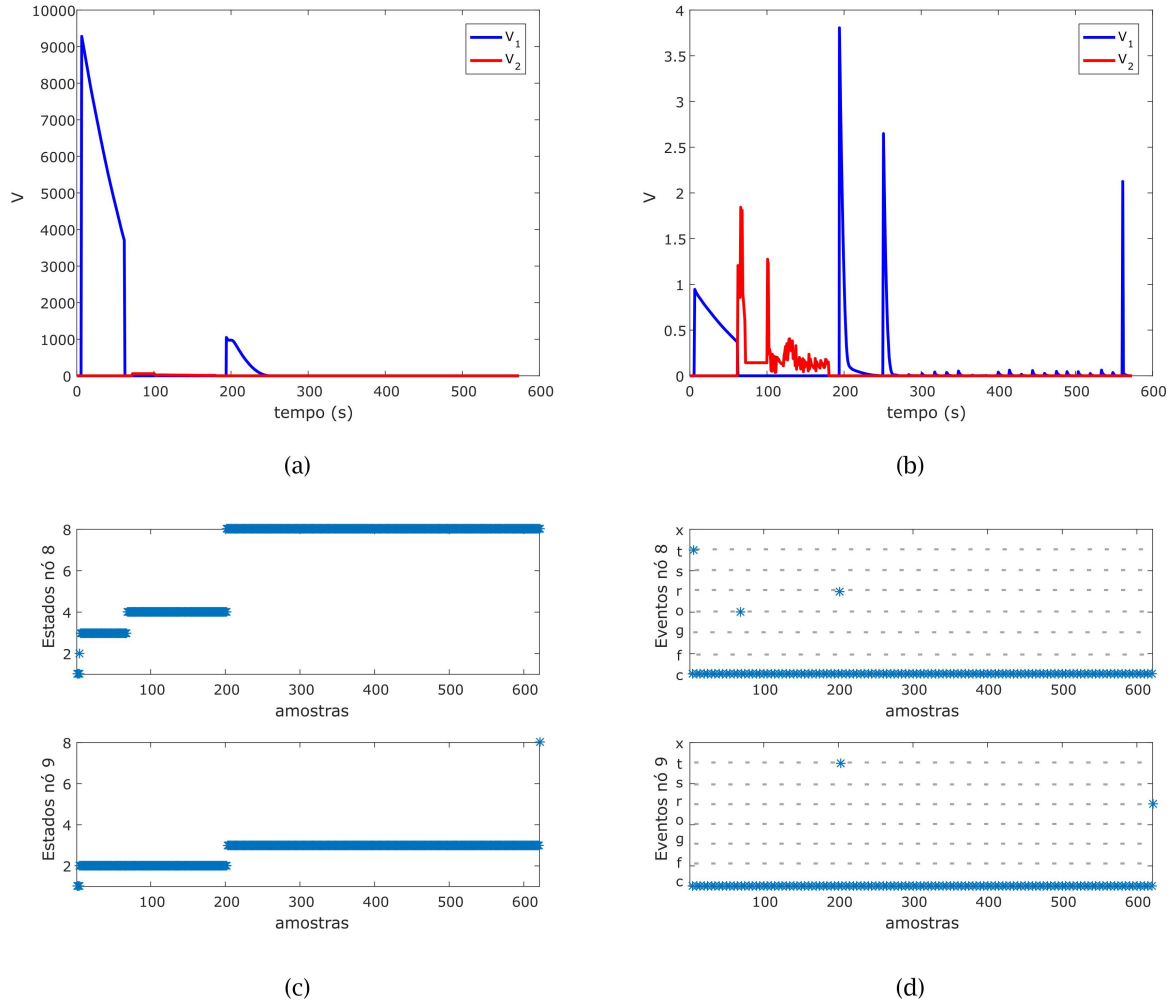


Figura 6.31: Experimento 2, (a) Funções de Lyapunov, (b) Funções de Lapunov atenuada, (c) Estados e (d) eventos dos nós móveis.

Reutilizando a Tabela 6.8, são apresentadas as métricas para este experimento, denominado Exp2, na qual observa-se um incremento na cobertura de 52,1%, na conectividade de 33,3% com a integração de dois nós. O tempo de navegação foi de 573,3s e a distância total percorrida pelos nós foi de 517,3 *cm*.

6.11 Experimento real 3: Navegação com obstáculo identificado na fronteira

Este experimento 3 visa avaliar a identificação de obstáculo quando o nó já se encontra navegando pela fronteira. Essa condição classifica o obstáculo como de fronteira. Na Figura 6.32(a) é apresentada a inicialização da rede e na Figura 6.32(b) tem-se a respectiva disposição em ambiente real. Já nas Figura 6.32(c) Figura 6.32(d) são apresentadas a navegação de cada um dos nós móveis, na Figura 6.32(e) é apresentada a disposição final fornecida pelo sistema de monitoramento após a navegação em ambiente real. Por fim, na Figura 6.32(f) são apresentadas as ações de controle linear e angular realizadas. Sendo que pode ser observado que o nó 8 apresenta ações de controle angular mais grosseiras em virtude do seguimento da fronteira e do desvio de obstáculo. Diferente do nó 9 que não sofre de alterações de *sepoint* na etapa de aproximação da fronteira apresentando uma velocidade angular nula.

Já na Figura 6.33(a) são apresentadas as funções de Lyapunov durante o experimento. Pode ser observado que inicialmente surge a ação de desvio de obstáculo, em virtude da supressão do acionamento do controlador de seguir caminho, devido o mesmo já se encontrar próximo da fronteira, diferentemente do nó 9 que se encontra distante da fronteira gerando uma amplitude elevada no acionamento do controlador de seguir fronteira. Na Figura 6.31(b), através da função de Lyapunov atenuada é perceptível que foi gerado o acionamento primeiramente do controlador de seguir caminho, mantido ativo até o nó encontrar o obstáculo sobre a fronteira. Por conseguinte, na Figura 6.31(c), são apresentados os estados que cada nó móvel executou durante o experimento, destacando os estados 1 (não integrado à rede), 2 (integrado à rede), 3 (em navegação), 4 (desvio de obstáculo por dentro da rede), 5 (desvio de obstáculo por fora da rede), estouro do tempo e acionamento do estado 7 para retorno à rede e 8 (tornando-se roteador). Já na Figura 6.31(d) tem-se os eventos disparados condizentes com as transições para os estados anteriormente descritos.

Na Tabela 6.8, também são apresentadas as métricas para este experimento, identificado como Exp3, na qual observa-se um incremento na cobertura de 58,3%, na conectividade de 16,7% com a integração de dois nós. O tempo de navegação foi de 194,8s e a distância total percorrida pelos nós foi de 154,0 *cm*.

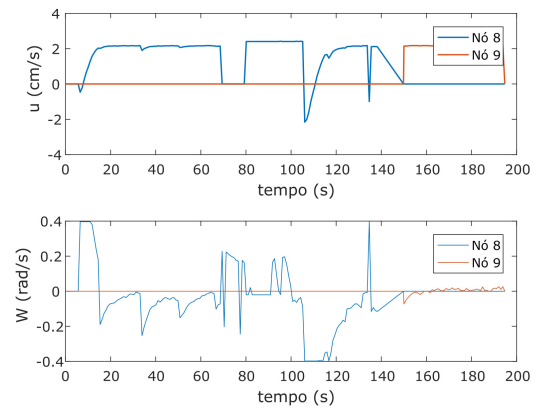
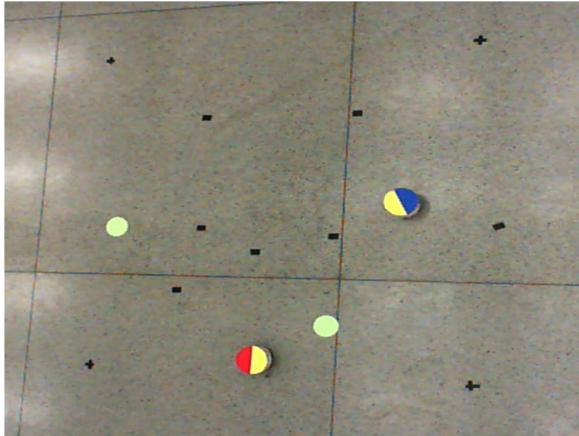
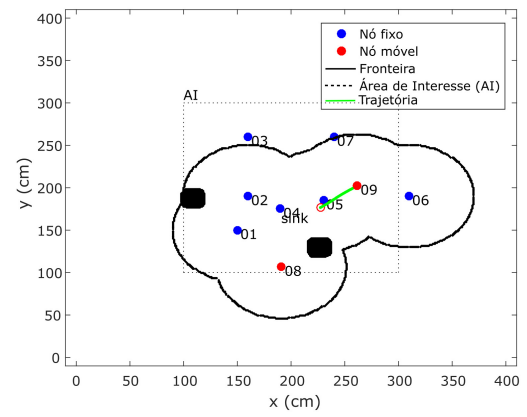
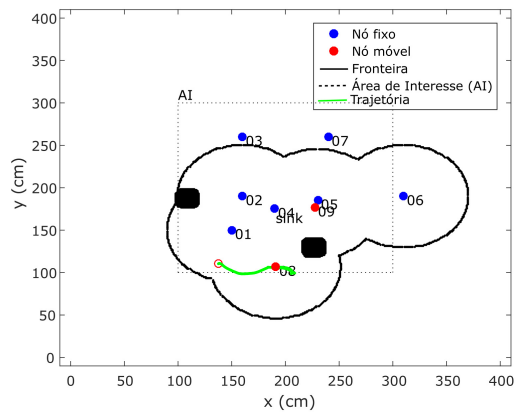
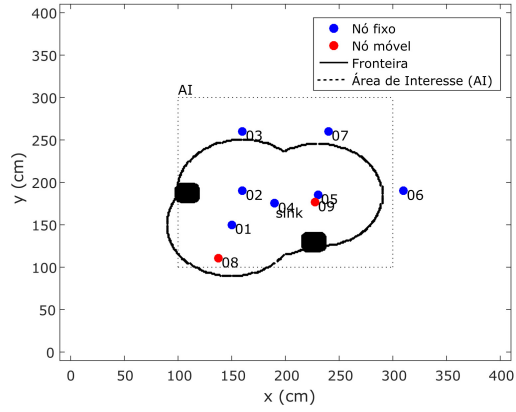


Figura 6.32: Experimento 3, (a) inicialização da rede, (b) disposição inicial em ambiente real, (c) disposição final da rede, (d) disposição final em ambiente real e (e) ações de controle.

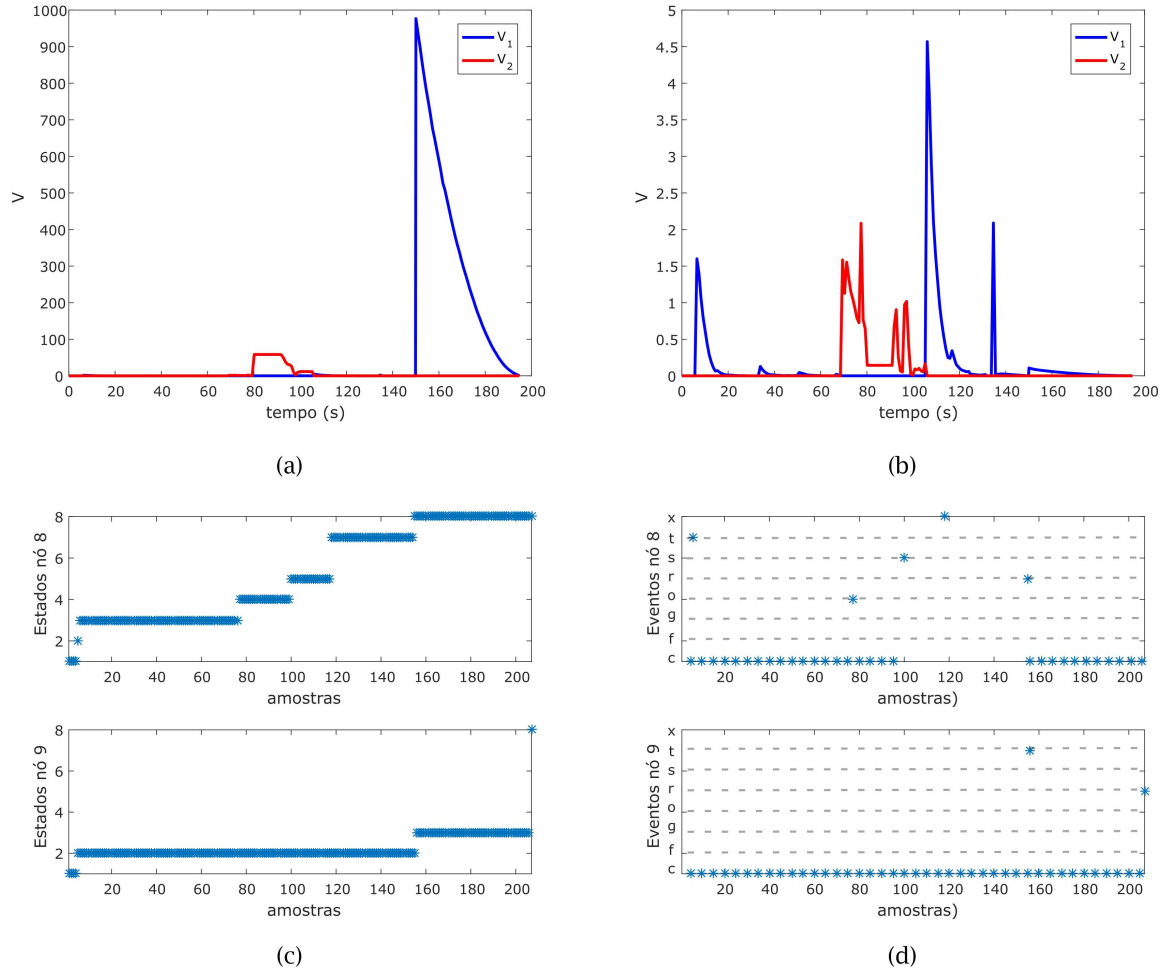


Figura 6.33: Experimento 3, (a) Funções de Lyapunov, (b) Funções de Lapunov atenuada, (c) Estados e (d) eventos dos nós móveis.

Tabela 6.8: Experimentos reais.

Reference	Exp1	Exp2	Exp3
Cobertura (%)	68,2	82,3	68,7
Incremento da Cobertura (%)	15,6	33,6	16,4
Conectividade (%)	77,8	88,9	77,8
Incremento da Conectividade (%)	16,7	33,3	16,7
Número de nós integrados	1,0	2,0	1,0
Tempode execução da tarefa (s)	271,5	655,7	233,2
Distância percorrida dos Nós (cm)	199,5	517,3	154,0
Número de movimentos dos nós	2,0	2,0	2,0

Através destes experimentos reais, foi possível explorar as condições proposta com a abordagem desta tese através de um processo de busca e integração de nós estáticos

isolados em virtude do emprego aleatórios. As condições avaliadas foram seguir caminho pela fronteira de conectividade estimada, perda de comunicação temporária e retorno à rede e os desvios de obstáculos, os identificando como de fronteira e interno a rede.

Capítulo 7

Conclusões

A operação de RSSF em ambiente inóspito é de fundamental importância, porém o emprego dos nós através de lançamentos prejudicam fatores de qualidade de serviços que não são garantidos com esta metodologia, a exemplo da conectividade e da cobertura da AI. Esta distribuição resulta em nós e sub-redes isoladas à margem da rede operante.

Nesta tese foi investigada a aplicação de nós móveis que constituem uma rede híbrida, em meios aos nós estáticos, e auxiliam na busca por estes nós e agrupamentos. Um algoritmo de busca pela fronteira de conectividade é proposto, com permissão de perdas momentâneas do nó móvel e garantia de retorno à rede. O processo de coordenação é desenvolvido com a criação de um sistema supervisor baseado em sistemas a eventos discretos. Esta abordagem contribui para a navegação de nós sensores móveis em RSSF, aspecto negligenciado para aplicações práticas em metodologias encontradas na literatura.

Para melhor caracterizar o emprego de nós neste tipo de cenário foi proposto, adicionalmente, um modelo que leva em consideração a influência do vento na distribuição, que abre uma nova vertente de estudos sobre o emprego de nós em RSSF.

A abordagem proposta baseada na exploração da fronteira de conectividade, através da navegação do nó móvel sobre a mesma é comparada em simulação com as abordagens baseadas no Diagrama de Voronoi e Forças Virtuais. Foi verificado que a abordagem proposta apresenta desempenho similar à abordagem de Voronoi, e ambas superior à abordagem baseada em Forças virtuais. Para isto, foram exploradas a busca e exploração em cenários com baixa dispersão dos nós, com alta dispersão, situações de topologia não convexa e cenários com obstáculos.

A capacidade de navegar sobre a fronteira da abordagem proposta permite integrar nós em toda vizinhança e não apenas aqueles internos à área de interesse. Através dos experimentos, foi possível verificar que o desempenho quanto à conectividade e número de nós integrados ao fim do processo de busca foi superior às demais abordagens.

Porém, o tempo de execução da tarefa e distância percorrida por todos os nós são maiores que as demais. A abordagem de Voronoi e Forças Virtuais, geralmente, realizarem um deslocamento cruzando internamente a rede até a fronteira. O maior deslocamento e

tempo gasto retratam um maior gasto energético. Contudo, a abordagem de exploração de fronteira de conectividade apresentou um número inferior de requerimentos de mobilidade de nós móveis para obtenção de desempenho similar à abordagem de Voronoi (experimentos 1, 2 e 3) e superior à abordagem de Forças Virtuais (experimento 4).

A cobertura resultante da abordagem de exploração de fronteira se apresentou menor, pois esta métrica é contabilizada pela cobertura interna da área de interesse, ambiente de atuação restrita dos demais algoritmos.

Portanto, pode ser destacado que a abordagem de exploração de fronteiras apresentou como vantagens, o tratamento da perda de comunicação do nó móvel com a rede, restrito a navegar por um tempo limite nesta condição e coordenado a retornar, liberdade de integração de nós em todas as direções e não apenas na área de interesse, aspectos não inclusos nas abordagens comparativas, bem como a capacidade de desviar de obstáculos no ambiente, característica incorporada ao método de Forças Virtuais. Sendo que a força resultante sobre o nó móvel pode apresentar mínimos locais, com possibilidade de não conclusão da tarefa.

Como trabalhos futuros podem ser analisadas outras contribuições ao modelo de lançamento de nós proposto, levando-se em consideração o emprego em ambiente aquático e colisão com obstáculos ou solo no lançamento dos nós. A estabilidade do chaveamento entre os controladores utilizados deve ser analisada para se ter uma garantia da estabilidade do sistema. A abordagem proposta também pode ser avaliada quanto ao tratamento de buracos e quebras na rede que surgem durante seu tempo de vida e impactos causados no gasto energético da rede em função da operação dos nós móveis.

Capítulo 8

Produção Bibliográfica

Até o presente momento e durante o desenvolvimento da pesquisa, alguns artigos foram publicados.

Farias, Wesley Alves, Raimundo Carlos Silvério Freire, Elyson Ádan Nunes Carvalho, José Gilmar Nunes de Carvalho Filho, Lucas Molina, and Eduardo Oliveira Freire. "Search and Integration of Nodes in Hybrid Wireless Sensor Networks by Exploring the Connectivity Frontier." *IEEE Sensors Journal* (2024).

Sousa, Rodrigo Passos, Daniel Augusto Santos Franco, Wesley Alves Farias, David Oliveira Santos, Lázaro Alberto de Araújo Menezes, and Lucas Molina. "Design of Cost-Aware Open-Loop Controller For Non-Linearity Compensation Without Embedded Sensors Using Computer Vision." In *2023 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2023 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2023 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pp. 200-205. IEEE, 2023.

Referências Bibliográficas

- [1] RM Silva, JS; Silva e B Boavida. *Redes de Sensores Sem Fios*. FCA - Editora de Informática, 2016.
- [2] Mourad Ouadou, Ouadoudi Zytoune e Driss Aboutajdine. Wireless charging using mobile robot for lifetime prolongation in sensor networks. In *2014 Second World Conference on Complex Systems (WCCS)*, pages 225–230. IEEE, 2014.
- [3] Christos G Cassandras e Stephane Lafortune. *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [4] José Eduardo Ribeiro Cury. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. *V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, page 26, 2001.
- [5] Eduardo Oliveira Freire. *Controle de robôs móveis por fusão de sinais de controle usando filtro de informação descentralizado*. PhD thesis, Universidade Federal do Espírito Santo-UFES, 2002.
- [6] Juan Marcos Toibero, Flavio Roberti, Fernando Auat Cheein, Carlos Soria e Ricardo Carelli. Stable switching control of wheeled mobile robots. *Mobile Robots Navigation*, pages 379–400, 2010.
- [7] Hailong Huang, Andrey V Savkin, Ming Ding e Chao Huang. Mobile robots in wireless sensor networks: A survey on tasks. *Computer Networks*, 148:1–19, 2019.
- [8] Juergen Rochol. *Sistemas de comunicação sem fio: conceitos e aplicações*. Bookman Editora, 2018.
- [9] Xi Chen. *Randomly Deployed Wireless Sensor Networks*, volume 1. Elsevier, 2020.
- [10] Dionisis Kandris, Christos Nakas, Dimitrios Vomvas e Grigorios Koulouras. Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. *Applied system innovation*, 3(1):14, 2020.
- [11] Anitha Christy Angelin e Salaja Silas. A comparative study of coverage hole detection techniques in wireless sensor networks. *Engineering Proceedings*, 59(1):5, 2023.

- [12] Ramesh Kumar, Tarachand Amgoth e Dipak Kumar Sah. Deployment of sensor nodes for connectivity restoration and coverage maximization in wsns. In *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, pages 209–213. IEEE, 2021.
- [13] Mr Sachin Santu Shende. A review on wireless sensor network: Its applications and challenges. *International Journal of Computational Research in Engineering and Science*, 1(01):18–25, 2023.
- [14] Zheyuan Ning, Hao Wang, Hao Luo, Yuchen Jiang, Mingyi Huo e Zhiwen Chen. A distributed connectivity optimization method for coverage control of the multi-agent system. In *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1–6. IEEE, 2023.
- [15] Shaimaa M Mohamed, Haitham S Hamza e Iman Aly Saroit. Coverage in mobile wireless sensor networks (m-wsn): A survey. *Computer Communications*, 110:133–150, 2017.
- [16] Xueyuan Wang e M Cenk Gursoy. Robust and decentralized reinforcement learning for uav path planning in iot networks. *arXiv preprint arXiv:2312.06250*, 2023.
- [17] Stefano Basagni, Alessio Carosi, Chiara Petrioli e Cynthia A Phillips. Moving multiple sinks through wireless sensor networks for lifetime maximization. In *2008 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, pages 523–526. IEEE, 2008.
- [18] Sheng Zhang, Jie Wu e Sanglu Lu. Collaborative mobile charging. *IEEE Transactions on Computers*, 64(3):654–667, 2014.
- [19] Liang He, Linghe Kong, Yu Gu, Jianping Pan e Ting Zhu. Evaluating the on-demand mobile charging in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 14(9):1861–1875, 2014.
- [20] Angel Stanoev, Sonja Filiposka, Visarath In e Ljupco Kocarev. Cooperative method for wireless sensor network localization. *Ad Hoc Networks*, 40:61–72, 2016.
- [21] Jamal N Al-Karaki e Amjad Gawanmeh. The optimal deployment, coverage, and connectivity problems in wireless sensor networks: revisited. *IEEE Access*, 5:18051–18065, 2017.
- [22] Kyle A Luthy, Edward Grant e Thomas C Henderson. Leveraging rssi for robotic repair of disconnected wireless sensor networks. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3659–3664. IEEE, 2007.

- [23] Tommaso Melodia, Dario Pompili e Ian F Akyildiz. A communication architecture for mobile wireless sensor and actor networks. In *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, volume 1, pages 109–118. IEEE, 2006.
- [24] Wesley Alves Farias, Raimundo Carlos Silvério Freire, Elyson Ádan Nunes Carvalho, José Gilmar Nunes de Carvalho Filho, Lucas Molina e Eduardo Oliveira Freire. Search and integration of nodes in hybrid wireless sensor networks by exploring the connectivity frontier. *IEEE Sensors Journal*, 2024.
- [25] Ronald C Arkin, Ronald C Arkin et al. *Behavior-based robotics*. MIT press, 1998.
- [26] Elyson Ádan Nunes Carvalho et al. *Estabilidade de sistemas chaveados baseados em objetivo de controle principal*. PhD thesis, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, 2012.
- [27] WPMH Heemels, B De Schutter, J Lunze e M Lazar. Stability analysis and controller synthesis for hybrid dynamical systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1930):4937–4960, 2010.
- [28] Valerie Galluzzi e Ted Herman. Survey: discovery in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(1):271860, 2012.
- [29] Juan Marcos Toibero, Flavio Roberti, Fernando Auat Cheein, Carlos Soria, Ricardo Carelli e A Barrera. Stable switching control of wheeled mobile robots. *Mobile Robots Navigation*, pages 379–400, 2010.
- [30] Alexey S Matveev, Chao Wang e Andrey V Savkin. Real-time navigation of mobile robots in problems of border patrolling and avoiding collisions with moving and deforming obstacles. *Robotics and Autonomous systems*, 60(6):769–788, 2012.
- [31] Mohammed Farsi, Mostafa A Elhosseini, Mahmoud Badawy, Hesham Arafat Ali e Hanaa Zain Eldin. Deployment techniques in wireless sensor networks, coverage and connectivity: A survey. *IEEE Access*, 7:28940–28954, 2019.
- [32] Ngoc-Thanh Dinh e Younghun Kim. Auto-configuration in wireless sensor networks: A review. *Sensors*, 19(19):4281, 2019.
- [33] Nor Azlina Ab Aziz, Kamarulzaman Ab Aziz, Wan Zakiah Wan Ismail et al. Coverage strategies for wireless sensor networks. *World academy of science, Engineering and technology*, 50:145–150, 2009.
- [34] Amr El-Mougy, Mohamed Ibnkahla, Ghaith Hattab e Waleed Ejaz. Reconfigurable wireless networks. *Proceedings of the IEEE*, 103(7):1125–1158, 2015.

- [35] Mustapha Reda Senouci e Abdelhamid Mellouk. *Deploying wireless sensor networks: theory and practice*. Elsevier, 2016.
- [36] Jahanvi Sharma e Arshnoor Bhutani. Review on deployment, coverage and connectivity in wireless sensor networks. In *2022 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing (AIC)*, pages 802–807. IEEE, 2022.
- [37] D Praveen Kumar, Tarachand Amgoth e Chandra Sekhara Rao Annavarapu. Machine learning algorithms for wireless sensor networks: A survey. *Information Fusion*, 49:1–25, 2019.
- [38] Zehua Wang, Shubin Wang e Haifeng Tang. Wireless sensor network coverage optimization based on sparrow search algorithm. In *International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems*, pages 251–258. Springer, 2021.
- [39] Li Lv, Funan Peng, Weiru Chen e Jun Wang. Node deployment of wireless sensor networks based on moea/p algorithm. In *2021 13th international conference on communication software and networks (ICCSN)*, pages 173–178. IEEE, 2021.
- [40] Yu-Ning Chen, Wu-Hsiung Lin e Chiuyuan Chen. An effective sensor deployment scheme that ensures multilevel coverage of wireless sensor networks with uncertain properties. *Sensors*, 20(7):1831, 2020.
- [41] Yoshiaki Taniguchi, Tomoya Kitani e Kenji Leibnitz. A uniform airdrop deployment method for large-scale wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 9(3-4):182–191, 2011.
- [42] Monika Choudhary e Nitin Goyal. Node deployment strategies in underwater wireless sensor network. In *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, pages 773–779. IEEE, 2021.
- [43] Mustapha Reda Senouci, Abdelhamid Mellouk e Amar Aissani. Random deployment of wireless sensor networks: a survey and approach. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 15(1-3):133–146, 2014.
- [44] Saeed Karimi-Bidhendi, Jun Guo e Hamid Jafarkhani. Energy-efficient deployment in static and mobile heterogeneous multi-hop wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(7):4973–4988, 2021.
- [45] Demin Wang, Bin Xie e Dharma P Agrawal. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with gaussian distribution. *IEEE transactions on mobile computing*, 7(12):1444–1458, 2008.

- [46] Chunfeng Liu, Zhao Zhao, Wenyu Qu, Tie Qiu e Arun Kumar Sangaiah. A distributed node deployment algorithm for underwater wireless sensor networks based on virtual forces. *Journal of Systems Architecture*, 97:9–19, 2019.
- [47] Orhan Dagdeviren e Vahid Khalilpour Akram. The effect of random node distribution and transmission ranges on connectivity robustness in wireless sensor networks. In *2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [48] Xi Chen. *Randomly Deployed Wireless Sensor Networks*. Elsevier, 2020.
- [49] Vikrant Sharma, RB Patel, HS Bhadauria e D Prasad. Deployment schemes in wireless sensor network to achieve blanket coverage in large-scale open area: A review. *Egyptian Informatics Journal*, 17(1):45–56, 2016.
- [50] Alex Hinds, Michael Ngulube, Shaoying Zhu e Hussain Al-Aqrabi. A review of routing protocols for mobile ad-hoc networks (manet). *International journal of information and education technology*, 3(1):1, 2013.
- [51] Bing-Hong Liu, Ngoc-Tu Nguyen, Van-Trung Pham e Yue-Xian Lin. Novel methods for energy charging and data collection in wireless rechargeable sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, 30(5):e3050, 2017.
- [52] Enrico Natalizio e Valeria Loscri. Controlled mobility in mobile sensor networks: advantages, issues and challenges. *Telecommunication Systems*, 52(4):2411–2418, 2013.
- [53] Andrey V Savkin, Faizan Javed e Alexey S Matveev. Optimal distributed blanket coverage self-deployment of mobile wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 16(6):949–951, 2012.
- [54] José R Martinez-de Dios, K Lferd, Alberto de San Bernabé, Gabriel Núñez, Arturo Torres-González e Aníbal Ollero. Cooperation between uas and wireless sensor networks for efficient data collection in large environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 70(1):491–508, 2013.
- [55] Shihu Xiang e Jun Yang. Performance reliability evaluation for mobile ad hoc networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 169:32–39, 2018.
- [56] Halil Yetgin, Kent Tsz Kan Cheung, Mohammed El-Hajjar e Lajos Hanzo Hanzo. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):828–854, 2017.

- [57] Hang Li e Andrey V Savkin. An algorithm for safe navigation of mobile robots by a sensor network in dynamic cluttered industrial environments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 54:65–82, 2018.
- [58] Yaguang Lin, Xiaoming Wang, Fei Hao, Liang Wang, Lichen Zhang e Ruonan Zhao. An on-demand coverage based self-deployment algorithm for big data perception in mobile sensing networks. *Future Generation Computer Systems*, 82:220–234, 2018.
- [59] Carmelo Costanzo, Valeria Loscri, Enrico Natalizio e Tahiry Razafindralambo. Nodes self-deployment for coverage maximization in mobile robot networks using an evolving neural network. *Computer Communications*, 35(9):1047–1055, 2012.
- [60] Anuj K Gupta, Harsh Sadawarti e Anil K Verma. Performance analysis of manet routing protocols in different mobility models. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, 5(6):73–82, 2013.
- [61] Zhigang Wang, MengChu Zhou e Nirwan Ansari. Ad-hoc robot wireless communication. In *SMC’03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483)*, volume 4, pages 4045–4050. IEEE, 2003.
- [62] David B Johnson e David A Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile computing*, pages 153–181. Springer, 1996.
- [63] Stefano Basagni, Alessio Carosi, Emanuel Melachrinoudis, Chiara Petrioli e Z Maria Wang. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. *Wireless Networks*, 14(6):831–858, 2008.
- [64] Fatme El-Moukaddem, Eric Torng e Guoliang Xing. Mobile relay configuration in data-intensive wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile computing*, 12(2):261–273, 2011.
- [65] Liang Song e Dimitrios Hatzinakos. Architecture of wireless sensor networks with mobile sinks: Sparsely deployed sensors. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 56(4):1826–1836, 2007.
- [66] Ching-Ju Lin, Po-Lin Chou e Cheng-Fu Chou. Hcdd: hierarchical cluster-based data dissemination in wireless sensor networks with mobile sink. In *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*, pages 1189–1194, 2006.

- [67] YoungSang Yun e Ye Xia. Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay-tolerant applications. *IEEE Transactions on mobile computing*, 9(9):1308–1318, 2010.
- [68] Abdul Waheed Khan, Abdul Hanan Abdullah, Mohammad Hossein Anisi e Javed Iqbal Bangash. A comprehensive study of data collection schemes using mobile sinks in wireless sensor networks. *Sensors*, 14(2):2510–2548, 2014.
- [69] Sanay Abdollahzadeh e Nima Jafari Navimipour. Deployment strategies in the wireless sensor network: A comprehensive review. *Computer Communications*, 91:1–16, 2016.
- [70] Jacopo Banfi, Alberto Quattrini Li, Ioannis Rekleitis, Francesco Amigoni e Nicola Basilico. Strategies for coordinated multirobot exploration with recurrent connectivity constraints. *Autonomous Robots*, 42(4):875–894, 2018.
- [71] Filip Klaesson, Petter Nilsson, Aaron D Ames e Richard M Murray. Intermittent connectivity for exploration in communication-constrained multi-agent systems. In *2020 ACM/IEEE 11th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs)*, pages 196–205. IEEE, 2020.
- [72] Sameera Poduri e Gaurav S Sukhatme. Constrained coverage for mobile sensor networks. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, volume 1, pages 165–171. IEEE, 2004.
- [73] Shijian Li, Congfu Xu, Weike Pan e Yunhe Pan. Sensor deployment optimization for detecting maneuvering targets. In *2005 7th International Conference on Information Fusion*, volume 2, pages 7–pp. IEEE, 2005.
- [74] Qiang Li, Qiang Yi, Rongxin Tang, Xin Qian, Kai Yuan e Shiyun Liu. A hybrid optimization from two virtual physical force algorithms for dynamic node deployment in wsn applications. *Sensors*, 19(23):5108, 2019.
- [75] Jalal Habibi, Hamid Mahboubi e Amir G Aghdam. A gradient-based coverage optimization strategy for mobile sensor networks. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 4(3):477–488, 2016.
- [76] Guiling Wang, Guohong Cao, Piotr Berman e Thomas F La Porta. Bidding protocols for deploying mobile sensors. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(5):563–576, 2007.
- [77] Peyman Tirandazi, Atefeh Rahiminasab e MJ Ebadi. An efficient coverage and connectivity algorithm based on mobile robots for wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pages 1–23, 2022.

- [78] Chien-Fu Cheng e Chu-Chiao Hsu. The deterministic sensor deployment problem for barrier coverage in wsns with irregular shape areas. *IEEE Sensors Journal*, 22(3):2899–2911, 2021.
- [79] Jeng-Shyang Pan, Qing-Wei Chai, Shu-Chuan Chu e Ning Wu. 3-d terrain node coverage of wireless sensor network using enhanced black hole algorithm. *Sensors*, 20(8):2411, 2020.
- [80] Zahra Zarei e Mozafar Bag-Mohammadi. Coverage improvement using voronoi diagrams in directional sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, 11(3):111–119, 2021.
- [81] Tongxin Shu, Kevin Bradley Dsouza, Vijay Bhargava e Clarence de Silva. Using geometric centroid of voronoi diagram for coverage and lifetime optimization in mobile wireless sensor networks. In *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [82] Mahsa Sadeghi Ghahroudi, Alireza Shahrabi e Tuleen Boutaleb. Voronoi-based cooperative node deployment algorithm in mobile sensor networks. In *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, pages 1–5. IEEE, 2020.
- [83] Khelil Abdelkader e Beghdad Rachid. Esa: an efficient self-deplyment algorithm for coverage in wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, 98:40–47, 2016.
- [84] Khoulood Eledlebi, Dymitr Ruta, Hanno Hildmann, Fabrice Saffre, Yousof Al Hammadi e Abdel F Isakovic. Coverage and energy analysis of mobile sensor nodes in obstructed noisy indoor environment: A voronoi-approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 21(8):2745–2760, 2020.
- [85] Khoulood Eledlebi, Hanno Hildmann, Dymitr Ruta e AF Isakovic. A hybrid voronoi tessellation/genetic algorithm approach for the deployment of drone-based nodes of a self-organizing wireless sensor network (wsn) in unknown and gps denied environments. *Drones*, 4(3):33, 2020.
- [86] Aparajita Chowdhury, Debashis De, Anindita Raychaudhuri e Mohana Bakshi. Corrigendum to energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks based on voronoi-glowworm swarm optimization-k-means algorithm [adhoc networks volume 122 (november 2021) 102660]. *Ad Hoc Networks*, 139:102907, 2023.

- [87] Wajih Abdallah e Thierry Val. Genetic-voronoi algorithm for coverage of iot data collection networks. In *2020 30th International Conference on Computer Theory and Applications (ICCTA)*, pages 16–22. IEEE, 2020.
- [88] S Indu, Asok Bhattacharyya, Venu Kesham e Santhanu Chaudhury. Self deployment of mobile sensor network for optimal coverage. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(7):2968–2975, 2010.
- [89] Peyman Tirandazi, Atefeh Rahiminasab e MJ Ebadi. An efficient coverage and connectivity algorithm based on mobile robots for wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pages 1–23, 2023.
- [90] Ramesh Kumar, Tarachand Amgoth e Debjit Das. Obstacle-aware connectivity establishment in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 21(4):5543–5552, 2020.
- [91] Saunhita Sapre e S Mini. Optimized relay nodes positioning to achieve full connectivity in wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 99(4):1521–1540, 2018.
- [92] Abdelkader Khelil, Rachid Beghdad e Amar Khelloufi. 3ha: hybrid hole healing algorithm in a wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, pages 1–19, 2020.
- [93] Hamid Mahboubi, Jalal Habibi, Amir G Aghdam e Kamran Sayrafian-Pour. Distributed deployment strategies for improved coverage in a network of mobile sensors with prioritized sensing field. *IEEE Transactions on Industrial informatics*, 9(1):451–461, 2012.
- [94] Zhuofan Liao, Jianxin Wang, Shigeng Zhang, Jiannong Cao e Geyong Min. Minimizing movement for target coverage and network connectivity in mobile sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 26(7):1971–1983, 2014.
- [95] Dan O Popa, Harry E Stephanou, Chad Helm e Arthur C Sanderson. Robotic deployment of sensor networks using potential fields. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, volume 1, pages 642–647. IEEE, 2004.
- [96] Qin Wen, Xiao-Qiang Zhao, Yan-Peng Cui, Yao-Ping Zeng, Hong Chang e Yin-Juan Fu. Coverage enhancement algorithm for wsns based on vampire bat and improved virtual force. *IEEE Sensors Journal*, 22(8):8245–8256, 2022.

- [97] Pakarat Musikawan, Yanika Kongsorot, Paisarn Muneesawang e Chakchai So-In. An enhanced obstacle-aware deployment scheme with an opposition-based competitive swarm optimizer for mobile wsns. *Expert Systems with Applications*, 189:116035, 2022.
- [98] Mengjian Zhang, Jing Yang e Tao Qin. An adaptive three-dimensional improved virtual force coverage algorithm for nodes in wsn. *Axioms*, 11(5):199, 2022.
- [99] Yindi Yao, Ying Li, Dangyuan Xie, Shanshan Hu, Chen Wang e Yangli Li. Coverage enhancement strategy for wsns based on virtual force-directed ant lion optimization algorithm. *IEEE sensors journal*, 21(17):19611–19622, 2021.
- [100] Liangshun Wu, Junsuo Qu, Haonan Shi e Pengfei Li. Node deployment optimization for wireless sensor networks based on virtual force-directed particle swarm optimization algorithm and evidence theory. *Entropy*, 24(11):1637, 2022.
- [101] Lei Shi, Baoxian Zhang, Hussein T Mouftah e Jian Ma. Ddrp: an efficient data-driven routing protocol for wireless sensor networks with mobile sinks. *International Journal of Communication Systems*, 26(10):1341–1355, 2013.
- [102] Ketan Sabale e S Mini. Path planning mechanism for mobile anchor-assisted localization in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 165:52–65, 2022.
- [103] Chien-Fu Cheng, Chu-Chiao Hsu, Meng-Shiuan Pan, Gautam Srivastava e Jerry Chun-Wei Lin. A cluster-based barrier construction algorithm in mobile wireless sensor networks. *Physical Communication*, 54:101839, 2022.
- [104] Zannatul Naim e Md Imran Hossain. Performance analysis of aodv, dsdv and dsr in vehicular adhoc network (vanet). In *2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, pages 17–22. IEEE, 2019.
- [105] M Jahir Pasha, Madhavi Pingili, K Sreenivasulu, M Bhavsingh, Shaik Imam Saheb e Alaa Saleh. Bug2 algorithm-based data fusion using mobile element for iot-enabled wireless sensor networks. *Measurement: Sensors*, 24:100548, 2022.