



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

Gustavo Bueno Ferreira

## **Transporte cooperativo de objeto por multi-robôs**

Rio de Janeiro  
2022

Gustavo Bueno Ferreira

**Transporte cooperativo de objeto por multi-robôs**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nadia Nedjah

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luiza de Macedo Mourelle

Rio de Janeiro  
2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

F383 Ferreira, Gustavo Bueno.  
Transporte cooperativo de objeto por multi-robôs / Gustavo  
Bueno Ferreira. – 2022.  
113f.

Orientadora: Nadia Nedjah.  
Coorientadora: Luiza de Macedo Mourelle.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Inteligência coletiva -  
Teses. 3. Robôs - Sistemas de controle - Teses. 4. Algoritmos -  
Teses. 5. Sistemas auto-organizáveis - Teses. I. Nedjah, Nadia. II.  
Mourelle, Luiza de Macedo. III. Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 004.896:681.52

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou  
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Gustavo Bueno Ferreira

## **Transporte cooperativo de objeto por multi-robôs**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em: 14 de dezembro de 2022

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nadia Nedjah (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia, UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luiza de Macedo Mourelle (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia, UERJ

---

Prof. Dr. Bernardo Sotto-Maior Peralva  
Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, UERJ

---

Prof. Dr. Helon Vicente Hultmann Ayala  
Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio

Rio de Janeiro  
2022

## AGRADECIMENTOS

Primeiro agradecer à Deus pela vida, pela saúde, por todas as oportunidades concedidas a mim, e pela família maravilhosa que o Senhor me deu.

Agradeço às minhas orientadoras, as professoras Nadia Nedjah e Luiza de Macedo Mourelle, pelos ensinamentos e pela convivência durante o curso. Obrigado também pelas broncas e puxões de orelha nos momentos certos, os quais me ajudaram a concluir esta dissertação. E obrigado, principalmente, por me guiarem por todo esse caminho, cheio de incertezas e dificuldades.

Agradeço especialmente aos meus pais Waldemiro Ferreira Junior e Carmem Silvia Bueno Ferreira, pelo apoio incondicional durante toda a minha vida, fundamental para o meu sucesso até aqui. Agradeço por todo esse amor imensurável, que moldou a minha personalidade e o meu caráter.

Agradeço ao meu colega de mestrado Jalber pela troca de conhecimentos, pelo companheirismo e pelos momentos de descontração durante o curso.

Agradeço à FAPERJ pelo auxílio financeiro recebido durante este curso de mestrado, sem a qual não poderia ter desenvolvido este trabalho em tempo integral.

Ninguém vai bater mais forte do que a vida. Não importa como você bate e sim o quanto aguenta apanhar e continuar lutando. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha

*Sylvester Stallone (Rocky Balboa).*

## RESUMO

FERREIRA, Gustavo Bueno. *Transporte cooperativo de objeto por multi-robôs*. 2022. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

O transporte de objetos por um grupo de robôs pode ser vantajoso quando um objeto é muito grande ou muito pesado para ser efetivamente manipulado por um único robô. O transporte cooperativo requer a coordenação e sincronização de forças de empurre a serem exercidas pelos robôs. Neste trabalho, é proposto um novo algoritmo para o Transporte Cooperativo de Objeto por Impulsioneamento, chamado TCOI. O algoritmo possui quatro etapas. A primeira implementa a busca pelo objeto no mundo, também chamado de arena. A segunda etapa do algoritmo começa quando pelo menos um robô encontra o objeto. Em seguida, este recruta os demais robôs. Durante a terceira etapa cada robô primeiro, calcula a pose em que deve estar localizado para executar as ações de impulsionar, e depois se desloca para esta pose. Quando o posicionamento de todos os robôs atrás do objeto circular é concluído, a quarta etapa começa. A partir de então, os robôs começam a alternar entre ações de impulsionamento e posicionamento para manter o objeto dentro da trajetória de transporte esperada. Isso é executado até que o objeto seja alojado no local de destino predefinido. Neste trabalho, a implementação da etapa de busca pelo objeto é inspirada em duas estratégias. A primeira estratégia é a busca aleatória. Já a segunda estratégia imita o comportamento de colônias de formigas durante seu forrageamento por fontes de alimento, depositando feromônios ao longo dos caminhos percorridos. O TCOI é implementado em robôs de enxame GRITSBot, utilizando a plataforma Robotarium. Propõe-se investigar além do desempenho das duas estratégias de procura, o impacto do posicionamento dos robôs durante o impulsionamento, o impacto do número de robôs e o da dimensão e peso do objeto. Para avaliar o modelo proposto, o tempo de cada etapa e a distância percorrida pelo objeto são avaliados. Os resultados mostram que o método de procura, que imita o comportamento de colônias de formigas obtêm uma menor rota do que o método utilizando a busca aleatória. Na média, os resultados utilizando o comportamento das formigas apresentam uma redução na rota de 6,7%, para o deslocamento apenas para frente dos robôs, já para o deslocamento para frente/trás a redução na rota é de 52,35%. Na análise do impacto do posicionamento dos robôs, o ângulo máximo entre os robôs proporcionou um menor erro no comprimento do percurso do objeto, do que para os outros ângulos. Na média, os resultados apresentam uma redução do erro no comprimento do percurso do objeto de 75,76% entre o ângulo máximo e mínimo entre os robôs. Já na análise do impacto do número de robôs, foi possível constatar que quanto mais robôs impulsionar o objeto, além do mínimo necessário, mais rápida fica a etapa de transporte do objeto. A redução no tempo para transportar o objeto utilizando o número máximo e mínimo de robôs é de 829,77s. Por fim, na análise do impacto da dimensão e peso do objeto, foi confirmado que a quantidade mínima de robôs para impulsionar o objeto deve ser proporcional às esses valores.

Palavras-chave: Transporte cooperativo. Enxame de robôs. Inteligência de enxame.

## ABSTRACT

FERREIRA, Gustavo Bueno. *Cooperative transport of objects by multi-robots*. 2022. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Coordinated transport of objects by a robotic swarm can be advantageous when the object to be transported is too large and/or too heavy to be effectively handled by a single robot. Cooperative transport requires coordination and synchronization of the pushing forces, to be exerted by the robots in order for the object to be transported successfully. In this work, a new algorithm for Cooperative Transport of Object by Pushing, called TCOI, is proposed. The algorithm has four stages. The first stage implements the object search done by the robots. The second stage of the algorithm starts when at least one robot finds the object. It then recruits the other robots. During the third stage, each robot first computes and then goes towards the location where it must position itself behind the object to cooperate in the pushing actions required for executing the transport properly. When the positioning of all robots behind the object is completed, the fourth stage of the algorithm begins. From then on, the robots start alternating between pushing and re-positioning actions in order to keep the object moving along the expected transport trajectory. This procedure is executed until the object is actually homed in a predefined location. In this work, the implementation of the object search stage is inspired by two strategies. The first strategy is the random search. The second strategy mimics the behavior used by ant colonies during their foraging for food sources, depositing pheromones along the traversed paths. Algorithm TCOI is implemented using a swarm of GRITSBot robots, via the Robotarium platform. In addition to the performance evaluation of the two search strategies, we investigate the impact of the positioning of the robots during the pushing actions, that of the number of robots as well as the impact of the dimension and weight of the object. To evaluate the proposed project, the time of each stage and the distance traveled by the object are evaluated. The results show that the search method, which mimics the behavior of ant colonies, obtains a shorter route than the method using random search. On average, the results using the behavior of ants show a reduction in the route of 6,7%, for moving robots forward only, as for the forward/backward movement, the reduction in the route is 52,35%. In the analysis of the impact of the positioning of the robots, the maximum angle between the robots provides a smaller error in the object path length, than for the other angles. On average, the results show a reduction in the error in the length of the object's path of 75,76% between the maximum and minimum angle between the robots. In the analysis of the impact of the number of robots, it is possible to verify that the more robots that push the object, beyond the required minimum, the faster the object transport stage becomes. The reduction in time to transport the object using the maximum and minimum number of robots is 829,77s. Finally, in the analysis of the impact of the object size and weight, it is confirmed that the minimum number of robots to push the object must be proportional to these values.

Keywords: Cooperative transport. Swarm robotics. Swarm intelligence.

## LISTA DE FIGURAS

1	Estratégias de transporte cooperativo . . . . .	22
2	Posicionamento do robô $i$ . . . . .	25
3	Arena . . . . .	25
4	Ilustração do posicionamento inicial dos robôs . . . . .	43
5	Ilustração do reposicionamento . . . . .	44
6	Força resultante dos robôs para impulsionar o objeto. . . . .	45
7	Decomposição da força resultante do robô $i$ . . . . .	46
8	Número máximo de robôs para impulsionar o objeto . . . . .	49
9	Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS. . . . .	66
10	Matriz de feromônio final após a etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente . . . . .	66
11	Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS . . . . .	67
12	Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	69
13	Matriz de feromônio final após a etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás . . . . .	69
14	Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS. . . . .	70
15	Trajectoria do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,7$ rad . . . . .	72
16	Trajectoria do centro de massa do objeto variando o erro angular $\Delta\theta_0$ . . . . .	73
17	Trajectoria do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,1$ rad . . . . .	74
18	Trajectoria do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,01$ rad . . . . .	75
19	Etapa de transporte variando o número de robôs para impulsionar o objeto . . . . .	76
20	Trajectoria do centro de massa do objeto de massa $M = 0,24$ kg variando o diâmetro do objeto e o número de robôs para impulsioná-lo. . . . .	77
A.1	Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	89
A.2	Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	89
A.3	Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	90

---

A.4	Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	90
A.5	Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	91
A.6	Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	91
A.7	Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS. . . . .	92
A.8	Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente . . . . .	92
A.9	Etapa de recrutamento com o mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS. . . . .	93
A.10	Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS. . . . .	93
A.11	Matriz de feromônio com o número médio de robôs . . . . .	94
A.12	Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS . . . . .	94
A.13	Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS. . . . .	95
A.14	Matriz de feromônio com o número máximo de robôs . . . . .	95
A.15	Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS. . . . .	96
A.16	Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	96
A.17	Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	96
A.18	Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	97
A.19	Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	97
A.20	Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória. . . . .	98
A.21	Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	98
A.22	Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	99
A.23	Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs . . . . .	99
A.24	Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS. . . . .	100
A.25	Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	100
A.26	Matriz de feromônio com o número médio de robôs . . . . .	101
A.27	Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS. . . . .	101
A.28	Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	102
A.29	Matriz de feromônio com o número máximo de robôs . . . . .	102

---

A.30 Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	103
A.31 Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 1$ rad . . . . .	103
A.32 Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,7$ rad . . . . .	104
A.33 Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,261799$ rad . . . . .	104
A.34 Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,1$ rad . . . . .	105
A.35 Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo $\theta$ entre os robôs e o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,01$ rad . . . . .	106
A.36 Etapa de transporte com número mínimo de robôs para impulsionar o objeto	106
A.37 Etapa de transporte com número médio de robôs para impulsionar o objeto	107
A.38 Etapa de transporte com número máximo de robôs para impulsionar o objeto	107
A.39 Etapa de procura com o número mínimo de robôs . . . . .	108
A.40 Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs . . . . .	108
A.41 Etapa de recrutamento e posicionamento inicial com o número mínimo de robôs . . . . .	109
A.42 Etapa do transporte do objeto com o número mínimo de robôs . . . . .	109
A.43 Etapa de procura com o número mínimo de robôs . . . . .	110
A.44 Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs . . . . .	110
A.45 Etapa de recrutamento e posicionamento inicial com o número mínimo de robôs . . . . .	111
A.46 Etapa do transporte do objeto com o número mínimo de robôs . . . . .	111
A.47 Etapa de procura com o número máximo de robôs . . . . .	112
A.48 Matriz de feromônio com o número máximo de robôs . . . . .	112
A.49 Etapa de recrutamento e posicionamento inicial com o número máximo de robôs . . . . .	113
A.50 Etapa do transporte do objeto com o número máximo de robôs . . . . .	113

## LISTA DE TABELAS

1	Constantes do Robotarium . . . . .	64
2	Constantes dos experimentos . . . . .	65
3	Resultados dos tempos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente . . . . .	67
4	Resultados dos percursos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente . . . . .	68
5	Resultados dos tempos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente/trás . . . . .	70
6	Resultados dos percursos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente/trás . . . . .	70
7	Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,7$ rad . . . . .	73
8	Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,1$ rad . . . . .	74
9	Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,01$ rad . . . . .	75
10	Número de robôs . . . . .	76
A.1	Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	88
A.2	Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	89
A.3	Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	90
A.4	Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS . . . . .	91
A.5	Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS . . . . .	92
A.6	Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS . . . . .	93
A.7	Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	94
A.8	Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	94
A.9	Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória . . . . .	95

---

A.10 Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	97
A.11 Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	98
A.12 Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS . . . . .	99
A.13 Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 1$ rad . . . . .	101
A.14 Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,7$ rad . . . . .	103
A.15 Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,261799$ rad . . . . .	105
A.16 Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,1$ rad . . . . .	105
A.17 Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular $\Delta\theta_0 = 0,01$ rad . . . . .	106
A.18 Resultado das etapas com o número mínimo de robôs . . . . .	107
A.19 Resultado das etapas com o novo diâmetro do objeto e utilizando número mínimo de robôs . . . . .	108
A.20 Resultado das etapas com o novo diâmetro do objeto e utilizando número máximo de robôs . . . . .	110

## LISTA DE ALGORITMOS

1	TCOI . . . . .	51
2	Inicializar Arena . . . . .	51
3	Procura do objeto pelo robô $i$ usando busca randômica . . . . .	53
4	Recrutar robô $i$ no caso de procura randômica . . . . .	54
5	Procura do objeto pelo robô $i$ usando ACS . . . . .	58
6	Escolher a nova pose do robô $i$ usando ACS . . . . .	59
7	Recrutar robô $i$ no caso de procura usando ACS . . . . .	60
8	Posicionar robôs . . . . .	60
9	Pose inicial do robô $i$ . . . . .	61
10	Transportar objeto . . . . .	61
11	Nova pose do robô $i$ . . . . .	62
12	Atualizar posição do alvo . . . . .	62

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1 TRANSPORTE COLETIVO POR IMPULSIONAMENTO</b> .....	<b>21</b>
1.1 Estratégias de Transporte Cooperativo .....	21
1.2 Definição do problema .....	24
1.3 Desafios .....	26
1.4 Considerações Finais do Capítulo .....	28
<b>2 TRABALHOS RELACIONADOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 Transporte por Enjaulamento .....	29
2.2 Transporte por Agarramento .....	33
2.3 Transporte por Impulsioneamento .....	35
2.4 Considerações Finais do Capítulo .....	40
<b>3 MODELOS PARA O IMPULSIONAMENTO DO OBJETO</b> .....	<b>42</b>
3.1 Posicionamento dos robôs .....	42
3.2 Força resultante dos robôs .....	44
3.3 Número de robôs .....	48
3.4 Considerações Finais do Capítulo .....	49
<b>4 ALGORITMOS PARA SIMULAÇÃO DO TCOI</b> .....	<b>50</b>
4.1 Inicialização da Arena .....	51
4.2 Procura do objeto e recrutamento dos robôs .....	51
4.2.1 Método de procura randômica .....	52
4.2.1.1 Algoritmo de procura usando busca randômica .....	52
4.2.1.2 Algoritmo de recrutamento no caso de procura randômica .....	52
4.2.2 Método de procura baseado no forrageamento de formigas .....	54
4.2.2.1 Introdução ao ACS .....	55
4.2.2.2 Algoritmo de procura usando ACS .....	57
4.2.2.3 Algoritmo de recrutamento no caso de procura usando ACS .....	57
4.3 Posicionamento Inicial .....	59
4.4 Transporte .....	59
4.5 Considerações Finais do Capítulo .....	61
<b>5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO</b> .....	<b>63</b>
5.1 Aspectos de Implementação .....	63
5.2 Parâmetros de Simulação .....	64
5.3 Procura e Recrutamento .....	65
5.3.1 Deslocamentos para frente .....	65

# SUMÁRIO

xiv

---

5.3.2	<u>Deslocamentos para frente/trás</u> .....	68
<b>5.4</b>	<b>Transporte</b> .....	71
5.4.1	<u>Impacto do Posicionamento dos Robôs</u> .....	71
5.4.2	<u>Impacto do Número de Robôs</u> .....	75
5.4.3	<u>Impacto das Características do Objeto</u> .....	76
<b>5.5</b>	<b>Considerações Finais do Capítulo</b> .....	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões</b> .....	79
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros</b> .....	82
<b>REFERÊNCIAS</b> .....		<b>83</b>
<b>A</b>	<b>APÊNDICE A - Resultados das simulações</b> .....	<b>88</b>
<b>A.1</b>	<b>Procura e Recrutamento</b> .....	88
A.1.1	<u>Deslocamento para frente</u> .....	88
A.1.2	<u>Deslocamentos para frente/trás</u> .....	89
<b>A.2</b>	<b>Transporte</b> .....	90
A.2.1	<u>Impacto do Posicionamento dos Robôs</u> .....	91
A.2.2	<u>Impacto do Número de Robôs</u> .....	100
A.2.3	<u>Impacto das Características do Objeto</u> .....	101

# INTRODUÇÃO

**S**istemas baseados em um único robô são inerentemente limitados por seu tamanho, força e versatilidade, o que geralmente os impede de executar tarefas além de seu propósito original. Além disso, eles são normalmente caros para projetar e construir e são menos resistentes a falhas do sistema (INGLETT; RODRÍGUEZ-SEDA, 2017). Assim, a funcionalidade limitada e os custos associados a robôs individuais emparelhados com as aplicações potenciais de sistemas robóticos mais versáteis garantem pesquisas para o desenvolvimento de robôs cooperativos. Os sistemas de vários robôs têm configurações flexíveis e funcionalidade espacialmente diversificada, permitindo que eles se adaptem mais facilmente a diversos ambientes e tarefas. Além disso, eles oferecem redundância e maior cobertura e rendimento que são de particular valor em tarefas onde o ambiente é desconhecido, como busca e salvamento, exploração e tarefas de vigilância (INGLETT; RODRÍGUEZ-SEDA, 2017).

O transporte cooperativo é bastante comum em animais, insetos, em particular em formigas. O transporte cooperativo em formigas é uma fonte de inspiração para cientistas, que tentam imitar o comportamento de enxames para projetar robôs autônomos capazes de realizar tarefas cooperativamente que estão além das competências de um único indivíduo. O objeto a ser transportado pode ter algumas características que requerem mais de um robô para auxiliar no transporte. Algumas dessas características são por exemplo, objeto alto, objeto pesado e objeto comprido, tornando imprescindível o auxílio de mais robôs para realizarem o transporte corretamente até seu destino final.

O transporte cooperativo de objetos pode ser extremamente eficaz em uma variedade de aplicações com alto potencial de impacto econômico e social, tais como: recuperação e eliminação de resíduos, desminagem ou operações que requerem manipulação de objetos em ambientes onde a intervenção humana direta é impossível ou impraticável, como no espaço ou no mar profundo (TUCI; ALKILABI; AKANYETI, 2018). Além disso, existem muitas aplicações potenciais para esses sistemas executarem atividades diárias,

como transporte de objetos em fábricas, armazéns, canteiros de obras e vários outros ambientes (INGLETT; RODRÍGUEZ-SEDA, 2017).

O transporte cooperativo de objeto por robôs é um tema que vem sendo estudado há muito tempo. Este tema é abordado em muitas áreas de investigação, promovendo diferentes abordagens, como transporte por enjaulamento (WANG et al., 2004), transporte por agarramento (HABIBI et al., 2015) e transporte por impulsionamento (CHEN et al., 2015). O transporte cooperativo por enjaulamento é um caso na qual os robôs prendem intencionalmente o objeto para certificar que ele mantenha os movimentos do grupo. Na estratégia de enjaulamento, os robôs se organizam em torno do objeto para formar um cerco que prende o objeto (RIMON; BLAKE, 1996). Estratégias de transporte por agarramento são métodos pelos quais os robôs se conectam fisicamente a um objeto para poder transportá-lo coletivamente. Assim, estratégias de transporte por agarramento só podem ser exploradas por robôs que possuam os mecanismos para agarrar um objeto. Existe uma variedade de mecanismos que permitem que um robô se conecte fisicamente a um objeto. Alguns dos quais permitem que os robôs não apenas agarrem, mas também levantem um objeto. Estratégias de transporte por impulsionamento são métodos de transporte coletivo de objetos, exercendo forças de empurrar sobre o objeto. Esse tipo de estratégia é empregado principalmente por robôs que não conseguem puxar objetos, uma vez que não têm como agarrá-los. Os algoritmos para cada abordagem apresentam dificuldades distintas. Em todas as abordagens, as etapas de busca e recrutamento do objeto podem ser semelhantes, a distinção está na etapa de transporte.

Para realizar um transporte de objeto cooperativamente, propõe-se a ideia de dividi-lo em uma série de etapas de resolução simples. A execução coordenada principalmente da etapa de transporte permite o deslocamento do objeto. As etapas são processos dinâmicos, pois precisam ser continuamente ajustadas em resposta às mudanças no ângulo formado entre o centro de massa do objeto a ser transportado e centro do próximo ponto de referência, e/ou no desempenho dos robôs. Uma solução imediata para resolver este problema é fazer todos os robôs empurrarem na mesma direção (FUJISAWA; IMAMURA; MATSUNO, 2013). A distribuição dos robôs atrás do objeto apresenta uma abordagem semelhante em (FUJISAWA; IMAMURA; MATSUNO, 2013). Essa distribuição dos robôs em relação ao objeto aumenta a dificuldade do problema, pois, o robô não possui uma visão

completa do ambiente. A comunicação se dá de forma indireta através da posição do objeto.

Diversas aplicações de transporte, que utilizam enxame de robôs, requerem o uso de cooperação coordenada. Por exemplo, em situações que são impraticáveis por humanos ou representam risco (DAI et al., 2015; STROUPE et al., 2005).

Existem algumas formigas que apresentam altas habilidades sociais, mas, ao mesmo tempo, mostram pouca ou nenhuma habilidade no transporte coletivo (HÖLLDOBLER; WILSON, 1990). Nessas espécies, o alimento é recuperado principalmente por formigas individuais. Itens maiores são divididos em pedaços menores para que possam ser transportados por formigas individuais. Existem poucas espécies eficientes no transporte através de grupos, um comportamento que evoluiu por diferentes razões. Entre os exemplos estão o grupo de espécies invasoras conhecidas como formigas de correição ou formigas saqueadoras (FRANKS, 1986). Suas enormes colônias só podem ser alimentadas por uma grande quantidade de alimentos frescos. Portanto, é muito importante que a colônia capture e recupere a presa de forma rápida e eficiente. O transporte cooperativo de alimentos serve a ambos os objetivos, pois reduz a necessidade de dissecação de alimentos no local e usa menos formigas para entregar a presa e, assim, disponibilizar mais formiga para a caça.

O transporte coletivo em formigas consiste em quatro fases em espécies de formigas que são mais eficientes no transporte (MCCREERY; BREED, 2014). Essas quatro fases são:

1. Fase de decisão, em algumas espécies de formigas, a decisão de iniciar um transporte cooperativo é adaptativa e baseada na probabilidade de sucesso do transporte. Às vezes, não é necessário tomar uma decisão, pois o transporte cooperativo pode surgir à medida que os trabalhadores se acumulam no local da presa. No entanto, nas formigas que recrutam ativamente ajudantes, o trabalhador que encontra o alimento deve decidir iniciar o transporte cooperativo. Esta decisão é afetada por vários fatores, como a resistência da presa aos movimentos, o tipo e tamanho da presa e a probabilidade de a presa ser encontrada por outras formigas, ou seja, se a probabilidade de as outras formigas encontrarem o alimento for baixa.
2. Fase de recrutamento, os mecanismos de recrutamento variam muito entre as diferentes espécies de formigas. Os mecanismos de recrutamento geralmente envolvem um procedimento de curto e longo alcance. No recrutamento de curto alcance, os localizadores liberam um produto químico volátil que atrai formigas próximas que

podem atrair formigas a distâncias de até 2 m. No recrutamento de longo alcance, o localizador volta diretamente ao ninho e, no caminho de volta ao ninho, deposita um rastro de feromônio e traz de volta pelo menos três formigas para a presa. Existem algumas espécies de formigas em que o processo de recrutamento envolve ambos os mecanismos. Além disso, em formigas de correição, o localizador não recruta outras formigas deixando um rastro de feromônio ou voltando para o ninho. Em vez disso, ela envia sinais para as formigas próximas. Algumas dessas formigas imediatamente se juntam ao localizador e tentam mover a presa, enquanto outras formigas recrutam mais formigas do ninho.

3. Fase de organização, a organização é uma fase importante que diferencia os transportes eficientes dos ineficientes. Em algumas espécies de formigas, parece que não há organização e a coordenação é um procedimento auto-organizado. Nesta espécie, há um estado transitório em que as formigas frequentemente mudam o ângulo em que estão aplicando força. Em algum ponto, esse esforço descoordenado produz força suficiente na direção correta para iniciar o movimento. Em algumas outras espécies de formigas, papéis distintos são estabelecidos para a duração do esforço. Nessas espécies, a formiga que originalmente encontrou a presa é mais importante para o sucesso do transporte. Além disso, o tamanho do grupo é determinado durante a fase de organização, pois quando há mais formigas do que o necessário, seu esforço é desperdiçado. Por exemplo, nas formigas de correição, uma formiga se juntaria a um grupo se pudesse ajudá-las a carregar a presa a uma certa velocidade. Portanto, uma formiga não se juntaria a um grupo que está transportando um item na velocidade desejada.
4. Fase de transporte, em espécies de formigas com transporte voltado para a frente, as operárias não pegam o alimento de uma só vez. Em vez disso, um grande trabalhador começa a mover a presa e outros trabalhadores se juntam ao transporte. Em algumas outras espécies, as formigas arrastam o item enquanto caminham para trás. Este comportamento de transporte aumenta a estabilidade ao manter o centro de gravidade do alimento baixo. Arrastar a comida e mantê-la baixa também pode ajudar na coordenação do transporte, pois todas as formigas podem se alinhar ao longo da comida e ficar de frente para a mesma direção.

Neste trabalho, é proposto um algoritmo para transporte cooperativo de objeto. A cada iteração, cada robô escolhe um ponto de referência da adjacência, em que se encontra no momento, para realizar uma busca pelo objeto. Após o primeiro robô chegar perto do objeto, ele recruta os demais, que se posicionam e, então, executam o transporte do objeto até seu destino final.

O algoritmo proposto permite a execução por robôs com recursos limitados para realizar o transporte, por exemplo, garras para puxar ou levantar o objeto. Esse algoritmo foi testado em robôs do tipo GRITSBot (PICKEM et al., 2017) para demonstrar sua eficácia e eficiência.

Na etapa de procura do objeto, são abordados dois métodos de procura: randômico e o *Ant Colony System* (ACS). Neste trabalho, na etapa de posicionamento inicial, os robôs se posicionam atrás do objeto para impulsioná-lo até posição final. A distribuição depende do número de robôs e da diferença angular entre cada robô. Na etapa de transporte, os robôs impulsionam o objeto em direção a posição final, após um empurrão é feita avaliação do posicionamento do centro de massa do objeto, em relação ao percurso, caso não tenha ultrapassado um limite, os robôs continuam impulsionando de acordo com o ângulo calculado na etapa de posicionamento inicial, mas caso tenha ultrapassado o limite, os ângulos que os robôs devem impulsionar o objeto são calculados novamente. Essa etapa é repetida até o objeto alcançar a posição final.

O restante desta dissertação está estruturado em seis capítulos. Primeiramente, o Capítulo 1 apresenta três estratégias de transporte cooperativo. É dada ênfase a estratégia de transporte por impulsionamento, técnica adotada neste trabalho para transportar o objeto.

Em seguida, o Capítulo 2 faz um levantamento bibliográfico em que as teorias e experimentos associados ao transporte cooperativo de objeto são analisados. Este capítulo mostra também a análise de conteúdos de periódicos, anais de congressos e livros.

O Capítulo 3 apresenta os cálculos para o posicionamento inicial dos robôs. Apresenta os cálculos relacionados a força resultante dos robôs para transportar o objeto. Por fim, mostra o cálculo da quantidade mínima e máxima de robôs que podem impulsionar atrás de um objeto. Em seguida, o Capítulo 4 mostra os algoritmos para as etapas do transporte cooperativo por impulsionamento, para as duas técnicas de busca utilizadas.

Em sequência, o Capítulo 5 demonstra como é realizada a implementação do algoritmo proposto na plataforma escolhida para simulação (Robotarium). Descreve o robô disponível e suas características. Apresenta uma análise dos resultados obtidos nos ensaios com duas estratégias para procura do objeto, com diferentes posicionamentos dos robôs, com diversos números de robôs e diversas massas do objeto.

Por último, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais da dissertação com relação aos resultados obtidos, os aspectos observados durante os ensaios e são propostas melhorias para o algoritmo e considerações para trabalhos futuros.

# Capítulo 1

## TRANSPORTE COLETIVO POR IMPULSIONAMENTO

**E**STE capítulo apresenta o problema do transporte cooperativo com o auxílio de um enxame de robôs. O transporte cooperativo é simplesmente definido como vários indivíduos movendo simultaneamente um objeto (CZACZKES; RATNIEKS, 2013). Quando aplicado à robótica de enxames, a ideia é que um grupo de robôs, de arquitetura semelhante ou variada, trabalhe coletivamente para transportar um objeto específico de um lugar para outro, enquanto executa várias tarefas, como calcular distância ao longo do tempo e evitar obstáculos.

Na Seção 1.1 são apresentadas as estratégias usadas para o transporte cooperativo. Na Seção 1.2 define o problema do transporte cooperativo. Na Seção 1.3 são apresentados os problemas que devem ser resolvidos para obter uma solução que permite uma implementação efetiva do transporte coletivo de objeto. Na Seção 1.4 são apresentadas as considerações finais para o capítulo.

### 1.1 Estratégias de Transporte Cooperativo

Existe uma grande quantidade de pesquisas sobre transporte cooperativo em insetos sociais (BERMAN et al., 2011, 2010; MCCREERY; BREED, 2014), bem como no campo da robótica de enxames (GROSS; DORIGO, 2008; TUCI et al., 2005).

O transporte cooperativo vem sendo estudado há anos em sistemas multi-robôs. Em geral, existem três estratégias diferentes para transportar um objeto por robôs:

1. Impulsionar, conforme ilustrado na Figura 1(a).
2. Agarrar, conforme ilustrado na Figura 1(b).

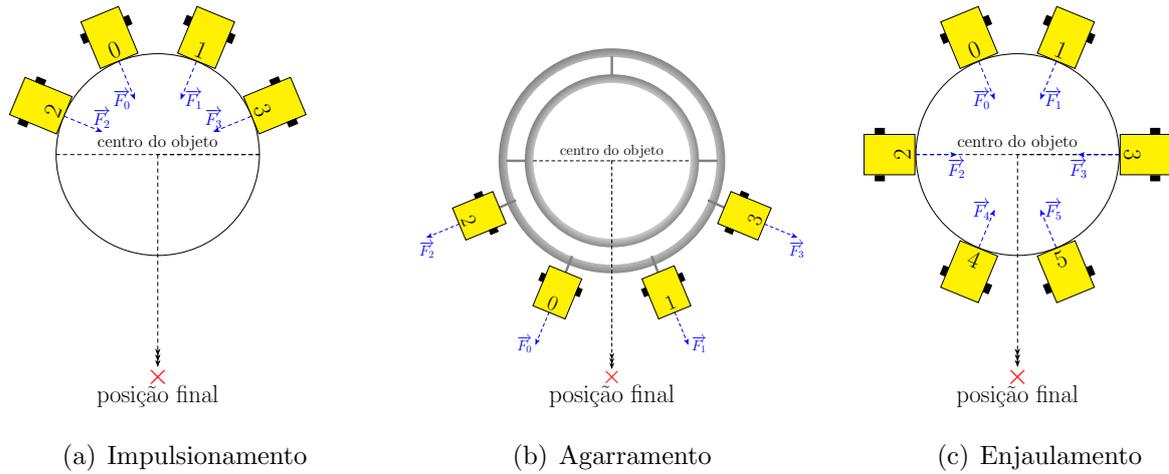


Figura 1: Estratégias de transporte cooperativo

3. Enjaular, conforme ilustrado na Figura 1(c).

A estratégia por impulsionamento é um método de transporte coletivo de objeto, exercendo forças de empurrar sobre o objeto. Esse tipo de estratégia é empregado principalmente por robôs que não podem puxar objetos, pois não têm meios de agarrá-los. A estratégia por impulsionamento pode parecer um método relativamente simples de transporte cooperativo. No entanto, além dos desafios comuns a todas as estratégias de transporte, por exemplo, o alinhamento de forças necessário para iniciar o transporte, dentre outras. A estratégia por impulsionamento exige uma quantidade significativa de coordenação de ações para sustentar o transporte. O objeto pode se mover em uma trajetória muito ineficiente, a menos que os robôs gerenciem cuidadosamente as forças de atrito, gravitacional e dinâmica para estabilizar a direção do transporte. Existem outros desafios, como estagnação e o efeito da forma do objeto que está sendo transportado. Em (KUBE; BONABEAU, 2000), os autores abordaram a questão da estagnação e propuseram um mecanismo de recuperação incluindo o realinhamento do ângulo de impulsionar e de reposicionamento da força de impulsionamento. Eles também apontaram que o impulsionamento de caixa direcionado, em que há um objetivo fixo, não requer comunicação e é insensível ao tamanho e geometria da caixa. No entanto, deve-se mencionar que em seus experimentos, todos os robôs podiam saber a direção do objetivo e, portanto, se mover em direção a ele. A estratégia de impulsionar é mostrada na Figura 1(a), onde os quatro robôs

estão atrás do objeto, impulsionando-o para a posição final. A força de impulsionamento que cada robô está aplicando no objeto é indicada.

A estratégia de agarramento é o método que envolve fazer com que vários robôs se conectem ao objeto usando mecanismos físicos para poder transportá-lo coletivamente. Assim, a estratégia de agarramento só pode ser explorada por robôs que possuam os mecanismos para agarrar um objeto. Existe uma variedade de mecanismos que permitem que um robô se conecte fisicamente a um objeto. Alguns dos quais permitem que os robôs não apenas agarrem, mas também levantem um objeto. Na natureza, em formigas, por exemplo, o transporte de um objeto usando a estratégia de agarramento é a forma mais comum de transporte, pois as formigas estão equipadas com mecanismos físicos apropriados para realizar a tarefa. Em comparação com a estratégia de impulsionamento, a estratégia de agarramento proporciona um melhor controle sobre o objeto transportado, pois uma vez agarrado, o objeto pode ser impulsionado ou puxado. No entanto, uma estratégia de agarramento estável e eficaz muitas vezes exige que os robôs se distribuam de maneira ideal em torno de um objeto para evitar efeitos indesejados, como o objeto tocar o solo ou a distribuição de carga desequilibrada entre os robôs. Outro desafio são os complicados mecanismos físicos necessários para agarrar um objeto. Em (SASAKI et al., 1995), os autores desenvolvem um algoritmo para permitir que um grupo homogêneo de robôs encontre o arranjo ótimo em torno de um objeto que deve ser levantado e transportado para uma posição final. No estudo, os robôs conhecem a forma do objeto. Eles estimam a massa do objeto e a posição do centro de massa levantando o objeto e usam essas estimativas para se distribuem de maneira ideal nos pontos de apreensão ao redor do objeto. A estratégia de agarramento é mostrada na Figura 1(b), onde os robôs com mecanismos mecânicos, representado pelo tubo circular cinza. Este tubo está preso no objeto em três partes e os quatro robôs estão puxando o objeto em direção a posição final do transporte. A força resultante das forças exercidas pelos robôs individualmente permite puxar o objeto para a posição destino.

A estratégia de enjaulamento pode ser considerada como um caso especial da estratégia de impulsionamento. Neste método, vários robôs se organizam em torno do objeto de tal forma que o objeto fica enjaulado dentro da formação dos robôs (FINK; HSIEH; KUMAR, 2008; WANG; HIRATA; KOSUGE, 2003). Dependendo da forma, o enjaulamento pode ser um problema complexo, pois requer que um certo número de robôs esteja disponível

e uma quantidade considerável de informações sobre o objeto. A estratégia de enjaulamento é mostrada na Figura 1(c), onde os robôs 0 e 1 impulsionam o objeto. A força de impulsionamento que cada robô aplica no objeto é indicada. Os robôs 2 e 3 ao lado garantem que o objeto não saia do caminho até a posição final e os robôs 4 e 5 da frente completam o enjaulamento. Eles também aplicam forças no sentido contrário a posição final. Eles ajudam em manter o objeto no caminho certo, reduzindo o erro durante a etapa de transporte (FINK; MICHAEL; KUMAR, 2007).

## 1.2 Definição do problema

Transporte Cooperativo de Objeto por Impulsionamento (TCOI) é o processo que gerencia e organiza um enxame de robôs para executarem corretamente um conjunto de etapas, visando um objetivo único. Esse processo consiste em procurar o objeto, recrutar os demais robôs, posicionar os robôs e transportar o objeto, de forma organizada e distribuída. A etapa de transporte deve ser dinâmica, pois precisa ser continuamente ajustada em resposta às mudanças no ângulo do objeto a ser transportado para o próximo ponto de referência.

A fim de fornecer uma definição formal do problema TCOI, seja  $S = \{0, 1, \dots, \omega - 1\}$  o conjunto de  $\omega$  pontos de referência e  $R = \{0, 1, \dots, \rho - 1\}$  o conjunto de  $\rho$  robôs. As duas variáveis são independentes entre si. Os robôs são iguais, portanto, a massa é a mesma, e é representada por  $m$ . A velocidade máxima que pode ser atingida pelos robôs é a mesma, e é representada por  $v_{max}$ . O diâmetro do robô  $i$  é definido como  $d$ .

A Figura 2 ilustra a pose do robô  $i$  determinada por  $p_i = [x_i, y_i, \beta_i]^T$ , onde  $x_i$  e  $y_i$  denotam a posição do baricentro do robô  $i$  e  $\beta_i$  seu rumo.

A Figura 3 mostra as dimensões de uma arena retangular. Os pontos de referência são coordenadas  $(x, y)$  e suas posições são definidas arbitrariamente dentro da arena. Desse modo, o cálculo da distância entre os pontos de referência se dá através da distância euclidiana. Logo, temos uma matriz da distância de  $\omega \times \omega$ . A adjacência de cada ponto de referência é indicada. A adjacência dos pontos de referência consiste em uma matriz do mesmo tamanho da matriz da distância entre os pontos de referência, definida como  $A$ .

Neste trabalho, todos os robôs começam ao redor do ponto de referência  $w_0$ , para a qual terão que levar o objeto circular. O identificador  $w^*$  denota o ponto de referência onde

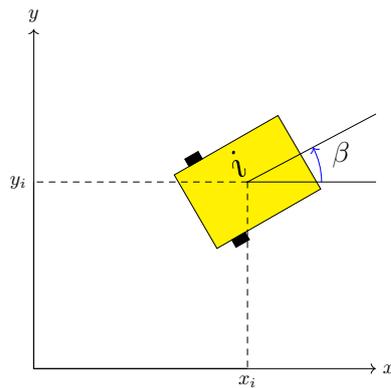
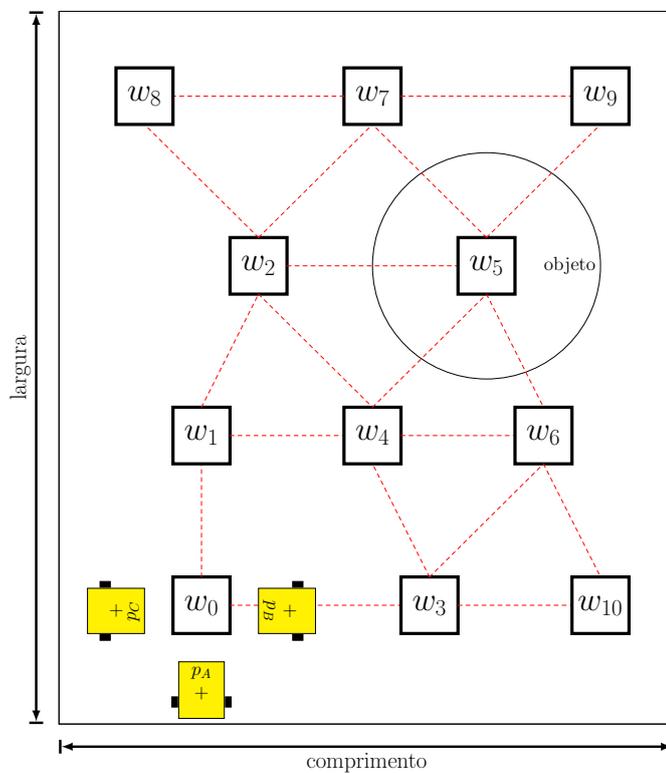
Figura 2: Posicionamento do robô  $i$ 

Figura 3: Arena

o objeto se encontra. Na Figura 3 o ponto de referência que o objeto se encontra é o  $w_5$ . Note que os robôs desconhecem a posição inicial na arena do objeto a ser transportado. A rota percorrida pelo robô  $i$  em busca do objeto a ser transportado é representada por  $C_i$ . Esta é formada pelos pontos de referência que o robô  $i$  atravessou até o instante que este encontrou o objeto. A menor rota usada pelos robôs que encontraram o objeto primeiro é denotada  $C^*$ . Os robôs se posicionam atrás do objeto em direção ao penúltimo ponto

de referência da rota  $C^*$ . Note que  $u^*$  é a última posição da rota  $C^*$ . O penúltimo ponto de referência da rota  $C^*$  é  $w_u = C^*[u^* - 1]$ .

### 1.3 Desafios

As etapas do transporte cooperativo possuem desafios distintos a serem resolvidos. A estratégia de transporte a ser adotada influencia as etapas, podendo aumentar ou reduzir a complexidade dos desafios a serem solucionados.

A primeira etapa do processo consiste na busca do objeto. Assim, o primeiro desafio é encontrar o objeto a ser transportado. Existem trabalhos onde eliminam essa etapa, como no caso de (HABIBI et al., 2015), onde os autores inicializam os testes dos controladores de movimento com os robôs posicionados e fixados ao longo do perímetro de um objeto do teste. Já em (WAN et al., 2020), não há dificuldade de se encontrar o objeto, pois o ambiente é totalmente observável, onde as poses dos robôs e objetos são todas conhecidas. Em outros trabalhos, a procura pelo objeto é mais difícil, pois não possuem conhecimento sobre a posição do objeto. Em (CHEN et al., 2015), os robôs fazem uma busca aleatória para encontrar o objeto. O segundo desafio é encontrar uma estratégia de busca, que possibilite achar o caminho mais curto do ponto de referência  $w^*$  onde o objeto se encontra, até o ponto de referência  $w_0$ .

A segunda etapa do processo consiste no recrutamento dos robôs. Assim como acontece na primeira etapa, existem casos onde os robôs possuem conhecimento prévio da posição do objeto, não havendo necessidade dessa etapa, ou já estarem fixados ao objeto, por exemplo em (HABIBI et al., 2015). Caso um robô encontre o objeto, e os demais ainda não tenham encontrado, existem duas formas de se comunicarem para aquele que encontrou o objeto informar a posição do objeto para os demais. A primeira é a comunicação direta, onde o robô que encontra o objeto informa os demais a posição do objeto. Neste caso os robôs podem ir diretamente para a posição do objeto ou percorrerem a rota que o robô que encontrou o objeto fez. A segunda é a comunicação indireta, onde o robô que encontra o objeto não informa os outros robôs. Portanto, os demais robôs continuam procurando o objeto, como em (CHEN et al., 2015). A comunicação indireta pode também ser realizada através de feromônios (FUJISAWA; IMAMURA; MATSUNO, 2013). O robô que encontra o objeto, não conseguindo impulsionar sozinho o objeto, retorna a posição inicial depositando feromônios no caminho. Assim, o recrutamento é realizado.

A terceira etapa do processo consiste no posicionamento inicial dos robôs, se preparando para o impulsionamento do objeto. O principal desafio é o alinhamento inicial das forças que permitirão o impulsionamento do objeto. Existem trabalhos onde os autores não se preocuparam tanto com o posicionamento inicial. Em (MATARIC; NILSSON; SIMSARIAN, 1995), os robôs são iniciados a partir de posições quase em contato com o objeto retangular. Para o alinhamento inicial das forças de impulsionar, os robôs já são posicionados à esquerda e à direita de um dos lados do objeto. Em (CHEN et al., 2015), é utilizado um grande número de robôs para impulsionar o objeto em posições onde a linha de visão direta para o destino é obstruída pelo objeto. Em (FUJISAWA; IMAMURA; MATSUNO, 2013), os robôs como possuem a posição de destino, pois é a mesma que a posição inicial. Os robôs se posicionam atrás do objeto, um atrás do outro, em linha reta com o destino do transporte. Em outros trabalhos é necessário um robô líder para fornecer informações aos demais robôs. Este é o caso em (GERKEY; MATARIC, 2002), onde é utilizado um robô observador que percebe o objeto e o destino final. A sua principal função é conduzir os robôs de enxame, fornecendo informações sobre a direção do transporte. Já em (NEUMANN; CHIN; KITTS, 2014), é proposto um algoritmo que gera informações sobre onde os robôs devem aplicar as forças de impulsionamento e a magnitude dessas forças, necessárias para transportar o objeto.

A quarta etapa do processo é o impulsionamento do objeto. O primeiro desafio nesta etapa é manter a trajetória percorrida pelo objeto transportado. Em (WANG; SILVA, 2006), existe um agente de visão para adquirir e processar as imagens globais. Ele analisa as imagens adquiridas, computa as localizações e orientações exatas dos robôs, do objeto e dos obstáculos, e transmite as informações ao agente de aprendizagem. São utilizados dois robôs que executam o plano gerado pelos agentes de aprendizagem. O plano pode exigir que um robô deixe o transporte para remover obstáculos que obstrua o caminho até o destino final do transporte. Enquanto um robô remove o obstáculo, o outro robô permanece no mesmo lugar, esperando que seu par retorne. Uma vez que o obstáculo é removido, o robô retorna para continuar a impulsionar o objeto. Em (NEUMANN; CHIN; KITTS, 2014), um algoritmo executado em um servidor externo controla um grupo de robôs necessários para impulsionar um objeto em trajetórias retas e circulares. O algoritmo gera informações sobre onde os robôs devem aplicar as forças e a magnitude dessas forças, necessárias para transportar o objeto. O segundo desafio é determinar o número de robôs

para realizar o transporte do objeto. Em (WAN et al., 2020), é utilizado um controle de duas fases. O primeiro é o processo de inicialização que encontra o número mínimo de robôs e a formação inicial dos robôs. O processo de inicialização começa com três robôs e aumenta iterativamente o número de robôs para encontrar o valor satisfatório para transportar o objeto. O segundo é do movimento do robô durante o transporte do objeto, onde cada robô é controlado continuamente para impulsionar o objeto em direção ao destino seguindo um determinado caminho. Já em (CHEN et al., 2015), os autores utilizam grande número de robôs para realizar o transporte do objeto. A quantidade máxima de robôs depende do perímetro do objeto, pois os robôs apenas impulsionam o objeto em posições onde a linha de visão direta para o destino é obstruída pelo objeto.

## 1.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo definiu-se o problema do transporte cooperativo de objeto por impulsionamento, utilizando um enxame de robôs. Descreveu-se as diferentes abordagens para o transporte cooperativo de objeto, analisando as estratégias de transporte. A estratégia de impulsionamento foi definida para ser empregada neste projeto. O próximo capítulo apresenta um estudo de alguns trabalhos atuais que abordam o problema de transporte cooperativo de objeto e a implementação em vários robôs destas técnicas, tanto em simuladores quanto em robôs reais.

## Capítulo 2

# TRABALHOS RELACIONADOS

**E**STE capítulo apresenta alguns trabalhos relacionados ao problema de transporte cooperativo de objetos em sistemas multi-robôs, desenvolvidos para fornecerem soluções tolerantes a falhas, econômicas e confiáveis para uma variedade de aplicações automatizadas. As soluções são organizadas nas Seções 2.1, 2.2 e 2.3, segundo três possíveis estratégias: transporte por enjaulamento, transporte por agarramento e transporte por impulsionamento, respectivamente. Na Seção 2.4, são apresentadas algumas considerações finais do capítulo.

### 2.1 Transporte por Enjaulamento

O transporte cooperativo por enjaulamento é um caso na qual os robôs prendem intencionalmente o objeto para certificar que ele mantenha os movimentos do grupo. Na estratégia de enjaulamento, os robôs se organizam em torno do objeto para formar um cerco que prende o objeto (RIMON; BLAKE, 1996). A seguir são apresentadas algumas estratégias de enjaulamento com abordagens diferentes.

Em (WANG et al., 2004), os autores descrevem um algoritmo de controle de força interna variável para guiar um grupo de três robôs omnidirecionais necessários para transportar um objeto no formato de um cubo. Os robôs têm a forma de um cubo, portanto eles encostam o objeto por um segmento de linha, ao invés de um ponto. Apenas o líder impulsiona o objeto, enquanto os seguidores seguram os lados do objeto com força. De forma que nenhuma mudança ocorra na posição relativa e orientação entre o objeto e cada robô seguidor. A coordenação dos robôs é conseguida simplesmente medindo a força resultante aplicada ao objeto e seu movimento. Essa forma de comunicação indireta através do objeto é suficiente para permitir aos seguidores manterem a formação e contri-

buírem para o transporte. Exercendo forças para mover o objeto ao longo da trajetória conhecida apenas pelo líder. A principal limitação deste estudo é que o sistema não pode seguir uma trajetória arbitrária que incorpore, especialmente quando a velocidade é baixa. No entanto, esse sistema envolvendo o conceito de força interna ativa pode seguir mais caminhos possíveis do que o objeto empurrando com força interna passiva que é gerada por atrito ou força de inércia, especialmente em movimento de alta velocidade. Exemplos semelhantes do uso de uma estratégia de enjaulamento com a abordagem líder-seguidor podem ser encontrados em (WANG; HIRATA; KOSUGE, 2003), (WANG; HIRATA; KOSUGE, 2004) e (FARRUGIA; FABRI, 2018).

O algoritmo proposto em (PEREIRA; CAMPOS; KUMAR, 2004), para transporte coletivo usando uma estratégia de enjaulamento que depende apenas da capacidade dos robôs de estimarem a orientação do objeto e as posições de seus vizinhos. Neste trabalho, usaram três robôs móveis com plataformas semelhantes a carros para se moverem na direção de um objetivo, enquanto mantêm uma formação prendendo um objeto triangular. Cada robô é equipado com uma câmera omnidirecional para estimar a orientação do objeto e sua posição em relação aos robôs vizinhos. Essas informações são comunicadas explicitamente entre os robôs para complementar seu conhecimento parcial sobre a orientação do objeto e a posição de outros robôs. O algoritmo de controle assume que cada robô tem uma cópia imaginária do objeto anexado a ele na origem do objeto, ou seja, um dos cantos do objeto. A interseção desses objetos imaginários forma uma região conhecida como *closure configuration space*. Se a origem do objeto real cai dentro do *closure configuration space*. Então o enjaulamento de um objeto é realizado de outra forma, os robôs têm que ajustarem suas posições para satisfazerem esta condição. As principais limitações desse estudo são a suposição de formas convexas, a sobre aproximação que está envolvida na verificação do fechamento do objeto quando as rotações estão presentes e o uso de robôs de ponto virtual que produzam condições conservadoras e suficientes para manter o enjaulamento do objeto. Exemplo similar do uso de uma estratégia de enjaulamento com a abordagem de fechamento de objeto pode ser identificado em (WANG; HIRATA; KOSUGE, 2005).

Nesta abordagem, (FINK; MICHAEL; KUMAR, 2007) propõe uma estratégia de enjaulamento para um grupo de robôs necessários para transportarem um objeto em forma de L e um objeto em forma circular, seguindo a trajetória de referência. Neste estudo,

os robôs estimam localmente o fechamento do objeto com base na comunicação direta a respeito de sua posição em relação ao objeto. Controlados por uma arquitetura com comportamentos diferentes, os robôs mudam do comportamento de abordagem para o comportamento de rodear quando estão próximos do objeto. No comportamento de rodear, os robôs se distribuem ao redor do objeto para formar o enjaulamento potencial. Tal abordagem requer que o robô conheça o diâmetro mínimo do objeto, quer dizer, a menor lacuna através da qual o objeto pode caber, o diâmetro máximo, ou seja, a distância máxima entre quaisquer dois pontos do objeto e o raio do círculo de enjaulamento.

Os robôs comunicam seus estados aos vizinhos até que um quorum seja alcançado, isto é, quando o número suficiente de robôs cercam o objeto e todos estejam prontos para iniciar o comportamento de transporte. Durante o comportamento de transporte, cada robô ajusta sua velocidade dependendo das posições dos vizinhos e da trajetória desejada do objeto. Se por algum motivo o enjaulamento for perdido durante o transporte, todos os robôs retornam ao comportamento de rodeamento para retomar o transporte. O estudo verifica a eficácia da abordagem usando de quatro a oito robôs de acionamento diferencial equipados com dois motores de passo para acionar as rodas e telômetros a laser. Os resultados deste estudo mostram a estabilidade da estratégia de enjaulamento proposta em um cenário no qual os robôs formam com sucesso fechamento que rodeia o objeto enquanto o empurra de uma posição inicial até seu destino final. Posteriormente em (FINK; HSIEH; KUMAR, 2008), os autores estendem essa abordagem para permitir que os robôs operem em um ambiente mais complexo que incorpora obstáculos. Outro estudo envolvendo uma estratégia de enjaulamento semelhante gerada por uma arquitetura de comportamentos diferentes é descrito em (EOH et al., 2014).

Em (DAI et al., 2015) é proposto um algoritmo para calcular os pontos apropriados para os robôs. O artigo enfoca a cooperação de multi-robôs para usar a estratégia de enjaulamento e transportar um objeto polígono convexo com os seguintes atributos. Primeiro, o número de robôs usados para essa estratégia e transportar objetos, deve ser minimizado permitindo o mínimo de tempo de comunicação. Segundo, a abordagem de enjaulamento e manipulação de objetos deve ser simples, porque o desempenho de um modelo complexo não se degrada devagar em relação às variações no ambiente. Terceiro, os multi-robôs devem evitar colisões entre si, quando se aproximam dos pontos adequados

para prender o objeto. Para evitar a colisão entre dois robôs e obter os caminhos mais curtos para prender o objeto utilizaram um algoritmo.

A formação de enjaulamento garante que todas as distâncias euclidianas entre dois robôs adjacentes sejam menores do que a largura mínima do objeto poligonal e o objeto não possa escapar. Quando todos os robôs alcançarem os pontos adequados atingindo a formação de enjaulamento, os robôs irão transportar o objeto para a posição de destino. Os resultados com quatro robôs mostram que o método de controle de rastreamento estável minimiza efetivamente os erros de rastreamento de trajetória até o destino.

Outro método é apresentado em (WAN et al., 2020). Neste trabalho, os autores propõem uma estratégia de enjaulamento, sendo que o controle inclui duas fases. O primeiro é o processo de inicialização que encontra o número satisfatório de robôs e a formação inicial dos robôs para fazer o enjaulamento. O segundo é o processo de movimento que usa um controlador de líder virtual simples ou usa a robustez translacional para escolher ativamente os robôs de suporte. O planejamento e o controle estão em um ambiente totalmente observável, onde as posições dos robôs e objetos são todas conhecidas. Os resultados experimentais mostram que o processo de inicialização mais o controlador de líder virtual podem efetivamente cercar e transportar objetos em ambientes de simulação. Podem escolher o menor ou o número satisfatório de robôs ajustando um limite, na simulação usaram uma caixa, um polígono, uma bola e um cilindro como objetos. Em experimentos do mundo real, onde existe mais incerteza, puderam melhorar ainda mais o desempenho escolhendo ativamente os robôs de apoio de acordo com a robustez translacional. Nessa simulação o objeto era um triângulo retângulo e em ambas as simulações para se chegar ao destino final deveriam subir e descer uma rampa. Concluíram que o método proposto requer menos robôs e evita travamentos e perda de objetos. Esse método fornece uma maneira promissora de lidar com ruídos de controle no contexto de tarefas de transporte de objetos cooperativos multi-robôs.

Uma desvantagem desse método é que ele é limitado a objetos convexos. A decomposição em robustez translacional e robustez rotacional não pode garantir integridade quando um ou mais ângulos internos do objeto são maiores que  $\pi$ . Além disso, não examinaram mais do que três robôs nos experimentos no mundo real. Além do mais, assumiram robôs homogêneos e omnidirecionais na análise, e tiveram que esperar até que todos os robôs girassem para a mesma orientação para manter a formação satisfatória. Outro es-

tudo envolvendo uma estratégia de enjaulamento semelhante para gerar o menor número de robôs para transportar o objeto é descrito em (WAN et al., 2012).

## 2.2 Transporte por Agarramento

Estratégias de transporte por agarramento são métodos pelos quais os robôs se conectam fisicamente a um objeto para poder transportá-lo coletivamente. Assim, estratégias de transporte por agarramento só podem ser exploradas por robôs que possuam os mecanismos para agarrar um objeto. Existe uma variedade de mecanismos que permitem que um robô se conecte fisicamente a um objeto. Alguns dos quais permitem que os robôs não apenas agarrem, mas também levantem um objeto. Nesta seção, são apresentadas algumas estratégias de agarramento com abordagens diferentes.

Em (SASAKI et al., 1995), os autores descrevem um algoritmo para permitir que um grupo homogêneo de três robôs encontrem o arranjo ideal em torno de um objeto antes de ser levantado e transportado para um destino final. O objetivo é agarrar e manusear um objeto grande cooperando com vários robôs com diferentes tamanhos, custos de movimentação e capacidade de carga. Propõem este método para evitar situações ruins. Como fazer um objeto cair ou alguns robôs sobrecarregados para agarrar e manusear. O algoritmo proposto inclui dois problemas de otimização. Primeiro, é a decisão do arranjo inicial do robô. Segundo, é a decisão do arranjo final do robô. A diferença entre essas otimizações é que o centro do objeto é reconhecido ou não. O índice de penalidade é definido para minimizar a energia que o sistema consome e para maximizar um índice de estabilidade. Concluíram que os robôs mudaram para os arranjos ideais em simulações e experimentos no computador.

Em (HABIBI et al., 2015), os autores apresentam quatro controladores de movimento distribuídos para permitir que um grupo de robôs realizem o transporte coletivamente de um objeto grande. Enquanto outros mapeiam o ambiente a fim de guiar os robôs de transporte na direção do destino, evitando obstáculos. Esses controladores incluem, rotação em torno de um robô pivô, rotação no local em torno de um centroide estimado do objeto, translação e um movimento combinado de rotação e translação em que cada robô manipulador segue um caminho trocoide. Três desses controladores requerem uma estimativa do centroide do objeto, para usar como eixo de rotação. Quando o objeto estiver cercado por robôs manipuladores, aproximam o centroide do objeto medindo o centroide

dos robôs manipuladores. Os algoritmos e controladores são distribuídos e robustos a mudanças na topologia da rede, número de robôs e erro de sensor. Concluíram após testes que todos os algoritmos em ambientes do mundo real com nove robôs e que o erro da estimativa do centroide é baixo e que todos os quatro controladores produzem um movimento confiável do objeto.

Em (STROUPE et al., 2005), os autores apresentam um sistema multi-robô heterogêneo, usando uma abordagem líder-seguidor. O estudo demonstra, por meio de robôs físicos, a capacidade de agarrar, levantar, transportar e posicionar objetos longos em uma tarefa de construção autônoma. Um grupo de dois robôs são necessários para manipular objetos a fim de construir uma estrutura existente em um ambiente realista. Os robôs se comunicam entre si para sincronizarem a apreensão, levantamento e colocação dos objetos na construção da estrutura. Os robôs coordenam suas ações medindo as forças aplicadas no objeto transportado usando um sensor de força-torque localizado em seus manipuladores. O seguidor coordena com o líder ajustando sua velocidade com base no retorno de força-torque de modo que os torques e as forças no manipulador permaneçam dentro do limite definido experimentalmente. Concluíram com base nas simulações que os robôs realizaram com êxito a tarefa de construção com uma baixa taxa de falhas.

Em (TUCI et al., 2005), os autores apresentam dois conjuntos de experimentos nos quais um grupo de robôs móveis, chamados *s-bot* (MONDADA et al., 2004). Os robôs se conectam fisicamente, para lidar com as condições ambientais que os impedem de realizar sua tarefa individualmente. O primeiro conjunto de experimentos é um estudo sobre a utilidade de robôs de automontagem para lidar com cenários relativamente complexos, como o transporte cooperativo de objetos. O segundo conjunto de experimentos é para aumentar a adaptabilidade do sistema multi-robô. No caso, sintetizam um mecanismo de tomada de decisão integrado que permite ao *s-bot* decidir de forma autônoma se as contingências ambientais exigem ou não a automontagem.

Os resultados do primeiro trabalho mostram que os *s-bot* possuem características de *hardware* que facilitam o projeto de mecanismos de controle para automontagem autônoma. A arquitetura de controle que desenvolveram foi particularmente bem sucedida em guiar os robôs envolvidos na tarefa de transporte cooperativo. No entanto, os resultados também mostraram que alguns recursos dos controladores dos robôs tiveram um efeito perturbador em seus desempenhos. Os resultados do segundo trabalho mostram que é

possível sintetizar, por meio de técnicas de computação evolutiva, redes neurais artificiais que integram tanto os mecanismos de coordenação sensório-motora quanto de tomada de decisão exigidos pelos robôs no contexto de automontagem. Outro estudo envolvendo uma estratégia de agarramento semelhante para os robôs se conectarem fisicamente e para transportarem um objeto é descrito em (GROSS; DORIGO, 2008).

## 2.3 Transporte por Impulsioneamento

Estratégias de transporte por impulsioneamento são métodos de transporte coletivo de objetos, exercendo forças de empurrar sobre o objeto. Esse tipo de estratégia é empregado principalmente por robôs que não conseguem puxar objetos, uma vez que não têm como agarrá-los. Nesta seção, são apresentadas algumas estratégias de impulsioneamento com abordagens diferentes.

Em (KUBE; HONG, 1997), demonstram que uma certa classe de tarefas cooperativas, nomeadamente de manipulação de caixa coordenada, são possíveis sem comunicação explícita ou mecanismos de cooperação. A abordagem depende da decomposição de sub-tarefas e do pré-processamento do sensor. Propõem uma estrutura para modelar tarefas multi-robôs que são descritas como uma série de etapas com cada etapa consistindo em subetapas. A teoria dos autômatos de estados finitos é usada para modelar etapas com transições de estado especificadas como predicados de detecção binárias chamadas de pistas perceptivas. Uma pista perceptiva, cujo cálculo é separado da operação dos autômatos, é processada por uma máquina de estado finito de três níveis chamada máquina Q. A abordagem é projetada para um conjunto redundante de robôs móveis homogêneos, onde onze robôs impulsioneam a caixa.

Os resultados foram apresentados neste trabalho para um sistema de robôs físicos capazes de moverem um objeto pesado coletivamente para uma posição de destino especificado arbitrariamente. Os resultados demonstram que uma solução viável, versus ótima, existe usando controle reativo em tarefas cooperativas que requerem coordenação estreita sem recorrer a mecanismos de cooperação, como comunicação explícita. A contribuição é um modelo de programação de tarefa simples para sistemas multi-robôs móveis. Argumenta-se que as máquinas Q e pistas perceptivas oferecem uma nova abordagem para modelagem de tarefas específicas do ambiente em robótica coletiva. Outro trabalho envolvendo uma estratégia de impulsar semelhante para modelagem de tarefas é

descrito em (KUBE; BONABEAU, 2000), neste trabalho apresentam novos resultados de experimentos usando quatro tipos diferentes de caixas transportadas entre duas posições de destino.

Em (MATARIC; NILSSON; SIMSARIAN, 1995), os autores propõem o uso de comunicação direta para melhorarem a coordenação de um grupo homogêneo de dois robôs de seis pernas equipados com sensoriamento de objeto e destino e um repertório de comportamentos de contato e seguidor de luz. Necessários para transportar cooperativamente uma caixa retangular em direção a um alvo. Apresentam e demonstram experimentalmente uma abordagem que utiliza a cooperação em três níveis, detecção, ação e controle, e aproveita um protocolo de comunicação simples para compensar a detecção incerta e ruidosa dos robôs. A estratégia de controle é reativa, baseada em informações sensoriais imediatas, a comunicação é usada pelos agentes para trocarem suas leituras de sensores e implementarem um protocolo de tomada de turnos. Para o alinhamento inicial das forças de impulsionar, os robôs são posicionados à esquerda e à direita de um dos lados do objeto mais comprido. Os resultados indicam que o uso da comunicação e do protocolo de tomada de turnos ajuda significativamente os robôs a melhorarem o desempenho geral do grupo.

Em (GERKEY; MATARIC, 2002), os autores propõem um método que ilustra o desempenho de um grupo de três robôs em que um elemento do grupo desempenha o papel de observador e os outros dois robôs desempenham o papel de empurrador. O observador percebe o objeto e os destinos do objetivo, e sua principal função é conduzir a equipe fornecendo aos demais robôs informações sobre a direção do transporte. Os empurradores impulsionam o objeto cuboide sem perceber o destino do objetivo que permanece oculto atrás da caixa que obstrui sua visão. Os robôs contam com uma forma de comunicação direta para a coordenação de suas ações. A trajetória de transporte é livre de obstáculos e as funções são atribuídas usando um sistema baseado em leilão, no caso, arquitetura *Murdoch*. O grupo heterogêneo consegue transportar com sucesso o objeto em trajetórias retas e curvas. O sistema também se mostrou resiliente à falha de um dos empurradores e, em certa medida, à falha do mecanismo de comunicação que sustenta a interação empurrador-observador. No entanto, o sistema depende muito das capacidades de um único observador, que atua como um elemento-chave que reúne informações sensoriais

enviadas pelos empurradores e gera a resposta do grupo, instruindo-os sobre como se moverem.

Em (CHEN et al., 2015), os autores propõem um método alternativo de transporte em grupo que explora a oclusão, ao invés de tentar superar as limitações impostas por ela. Esse método foi utilizado para transportar um objeto grande para um destino usando um grande número de robôs móveis que são significativamente menores do que o objeto. Os robôs apenas impulsionam o objeto em posições onde a linha de visão direta para o destino é obstruída pelo objeto. Este comportamento simples resulta no transporte do objeto em direção ao destino sem usar qualquer forma de comunicação direta, esta estratégia é totalmente descentralizada e não possuem mecanismos de manipulação específicos.

Implementaram essa estratégia na plataforma robótica *e-puck* de (MONDADA et al., 2009) e apresentaram experimentos sistemáticos com um grupo de vinte *e-pucks* transportando três objetos de diferentes formatos sendo eles um triangular, um retangular e um circular. Os objetos foram transportados com sucesso para o destino em quarenta e três de quarenta e cinco tentativas. Ao usar um destino móvel, teleoperado por um humano via *Bluetooth*, o objeto pode ser navegado através de um ambiente com obstáculos. Conforme os robôs de transporte empurram o objeto em direção ao robô objetivo, o operador pode controlar indiretamente a direção do transporte ao dirigir o robô objetivo. Em (KAPELLMANN-ZAFRA; CHEN; GROSS, 2016), a principal diferença para (CHEN et al., 2015) é que o ser humano precisa interagir apenas com um único robô, e ainda assim ganha controle sobre as ações cooperativas de todo o enxame.

Os autores (WANG; SILVA, 2006) consideram um grupo heterogêneo de robôs que são necessários para transportar cooperativamente uma caixa, removendo obstáculos que obstruem o caminho para o destino final do transporte. Os autores propõem uma abordagem baseada no uso de um sistema de controle de força e movimento. Três tipos diferentes de agente foram usados nesta abordagem. Um agente de visão que tem uma visão global do ambiente para gerar posições e coordenadas de orientação de todos os robôs, o objeto e os obstáculos. Um agente de aprendizagem responsável por gerar planos de cooperação com base em uma abordagem de otimização que integra aprendizagem por reforço e algoritmo genético. Dois robôs físicos que executam o plano gerado pelos agentes de aprendizagem. O plano pode exigir que um robô deixe o transporte para remover obstáculos que obstruem o caminho até o destino final do transporte. O estudo demonstra a

viabilidade e a eficácia do método proposto usando experimentos com dois pequenos protótipos de robôs. Tanto a visão quanto os agentes de aprendizagem são elementos-chave cuja contribuição é vital para o correto funcionamento do sistema multi-robô.

Em (ALKILABI; NARAYAN; TUCI, 2016), os autores demonstram que a coordenação eficaz de ações para iniciar e sustentar o transporte de objetos cuboides retangulares pesados a serem movidos em uma direção arbitrária que pode ser obtida por grupos homogêneos de robôs. Explorando uma forma relativamente simples de comunicação indireta baseada apenas na possibilidade de monitorar os movimentos do objeto. Neste estudo, os robôs *e-puck* físicos são equipados com um sensor de fluxo óptico cujas leituras são usadas para distinguir entre os casos em que os robôs impulsionando as forças contribuem para mover o objeto daqueles casos em que os esforços dos robôs não resultam em qualquer movimento do objeto. A possibilidade de discriminar entre as duas circunstâncias mencionadas anteriormente é vital para o alinhamento inicial das forças de tração e para a sustentação do transporte. Os robôs são controlados por redes neurais dinâmicas sintetizadas usando técnicas de computação evolutiva. O controlador melhor desenvolvido demonstra uma estratégia de transporte de grupo eficaz que é robusta à variabilidade nas características físicas do objeto ou seja, massa do objeto e tamanho do lado do objeto mais longo e escalável para diferentes tamanhos de grupo. Em um estudo complementar (ALKILABI et al., 2018), os autores complementam o neurocontrolador dos robôs, inicialmente projetado para suportar o transporte de objetos em uma direção arbitrária, com mecanismos para direcionar o transporte para um local de destino específico.

Em (FUJISAWA; IMAMURA; MATSUNO, 2013), os autores demonstram um estudo de transporte cooperativo baseado no comportamento das formigas, na qual usam uma comunicação indireta via feromônio artificial. Neste estudo, usam três grupos com números diferentes de robôs, com quatro, sete e dez robôs. Em vez de um feromônio biológico, usam etanol, que é uma substância volátil semelhante ao feromônio de trilha e cada robô utiliza um sensor de álcool para detectar o feromônio e um tanque de etanol com uma micro bomba para depositar o feromônio.

A tarefa requer que os robôs realizem uma busca aleatória para encontrar um alimento, neste caso, um objeto pesado e transportá-lo para um local de destino, ou seja, o ninho. A comunicação baseada em feromônios é usada pelos robôs para recrutar outros companheiros de ninho quando um local que contenha o alimento é identificado. Os resul-

tados indicam que a comunicação baseada em feromônios contribui para reduzir o tempo de realização da tarefa, em comparação ao caso em que os robôs dependem totalmente de uma busca aleatório para se reunir na comida. O estudo também mostra que a comunicação baseada em feromônios é eficaz apenas com um número relativamente pequeno de robôs no ambiente, neste caso com quatro robôs a diferença foi maior. Entretanto, quando um grupo maior de robôs são usados, a tarefa é completada mais rapidamente, nesta situação foram dez robôs com uma diferença bem pequena com ou sem comunicação de feromônio.

Em (NEUMANN; CHIN; KITTS, 2014), um algoritmo executado em um servidor externo controla um grupo de robôs necessários para impulsionar uma caixa em trajetórias retas e circulares definidas pelo programador. Combinaram a metodologia de controle de *cluster space* com controle de força explícita para mover de forma eficaz e segura tal objeto com robôs móveis. O algoritmo gera informações sobre onde os robôs devem aplicar as forças de pressão e a magnitude das forças necessárias para transportar a caixa, baseado no controle de força explícita. O controle do *cluster space* é usado para manter a formação dos robôs móveis e sua posição em relação ao objeto, a posição e a orientação dos robôs e da caixa são medidas usando uma etiqueta de banda ultra larga colocada nos robôs e também na caixa. As leituras geradas pelos sensores de força e dados relativos à posição dos robôs gerados pelo sistema de banda ultra larga são encaminhados para um servidor central. Por sua vez calcula a velocidade necessária dos robôs e envia os comandos para os robôs de acordo. Os robôs executam os comandos para gerar as forças e torques desejados no objeto a fim de movê-lo ao longo de uma trajetória planejada. O estudo demonstra a validade do método proposto usando dois robôs homogêneos equipados com extensão de sensores de força articulados. O servidor que executa o algoritmo de controle é o elemento principal que gerencia as ações dos robôs enviando instruções a cada robô por meio de uma forma de comunicação direta, suportada por uma rede de comunicação sem fio.

As vantagens desse método, em primeiro lugar, a arquitetura proposta permite a ação simultânea de todos os robôs móveis para o transporte de objetos. Em segundo lugar, por meio do controle de *cluster*, os robôs móveis são mais reativos uns aos outros do que uma arquitetura líder-seguidor estrita, em que um líder pode não compensar por um seguidor em dificuldade. Terceiro, ao monitorar as forças durante o movimento, a arquitetura evita forças perigosas que poderiam ser desenvolvidas com métodos de enjau-

lamento. Existem várias desvantagens na arquitetura de controle proposta. A arquitetura não é ideal para robôs controlados cinematicamente, uma vez que não haverá uma correspondência um-para-um entre velocidades e forças. Além disso, para situações com forças de atrito de *Coulomb* que são significativamente maiores do que as forças devido à aceleração, os robôs só podem aplicar efetivamente uma única força, enquanto em movimento. Apesar dessas deficiências, a arquitetura conseguiu alcançar com sucesso os objetivos dos experimentos.

## 2.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados trabalhos relacionados ao problema de transporte coletivo de objetos que servem como alternativa, principalmente aos objetos pesados, grandes ou com que possuem formas complexas que não são capazes de serem transportados por apenas um robô e levá-los ao seu destino final. Entretanto, esse não é um requisito estrito, nem todos os robôs do grupo precisam participar do ato físico de transporte, impulsionar o objeto. Como mostrado, a cooperação ainda pode ser alcançada quando um único ou poucos robôs transportam o objeto e os outros planejam a coordenação e a navegação dos transportadores ao longo de uma trajetória desejada.

Os métodos foram classificados segundo três possíveis estratégias: transporte por enjaulamento, transporte por agarramento e transporte por impulsionamento. Os métodos de enjaulamento estudados mostram que o cerco deve ser mantido durante o transporte para garantir que o objeto não escape dos robôs. No transporte cooperativo baseado nas estratégias de enjaulamento e de agarramento, o tamanho e a forma do objeto são características particularmente importantes. Uma vez que afetam o número de robôs necessários para cercar ou agarrar o objeto.

As soluções de transporte por impulsionamento podem parecer métodos relativamente simples de transporte cooperativo. No entanto, além dos desafios comuns a todas as estratégias de transporte, as estratégias de impulsionamento exigem uma quantidade significativa de coordenação de ações para sustentar o transporte. O objeto pode se mover em uma trajetória muito ineficiente, a menos que os robôs gerenciem cuidadosamente as forças de atrito, gravitacional e dinâmica para estabilizar a direção do transporte. De uma forma geral, é importante notar que a grande maioria desses trabalhos é baseada em grupos homogêneos de robôs, exceto em (GERKEY; MATARIC, 2002) e (WANG; SILVA,

2006). Os grupos que exploram a comunicação indireta prevalecem sobre os grupos que exploram as formas de comunicação direta. Maioria dos estudos olha para cenários de transporte simplificados, onde os problemas relacionados ao alinhamento inicial das forças de empurrar são resolvidos inicializando os robôs muito próximos do objeto, voltados para o mesmo lado do objeto. No próximo capítulo são apresentados os modelos para transportar o objeto.

## Capítulo 3

# MODELOS PARA O IMPULSIONAMENTO DO OBJETO

**N**ESTE trabalho, dentre as três estratégias de transporte, apresentadas anteriormente, a estratégia abordada neste trabalho é de impulsionamento. Na Seção 3.1 apresenta os cálculos para o posicionamento inicial dos robôs e o reposicionamento dos robôs após um empurrão no objeto. Na Seção 3.2 apresenta os cálculos relacionados a força resultante dos robôs para impulsionar o objeto. Na Seção 3.3 mostra o cálculo da quantidade mínima e máxima de robôs que podem impulsionar atrás de um objeto. Na Seção 3.4 são apresentadas as considerações finais para o capítulo.

### 3.1 Posicionamento dos robôs

Os robôs se posicionam atrás do objeto para impulsioná-lo. A distribuição dos robôs atrás do objeto, depende do número de robôs  $\rho$  e da diferença angular entre cada robô, representado pelo ângulo  $\theta$ . Cada robô possui uma linha que passa no centro dele, no sentido da sua orientação, que passa o centro do objeto. O ângulo  $\theta$  é formado quando essas linhas se cruzam no centro do objeto. A Figura 4(a) ilustra o caso onde o número de robôs é par, o robô com número par fica deslocado à direita do ângulo  $\alpha$ . Entretanto, se o número do robô for ímpar, o robô fica deslocado à esquerda do ângulo  $\alpha$ . A Equação 1 demonstra o cálculo do rumo dos robôs quando o número de robôs é par. A Figura 4(b) ilustra o caso onde o número de robôs é ímpar, apenas o robô 0 se posiciona na mesma direção do ângulo  $\alpha$  e os demais robôs se posicionam da mesma forma que o caso anterior. A Equação 2 demonstra o cálculo do rumo dos robôs quando o número de robôs é ímpar. O ângulo  $\alpha$  é formado entre o ponto de referência que o objeto se encontra e o ponto de

referência que ele deve ser impulsionado. O ângulo  $\beta$  é aquele em o robô  $i$  se posiciona inicialmente em relação à linha horizontal do objeto para iniciar o transporte.

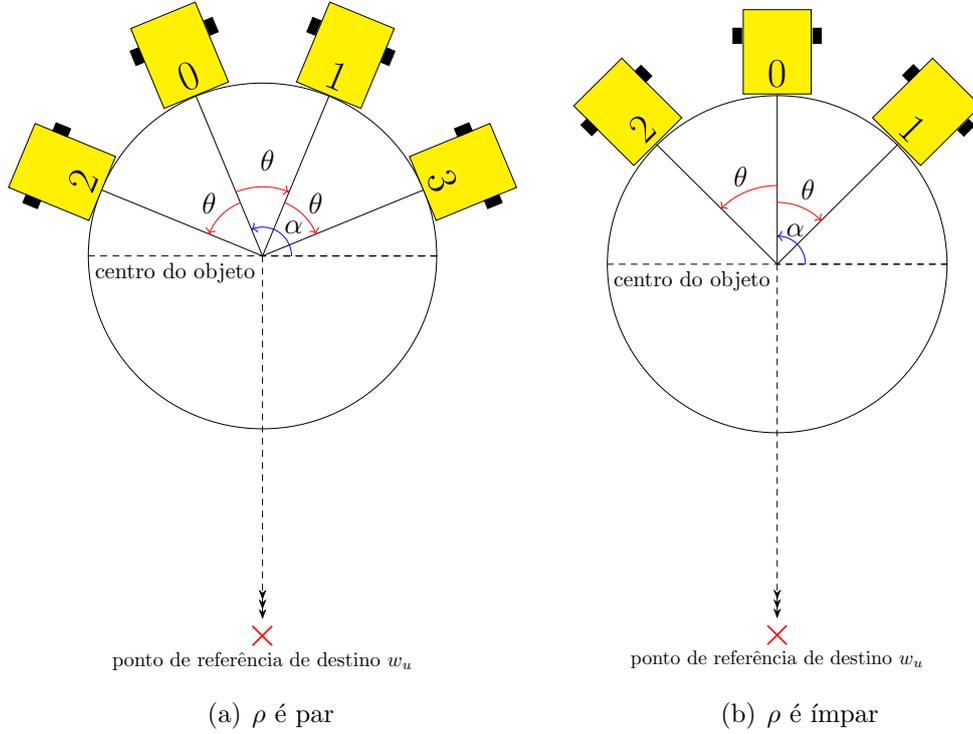


Figura 4: Ilustração do posicionamento inicial dos robôs

$$\beta_i = \begin{cases} \alpha + \theta \times (((i \mathbf{div} 2) + 1) - 0,5) & \text{se } i \bmod 2 = 0; \\ \alpha + \theta \times ((-(i + 1) \mathbf{div} 2) + 0,5) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta_i = \begin{cases} \alpha + \theta \times (i \mathbf{div} 2) & \text{se } i \bmod 2 = 0; \\ \alpha - \theta \times ((i + 1) \mathbf{div} 2) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

A pose do robô  $i$  é calculada conforme a Equação 3, considerando o ângulo  $\alpha$ , o diâmetro do robô  $d$ , o diâmetro do objeto  $D$  e a distribuição dos robôs atrás do objeto.

$$\begin{aligned} x_i &= w_x^* + ((d + D)/2) \times \cos(\beta + \pi) \\ y_i &= w_y^* + ((d + D)/2) \times \sin(\beta + \pi) \\ p_i &= [x_i, y_i, \beta_i]^T \end{aligned} \quad (3)$$

Após cada empurrão, é avaliado um novo ângulo  $\alpha^+$ . Seu cálculo é igual ao utilizado para o do ângulo  $\alpha$ . Caso haja um desvio maior do que o erro angular  $\Delta\theta_0$ , calcula-se novamente a pose dos robôs baseando-se no ângulo  $\alpha^+$ . Caso contrário, utiliza-se o ângulo  $\alpha$ . A Figura 5(a) ilustra um posicionamento errado dos robôs, após um empurrão, onde

o objeto se desviou da trajetória esperada. Já a Figura 5(b) ilustra o reposicionamento correto dos robôs. Os robôs se reposicionam utilizando o ângulo  $\alpha^+$  para transportar corretamente o objeto até o ponto de referência  $w_u$ .

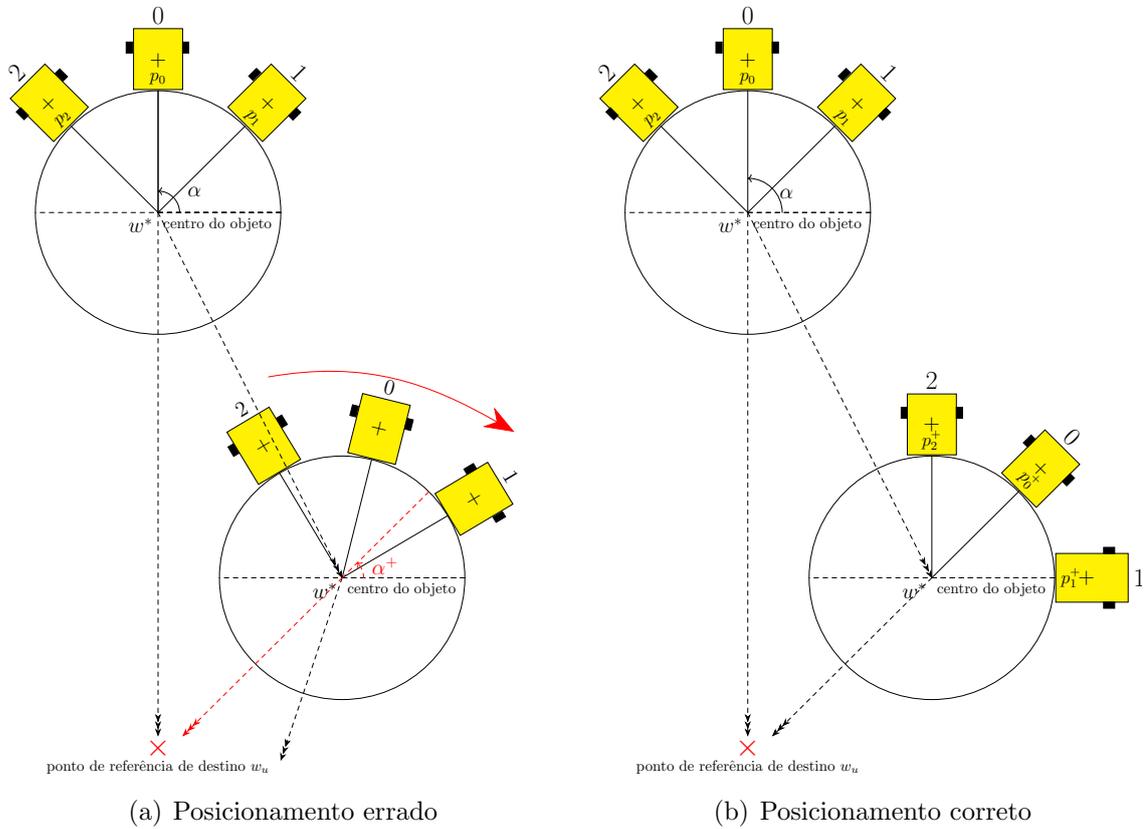


Figura 5: Ilustração do reposicionamento

### 3.2 Força resultante dos robôs

O modelo da força resultante dos robôs é importante, pois ela permite identificar a força necessária para os robôs impulsionarem um objeto de massa  $M$  com uma aceleração  $A$ . Dependendo da massa do objeto a ser transportado, precisa-se de mais, ou menos robôs. O objeto estando em um ponto de referência deve ser transportado em linha reta para o próximo ponto de referência. Logo, o sentido que os robôs devem impulsionar o objeto é necessário um ângulo, que permite esse sentido em linha reta, até o próximo ponto de referência.

Os robôs não levantam o objeto, logo não há nenhum movimento na vertical. De acordo com a terceira lei de Newton: toda ação corresponde a uma reação de igual intensidade, mas que atua no sentido oposto (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). Na

vertical o objeto exerce uma ação, denominada força peso  $Pe$  sobre a superfície da arena e a reação a essa força peso  $Pe$  é chamada de força normal  $N$ . Neste caso, como o objeto não sofre movimento na vertical, a força peso  $Pe$  é igual a força normal  $N$ .

Inicialmente, os robôs não aplicam força sobre o objeto, apenas se posicionam atrás do objeto, para impulsioná-lo. Assim, o objeto está sobre influência da primeira lei de Newton: lei da inércia, como nenhuma força resultante atua sobre o objeto, a velocidade não pode mudar, ou seja, o objeto não pode sofrer aceleração (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Os robôs para impulsionar um objeto da posição inicial até a posição final, aplicam uma força sobre ele. A Figura 6 mostra a força resultante  $\vec{F}_i$  de cada robô. O ângulo formado pela força resultante  $\vec{F}$  dos robôs deve ser igual a  $\alpha$ .

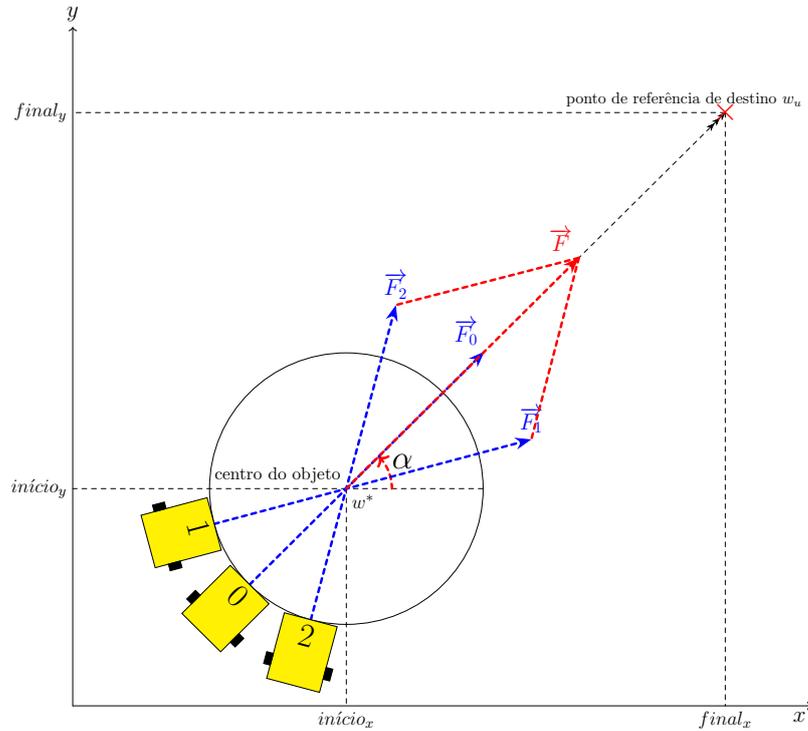


Figura 6: Força resultante dos robôs para impulsionar o objeto

De acordo com a segunda lei de Newton: princípio fundamental da dinâmica, a força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela aceleração (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). No caso do robô  $i$ , o motor produz uma força resultante  $\vec{F}_i$ , conforme apresentado pela Equação 4:

$$\vec{F}_i = m \times \vec{a}, \quad (4)$$

onde aceleração do robô  $i$  é definida como  $a$  e  $m$  é a massa do robô  $i$ . Os robôs são iguais, portanto, a massa e a aceleração são as mesmas.

A força resultante  $\vec{F}$  é o somatório da força resultante  $\vec{F}_i$  de cada robô, conforme apresentado pela Equação 5.

$$\vec{F} = \sum_{i=0}^{\rho-1} \vec{F}_i = m \times \vec{a} \times \rho \quad (5)$$

A decomposição da força resultante  $\vec{F}$  dos robôs que agem sobre o objeto é composta pelas componentes da sua força  $F_x$  no eixo x e da sua força  $F_y$  no eixo y. A força  $F_{i_x}$  do robô  $i$  no eixo x é apresentada na Equação 6. A força  $F_{i_y}$  do robô  $i$  no eixo y é apresentada na Equação 7. A força  $F_x$  no eixo x é o somatório das forças  $F_{i_x}$  de cada robô no eixo x, conforme mostra a Equação 8. A força  $F_y$  no eixo y é o somatório das forças  $F_{i_y}$  de cada robô no eixo y, conforme apresentado pela Equação 9. O ângulo  $\beta_i$  é o rumo do robô  $i$ . A Figura 7 mostra a força resultante  $\vec{F}_i$  do robô  $i$ , e as forças nas componentes  $x$  e  $y$ .

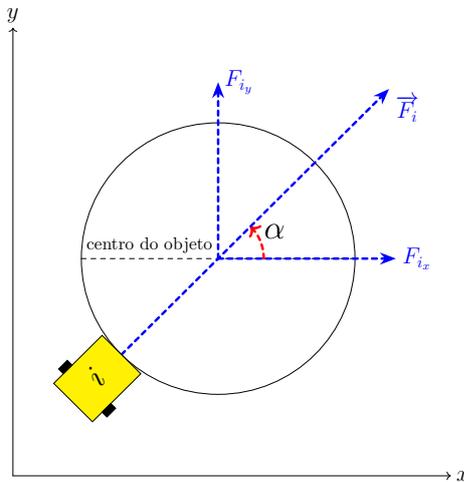


Figura 7: Decomposição da força resultante do robô  $i$

$$F_{i_x} = m \times a \times \cos(\beta_i) \quad (6)$$

$$F_{i_y} = m \times a \times \sin(\beta_i) \quad (7)$$

$$F_x = \sum_{i=0}^{\rho-1} F_{i_x} = m \times a \times \sum_{i=0}^{\rho-1} \cos(\beta_i) \quad (8)$$

$$F_y = \sum_{i=0}^{\rho-1} F_{i_y} = m \times a \times \sum_{i=0}^{\rho-1} \sin(\beta_i) \quad (9)$$

O cálculo do módulo da força resultante  $\vec{F}$  é mostrado na Equação 10. O ângulo  $\gamma$  é o ângulo que a força resultante  $\vec{F}$  faz em relação ao eixo x. Este ângulo mostra a direção da força resultante  $\vec{F}$  que os robôs devem impulsionar o objeto, neste caso para o ponto de referência de destino  $w_u$ . O ângulo  $\gamma$  deve ser igual ao ângulo  $\alpha$ , pois é o sentido que o objeto deve ir do ponto de referência inicial até o ponto de referência de destino  $w_u$ . A Equação 11 mostra o cálculo do ângulo  $\gamma$ .

$$|\vec{F}| = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2} = m \times a \times \rho \quad (10)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = \arctan\left(\frac{\sum_{i=0}^{\rho-1} \sin(\beta_i)}{\sum_{i=0}^{\rho-1} \cos(\beta_i)}\right) \quad (11)$$

O objeto inicialmente está em repouso, entretanto, no momento que os robôs aplicam conjuntamente força sobre ele, para impulsioná-lo, a força resultante  $\vec{F}$  sobre o mesmo não é mais nula. A Equação 12 mostra o cálculo para a força resultante necessária para impulsionar um objeto de massa  $M$  com uma aceleração  $A$ .

$$\vec{F} = M \times \vec{A} \quad (12)$$

A massa do objeto  $M$  é um valor escalar sempre positivo, a direção e o sentido da aceleração  $\vec{A}$  de um objeto é sempre idêntico ao da força resultante que atua sobre ele. A força  $\vec{F}$  que age sobre o objeto é a força resultante  $\vec{F}$  dos robôs, que impulsionam o objeto. Através das Equações 5 e 12, a aceleração  $A$  do objeto pode ser determinada através da Equação 13.

$$A = \frac{\rho \times m \times a}{M} \quad (13)$$

Os robôs impulsionam o objeto durante um passo de tempo  $\Delta t$ , onde os robôs podem atingir suas velocidades máximas  $v_{max}$ . Após, o intervalo de tempo  $\Delta t$ , os robôs param de impulsionar o objeto e param. Logo após, o objeto ter alcançado uma nova posição, os robôs se posicionam novamente, conforme explicado na Seção 3.1.

### 3.3 Número de robôs

Como visto anteriormente, o objeto precisa de uma força para deslocar sua massa  $M$  com uma aceleração  $A$ . Logo, há uma necessidade de um número mínimo de robôs  $\rho_{min}$  para exercer força sobre o objeto, para impulsioná-lo até o ponto de referência de destino  $w_u$ . A quantidade mínima de robôs  $\rho_{min}$  necessária para impulsionar o objeto de massa  $M$  é definida pela Equação 14:

$$\rho_{min} = \frac{M \times A}{m \times a}. \quad (14)$$

Note que a Equação 14 é baseada nas Equações 5 e 12. Ademais, caso o número de robôs disponíveis seja inferior ao necessário para impulsionar o objeto, o mesmo permanecerá inerte.

O objetivo principal de se utilizar o número máximo de robôs é que a força do robô  $i$  para impulsionar o objeto, seja menor. Neste caso, a aceleração do robô  $i$  é menor. Para calcular a quantidade máxima de robôs que podem impulsionar atrás de um objeto em direção ao ponto de referência de destino  $w_u$ , sem que as forças dos robôs se anulem são dadas pelas equações abaixo. Na Figura 8 é possível através de um triângulo retângulo encontrarmos a metade do ângulo mínimo  $\theta_{min}$  entre o rumo de dois robôs em relação ao centro do objeto. O cateto adjacente é a linha tracejada que parte do centro do objeto, até onde está indicado o meio do espaçamento mínimo  $\varepsilon$  entre os robôs 0 e 1. O cateto oposto é o raio do robô 0, acrescido metade do espaçamento mínimo entre os robôs. A hipotenusa é o raio do objeto, acrescido o raio do robô 0. Assim, obtemos a metade do ângulo mínimo entre os robôs. O mesmo raciocínio pode ser feito com o robô 1.

Portanto, a verificação da metade do ângulo mínimo  $\theta_{min}$  entre o rumo de dois robôs em relação ao centro do objeto é dado pela Equação 15:

$$\arctan\left(\frac{\theta_{min}}{2}\right) = \frac{(d/2 + \varepsilon/2)}{\sqrt{(d/2 + D/2)^2 - (d/2 + \varepsilon/2)^2}}, \quad (15)$$

onde  $d$  é o diâmetro do robô,  $D$  é o diâmetro do objeto e  $\varepsilon$  é o espaçamento mínimo entre os robôs.

Os robôs não podem ficar com um ângulo entre eles de  $180^\circ$ , caso contrário suas forças se anulariam e estariam prendendo o objeto, ao invés de impulsioná-lo em direção

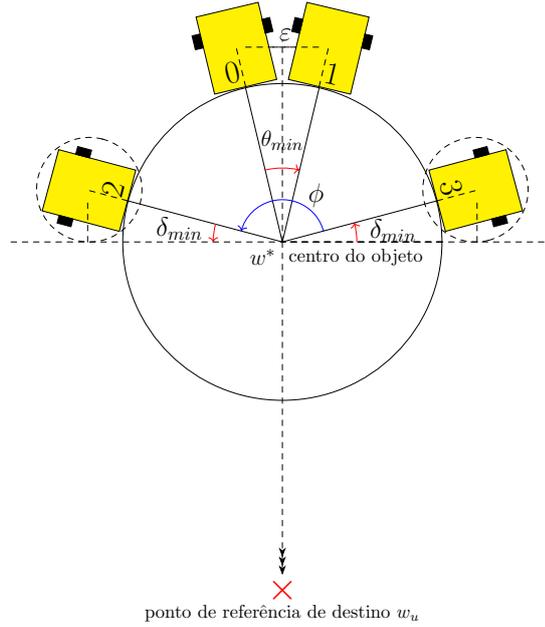


Figura 8: Número máximo de robôs para impulsionar o objeto

ao ponto de referência de destino  $w_u$ . O ângulo mínimo  $\delta_{min}$  que um robô deve fazer em relação a horizontal e o centro do objeto é dado pela Equação 16:

$$\arctan(\delta_{min}) = \frac{d/2}{\sqrt{(d/2 + D/2)^2 - (d/2)^2}}. \quad (16)$$

O cálculo do número máximo de robôs  $\rho_{max}$  para impulsionar um objeto é em função do ângulo entre os robôs  $\theta_{min}$ , com o centro do objeto e do ângulo mínimo  $\delta_{min}$  que um robô deve fazer em relação a horizontal, e com o centro do objeto, como mostra a Equação 17:

$$\rho_{max} = \left\lceil \frac{\phi}{\theta_{min}} \right\rceil = \left\lceil \frac{180^\circ - 2 \times \delta_{min}}{\theta_{min}} \right\rceil, \quad (17)$$

onde a diferença entre  $180^\circ$ , e duas vezes o ângulo mínimo  $\delta_{min}$ , representa o ângulo  $\phi$ , mostrado na Figura 8.

### 3.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se os cálculos para o posicionamento inicial dos robôs e o posicionamento após um empurrão no objeto. Apresentou-se as forças dos robôs exercidas sobre o objeto. Apresentou-se os cálculos para o número mínimo e máximo de robôs para impulsionar o objeto. O próximo capítulo apresenta os algoritmos do TCOI.

## Capítulo 4

# ALGORITMOS PARA SIMULAÇÃO DO TCOI

**N**E este trabalho, dois métodos distintos são feitos para procurar o objeto e recrutar os robôs. As outras etapas são iguais nos dois métodos. Na Seção 4.1 apresenta o algoritmo para determinar as posições dos pontos de referência e as poses iniciais dos robôs. Na Seção 4.2 apresenta os algoritmos de procura do objeto e recrutamento os robôs, para o método de procura randômica e para o método de procura baseado no forrageamento de formigas. Na Seção 4.3 apresenta o algoritmo do posicionamento inicial dos robôs. Na Seção 4.4 apresenta o algoritmo do transporte do objeto. Na Seção 4.5 são apresentadas as considerações finais para o capítulo.

A implementação do TCOI está estruturada em cinco etapas principais nos dois métodos, conforme mostrado no Algoritmo 1: *inicializar arena*, *procurar objeto*, *recrutar robôs*, *posicionar robôs* e *transportar objeto*. Vale notar que para as etapas referentes à procura pelo objeto e ao recrutamento dos robôs são propostas duas abordagens: uma baseada numa busca randômica e a outra inspirada pelo método de forrageamento de formigas. Note que  $W$  é o conjunto das posições dos pontos de referência, que  $P$  é o conjunto das poses dos robôs, que  $\alpha$  é o ângulo entre a linha horizontal, que passa no centro do objeto, e a linha horizontal, que passa no centro do penúltimo ponto de referência da rota  $C^*$  e que  $\tau$  é a matriz de feromônios. A escolha do ponto de referência  $w^*$  pode ser realizada de forma randômica, exceto pelo ponto de referência inicial  $w_0$ . Inicialmente, os robôs não possuem conhecimento sobre a localização do ponto de referência  $w^*$ .

Na etapa de inicialização da arena, são determinadas as posições dos pontos de referência  $W$  e as poses iniciais dos robôs  $P$ . Na etapa de procura do objeto, a cada iteração é realizada a procura do ponto de referência  $w^*$ . Nesta etapa, é verificado se o

**Algoritmo 1** TCOI**requer**  $\rho, \omega, A$ ;

- 1: Inicializar Arena( $\rho, \omega$ );
- 2: Procura do objeto pelo robô  $i(W, P)$ ;
- 3: Recrutar robô  $i(p_i, C_i, C^*)$ ;
- 4: Posicionar Robôs( $w^*, C^*, P$ );
- 5: Transportar Objeto( $w^*, w_0, \alpha, P, C^*$ );

ponto de referência desejado  $w^*$  é alcançado, através da diferença entre a pose do robô  $i$  ( $p_i$ ) e o sensor de distância do robô  $i$ , definido como  $sensor_i$ , sendo que este sensor é emulado. Em caso negativo, é realizado o caminho até o último ponto de referência escolhido  $w_u$ . A próxima etapa a ser executada é o recrutamento, que acontece após um dos robôs ter alcançado  $w^*$  e o restante dos robôs atingirem seu respectivo ponto de referência. Após o recrutamento ter sido alcançado, os robôs se posicionam para iniciarem a etapa de transporte. Por fim, os robôs transportam o objeto até seu destino final.

## 4.1 Inicialização da Arena

A etapa de inicialização da arena é implementada conforme mostrado no Algoritmo 2. Nesta etapa, são determinadas as posições dos pontos de referência e as poses iniciais dos robôs.

**Algoritmo 2** Inicializar Arena**requer**  $\rho, \omega$ ;**garante**  $W, P$ ;

- 1: **para**  $k := 0 \rightarrow \omega - 1$  **faça**
- 2:   **Gera**  $w_k$  na arena;
- 3: **fim para**
- 4: **para**  $i := 0 \rightarrow \rho - 1$  **faça**
- 5:   **Gera** randomicamente  $p_i$  ao redor do  $w_0$ ;
- 6: **fim para**

## 4.2 Procura do objeto e recrutamento dos robôs

As duas etapas do TCOI que divergem nos dois métodos são: procurar objeto e recrutar robôs. Inicialmente é abordado o método de procura randômica. Logo após, o método de procura baseado no forrageamento de formigas é abordado.

### 4.2.1 Método de procura randômica

Durante a etapa de procura do objeto, a cada iteração é realizada a procura do ponto de referência  $w^*$ . A escolha para qual ponto de referência o robô  $i$  deve ir, é realizada de forma randômica.

#### 4.2.1.1 Algoritmo de procura usando busca randômica

A etapa de procura do objeto é implementada conforme mostrado no Algoritmo 3. Nesta etapa, o robô  $i$  escolhe randomicamente um ponto de referência  $r$ , pertencente a adjacência do ponto de referência atual  $w_i$ , onde este se encontra e que não tenha sido escolhido anteriormente, essa adjacência é denominada como  $A_i^{w_i}$ . Dessa forma, o ponto de referência  $r$  é atribuído a última posição  $u_i$  da sua rota  $C_i$ .

O robô que encontra o objeto primeiro, tem sua rota escolhida como a menor rota  $C^*$ . A rota  $C^*$  é uma das entradas na etapa de recrutamento. Os robôs restantes, cada um se encaminha para o último ponto de referência escolhido aleatoriamente  $r$ .

#### 4.2.1.2 Algoritmo de recrutamento no caso de procura randômica

O Algoritmo 4 descreve o método proposto para implementar o recrutamento dos robôs do enxame para chegarem no objeto. Existem duas opções: os robôs irem direto ao ponto de referência  $w^*$  ou percorrerem o sub-caminho na rota  $C^*$  que leva o robô da sua pose corrente até  $w^*$ . Neste trabalho, a segunda opção é explorada. Esta etapa é responsável por levar os robôs, que não encontraram o objeto, até o mesmo, pela rota  $C^*$  e, caso o robô  $i$  já se encontre perto do objeto, que ele permaneça lá. Note que  $q$  é uma variável para o último ponto de referência da rota  $C^*$  e que  $g$  é uma variável para um dado ponto de referência.

Inicialmente, é realizada a comparação entre o último ponto de referência da rota  $C_i$  e a rota  $C^*$ . Nesta comparação, três situações são possíveis, sendo que na última, dois casos são possíveis:

1.  $C_i[u_i] = w^*$ , indica que o último ponto de referência da sua rota  $C_i$  é o ponto de referência onde se encontra o objeto  $w^*$ . Logo, o robô  $i$  permanece em sua pose  $p_i$ .
2.  $(C_i[u_i] \in C^*) \wedge (C_i[u_i] \neq w^*)$ , indica que o último ponto de referência da sua rota  $C_i$  pertence à rota  $C^*$ , porém este ponto de referência não é o ponto de referência  $w^*$ .

---

**Algoritmo 3** Procura do objeto pelo robô  $i$  usando busca randômica

---

**requer**  $W\{w_0, w_1, \dots, w_{\omega-1}\}, P\{p_0, p_1, \dots, p_{\rho-1}\};$   
**garante**  $C_i, C^*, p_i, w^*;$

- 1:  $var_i \leftarrow false;$
- 2:  $obj\_enc \leftarrow false;$
- 3:  $mc \leftarrow \infty;$  { $mc$  é o comprimento da menor rota}
- 4:  $u_i \leftarrow 0;$
- 5: **enquanto**  $\neg obj\_enc$  **faça**
- 6:   **Gera** randomicamente  $r \in A_i^{w_i};$
- 7:    $C_i[u_i] \leftarrow r;$
- 8:    $u_i \leftarrow u_i + 1;$
- 9:   **enquanto**  $sensor_i > 0.5 \wedge p_i \neq r$  **faça**
- 10:     robô  $i$  avança na direção de  $r;$
- 11:   **fim enquanto;**
- 12:   **se**  $sensor_i \leq 0.5$  **então**
- 13:      $w^* \leftarrow r;$
- 14:      $oe_i \leftarrow true;$  {variável objeto encontrado}
- 15:   **fim se**
- 16:   **para**  $i := 0 \rightarrow \rho - 1$  **faça**
- 17:     **se**  $oe_i = true$  **então**
- 18:        $obj\_enc \leftarrow true;$
- 19:        $z \leftarrow fc(C_i);$  { $fc$  calcula o comprimento da  $C_i$ }
- 20:       **se**  $z < mc$  **então**
- 21:          $mc \leftarrow z;$
- 22:          $C^* \leftarrow C_i;$
- 23:     **fim se**
- 24:   **fim se**
- 25:   **fim para**
- 26: **fim enquanto;**

---

Logo, o robô  $i$  parte deste ponto de referência pertencente à rota  $C^*$  até concluir toda a rota  $C^*$ .

3.  $C_i[u_i] \notin C^*$ , indica que o último ponto de referência da sua rota  $C_i$  não pertence à rota  $C^*$ , havendo aqui dois casos. No primeiro caso, se existir um ponto de referência na adjacência deste último ponto de referência da sua rota  $C_i$ , pertencente à rota  $C^*$ , o robô  $i$  se desloca para este ponto e, depois o robô  $i$  segue o item anterior. A adjacência é denominada como  $A_i^{C_i[u_i]}$ . No segundo caso, se não houver um ponto de referência na adjacência  $A_i^{C_i[u_i]}$ , pertencente à rota  $C^*$ , o robô  $i$  escolhe randomicamente um ponto de referência pertencente à adjacência  $A_i^{C_i[u_i]}$ , havendo aqui dois casos. No primeiro caso, o robô  $i$  pode alcançar um ponto de referência que na adjacência deste ponto de referência exista um ponto de referência, pertencente

à rota  $C^*$ . No segundo caso, o robô faz um caminho alternativo até o objeto, pois na adjacência dos pontos de referência que foi passando, não havia um ponto de referência pertencente a rota  $C^*$ .

---

**Algoritmo 4** Recrutar robô  $i$  no caso de procura randômica

---

**requer**  $p_i, C_i, C^*$ ;

**garante**  $p_i$

```

1: rota_enc = false;
2: se  $C_i[u_i] \in C^*$  então
3:   Seja  $q | C^*[q] = C_i[u_i]$ ;
4:   rota_enc  $\leftarrow$  true;
5: fim se
6: enquanto  $sensor_i > 0.5$  faça
7:   se rota_enc = true então
8:      $g \leftarrow C^*[q ++]$ ;
9:   senão
10:    se  $\exists q \in A_i^{C_i[u_i]} | q \in C^*$  então
11:       $g \leftarrow q$ ;
12:      rota_enc  $\leftarrow$  true;
13:    senão
14:      Gera randomicamente  $g \in A_i^{C_i[u_i]}$ ;
15:    fim se
16:  fim se
17:  enquanto  $p_i \neq g$  faça
18:    robô  $i$  avança na direção de  $g$ ;
19:  fim enquanto
20: fim enquanto

```

---

A ação de identificar o último ponto de referência da rota  $C_i$ , em relação à rota  $C^*$ , baseia-se no compromisso de reduzir o percurso até o ponto de referência  $w^*$ . Isto vem em decorrência do mesmo percurso ser usado de forma inversa para alcançar o ponto de referência  $w_0$  na etapa de transporte.

### 4.2.2 Método de procura baseado no forrageamento de formigas

Durante a etapa de procura do objeto, a cada iteração é realizada a procura do ponto de referência  $w^*$ . A escolha para qual ponto de referência o robô  $i$  deve ir, é realizada utilizando a regra de transição de estado do ACS.

### 4.2.2.1 Introdução ao ACS

O *ant colony system* (ACS) difere do *ant system* devido a três aspectos principais (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997):

1. A regra de transição de estado fornece uma forma direta de equilíbrio entre a exploração de novas arestas e a exploração de conhecimento a priori e acumulado sobre o problema.
2. A regra de atualização global é aplicado apenas às arestas que pertencem ao melhor passeio de formigas.
3. Enquanto as formigas constroem uma solução, uma regra de atualização local de feromônios (regra de atualização local) é aplicada.

O ACS funciona da seguinte forma: as formigas são inicialmente posicionadas nos pontos de referência escolhidos de acordo com alguma regra de inicialização. Cada formiga constrói uma rota aplicando repetidamente uma regra estocástica, a regra de transição de estado. Ao construir sua rota, uma formiga também modifica a quantidade de feromônio nos pontos de referência visitados aplicando a regra de atualização local. Uma vez que todas as formigas tenham terminado sua rota, a quantidade de feromônio nos pontos de referência é modificada novamente aplicando a regra de atualização global. As formigas são guiadas, na construção de suas rotas, tanto por informações heurísticas, preferem escolher pontos de referência com distâncias curtas, quanto por informações de feromônios. Um ponto de referência com uma grande quantidade de feromônio é uma escolha muito desejável. As regras de atualização de feromônios são projetadas de modo que tendam a fornecer mais feromônios aos pontos de referência que deveriam ser visitados por formigas. A seguir, discutimos a regra de transição de estado, a regra de atualização global e a regra de atualização local.

A regra de transição de estado é a seguinte: uma formiga posicionada em um ponto de referência escolhe um ponto de referência para onde se deslocar aplicando a regra dada pela Equação 18:

$$C_i[u_i] = \begin{cases} \arg \max_{w_{i+1} \in A_i^{w_i}} (\tau_{w_i, w_{i+1}}) \times (1/A_i^{w_i, w_{i+1}})^{\eta_2} & \text{se } q \leq q_0; \\ \text{roleta}_{w_{i+1} \in A_i^{w_i}} \frac{(\tau_{w_i, w_{i+1}})^{\eta_1} \times (1/A_i^{w_i, w_{i+1}})^{\eta_2}}{\sum_{w_{i+1} \in A_i^{w_i}} (\tau_{w_i, w_{i+1}})^{\eta_1} \times (1/A_i^{w_i, w_{i+1}})^{\eta_2}} & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (18)$$

onde  $\tau$  é a matriz de feromônios. A adjacência do ponto de referência atual  $w_i$ , onde o robô  $i$  se encontra e que não tenha visitado anteriormente, é denominada  $A_i^{w_i}$ . Os parâmetros  $\eta_1$  e  $\eta_2$  são usados para determinar a influência do feromônio e da informação heurística. O parâmetro  $q_0$  é entre 0 e 1, e  $q$  é um valor randômico entre 0 e 1.

A regra de transição de estado resultante é chamada de regra pseudo-proporcional aleatória. Essa regra de transição de estado, favorece transições para pontos de referência conectados por distâncias curtas e com grande quantidade de feromônio. O parâmetro  $q_0$  determina a importância relativa da intensificação versus diversificação. Toda vez que uma formiga no ponto de referência  $w_i$  tem que escolher um ponto de referência  $w_{i+1}$  para se mudar, ela amostra um número aleatório  $0 \leq q \leq 1$ . Se  $q \leq q_0$  então o melhor ponto de referência é escolhido, intensificação (*exploitation*). Caso contrário um ponto de referência é escolhido de acordo com a diversificação (*exploration*).

Na regra de atualização global do ACS, apenas a melhor formiga, ou seja, a formiga que construiu a rota mais curta desde o início do teste pode depositar feromônio. Essa escolha, juntamente com o uso da regra pseudo-proporcional aleatória, visa tornar a busca mais direcionada. As formigas procuram em uma adjacência da menor rota encontrada até a iteração atual do algoritmo. A atualização global é realizada depois que todas as formigas concluíram suas rotas. O nível de feromônio é atualizado aplicando a regra de atualização global da Equação 19:

$$\tau_{C_{w_i}^*, C_{w_{i+1}}^*} \leftarrow (1 - p) \times \tau_{C_{w_i}^*, C_{w_{i+1}}^*} + p \times (Q/mc), \forall (w_i, w_{i+1}) \in C^*, \quad (19)$$

onde  $0 < p < 1$  é o parâmetro de decaimento do feromônio. Os parâmetros  $p$  e  $Q$  são determinados de forma empírica. A atualização global tem o objetivo de fornecer uma maior quantidade de feromônio para rotas mais curtas. A Equação 19 determina que apenas os pontos de referência pertencentes a menor rota global receberão reforço.

Na regra de atualização local do ACS, ao construir uma solução, as formigas visitam os pontos de referência e mudam seu nível de feromônio aplicando a regra de atualização local dado pela Equação 20:

$$\tau_{u_{i-1},u_i} \leftarrow (1 - \xi) \times \tau_{u_{i-1},u_i} + \xi \times \tau_0, \quad (20)$$

onde  $\tau_0$  e  $\xi$  são parâmetros determinados de forma empírica.

#### 4.2.2.2 Algoritmo de procura usando ACS

A etapa de procura do objeto é implementada conforme mostrado em Algoritmo 5. Durante esta etapa, o robô  $i$  usa a regra de transição de estado para selecionar um ponto de referência  $g$ . Esta etapa é descrita em Algoritmo 6. O robô  $i$ , em seu ponto de referência atual  $w_i$ , escolhe se mover para o ponto de referência em sua adjacência  $A_i^{w_i}$  que ainda não foi visitado. As variáveis  $Pr_{int}$  e  $Pr_{div}$  representam as probabilidades de intensificação e diversificação, respectivamente. A matriz de feromônios  $\tau$  é usada no cálculo das probabilidades. Os parâmetros  $\eta_1$  e  $\eta_2$  são usados para determinar a influência do feromônio e da informação heurística,  $q_0$  é um valor entre 0 e 1. Se  $q \leq q_0$  então o melhor ponto de referência de acordo com a probabilidade de intensificação é escolhido, caso contrário, um ponto de referência é escolhido de acordo com a probabilidade de diversificação. Desta forma, o ponto de referência  $g$  é atribuído à última posição  $u_i$  da sua rota  $C_i$ . No caminho para o ponto de referência  $g$ , o feromônio é atualizado pela regra de atualização local.

O robô que encontra o objeto primeiro, tem sua rota escolhida como a menor rota  $C^*$ . A rota  $C^*$  é uma das entradas na fase de recrutamento. Os robôs restantes dirigem-se cada um para o último ponto de referência escolhido. Após cada robô  $i$  construir sua rota  $C_i$ , o feromônio é atualizado pela regra de atualização global. Onde,  $p$  é a taxa de evaporação e  $Q$  é uma constante. A evaporação e a deposição de feromônios ocorrem apenas em pontos de referência na rota  $C^*$ .

#### 4.2.2.3 Algoritmo de recrutamento no caso de procura usando ACS

O Algoritmo 7 descreve o método proposto para implementar o recrutamento dos robôs do enxame para chegarem no objeto. Existem duas opções: os robôs irem direto ao ponto de referência  $w^*$  ou percorrerem o sub-caminho na rota  $C^*$  que leva o robô da sua posição corrente até  $w^*$ . Neste trabalho, a segunda opção é explorada. Esta etapa é responsável por levar os robôs, que não encontraram o objeto, até o mesmo, pela rota  $C^*$  e, caso o robô  $i$  já se encontre perto do objeto, que ele permaneça lá. Note que  $b$  é uma variável para o último ponto de referência da rota  $C^*$  e que  $g$  é uma variável para um dado ponto de referência.

---

**Algoritmo 5** Procura do objeto pelo robô  $i$  usando ACS
 

---

**requer**  $W\{w_0, w_1, \dots, w_{\omega-1}\}, P\{p_0, p_1, \dots, p_{\rho-1}\}, \tau;$   
**garante**  $C_i, C^*, p_i, w^*, \tau;$

- 1:  $var_i \leftarrow false;$
- 2:  $obj\_enc \leftarrow false;$
- 3:  $u_i \leftarrow 0;$
- 4:  $mc \leftarrow \infty;$  { $mc$  é o comprimento da menor rota}
- 5: **enquanto**  $\neg obj\_enc$  **faça**
- 6:  $g \leftarrow$  Escolher a nova pose do robô  $i(W, \tau, A, w_i);$
- 7:  $C_i[u_i] \leftarrow g;$
- 8: **enquanto**  $sensor_i > 0.5 \wedge p_i \neq g$  **faça**
- 9: robô  $i$  avança na direção de  $g;$
- 10: **fim enquanto;**
- 11:  $\tau_{u_{i-1}, u_i} \leftarrow (1 - \xi) \times \tau_{u_{i-1}, u_i} + \xi \times \tau_0;$
- 12:  $u_i \leftarrow u_i + 1;$
- 13: **se**  $sensor_i \leq 0.5$  **então**
- 14:  $w^* \leftarrow r;$
- 15:  $oe_i \leftarrow true;$  {variável objeto encontrado}
- 16: **fim se**
- 17: **para**  $i := 0 \rightarrow \rho - 1$  **faça**
- 18: **se**  $oe_i = true$  **então**
- 19:  $obj\_enc \leftarrow true;$
- 20:  $z \leftarrow fc(C_i);$  { $fc$  calcula o comprimento da rota  $C_i$ }
- 21: **se**  $z < mc$  **então**
- 22:  $mc \leftarrow z;$
- 23:  $C^* \leftarrow C_i;$
- 24:  $u^* \leftarrow u_i;$
- 25: **fim se**
- 26: **fim se**
- 27: **fim para**
- 28: **fim enquanto;**
- 29: **para**  $j := 0 \leftarrow u^* - 1$  **faça**
- 30:  $\tau_{C_j^*, C_{j+1}^*} \leftarrow (1 - p) \times \tau_{C_j^*, C_{j+1}^*} + p \times (Q/mc)$
- 31: **fim para**

---

Inicialmente, é realizada a comparação entre o último ponto de referência da rota  $C_i$  e a rota  $C^*$ . Nesta comparação, três situações são possíveis, sendo que na última, dois casos são possíveis. As duas primeiras situações são idênticas as da Seção 4.2.1.2. Já a terceira situação existem dois casos. O primeiro caso é idêntico, ao primeiro caso da terceira situação apresentado na Seção 4.2.1.2. O segundo caso é diferente, onde se não houver um ponto de referência na adjacência  $A_i^{C_i[u_i]}$ , pertencente à rota  $C^*$ , o robô  $i$  escolhe o próximo ponto de referência através da regra de transição de estado, e não de forma randômica.

---

**Algoritmo 6** Escolher a nova pose do robô  $i$  usando ACS

---

**requer**  $W, \tau, A, w_i$ ;

**garante**  $g$ ;

- 1:  $sum \leftarrow 0$ ;
  - 2:  $p_{ot} \leftarrow 0$ ; {variável referente a um índice na probabilidade de intensificação};
  - 3:  $ot \leftarrow 0$ ; {variável referente a um ponto de referência na probabilidade de intensificação};
  - 4: **para**  $j \in A_i^{w_i}$  **faça**
  - 5:    $Pr_{div}[j] \leftarrow (\tau_{w_i,j})^{\eta_1} \times (1/A_i^{w_i,j})^{\eta_2}$ ;
  - 6:    $sum \leftarrow sum + Pr_{div}[j]$ ;
  - 7:    $Pr_{int}[j] \leftarrow (\tau_{w_i,j}) \times (1/A_i^{w_i,j})^{\eta_2}$ ;
  - 8:   **se**  $p_{ot} < Pr_{int}[j]$  **então**
  - 9:      $p_{ot} \leftarrow Pr_{int}[j]$ ;
  - 10:     $ot \leftarrow j$ ;
  - 11:   **fim se**
  - 12: **fim para**
  - 13:  $Pr_{div} \leftarrow Pr_{div}/sum$ ;
  - 14: **Gera** randomicamente um valor entre 0 e 1;
  - 15: **se**  $q \leq q_0$  **então**
  - 16:    $g \leftarrow ot$ ;
  - 17: **senão**
  - 18:    $g \leftarrow roleta(Pr_{div})$ ;
  - 19: **fim se**
- 

### 4.3 Posicionamento Inicial

O Algoritmo 8 descreve o método para os robôs se posicionarem para iniciarem o transporte. Os robôs se posicionam atrás do objeto em direção ao penúltimo ponto de referência da rota  $C^*$ . Note que  $u^*$  é o último ponto de referência da rota  $C^*$ .

As poses são calculadas no Algoritmo 9, considerando o ângulo  $\alpha$ , o diâmetro do robô  $d$ , o diâmetro do objeto  $D$  e a distribuição dos robôs atrás do objeto. A distribuição dos robôs é explicada no Capítulo 3 na Seção 3.1.

### 4.4 Transporte

O Algoritmo 10 descreve a execução do transporte do objeto por todos os robôs. Este algoritmo é executado até os robôs percorrerem toda a rota  $C^*$  no sentido contrário.

A atualização da pose dos robôs, após cada empurrão, é executada pelo Algoritmo 11. Lembre que  $d$  e  $D$  representam o diâmetro do robô e o diâmetro do objeto, respectivamente. A distribuição dos robôs, atrás do objeto, é explicada na etapa de posicionamento inicial. Após cada empurrão, o reposicionamento dos robôs é explicado no

---

**Algoritmo 7** Recrutar robô  $i$  no caso de procura usando ACS

---

**requer**  $p_i, C_i, C^*, W, \tau$ ;

**garante**  $p_i$

```

1:  $rota\_enc = false$ ;
2: se  $C_i[u_i] \in C^*$  então
3:   Seja  $b | C^*[b] = C_i[u_i]$ ;
4:    $rota\_enc \leftarrow true$ ;
5: fim se
6: enquanto  $sensor_i > 0.5$  faça
7:   se  $rota\_enc = true$  então
8:      $g \leftarrow C^*[b]$ ;
9:      $b \leftarrow b + 1$ ;
10:  senão
11:    se  $\exists b \in A_i^{C_i[u_i]} | b \in C^*$  então
12:       $g \leftarrow b$ ;
13:       $rota\_enc \leftarrow true$ ;
14:    senão
15:       $g \leftarrow$  Escolher a nova pose do robô  $i(W, \tau, w_i)$ ;
16:    fim se
17:  fim se
18:  enquanto  $p_i \neq g$  faça
19:    robô  $i$  avança na direção de  $g$ ;
20:  fim enquanto
21: fim enquanto

```

---

**Algoritmo 8** Posicionar robôs

---

**requer**  $w^*, C^*, P$ ;

**garante**  $P$ ;

```

1: para paralelo  $i := 0 \rightarrow \rho - 1$  faça
2:    $p_i^+ \leftarrow$  Pose inicial do robô  $i(w^*, p_i, C^*, u^*)$ ;
3:   enquanto  $p_i \neq p_i^+$  faça
4:     robô  $i$  avança na direção de  $p_i^+$ ;
5:   fim enquanto
6:    $P \leftarrow P \cup p_i^+$ 
7: fim para paralelo

```

---

Capítulo 3 na Seção 3.1. Após o empurrão, no Algoritmo 12, a posição do alvo é atualizada. Onde  $V$  é a velocidade do objeto,  $A$  é a aceleração do objeto e  $\Delta t$  é a variação do passo de tempo.

---

**Algoritmo 9** Pose inicial do robô  $i$ 


---

**requer**  $w^*, p_i, C^*, u^*$ ;  
**garante**  $p_i^+, \alpha$ ;

- 1:  $u \leftarrow u^* - 1$ ;
- 2:  $w_u \leftarrow C^*[u]$ ;
- 3:  $\alpha := \arctan((w_{uy} - w_y^*) / (w_{ux} - w_x^*))$
- 4: **se**  $\rho \bmod 2 = 0$  **então**
- 5:   **se**  $i \bmod 2 = 0$  **então**
- 6:      $\beta_i \leftarrow \alpha + \theta \times ((i \bmod 2) + 1) - 0, 5$ ;
- 7:   **senão**
- 8:      $\beta_i \leftarrow \alpha + \theta \times ((-i) \bmod 2) + 0, 5$ ;
- 9:   **fim se**
- 10: **senão**
- 11:   **se**  $i \bmod 2 = 0$  **então**
- 12:      $\beta_i \leftarrow \alpha + \theta \times (i \bmod 2)$ ;
- 13:   **senão**
- 14:      $\beta_i \leftarrow \alpha - \theta \times ((i + 1) \bmod 2)$ ;
- 15:   **fim se**
- 16: **fim se**
- 17:  $x_i := w_x^* + ((d + D)/2) \times \cos(\beta + \pi)$
- 18:  $y_i := w_y^* + ((d + D)/2) \times \sin(\beta + \pi)$
- 19:  $p_i^+ \leftarrow [x_i, y_i, \beta_i]^T$

---



---

**Algoritmo 10** Transportar objeto

---

**requer**  $w^*, w_0, \alpha, P, C^*$ ;

- 1: **repita**
- 2:   **para paralelo**  $i := 0 \rightarrow \rho - 1$  **faça**
- 3:      $p_i^+ \leftarrow$  Nova pose do robô  $i(w^*, \alpha, p_i, C^*, u^*)$ ;
- 4:     **enquanto**  $p_i \neq p_i^+$  **faça**
- 5:       robô  $i$  avança na direção de  $p_i^+$  empurrando o alvo;
- 6:     **fim enquanto**
- 7:   **fim para paralelo**
- 8:   Atualizar posição do alvo  $w^*$ ;
- 9: **até**  $w_u = w_0$

---

## 4.5 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se os algoritmos para o Transporte Cooperativo de Objeto por Impulsão. Dois métodos distintos de procura de objeto e recrutamento dos robôs são propostos. No primeiro método, os robôs escolhem os pontos de referência aleatoriamente. Já no segundo método, os robôs escolhem os pontos de referência baseados no forrageamento de formigas. A metodologia usada no transporte é de impulsão,

---

**Algoritmo 11** Nova pose do robô  $i$ 


---

**requer**  $w^*, \alpha, p_i, C^*, u^*$ ;**garante**  $\alpha, p_i^+$ 

- 1:  $u^* \leftarrow u^* - 1$ ;
  - 2:  $w_u \leftarrow C^*[u^*]$ ;
  - 3:  $\alpha^+ := \arctan((w_{uy} - w_y^*)/(w_{ux} - w_x^*))$
  - 4:  $\Delta\theta_1 := |\alpha^+ - \alpha|$
  - 5: **se**  $\Delta\theta_1 > \Delta\theta_0$  **então**
  - 6:    $\alpha \leftarrow \alpha^+$
  - 7: **fim se**
  - 8: **se**  $\rho \bmod 2 = 0$  **então**
  - 9:   **se**  $i \bmod 2 = 0$  **então**
  - 10:      $\beta_i \leftarrow \alpha + \theta \times (((i \text{ div } 2) + 1) - 0, 5)$ ;
  - 11:   **senão**
  - 12:      $\beta_i \leftarrow \alpha + \theta \times ((-(i + 1) \text{ div } 2) + 0, 5)$ ;
  - 13:   **fim se**
  - 14: **senão**
  - 15:   **se**  $i \bmod 2 = 0$  **então**
  - 16:      $\beta_i \leftarrow \alpha + \theta \times (i \text{ div } 2)$ ;
  - 17:   **senão**
  - 18:      $\beta_i \leftarrow \alpha - \theta \times ((i + 1) \text{ div } 2)$ ;
  - 19:   **fim se**
  - 20: **fim se**
  - 21:  $x_i := w_x^* + ((d + D)/2) \times \cos(\beta_i + \pi)$
  - 22:  $y_i := w_y^* + ((d + D)/2) \times \sin(\beta_i + \pi)$
  - 23:  $p_i^+ \leftarrow [x_i, y_i, \beta_i]^T$
- 

---

**Algoritmo 12** Atualizar posição do alvo
 

---

**requer**  $w^*$ ;**garante**  $w^*$ ;

- 1:  $w_x^* := w_x^* + V_x \times t + A_x \times \frac{\Delta t^2}{2}$
  - 2:  $w_y^* := w_y^* + V_y \times t + A_y \times \frac{\Delta t^2}{2}$
  - 3:  $w^* \leftarrow [w_x^*, w_y^*]^T$  {nova posição do alvo}
- 

onde os robôs se posicionam atrás do objeto e exercem forças para impulsioná-lo. No próximo capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios realizados.

# Capítulo 5

## AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste trabalho, as etapas do TCOI são impactadas por diversos fatores. Na Seção 5.1 são apresentados os aspectos de implementação. Na Seção 5.2 são apresentados os parâmetros de simulação. Na Seção 4.2 são apresentados os impactos nas etapas de procura e recrutamento devido aos métodos de procura. Na Seção 5.4 são apresentados os impactos nas etapas de posicionamento inicial dos robôs e impulsionamento do objeto, os impactos são no posicionamento dos robôs, e no número de robôs para impulsionar o objeto e por último, impacto das características do objeto. Na Seção 5.5 são apresentadas as considerações finais para o capítulo.

### 5.1 Aspectos de Implementação

O algoritmo proposto foi implementado em um enxame de robôs do tipo GRITSBot. Os robôs atualmente não estão equipados com placas de sensores, pois a detecção de distância pode ser emulada através do servidor de *back-end* que rastreia as posições de todos os robôs. A pose global de todos os robôs é recuperada através de um sistema de rastreamento aéreo e utiliza uma única *webcam* em conjunto com as *tags* ArUco para rastreamento (PICKEM et al., 2017). As simulações são feitas no Robotarium, que é um centro de pesquisa multi-robô acessível remotamente (PICKEM et al., 2017). O Robotarium usa Certificados de Barreira de Segurança para garantir um comportamento livre de colisões de todos os robôs. Uma comunicação direta é emulada apenas quando o primeiro robô encontra o de referência  $w^*$ . Assim, os outros robôs têm conhecimento da rota  $C^*$ . Para a etapa de transporte do objeto, a comunicação é indireta, usando-se o objeto para comunicação, semelhante à utilizada em (WANG et al., 2004). Os Certificados de Barreira de Segurança

são usados em todas as etapas. Entretanto, não são utilizados com o objeto, pois os robôs têm que empurrar o objeto.

Na Tabela 1, estão as constantes utilizadas no TCOI e são próprias do Robotarium. O passo de tempo  $t$  é o inverso da frequência de atualização do Robotarium (3 Hz). A velocidade  $v_{max}$  representa a velocidade máxima que pode ser atingida pelo robô. A aceleração  $a$  denota a variação de velocidade do robô, indo progressivamente de 0 a  $v_{max}$ . A arena é modificada, pois o número de pontos de referência e o tamanho do objeto não caberiam na configuração original. A arena modificada tem 6,4 m de comprimento e 4 m de altura. Já a arena original tem 3,2 m de comprimento e 2 m de altura.

Tabela 1: Constantes do Robotarium

Parâmetro	Descrição	Valor
$d$	Diâmetro do robô	0,11 m
$m$	Massa do robô	0,06 kg
$t$	Passo de tempo	0,333 s
$v_{max}$	Velocidade máxima do robô	0,2 m/s
$a_{max}$	Aceleração máxima do robô	0,6 m/s <sup>2</sup>

## 5.2 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros das simulações estão apresentados na Tabela 2. O número de robôs usados varia nas simulações. O número de pontos de referência é 27, sendo o ponto 0 o alvo e o ponto 26 onde se encontra o objeto no começo. A massa  $M$  e o diâmetro do objeto  $D$  mudam na última simulação. A diferença angular que um robô deve ter para o outro na etapa de posicionamento inicial assume um valor inicial dependendo da simulação. Durante a etapa de transporte, esta diferença angular inicial é mantida na medida do possível. O erro angular  $\Delta\theta_0$  representa o desvio angular da frente do robô com relação à linha reta formada pelo centro do objeto transportado e o próximo ponto de referência, *i.e.* aquele para o qual o objeto deve ser transportado. O erro angular tolerado é 0,01. O valor do erro angular é definido a partir de simulações. Para valores maiores do que  $\Delta\theta_0$ , o centro do objeto desviaria muito da linha reta que o liga ao próximo ponto de referência, enquanto valores menores ocasionariam um reposicionamento constante do objeto.

Tabela 2: Constantes dos experimentos

Parâmetro	Descrição	Valor
$\omega$	Número de pontos de referência	27
$\Delta\theta_0$	Erro angular	0,01 rad
$\eta_1$	Influência do feromônio	0,1
$\eta_2$	Informação heurística	0,9
$p$	Taxa de evaporação	0,1
$\tau_0$	Nível mínimo de feromônio	0,01
$\xi$	Coefficiente de decaimento de feromônio	0,1
$q_0$	Probabilidade	0,4
$Q$	Constante	5

### 5.3 Procura e Recrutamento

Com o objetivo de avaliar o desempenho das etapas de procura e recrutamento do algoritmo TCOI, apresentado no Capítulo 4, são realizadas simulações variando-se o número de robôs, os métodos de procura e a adjacência dos pontos de referência. Como o diâmetro do objeto  $D$  é 0,6 m, o número mínimo de robôs é 3, o máximo é 7 e a média é 5. Os métodos de procura são: o randômico e o ACS. Na adjacência dos pontos de referência existem dois casos. No primeiro caso, os robôs escolhem um ponto de referência, com um valor maior do que onde está. Já no segundo caso, os robôs podem escolher um ponto de referência, com um valor menor do que onde está. Para cada cenário, foram realizadas 10 simulações. Os resultados preliminares utilizando o método de procura randômica pode ser encontrado em (FERREIRA; NEDJAH; MOURELLE, 2022b). Já os resultados preliminares utilizando o método de procura ACS pode ser encontrado em (FERREIRA; NEDJAH; MOURELLE, 2022a)

#### 5.3.1 Deslocamentos para frente

Neste caso, a adjacência dos robôs é definida de tal sorte que os robôs só conseguem se deslocar para ficarem mais próximos do objetivo.

Para avaliar o desempenho do exame durante a etapa de procura, foram realizados 3 estudos de casos, executados com ambos os métodos de procura propostos. Nesses casos, foram considerados exames de  $\rho_{min} = 3$ ,  $\rho_{med} = 5$ , e  $\rho_{max} = 7$  robôs. Ainda, para consolidar os resultados, foram realizadas 10 simulações para cada caso.

A Figura 9(a) mostra o início da etapa de procura utilizando o método de procura ACS com um exame de 3 robôs. Já a Figura 9(b) retrata a procura do objeto. A

Figura 9(c) retrata o instante em que o robô 2 encontra o objeto e os outros robôs seguem para seus pontos de referência escolhidos por último. Por fim, a Figura 9(d) mostra quando estes robôs chegaram em seus pontos de referência, sendo o fim da etapa de procura. Os resultados dos demais casos estão apresentados no Apêndice A.1.1.

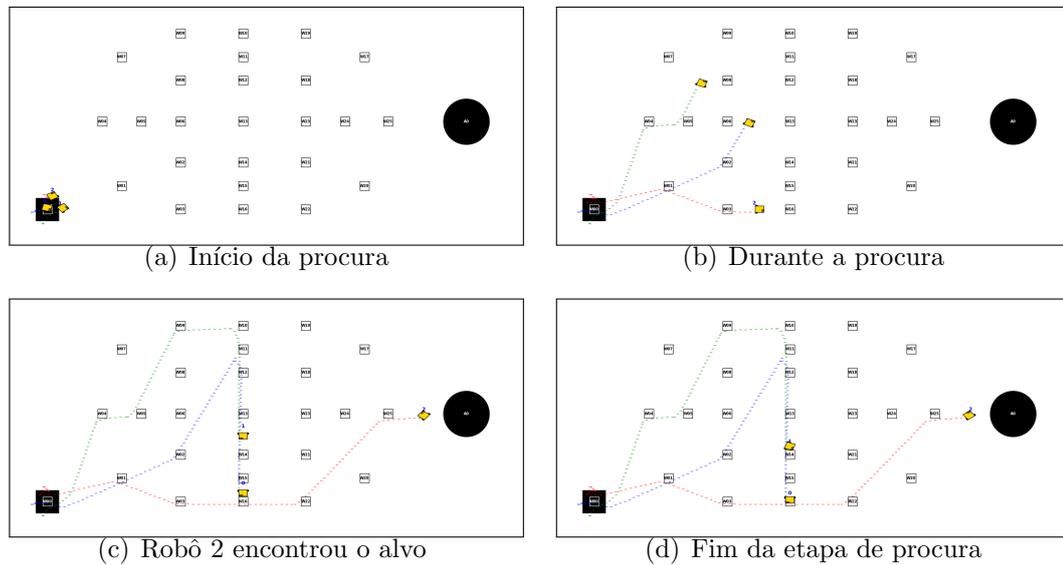


Figura 9: Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

A Figura 10 mostra a matriz de feromônio final após a etapa de procura, para o estudo de caso, que o número de robôs é mínimo.

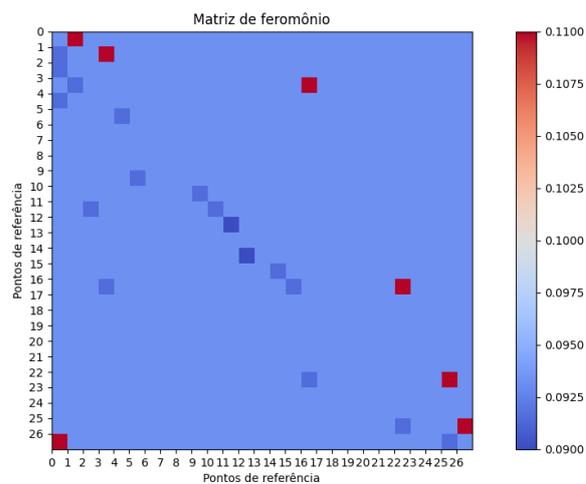


Figura 10: Matriz de feromônio final após a etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente

A próxima etapa consiste no recrutamento dos robôs que não encontraram o objeto. A Figura 11(a) ilustra a etapa do recrutamento, o robô 2 permanece em sua pose, já os robôs 0 e 1 partiram dos seus pontos de referência escolhidos por último na etapa de procura. O final do recrutamento do primeiro experimento é mostrado na Figura 11(b).

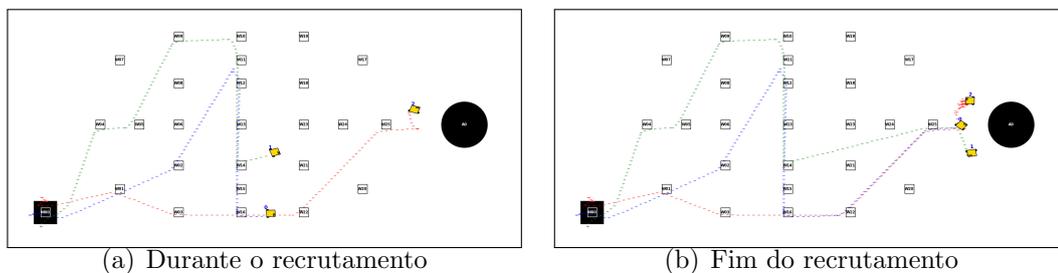


Figura 11: Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

O tempo e o desvio padrão das etapas, executadas por cada número de robô, onde os deslocamentos são para frente, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados dos tempos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente

Parâmetro	Procura aleatória		Procura utilizando ACS		
	Robôs	TMP	TMR	TMP	TMR
3		$33,56 \pm 0,29$	$52,72 \pm 0,46$	$32,82 \pm 0,25$	$53,78 \pm 0,49$
5		$35,41 \pm 0,04$	$50,06 \pm 0,56$	$39,94 \pm 0,53$	$53,17 \pm 0,52$
7		$30,57 \pm 0,06$	$59,77 \pm 0,11$	$45,56 \pm 0,66$	$63,32 \pm 0,66$

O tempo médio de procura (TMP) da etapa de procura é o tempo que um robô demora para encontrar o objeto e, para os outros robôs, é o tempo que cada robô demorou para alcançar o último ponto de referência escolhido. Já o tempo médio de espera (TME) é a diferença entre o tempo do robô que chegou no seu último ponto de referência escolhido e o tempo que aquele robô que concluiu por último a etapa de procura. O tempo médio de recrutamento (TMR) é o tempo da etapa de recrutamento. A Tabela 4 mostra a distância e a rota  $C^*$  das etapas para este caso.

Na etapa de procura, onde os deslocamentos são para frente, com 7 robôs utilizando o método de procura aleatória, encontra-se o objeto em menos tempo, conforme mostrado na Tabela 3. Entretanto, a distância é maior, se comparado a 3 robôs utilizando o método de procura ACS, conforme mostrado na Tabela 4. A pequena diferença, entre esses tempos é devido ao um robô ter que se desviar de outro, que acaba afetando o TMP. Comparando

Tabela 4: Resultados dos percursos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente

Parâmetro	Procura aleatória		Procura utilizando ACS	
Robôs	Distância	Rota	Distância	Rota
3	7,03	[0, 5, 6, 15, 24, 25, 26]	6,31	[0, 1, 3, 16, 22, 25, 26]
5	7,27	[0, 4, 13, 21, 23, 25, 26]	6,61	[0, 1, 3, 16, 22, 24, 25, 26]
7	6,43	[0, 3, 22, 24, 25, 26]	6,38	[0, 3, 16, 21, 23, 24, 25, 26]

os métodos de procura, com o mesmo número de robôs, o método de procura utilizando ACS é o melhor em todos os casos, em relação a distância das rotas. O TMP na procura aleatória, apresenta um menor desvio padrão, comparado a procura utilizando ACS. Na etapa de recrutamento, o TMR é independente do método de procura e do número de robôs. Depende do ponto de referência que o robô parou na etapa de procura. O TMR na procura aleatória, apresenta um menor desvio padrão, comparado a procura utilizando ACS.

### 5.3.2 Deslocamentos para frente/trás

Neste caso, a adjacência dos robôs é definida de tal sorte que os robôs conseguem se deslocar para ficarem mais próximos ou mais afastados do objetivo.

Para avaliar o desempenho do enxame durante a etapa de procura, foram realizados 3 estudos de casos, executados com ambos os métodos de procura propostos. Nesses casos, foram considerados enxames de  $\rho_{min} = 3$ ,  $\rho_{med} = 5$ , e  $\rho_{max} = 7$  robôs. Ainda, para consolidar os resultados, foram realizadas 10 simulações para cada caso.

A Figura 12(a) mostra o início da etapa de procura utilizando o método de procura ACS com um enxame de 7 robôs. Já a Figura 12(b) retrata a procura do objeto. A Figura 12(c) retrata o instante em que o robô 6 encontra o objeto e os outros robôs seguem para seus pontos de referência escolhidos por último. Por fim, a Figura 12(d) mostra quando estes robôs chegaram em seus pontos de referência, sendo o fim da etapa de procura. Neste âmbito, o último ponto de referência escolhido pelo o robô 3 é onde o objeto se encontra. Os resultados dos demais casos estão apresentados no Apêndice A.1.2.

A Figura 13 mostra a matriz de feromônio final após a etapa de procura, para o estudo de caso, que o número de robôs é máximo.

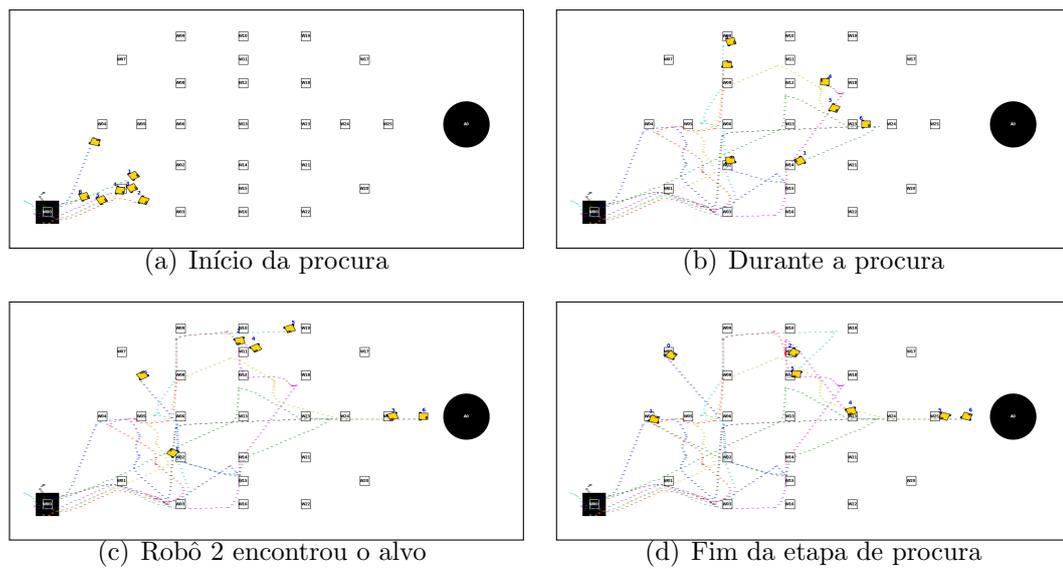


Figura 12: Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

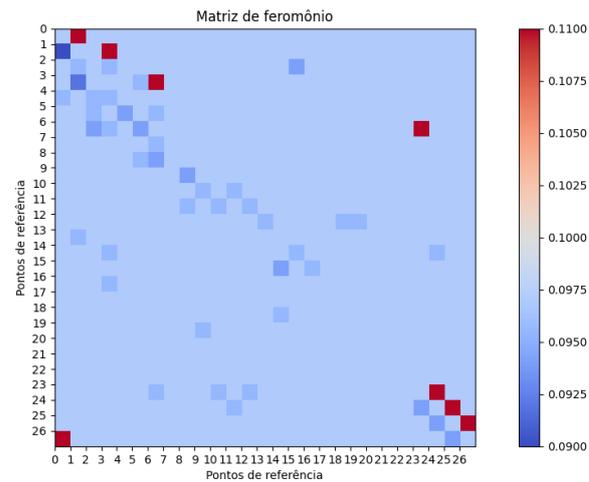


Figura 13: Matriz de feromônio final após a etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás

A próxima etapa consiste no recrutamento dos robôs que não encontraram o objeto. A Figura 14(a) ilustra a etapa do recrutamento. O final do recrutamento do primeiro experimento é mostrado na Figura 14(b).

Na etapa de procura, onde os deslocamentos são para frente/trás, com 7 robôs utilizando o método de procura ACS, encontra-se o objeto em menos tempo, conforme mostrado na Tabela 5. Além disso, a distância é a menor, conforme mostrado na Tabela 6. Os métodos de procura são impactados com a quantidade de robôs, além do TMP ser

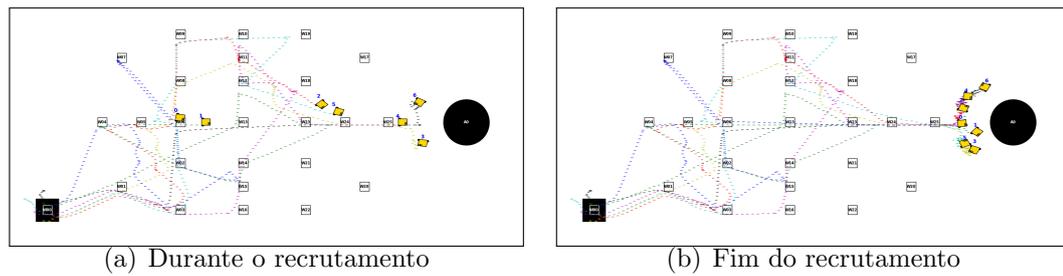


Figura 14: Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

menor, a distância é menor, conforme aumenta o número de robôs. Comparando os métodos de procura, com o mesmo número de robôs, o método de procura utilizando ACS é o melhor em todos os casos, em relação ao TMP e a distância das rotas. O TMP na procura aleatória, apresenta um menor desvio padrão, comparado a procura utilizando ACS. Na etapa de recrutamento, o TMR é independente do método de procura e do número de robôs. Depende do ponto de referência que o robô parou na etapa de procura. A Figura 12(d) ilustra os robôs 0 e 1 distantes do ponto de referência onde o objeto se encontra, por exemplo. O TMR na procura aleatória, apresenta um menor desvio padrão, comparado a procura utilizando ACS.

Tabela 5: Resultados dos tempos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente/trás

Parâmetro	Procura aleatória		Procura utilizando ACS		
	Robôs	TMP	TMR	TMP	TMR
3		144,13 ± 0,2	243,77 ± 0,19	78,83 ± 0,37	120,47 ± 0,38
5		95,92 ± 0,12	184,76 ± 0,2	63,99 ± 0,28	86,61 ± 0,3
7		77,02 ± 0,2	139,24 ± 0,37	57,71 ± 0,52	93,43 ± 0,52

Tabela 6: Resultados dos percursos da procura e recrutamento utilizando deslocamento para frente/trás

Parâmetro	Procura aleatória		Procura utilizando ACS		
	Robôs	Distância	Rota	Distância	Rota
3		28,5	[0, 2, 1, 14, 6, 15, 5, 13, 16, 20, 22, 24, 19, 17, 10, 18, 9, 7, 12, 11, 23, 25, 26]	12,88	[0, 2, 8, 11, 10, 9, 7, 4, 5, 6, 13, 12, 24, 25, 26]
5		19,01	[0, 4, 6, 10, 23, 18, 12, 15, 13, 21, 17, 24, 22, 25, 26]	9,42	[0, 1, 2, 6, 5, 16, 13, 24, 25, 26]
7		14,58	[0, 4, 3, 2, 12, 23, 11, 8, 15, 14, 24, 26]	7,03	[0, 1, 3, 6, 23, 24, 25, 26]

## 5.4 Transporte

A etapa de transporte pode ser impactada pelo posicionamento dos robôs, pelo número de robôs e pela massa, e do diâmetro do objeto. A Seção 5.4.1 mostra o impacto do posicionamento dos robôs. Já a Seção 5.4.2 demonstra o impacto do número de robôs impulsionando o objeto. A Seção 5.4.3 mostra o impacto da massa e do diâmetro do objeto no impulsionamento do objeto. Em todas as seções o método de procura utilizado é o ACS.

### 5.4.1 Impacto do Posicionamento dos Robôs

Após a etapa de recrutamento, as próximas etapas são, posicionamento inicial e de impulsionamento do objeto. Na etapa de posicionamento inicial, os robôs são separados por um ângulo  $\theta$ . Durante a etapa de transporte, esta diferença angular entre os robôs é mantida na medida do possível. Lembre que o erro angular  $\Delta\theta_0$  representa o desvio angular da frente do robô com relação à linha reta formada pelo centro do objeto transportado e o próximo ponto de referência, *i.e.* aquele para o qual o objeto deve ser transportado. São avaliados 5 estudos de caso, variando o erro angular  $\Delta\theta_0$ . Para cada um desses casos, são consideradas ainda 3 configurações, variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs:  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$ ,  $\theta_{max}$ .

As Figuras 15(a) a 15(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,7 rad, na etapa de transporte do objeto. A linha em azul nas figuras mostra a rota  $C^*$ . Já os pontos em vermelho, representam o centro do objeto a cada impulsionamento ao longo da rota  $C^*$ .

Os robôs necessitam se reposicionar menos vezes ao longo de toda rota, quando o ângulo é  $\theta_{med}$ , conforme a Tabela 7. Entretanto, o ângulo  $\theta_{max}$  apresenta um menor erro no comprimento percorrido pelo objeto. As Figuras 15(a) a 15(c) mostram que os pontos que o centro de massa do objeto têm ao longo da rota  $C^*$ . Em determinados trechos estes pontos estão abaixo ou acima da rota  $C^*$ . Portanto, quando é tolerado um erro angular  $\Delta\theta_0$  alto, o objeto tende a sair da rota  $C^*$ . Quando é utilizado o ângulo  $\theta_{max}$ , o centro de massa do objeto, desvia menos da rota  $C^*$ , do que os outros ângulos. O erro no comprimento percorrido pelo objeto é definido pela Equação 21:

$$E = \Lambda_t + d_{w_0} - \Lambda_{C^*}, \quad (21)$$

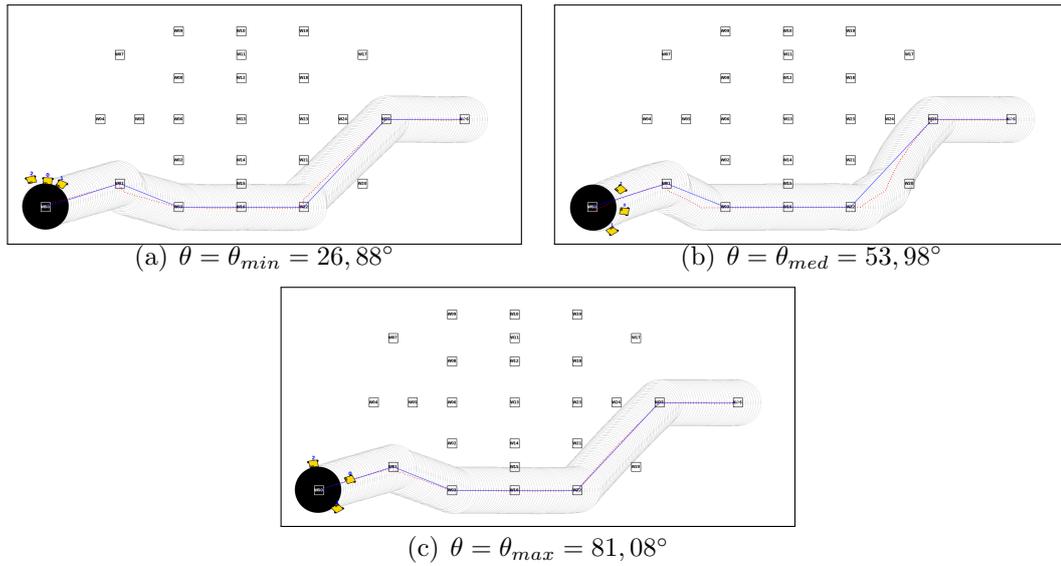


Figura 15: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,7$  rad

onde  $\Lambda_t$  representa o comprimento do percurso do centro de massa do objeto transportado,  $d_{(w_0)}$  representa a distância Euclidiana entre o centro de massa do objeto e o ponto de referência  $w_0$  e  $\Lambda_{C^*}$  representa o comprimento da menor rota  $C^*$ . O comprimento do percurso é calculado pela soma das distâncias Euclidianas entre os pontos pelos quais passa o centro de massa do objeto durante o transporte. Analogamente, o comprimento da rota  $C^*$  é a soma das distâncias Euclidianas entre os pontos de referências da mesma. O erro no percurso do objeto é positivo, pois o comprimento do percurso do objeto, incluindo a distância não percorrida até  $w_0$ , é maior do que o da menor rota  $C^*$ . Observa-se que isso acontece quando o erro angular permitido é grande. A Figura 16(a) ilustra essa situação. Note que o erro no percurso do objeto pode ser negativo devido ao fato de que o objeto ao chegar próximo ao ponto de referência para o qual está sendo impulsionado, muda para o próximo ponto anterior a ele na rota  $C^*$ . Observa-se que isso acontece quando o erro angular permitido é bem reduzido. A Figura 16(b) ilustra essa situação.

As Figuras 17(a) a 17(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,1 rad, na etapa de transporte do objeto.

Os robôs necessitam se reposicionar mais vezes ao longo de toda rota  $C^*$  do que quando utiliza-se o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,7, conforme a Tabela 8. Nesta simulação, quando o ângulo é  $\theta_{med}$ , os robôs precisam se reposicionar menos do que nos outros ângulos

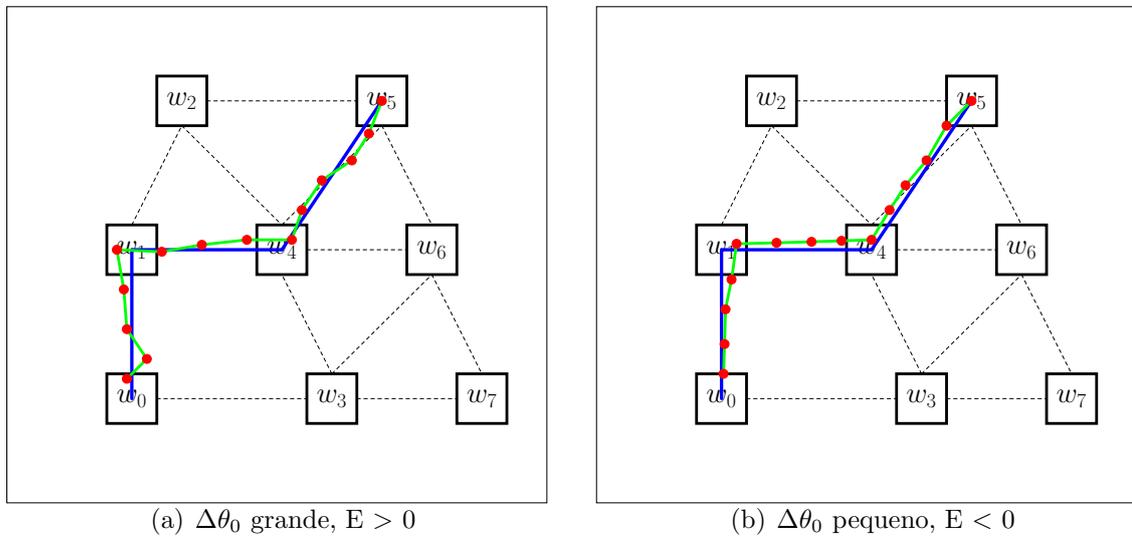


Figura 16: Trajetória do centro de massa do objeto variando o erro angular  $\Delta\theta_0$

Tabela 7: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,7$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	49	34	42
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,3744	6,474	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,016	0,0043	0,0178
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,0804	0,1683	0,0158
Tempo para transportar o objeto (s)	1569,52	1762,02	2376,94

$\theta$ . Entretanto, o ângulo  $\theta_{max}$  apresenta um menor erro no comprimento percorrido pelo objeto do que os outros ângulos. As Figuras 17(a) a 17(c) mostram que os pontos que o centro de massa do objeto têm ao longo da rota  $C^*$ . Em determinados trechos estes pontos estão abaixo ou acima da rota  $C^*$ , porém os desvios são menores do que quando se utiliza o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,7. Portanto, quando é tolerado um erro angular  $\Delta\theta_0$  menor, o objeto tende a sair menos da rota  $C^*$ . Quando é utilizado o ângulo  $\theta_{max}$ , o centro de massa do objeto, desvia menos da rota  $C^*$  do que os outros ângulos, para o mesmo erro angular.

As Figuras 18(a) a 18(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,01 rad, na etapa de transporte do objeto.

Os robôs necessitam se reposicionar mais vezes ao longo de toda rota  $C^*$  do que quando utiliza-se o erro angular  $\Delta\theta_0$  iguais a 0,7 e 0,1, conforme a Tabela 9. Nesta

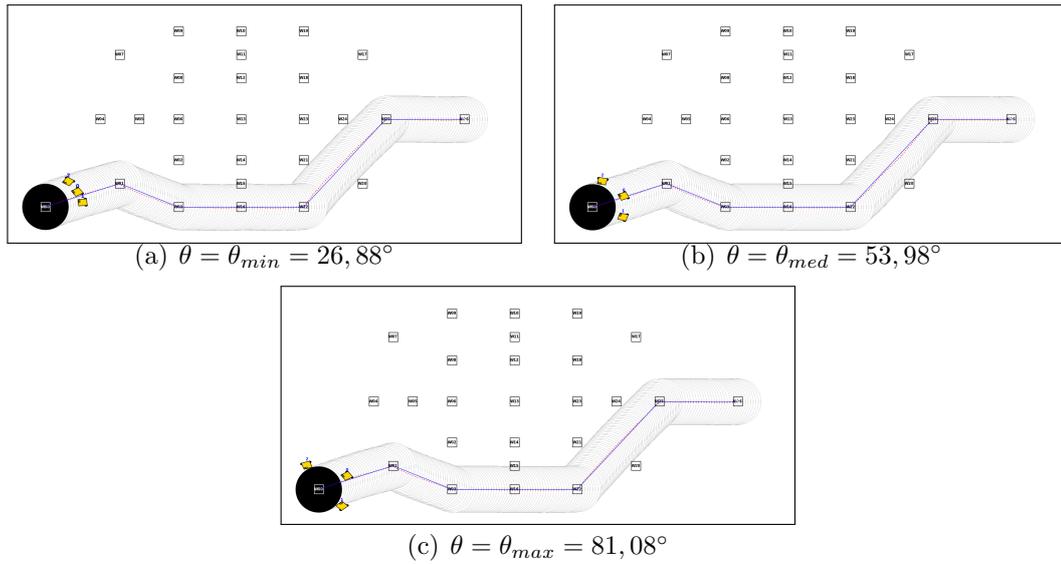


Figura 17: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,1$  rad

Tabela 8: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,1$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	68	46	51
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,308	6,308	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,016	0,0043	0,0178
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,014	0,0023	0,0158
Tempo para transportar o objeto (s)	1563,3	1727,59	1800,14

simulação, quando o ângulo é  $\theta_{med}$ , os robôs precisam se reposicionar menos do que nos outros ângulos  $\theta$ . Entretanto, os ângulos  $\theta_{max}$  e  $\theta_{med}$  apresentam um menor erro no comprimento percorrido pelo objeto, comparado ao ângulo  $\theta_{min}$ . As Figuras 18(a) a 18(c) mostram que os pontos que o centro de massa do objeto têm ao longo da rota  $C^*$ . Em determinados trechos estes pontos estão abaixo ou acima da rota  $C^*$ , porém os desvios são menores do que quando se utiliza o erro angular  $\Delta\theta_0$  iguais a 0,7 e 0,1, os pontos do centro de massa do objeto estão praticamente em cima da rota  $C^*$ . Portanto, quando é tolerado um erro angular  $\Delta\theta_0$  menor, o objeto tende a sair menos da rota  $C^*$ . Quando é utilizado o ângulo  $\theta_{max}$ , o centro de massa do objeto, desvia menos da rota  $C^*$  do que os outros ângulos, para o mesmo erro angular. No Apêndice A.2.1 estão as imagens e as tabelas da etapa de posicionamento inicial e durante a etapa de transporte do objeto para cada erro angular e para cada ângulo entre os robôs.

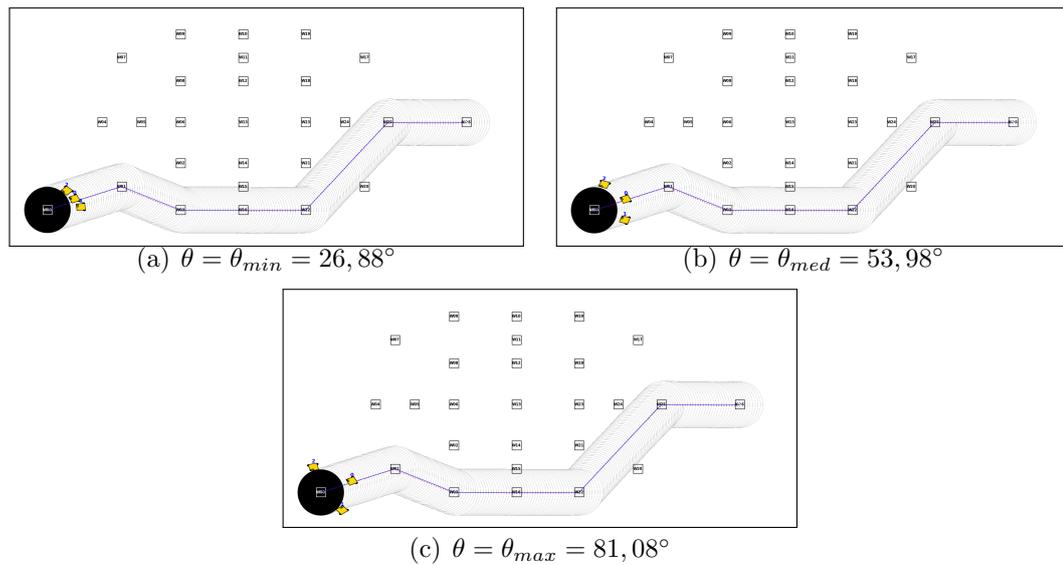


Figura 18: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,01$  rad

Tabela 9: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,01$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	167	100	155
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,308	6,308	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,0031	0,0012	0,0012
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,0011	-0,0008	-0,0008
Tempo para transportar o objeto (s)	1144,73	1110	1437,99

### 5.4.2 Impacto do Número de Robôs

São avaliados 3 estudos de caso, variando o número de robôs, do número mínimo até o número máximo de robôs para impulsionar o objeto. As características do objeto são constantes, a massa  $M$  é 0,18 kg e o diâmetro é 0,6 m. Além disso o erro angular é  $\Delta\theta_0 = 0,01$ . As Figuras 19(a) a 19(c) mostram o final da etapa de transporte do objeto com 3, 5 e 7 robôs, respectivamente. O ângulo entre os robôs em cada figura é o máximo. No Apêndice A.2.2 estão as imagens da etapa de posicionamento inicial e durante a etapa de transporte do objeto para cada número de robô.

O número de mudança no posicionamento dos robôs reduz a medida, que aumenta o número de robôs impulsionam o objeto. Visto que, com maior número de robôs, a distância percorrida pelo objeto é maior. Ao utilizar 5 robôs, o objeto percorre uma

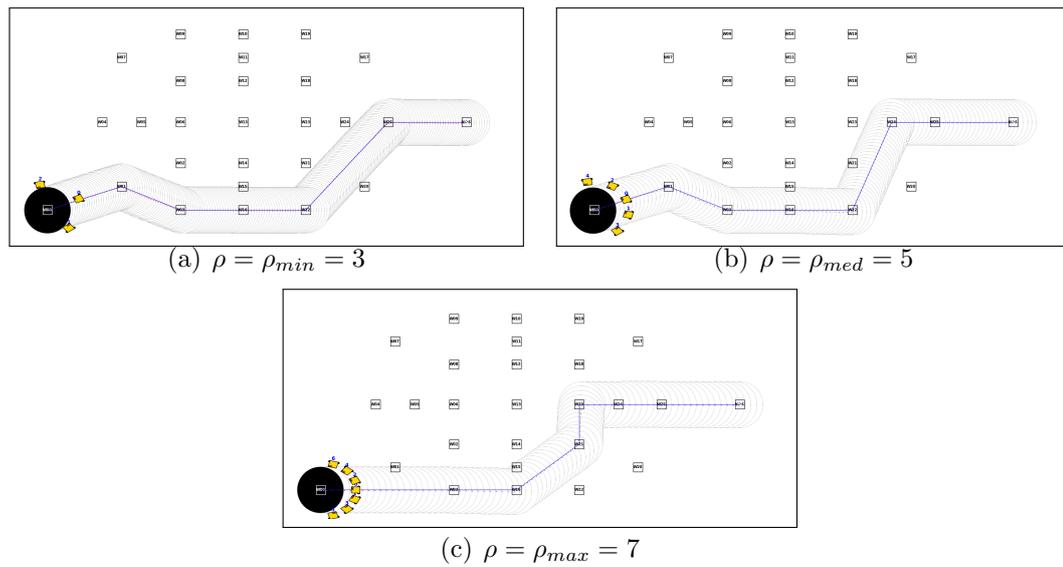


Figura 19: Etapa de transporte variando o número de robôs para impulsionar o objeto distância maior, do que a rota  $C^*$ . O número de robôs que podem impulsionar o objeto, impacta no tempo para transportá-lo. Logo, ao aumentar o número de robôs, o tempo para transportar o objeto é menor.

Tabela 10: Número de robôs

Parâmetro	$\rho_{min}$	$\rho_{med}$	$\rho_{max}$
Robôs	3	5	7
Mudança no posicionamento dos robôs	155	58	37
Distância da rota $C^*$ (m)	6,31	6,61	6,38
Distância percorrida pelo objeto (m)	6,308	6,648	6,3632
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,0012	0,0178	0,0046
Erro na distância percorrida pelo objeto (m)	-0,0008	0,0558	-0,0122
Tempo para transportar o objeto (s)	1437,99	972,6	608,22

### 5.4.3 Impacto das Características do Objeto

As variações nas características do objeto impactam na quantidade mínima e máxima de robôs para impulsionar um objeto. Nesse caso, as características são a massa  $M$  e diâmetro  $D$  do objeto.

Para avaliar o impacto das características do objeto impulsionado, foram avaliados 2 cenários:  $M = 0,24$  kg,  $D = 0,6$  m, e  $D = 0,8$  m. Lembre que durante os experimentos anteriores, foi usado um objeto de massa  $M = 0,18$  kg e de diâmetro  $D = 0,6$  m. Logo, a quantidade mínima para impulsionar o objeto é 4. A Figura 20(a) mostra o final da

etapa de transporte. Vale notar que o ângulo  $\theta$  é configurado como  $\theta_{max} = 54,05^\circ$  e o erro angular é configurado como  $\Delta\theta_0 = 0,01$ .

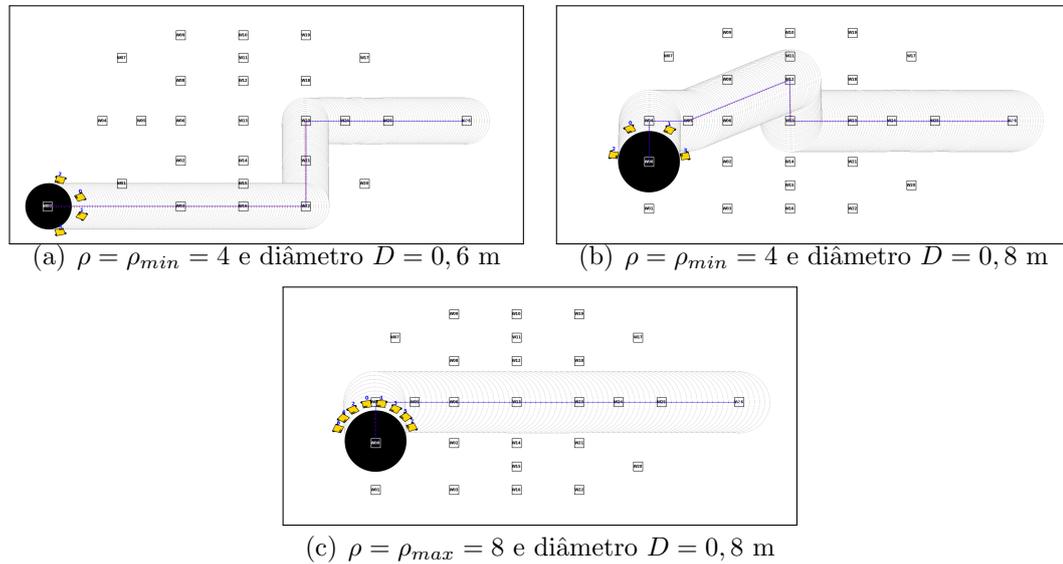


Figura 20: Trajetória do centro de massa do objeto de massa  $M = 0,24$  kg variando o diâmetro do objeto e o número de robôs para impulsioná-lo

O novo diâmetro  $D$  do objeto é  $0,8$  m e massa  $M$  permanece em  $0,24$  kg. Logo, a quantidade mínima para impulsionar o objeto é  $4$  e a máxima é  $8$ . Para esse cenário, como o diâmetro do objeto é maior do que foi utilizado até então, alguns pontos de referências precisaram ser alterados. A configuração inicial impossibilitava o impulsionamento do objeto, pois os robôs iriam colidir com a borda inferior da arena. Neste caso, a etapa de transporte do objeto seria afetada negativamente. A Figura 20(b) mostra o final da etapa de transporte com a nova configuração da arena e utilizando o número mínimo de robôs. Vale notar que o ângulo  $\theta$  é configurado como  $\theta_{max} = 55,37^\circ$  e o erro angular é configurado como  $\Delta\theta_0 = 0,01$ . Já a Figura 20(c) mostra o final da etapa de transporte quando utiliza-se o número máximo de robôs. O ângulo  $\theta$  é alterado para  $\theta_{min} = 20,9^\circ$ . Logo, ao modificar as características do objeto, como a massa  $M$  e o diâmetro  $D$ , altera-se a quantidade de robôs que podem transportar o objeto e os ângulos entre os robôs. Sendo assim, as dimensões da arena acabam limitando o número de robôs para impulsionar o objeto e o ângulo entre os robôs. No Apêndice A.2.3 estão as imagens e os resultados de todas as etapas do TCOI relacionadas as Figuras 20(a) a 20(c).

## 5.5 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados para as simulações realizadas com o algoritmo TCOI. Nos resultados obtidos, na primeira simulação, verificou-se a superioridade do método de procura utilizando ACS em relação a procura aleatória. Já na segunda simulação, o ângulo  $\theta_{max}$  apresentou um menor erro no comprimento do percurso do objeto em todos os casos abordados. Na terceira simulação, verificou-se que com maior número de robôs, mais rápido se transporta o objeto. Na última simulação, verificou-se que caso a massa  $M$  e o diâmetro  $D$  do objeto sejam alterados, a quantidade mínima de robôs para transportar o objeto é alterada.

O capítulo seguinte finaliza este trabalho, abordando suas principais conclusões, bem como os pontos mais relevantes da presente dissertação. Também serão tratadas direções para possíveis trabalhos futuros.

## Capítulo 6

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

**E**ste capítulo apresenta na Seção 6.1, as principais conclusões sobre o transporte cooperativo de objeto por impulsionamento, proposto nesta dissertação. A Seção 6.2 elenca possíveis melhorias do modelo proposto com vista em gerar resultados melhores a etapa de transporte do objeto, e apresenta possibilidades de trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Esta dissertação abordou o problema de impulsionar um objeto circular grande e pesado por multi-robôs. Nesta dissertação foi proposto um modelo para transportar cooperativamente o objeto por impulsionamento, o TCOI. Este modelo possui 5 etapas.

Na etapa de inicialização da arena são determinadas as posições dos pontos de referência e as poses iniciais dos robôs, todos os robôs começam ao redor do ponto de referência  $w_0$ , para a qual terão que levar o objeto. Na etapa de procura, dois métodos foram abordados: randômico e o ACS. Nos dois métodos de procura, o robô  $i$  escolhe um ponto de referência pertencente a adjacência do ponto de referência atual, onde este se encontra e que não tenha sido escolhido anteriormente. Essa etapa é realizada até um robô alcançar o ponto de referência  $w^*$ , que se encontra o objeto. Cada robô  $i$  tem a sua rota percorrida  $C_i$ , formada pelas pontos de referência que o robô  $i$  atravessou até o instante que este encontre o objeto. A menor rota usada pelos robôs que encontraram o objeto primeiro é denotada a menor rota  $C^*$ . Os robôs restantes, cada um se encaminha para o último ponto de referência escolhido, de acordo com o método utilizado na etapa de procura. Durante a etapa de procura usando o método ACS, a comunicação é realizada indiretamente através do feromônio. Ao utilizar o método de procura aleatória, também,

não há comunicação direta. A etapa de recrutamento é responsável por levar os robôs, que não encontraram o objeto, até o mesmo, pela rota  $C^*$  encontrada entre os robôs e, caso o robô  $i$  já se encontre perto do objeto, que ele permaneça lá. No método proposto para implementar o recrutamento dos robôs do enxame para chegarem no objeto. Existem duas opções: os robôs irem direto ao ponto de referência  $w^*$  que o objeto se encontra ou percorrerem o sub-caminho na rota  $C^*$  que leva o robô da sua pose corrente até o ponto de referência  $w^*$ . Neste trabalho, a segunda opção é explorada. Nesta etapa, dentre os robôs que encontraram o objeto, o robô que possui a rota  $C^*$ , comunica aos demais robôs a menor rota encontrada. Na etapa de posicionamento inicial, os robôs se posicionam atrás do objeto em direção ao penúltimo ponto de referência da rota  $C^*$ . Por último, a etapa de transporte do objeto, os robôs percorrerem toda a rota  $C^*$  no sentido contrário. Nesta etapa, os robôs se posicionam baseando-se na posição do objeto, não havendo comunicação entre eles.

Escolheu-se como plataforma de simulação Robotarium que disponibiliza os robôs GRITBot. Estes robôs possuem características que viabilizam sua utilização nessa aplicação, tais como tamanho reduzido. Usando a plataforma de simulação, Robotarium, pode-se configurar o tamanho da arena, além das características do robô. Houve a necessidade de emular um sensor de distância, para os robôs encontrarem o objeto.

Para a avaliação do modelo proposto, foi realizada uma análise dos resultados obtidos. A primeira parte das simulações teve como objetivo avaliar as etapas de procura e recrutamento. O TCOI nestas etapas demonstrou eficiência em todas as simulações realizadas, executando-se as em que haviam 7 robôs. A segunda parte das simulações teve como objetivo avaliar as etapas de posicionamento e impulsionamento do objeto.

No primeiro cenário, o impacto dos métodos de procura foram abordados. Na etapa de procura, em relação a uma adjacência, que os robôs possam apenas avançar, o método de procura utilizando ACS obteve, rotas menores, do que na procura aleatória. Já o tempo de procura do objeto, foi menor na procura aleatória. Essa diferença pode se dar por dois motivos. O primeiro motivo, o robô ao evitar colidir com outro robô, desvia do percurso que estava percorrendo até o ponto de referência escolhido. Já o segundo motivo, a etapa de procura é realizada até um robô alcançar o ponto de referência  $w^*$ , que se encontra o objeto. Os robôs restantes, cada um se encaminha para o último ponto de referência escolhido, de acordo com o método utilizado na etapa de procura.

Após, todos os robôs alcançarem o último ponto de referência escolhido é finalizada a etapa de procura. Logo, os comprimentos dos percursos que os robôs devem percorrer até os últimos pontos de referência escolhidos, afeta no tempo da etapa de procura. No cenário onde a adjacência é planejada para que os robôs possam avançar ou retroceder, o método de procura utilizando ACS obteve resultados ainda mais satisfatórios do que usando a procura aleatória. Em ambos os métodos, quanto maior a quantidade de robôs, menor é o comprimento da menor rota  $C^*$  encontrada pelos robôs. O tempo da etapa de recrutamento é independente do método de procura e do número de robôs diretamente, mas sim da distância que separa o ponto de referência mais afastado do objeto, onde um dos robôs a serem recrutados se encontra.

No segundo cenário, nas etapas de posicionamento inicial e de impulsionamento do objeto, o impacto do ângulo  $\theta$  formado pelos os robôs ao redor do objeto foi abordado. O motivo foi avaliar o impacto do ângulo  $\theta$  ao longo da etapa de transporte. Durante a etapa de transporte, o objeto pode desviar da menor rota até o erro angular  $\Delta\theta_0$ . Neste cenário, para cada erro angular  $\Delta\theta_0$ , foram abordados os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$ . Ao utilizar um erro angular  $\Delta\theta_0$  de 0.7 rad, o ângulo  $\theta_{max}$  apresentou um erro no comprimento do percurso do objeto menor, do que os ângulos  $\theta_{min}$  e  $\theta_{med}$ . Já ao utilizar um erro angular  $\Delta\theta_0$  de 0.1 rad, o ângulo  $\theta_{max}$  apresentou um erro no comprimento do percurso do objeto equivalente, aos ângulos  $\theta_{min}$  e  $\theta_{med}$ . Por fim, ao utilizar um erro angular  $\Delta\theta_0$  de 0.01 rad, o ângulo  $\theta_{max}$  apresentou um erro no comprimento do percurso do objeto igual, ao ângulo  $\theta_{med}$  e ambos obtiveram um erro menor, do que o ângulo  $\theta_{min}$ . Neste cenário, houve uma correlação negativa, quanto menor o erro angular  $\Delta\theta_0$ , maior foi a quantidade de mudança no posicionamento dos robôs.

No terceiro cenário, o impacto do número de robôs para impulsionar o objeto foi abordado. A quantidade de robôs variou, do número mínimo de robôs para impulsionar o objeto, até a quantidade máxima. Neste cenário, quanto maior a quantidade de robôs para impulsionarem um objeto, mais rápida é a etapa de transporte do objeto. Neste caso, conforme a quantidade de robôs aumenta, maior é a distância percorrida pelo objeto após um empurrão, que acaba reduzindo o número de mudanças no posicionamento dos robôs.

O último cenário envolvendo as etapas de posicionamento inicial e impulsionamento do objeto, mostrou que quando varia a massa  $M$  do objeto e/ou o diâmetro  $D$  do objeto, o

número mínimo de robôs para impulsionar o objeto varia. Neste cenário, mostrou algumas limitações em relação ao diâmetro  $D$  do objeto, que pode ser impulsionado pelos robôs e do ângulo  $\theta$  entre os robôs. A limitação ocorre pela dimensão da arena, pois dependendo do diâmetro  $D$  do objeto, o mesmo ou até os robôs podem colidir com alguma borda da arena, inviabilizando o transporte do objeto. Para demonstrar o transporte do objeto com um diâmetro maior do que estava se utilizando, alguns pontos de referência precisaram ser modificados.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Sugere-se nesta seção algumas propostas que podem trazer melhorias no algoritmo proposto, assim como novos ensaios com o objetivo de aprofundar a análise sobre o transporte cooperativo de objeto por multi-robôs.

Uma limitação na implementação do TCOI é a capacidade operacional do robô GRITSBot e do simulador Robotarium. Seria de grande contribuição para esta pesquisa a implementação do TCOI em outros simuladores e em outros robôs que possuam características estruturais diferentes, como sensores de distância. Também seria de grande contribuição a implementação do TCOI em robôs com diferentes características, expandindo a aplicação do TCOI para enxames heterogêneos. Poderia ser implementado no mundo real, entretanto, ao modificar algumas características do Robotarium e do GRITSBot, a simulação fica inviabilizada, por conta de não aceitarem essas modificações.

Seria de grande valia a implementação do transporte cooperativo repetitivo. Assim, os robôs podem maximizar ainda mais a menor rota  $C^*$ . Outra implementação, caso um robô venha a falhar, qual o impacto na etapa de transporte e como os robôs devem se organizar.

Por fim, um possível acréscimo neste tema seria uma nova configuração da arena, com a inclusão de obstáculos e como impactaria nas etapas do TCOI. Nesta nova proposta, a menor rota  $C^*$ , talvez não seria a mais eficaz para se impulsionar o objeto, pois levaria muito tempo para contornar o obstáculo. Desta forma, o método de procura do objeto seria ainda mais sofisticado para avaliar qual das rotas seria mais eficaz em impulsionar o objeto.

# REFERÊNCIAS

- ALKILABI, M. H. M. et al. Evolving group transport strategies for epuck robots: moving objects towards a target area. In: *Distributed Autonomous Robotic Systems*. London, UK: Springer, Cham, 2018, (Springer Proceedings in Advanced Robotics, v. 6). p. 503–516.
- ALKILABI, M. H. M.; NARAYAN, A.; TUCI, E. Cooperative object transport with a swarm of e-puck robots: robustness and scalability of evolved collective strategies. *Swarm Intelligence*, Springer, v. 6, p. 185–209, 2016.
- BERMAN, S. et al. Study of group food retrieval by ants as a model for multi-robot collective transport strategies. In: *Robotics: Science and Systems*. Zaragoza, Spain: MIT Press Journals, 2010. p. 259–266.
- BERMAN, S. et al. Experimental study and modeling of group retrieval in ants as an approach to collective transport in swarm robotic systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 9, p. 1470–1481, 2011.
- CHEN, J. et al. Occlusion-based cooperative transport with a swarm of miniature mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, IEEE, v. 31, p. 307–321, 2015.
- CZACZKES, T.; RATNIEKS, F. Cooperative transport in ants (hymenoptera: Formicidae) and elsewhere. *Myrmecological News*, v. 18, p. 1–11, 03 2013.
- DAI, Y. et al. Symmetric caging formation for convex polygon object transportation by multiple mobile robots. In: IEEE. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Busan, South Korea, 2015. p. 595–600.
- DORIGO, M.; GAMBARDILLA, L. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 1, p. 53–66, 1997.

- EOH, E. et al. Distributed object transportation using virtual object. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, JIII, v. 2, n. 1, p. 20–25, 2014.
- FARRUGIA, J. L.; FABRI, S. G. Swarm robotics for object transportation. In: IEEE. *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*. Sheffield, UK, 2018. p. 353–358.
- FERREIRA, G. B.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L. M. Cooperative transport of objects by multi-robots. In: CILAMCE. *XLIII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. Foz do Iguaçu, PR, BRA, 2022. p. 1–8.
- FERREIRA, G. B.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L. M. Transporte cooperativo de objeto por multi-robôs. In: CBA. *XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. Fortaleza, CE, BRA, 2022. p. 1–8.
- FINK, J.; HSIEH, M. A.; KUMAR, V. Multi-robot manipulation via caging in environments with obstacles. In: IEEE. *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, USA, 2008. p. 1471–1476.
- FINK, J.; MICHAEL, N.; KUMAR, V. Composition of vector fields for multi-robot manipulation via caging. In: *Conference Robotics: Science and Systems*. Atlanta, GA, USA: MIT Press Journals, 2007. v. 3.
- FRANKS, N. R. Teams in social insects: group retrieval of prey by army ants (*Eciton burchelli*, hymenoptera: Formicidae). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, v. 18, p. 425–429, 1986.
- FUJISAWA, R.; IMAMURA, H.; MATSUNO, F. Cooperative transportation by swarm robots using pheromone communication. In: MARTINOLI, A. et al. (Ed.). *Distributed Autonomous Robotic Systems: The 10th International Symposium*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 559–570.
- GERKEY, B. P.; MATARIC, M. J. Pusher-watcher: An approach to fault-tolerant tightly-coupled robot coordination. In: IEEE. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC, USA, 2002. v. 1, p. 464–469.

- GROSS, R.; DORIGO, M. Evolution of solitary and group transport behaviors for autonomous robots capable of self-assembling. *Adaptive Behavior*, v. 16, p. 285–305, 2008.
- HABIBI, G. et al. Distributed centroid estimation and motion controllers for collective transport by multi-robot systems. In: IEEE. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, WA, USA, 2015. p. 1282–1288.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos De Física - Volume 1 - Mecânica*. 9. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2012.
- HÖLLDOBLER, B.; WILSON, E. *The Ants*. Belknap Press of Harvard University Press, 1990. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=R-7TaridBX0C>>.
- INGLETT, J. E.; RODRÍGUEZ-SEDA, E. J. Object transportation by cooperative robots. In: *SoutheastCon 2017*. Concord, NC, USA: IEEE, 2017. p. 1–6.
- KAPPELLMANN-ZAFRA, G.; CHEN, J.; GROSS, R. Using google glass in human-robot swarm interaction. In: SPRINGER. *Conference: Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2016)*. Sheffield, UK, 2016. v. 9716, p. 196–201.
- KUBE, C. R.; BONABEAU, E. Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and Autonomous Systems*, ELSEVIER, v. 30, n. 1–2, p. 85–101, 2000.
- KUBE, C. R.; HONG, Z. Task modelling in collective robotics. *Autonomous Robots*, Springer, v. 4, p. 53–72, 1997.
- MATARIC, M. J.; NILSSON, M.; SIMSARIAN, K. T. Cooperative multi-robot box-pushing. In: IEEE. *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. Pittsburgh, PA, USA, 1995. v. 3, p. 556–561.
- MCCREERY, H. F.; BREED, M. D. Cooperative transport in ants: a review of proximate mechanisms. *Insectes Sociaux*, v. 61, p. 99–110, 2014.
- MONDADA, F. et al. The e-puck, a robot designed for education in engineering. *Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, v. 1, p. 59–65, 2009.

- MONDADA, F. et al. Swarm-bot: A new distributed robotic concept. *Autonomous Robots*, v. 17, p. 193–221, 2004.
- NEUMANN, M. A.; CHIN, M. H.; KITTS, C. A. Object manipulation through explicit force control using cooperative mobile multi-robot systems. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, San Francisco, CA, USA, v. 1, p. 364–369, 2014.
- PEREIRA, G. A. S.; CAMPOS, M. F. M. C.; KUMAR, V. Decentralized algorithms for multi-robot manipulation via caging. *The International Journal of Robotics Research*, Sage Publications, v. 23, n. 7–8, p. 783–795, 2004.
- PICKEM, D. et al. The robotarium: A remotely accessible swarm robotics research testbed. In: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Singapore: IEEE, 2017. p. 1699–1706.
- RIMON, E.; BLAKE, A. Caging 2d bodies by 1 - parameter two - fingered gripping systems. In: IEEE. *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis, MN, USA, 1996. p. 1458–1464.
- SASAKI, J. et al. Cooperating grasping of a large object by multiple mobile robots. In: IEEE. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Nagoya, Japan, 1995. p. 1205–1210.
- STROUPE, A. et al. Behavior-based multi-robot collaboration for autonomous construction tasks. In: IEEE. *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, AB, Canada, 2005. p. 1495–1500.
- TUCI, E.; ALKILABI, M. H. M.; AKANYETI, O. Cooperative object transport in multi-robot systems: A review of the state-of-the-art. *Frontiers in Robotics and AI*, v. 5, 2018.
- TUCI, E. et al. Cooperation through self-assembly in multi-robot systems. *TAAS*, v. 1, p. 115–150, 2005.
- WAN, W. et al. Cooperative manipulation with least number of robots via robust caging. In: IEEE. *Proceedings of the 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Sendai, Japan, 2012. p. 896–903.

- WAN, W. et al. Multirobot object transport via robust caging. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, v. 50, n. 1, p. 270–280, 2020.
- WANG, Y.; SILVA, C. W. de. Cooperative transportation by multiple robots with machine learning. In: IEEE. *2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. Vancouver, BC, CA, 2006. p. 3050–3056.
- WANG, Z.; HIRATA, Y.; KOSUGE, K. Control multiple mobile robots for object caging and manipulation. In: IEEE. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Las Vegas, NV, USA, 2003. p. 1751–1756.
- WANG, Z.; HIRATA, Y.; KOSUGE, K. Control a rigid caging formation for cooperative object transportation by multiple mobile robots. In: IEEE. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans, LA, USA, 2004. p. 1580–1585.
- WANG, Z.; HIRATA, Y.; KOSUGE, K. An algorithm for testing object caging condition by multiple mobile robots. In: IEEE. *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, AB, CA, 2005. p. 3022–3027.
- WANG, Z. et al. A pushing leader based decentralized control method for cooperative object transportation. In: IEEE. *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Sendai, Japan, 2004. p. 1035–1040.

# Apêndice A

## APÊNDICE A - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Este apêndice apresenta as figuras e os valores numéricos obtidos nas simulações realizadas no Capítulo 5.

### A.1 Procura e Recrutamento

Na Seção A.1.1 apresenta os resultados, onde os robôs escolhem um ponto de referência, com um valor maior do que onde está. Na Seção A.1.2 apresenta os resultados, onde os robôs podem escolher um ponto de referência, com um valor menor do que onde está.

#### A.1.1 Deslocamento para frente

As Tabelas A.1 a A.3 e as Figuras A.1 a A.6 exibem os resultados para o método de procura aleatória. Já as Tabelas A.4 a A.6 e as Figuras A.7 a A.15 exibem os resultados para o método de procura utilizando ACS.

Tabela A.1: Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

Parâmetro	Número mínimo de robôs		
Robôs	1	2	3
TMP (s)	39,72	37,32	33,56
TME (s)	0	2,4	6,16
TMR (s)	52,72	40	33,56

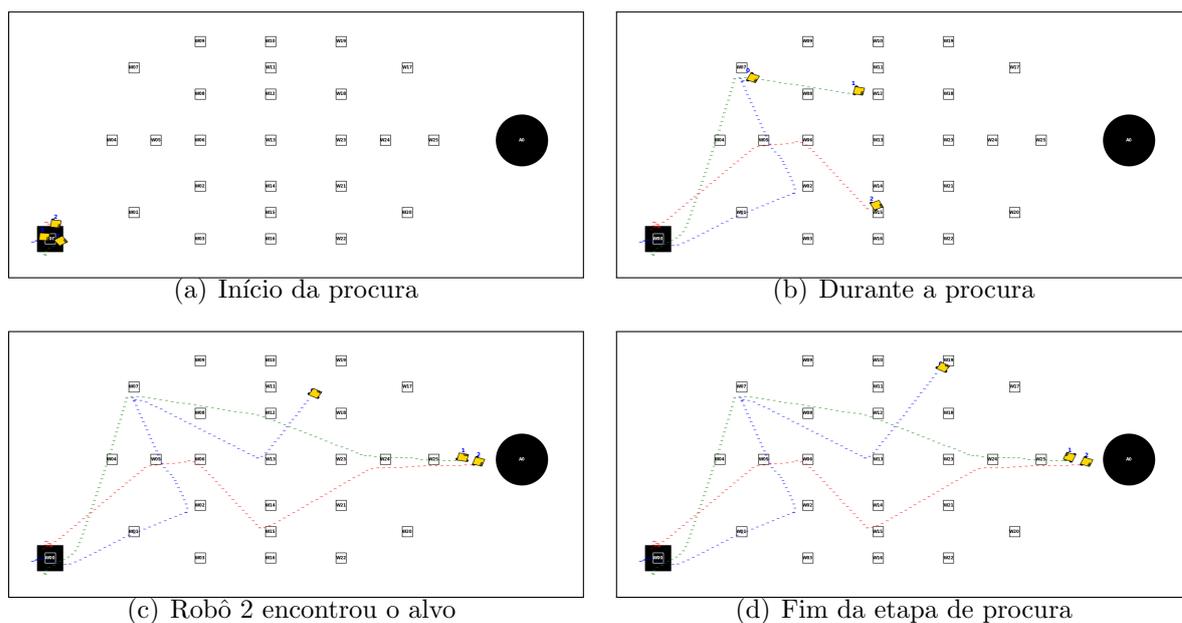


Figura A.1: Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

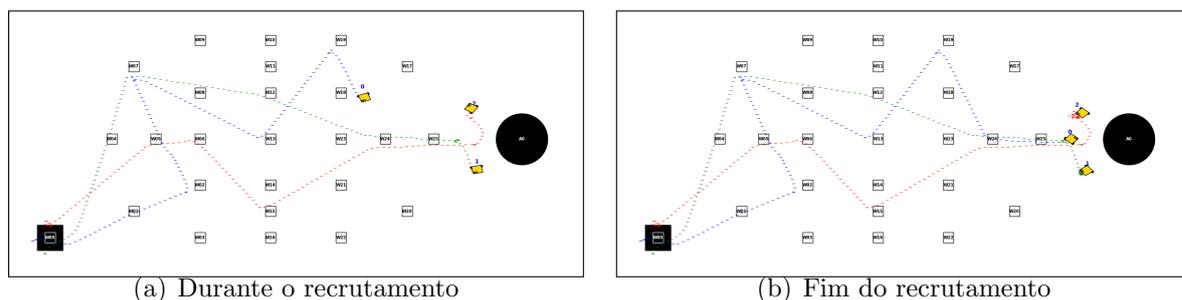


Figura A.2: Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

Tabela A.2: Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

Parâmetro	O número médio de robôs				
Robôs	1	2	3	4	5
TMP (s)	35,76	40,75	37,3	35,41	35,61
TME (s)	4,99	0	3,45	5,34	5,14
TMR (s)	50,06	49,67	37,3	35,41	43,48

### A.1.2 Deslocamentos para frente/trás

As Tabelas A.7 a A.9 e as Figuras A.16 a A.21 exibem os resultados para o método de procura aleatória. Já as Tabelas A.10 a A.12 e as Figuras A.24 a A.30 exibem os resultados para o método de procura utilizando ACS.

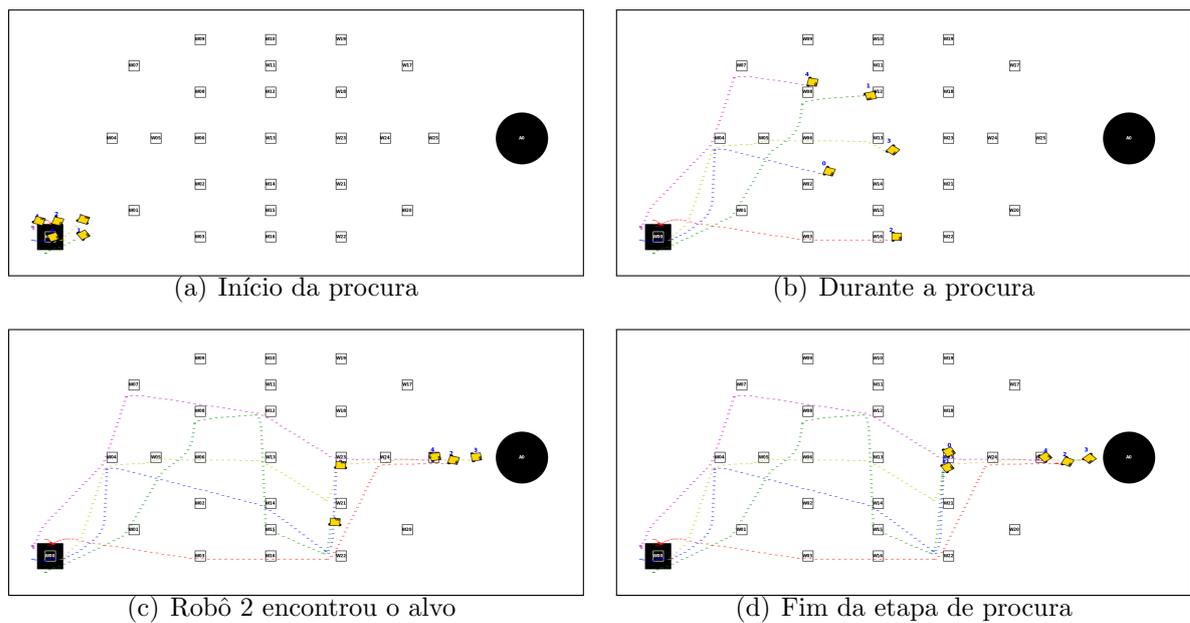


Figura A.3: Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

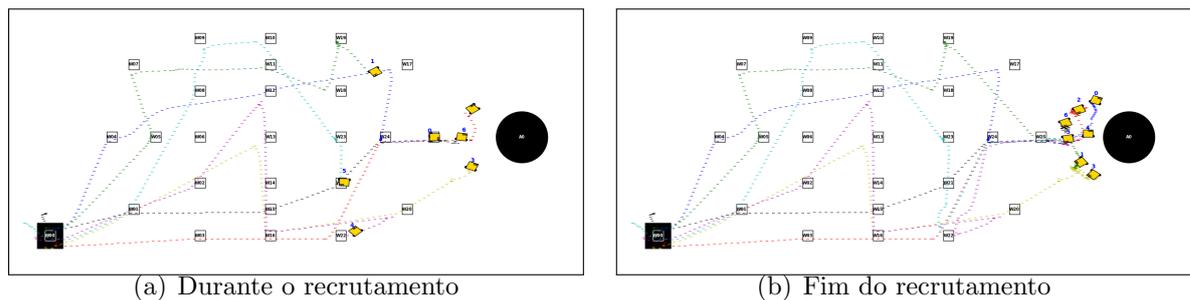


Figura A.4: Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

Tabela A.3: Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

Parâmetro	Número máximo de robôs						
	1	2	3	4	5	6	7
Robôs	1	2	3	4	5	6	7
TMP (s)	31,94	33,66	30,57	35,04	38,13	32,68	30,91
TME (s)	6,19	4,47	7,56	3,09	0	5,45	7,22
TMR (s)	44,71	50,14	30,57	40,59	55,29	59,77	36,07

## A.2 Transporte

Na Seção A.2.1 apresenta os resultados para o impacto do posicionamento dos robôs. Na Seção A.2.2 apresenta os resultados para o impacto do número de robôs. Já a Seção A.2.3 apresenta os resultados para o impacto nas características do objeto.

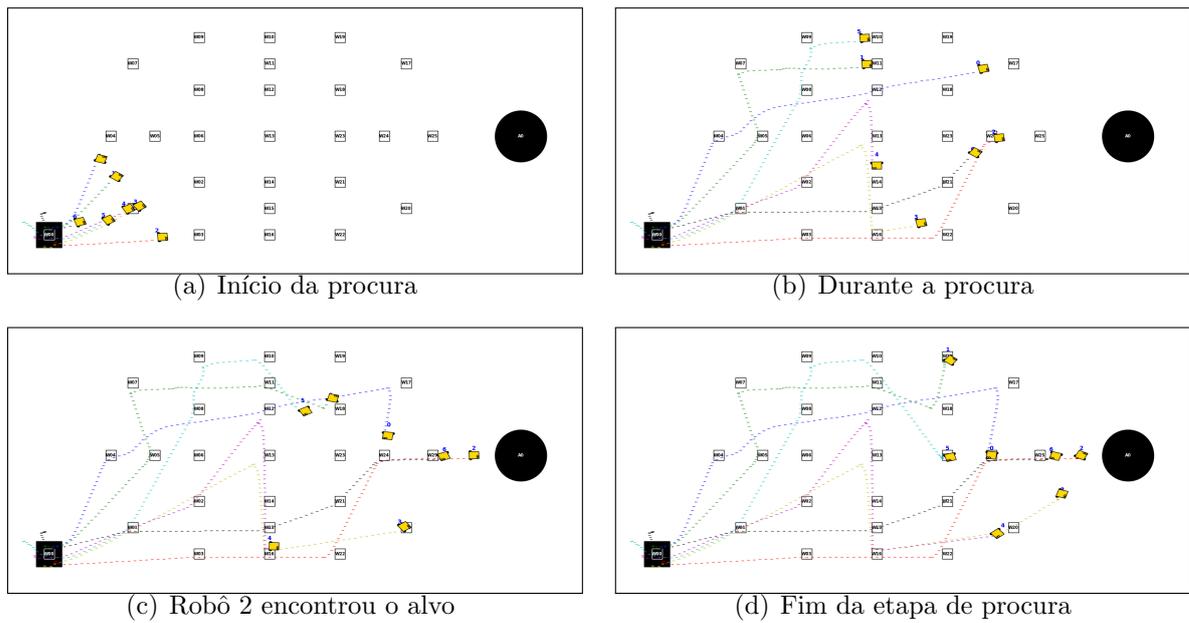


Figura A.5: Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

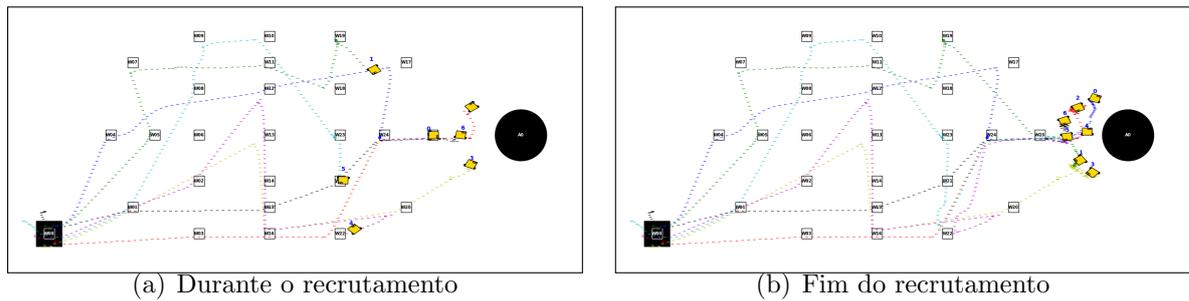


Figura A.6: Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura aleatória

Tabela A.4: Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

Parâmetro	Número mínimo de robôs		
	1	2	3
Robôs	1	2	3
TMP (s)	36,18	37,23	32,28
TME (s)	1,05	0	4,95
TMR (s)	53,78	49,69	32,28

### A.2.1 Impacto do Posicionamento dos Robôs

As Figuras A.31(a) a A.31(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 1 rad, na etapa de transporte do objeto. A Tabela A.13 mostra os resultados utilizando esses ângulos  $\theta$  e o

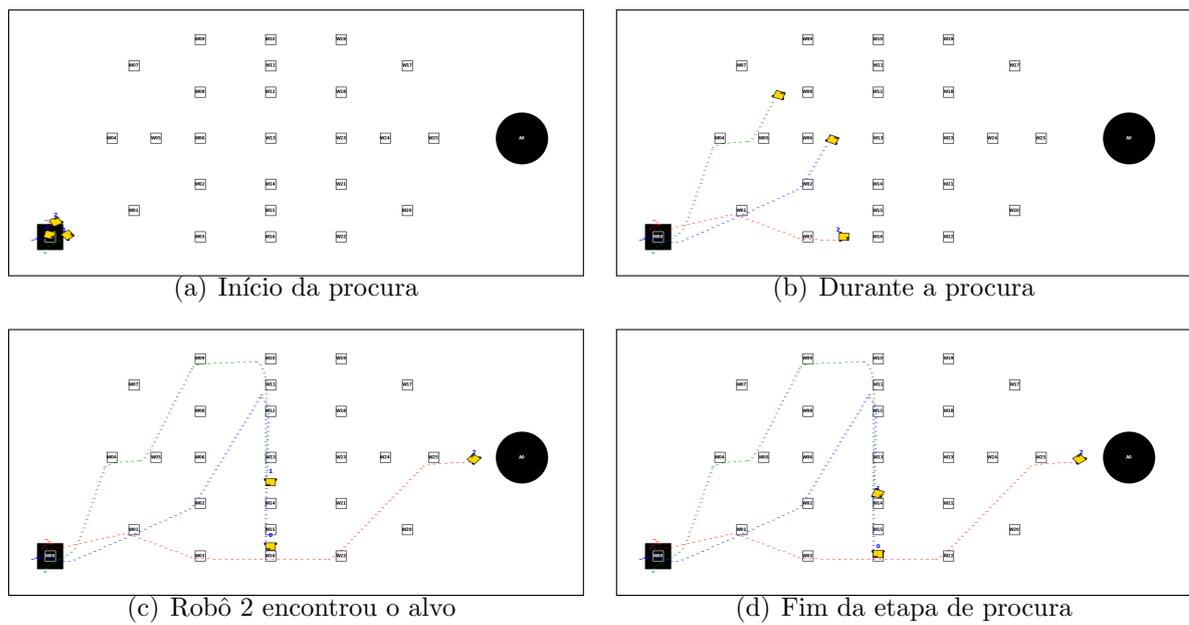


Figura A.7: Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

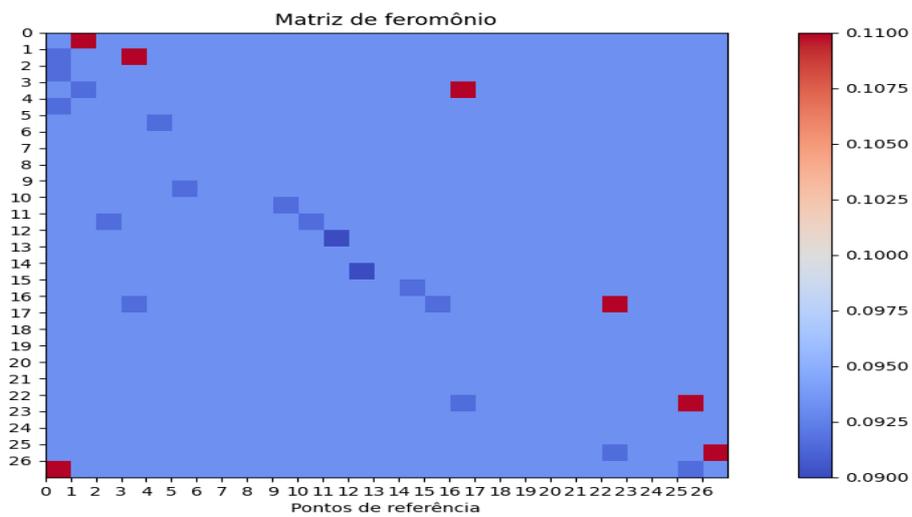


Figura A.8: Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente

Tabela A.5: Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

Parâmetro	O número médio de robôs				
Robôs	1	2	3	4	5
TMP (s)	39,94	41,58	40,03	43,64	42,99
TME (s)	3,7	2,06	3,61	0	0,45
TMR (s)	39,94	46,49	44,93	47,18	53,17

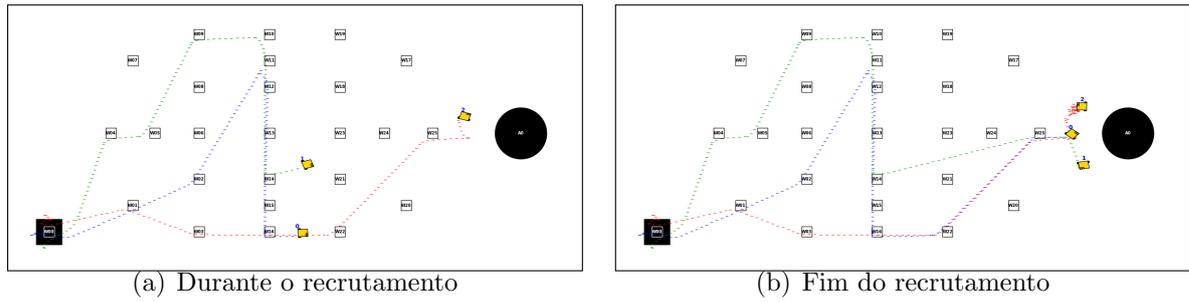


Figura A.9: Etapa de recrutamento com o mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

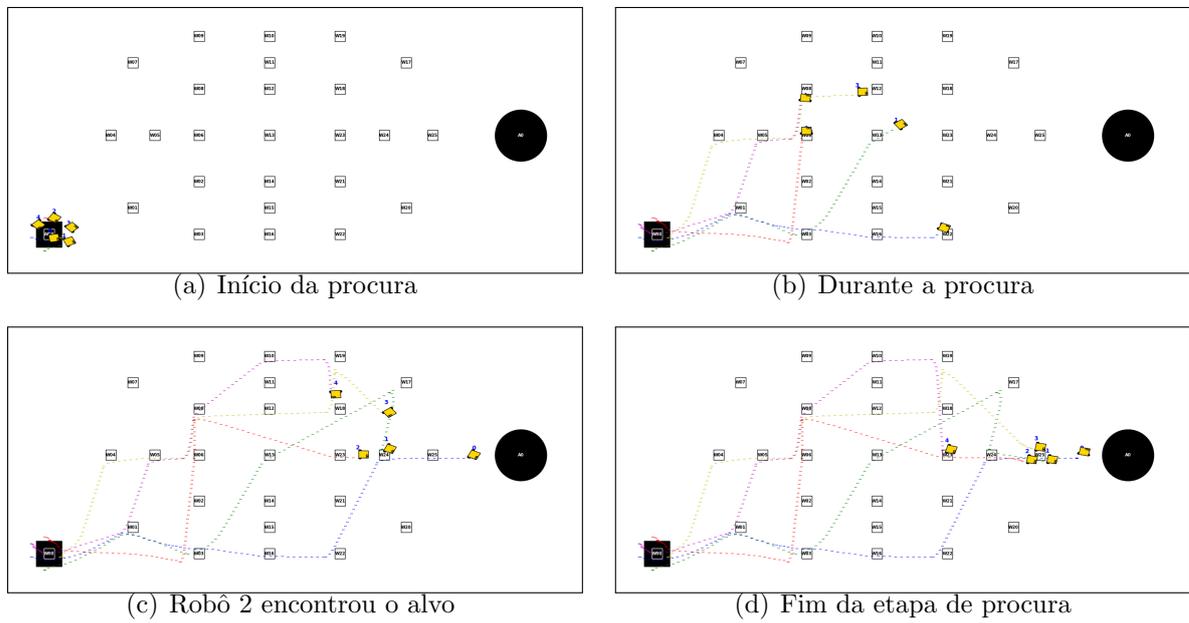


Figura A.10: Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

Tabela A.6: Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

Parâmetro	Número máximo de robôs						
Robôs	1	2	3	4	5	6	7
TMP (s)	45,79	45,56	46,08	47,09	47,43	46,41	46,76
TME (s)	1,64	1,87	1,65	0,34	0	1,02	0,67
TMR (s)	45,79	45,56	46,08	61,88	53,22	62,52	46,76

erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 1 rad. As Figuras A.32(a) a A.32(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,7 rad, na etapa de transporte do objeto. A Tabela A.14 mostra os resultados utilizando esses ângulos  $\theta$  e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,7 rad. As Figuras A.33(a)

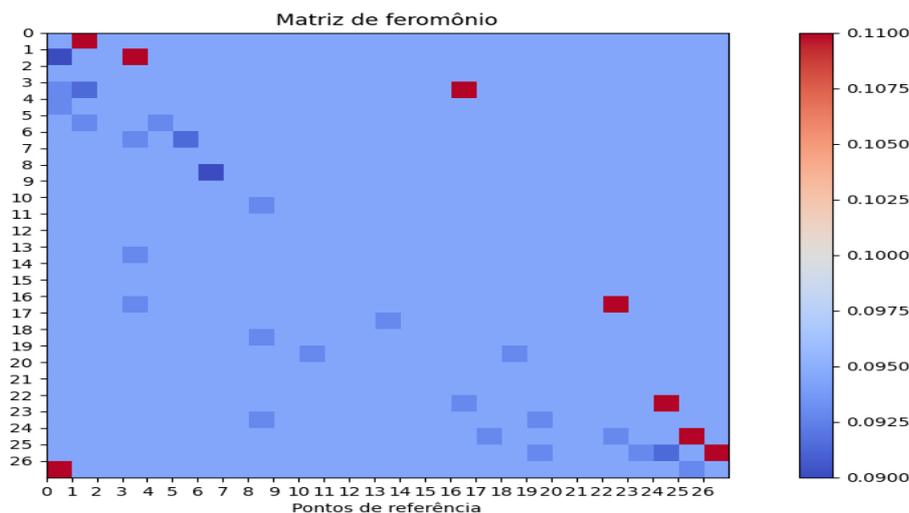


Figura A.11: Matriz de feromônio com o número médio de robôs

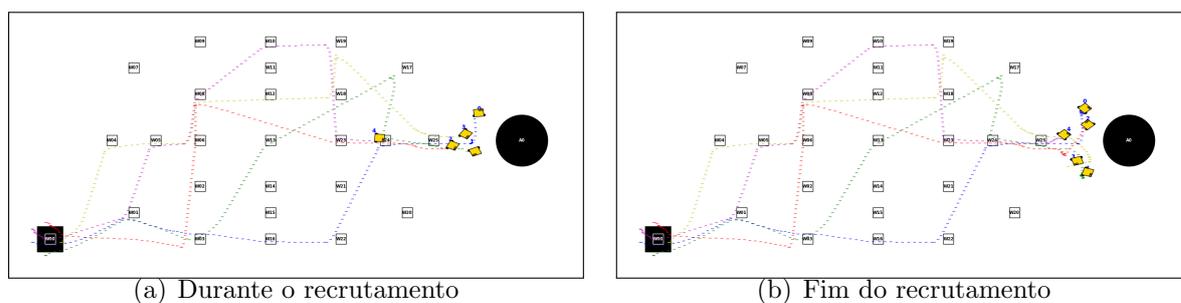


Figura A.12: Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

Tabela A.7: Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

Parâmetro	Número mínimo de robôs		
Robôs	1	2	3
TMP (s)	144,13	144,88	145,84
TME (s)	1,71	0,96	0
TMR (s)	144,13	243,77	224,19

Tabela A.8: Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

Parâmetro	O número médio de robôs				
Robôs	1	2	3	4	5
TMP (s)	97,99	97,24	95,92	100,73	103,46
TME (s)	5,47	6,22	7,54	2,73	0
TMR (s)	184,76	97,24	95,92	124,07	131,2

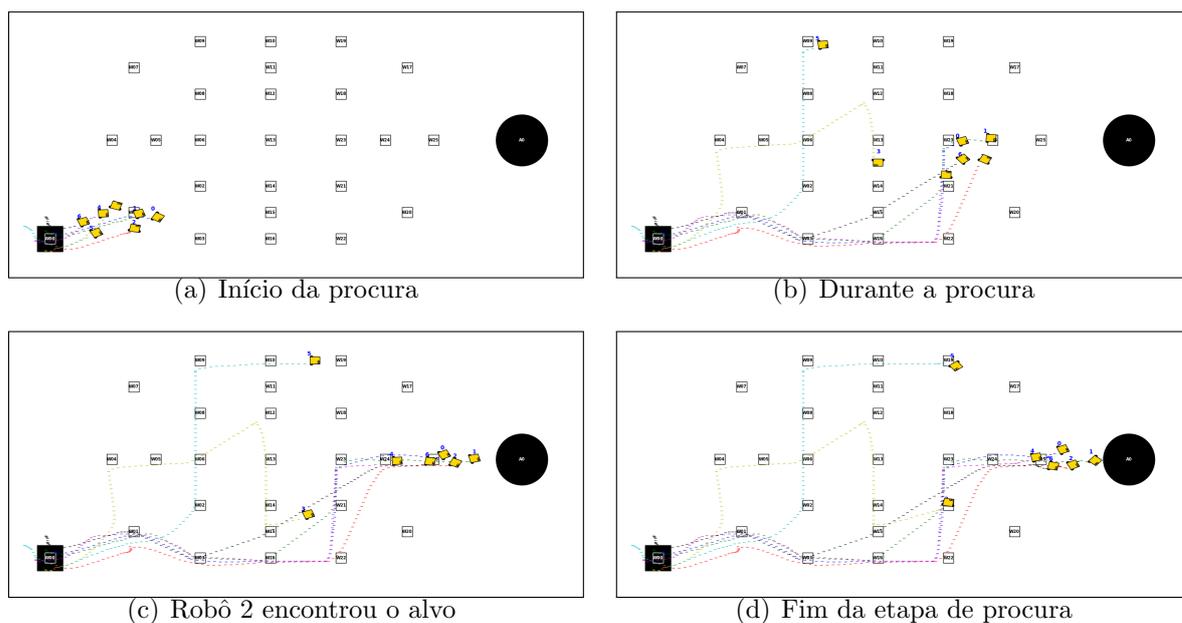


Figura A.13: Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

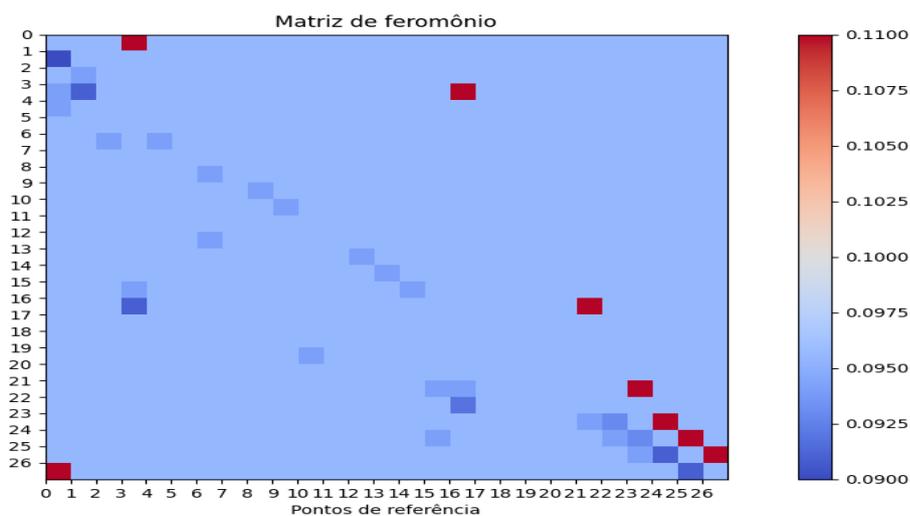


Figura A.14: Matriz de feromônio com o número máximo de robôs

Tabela A.9: Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

Parâmetro	Número máximo de robôs							
	Robôs	1	2	3	4	5	6	7
TMP (s)		79,08	84,24	77,72	77,02	77,72	78,4	77,36
TME (s)		5,16	0	6,52	7,22	6,52	5,84	6,88
TMR (s)		138,21	108,29	97,64	77,02	89,75	139,24	113,44

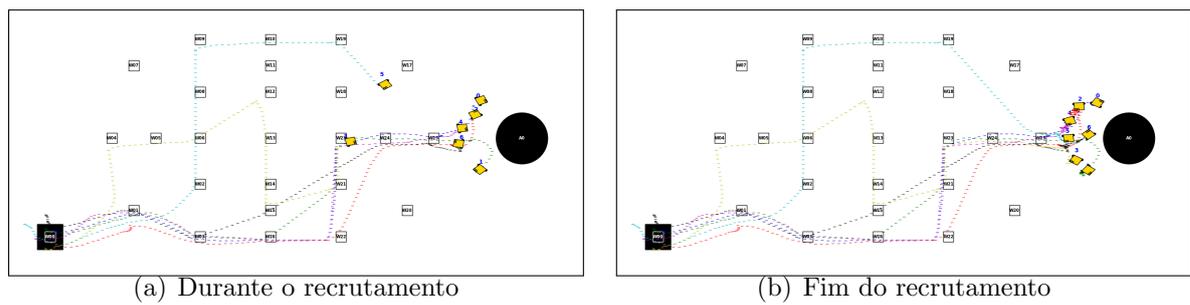


Figura A.15: Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente e utilizando o método de procura ACS

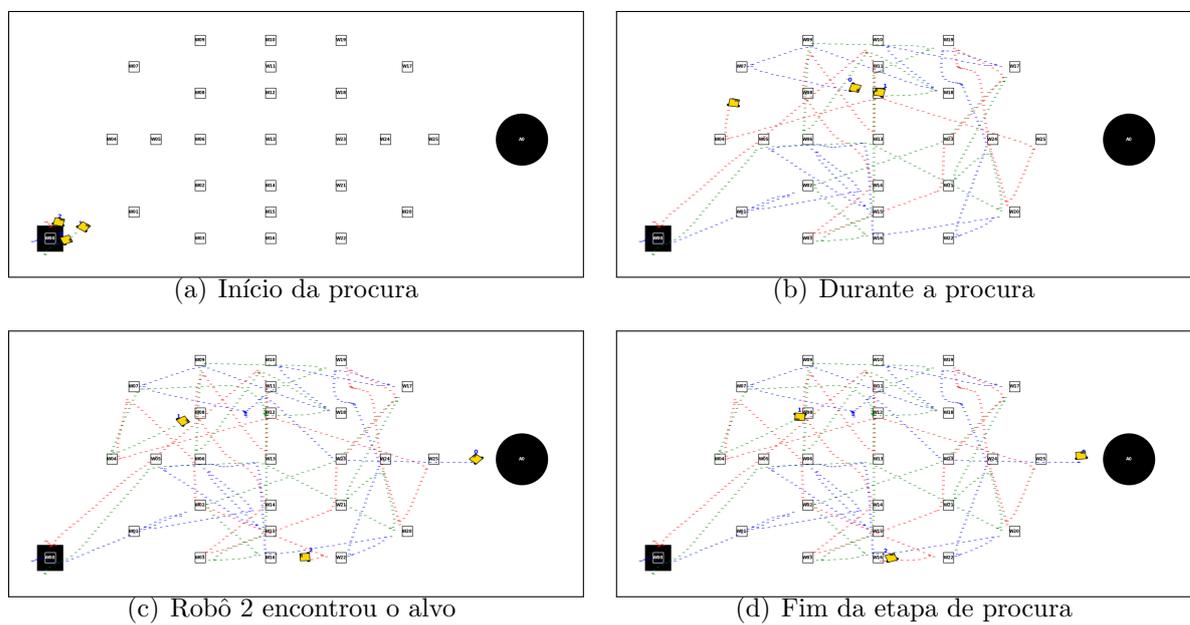


Figura A.16: Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

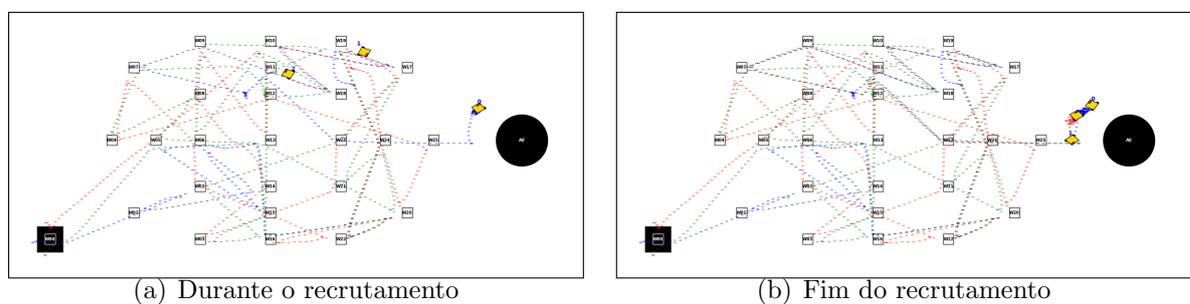


Figura A.17: Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

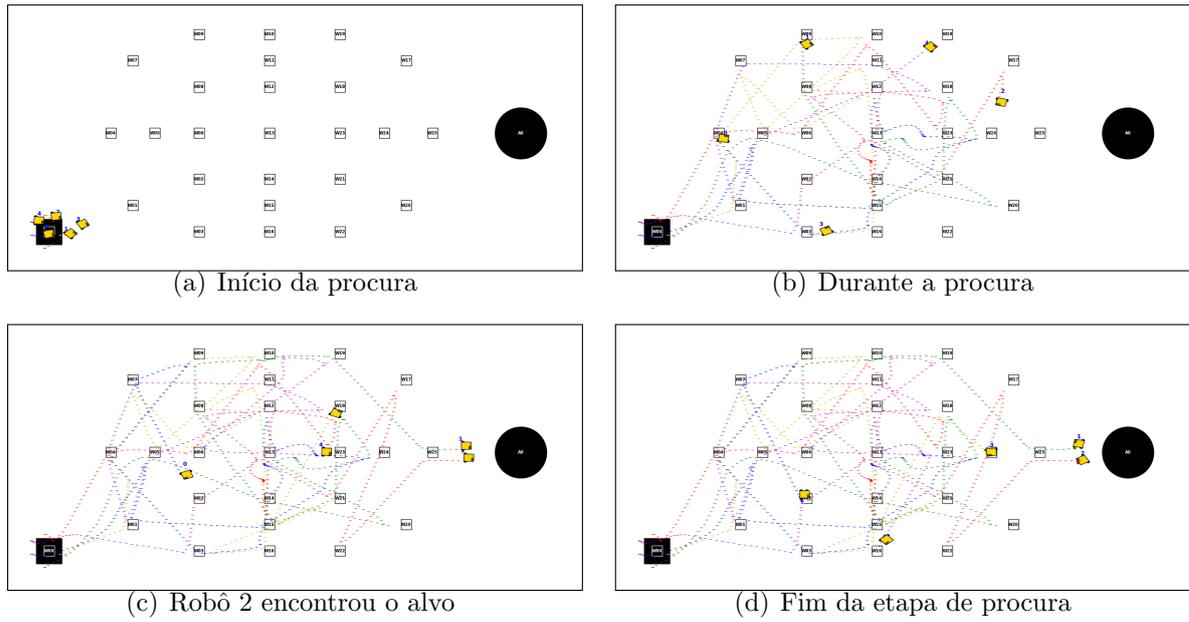


Figura A.18: Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

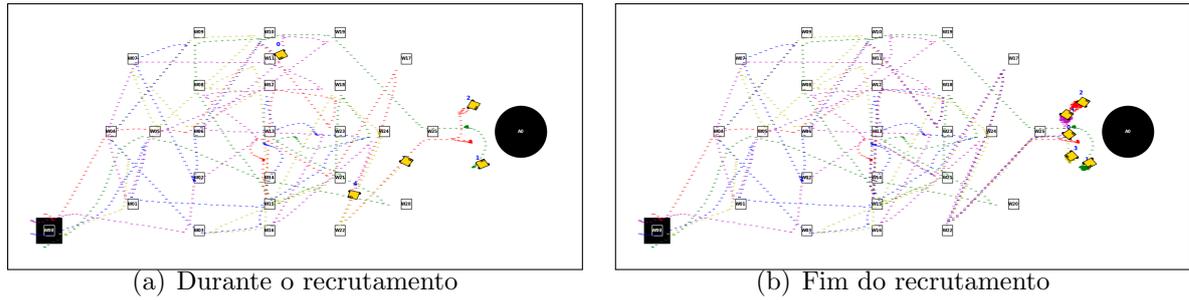


Figura A.19: Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

Tabela A.10: Resultados da procura e recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

Parâmetro	Número mínimo de robôs		
	1	2	3
Robôs	1	2	3
TMP (s)	78,83	81,13	81,82
TME (s)	2,99	0,69	0
TMR (s)	78,83	96,55	120,47

a A.33(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,261799 rad, na etapa de transporte do objeto. A Tabela A.15 mostra os resultados utilizando esses ângulos  $\theta$  e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,261799 rad. Já as Figuras A.34(a) a A.34(c) mostram a trajetória do centro

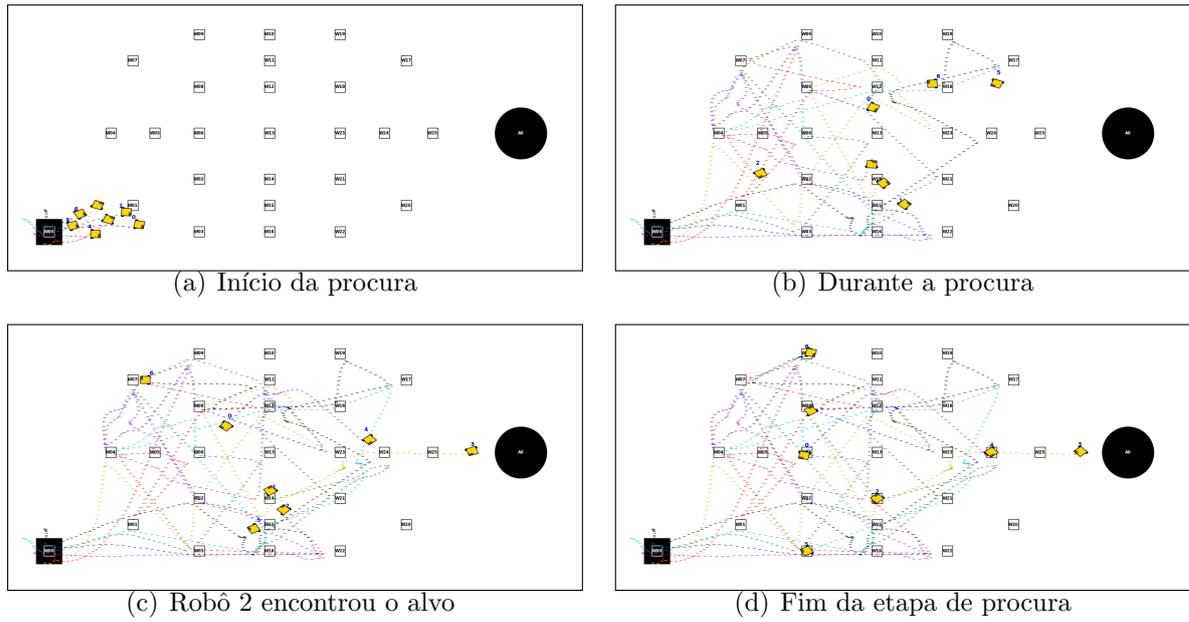


Figura A.20: Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

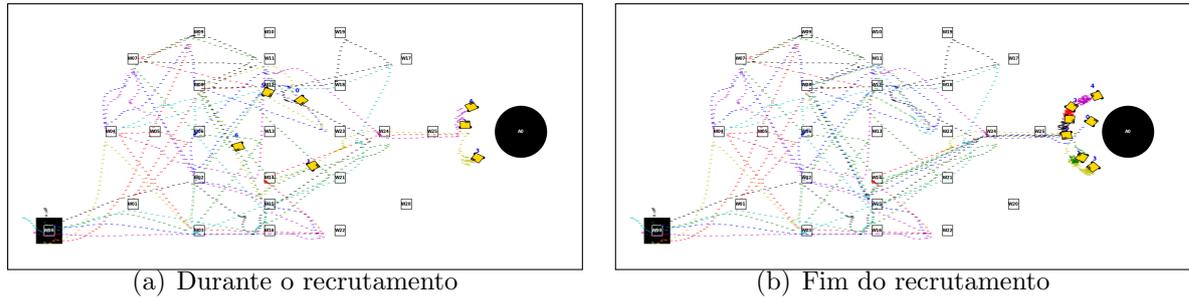


Figura A.21: Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura aleatória

Tabela A.11: Resultados da procura e recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

Parâmetro	O número médio de robôs				
	1	2	3	4	5
TMP (s)	71,46	69,05	63,99	65,96	66,65
TME (s)	0	2,41	7,47	5,5	4,81
TMR (s)	84,56	82,14	63,99	86,61	79,27

de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$  e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,1 rad, na etapa de transporte do objeto. A Tabela A.16 mostra os resultados utilizando esses ângulos  $\theta$  e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,1 rad. Por fim, as Figuras A.35(a) a A.35(c) mostram a trajetória do centro de massa do objeto com os ângulos  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{med}$

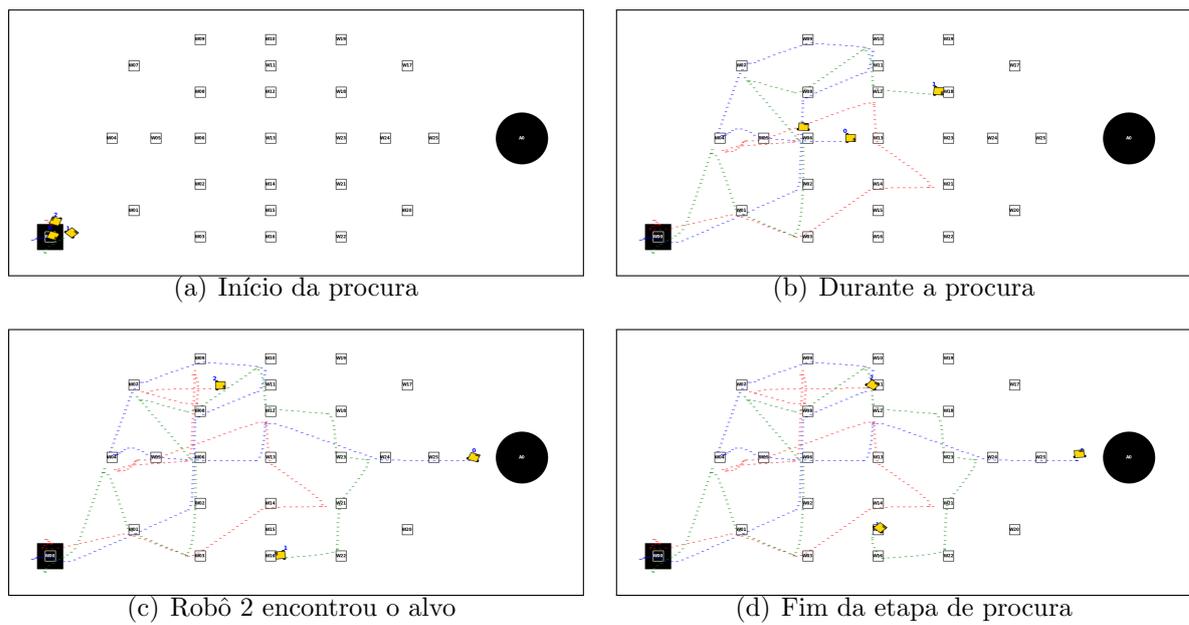


Figura A.22: Etapa de procura com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

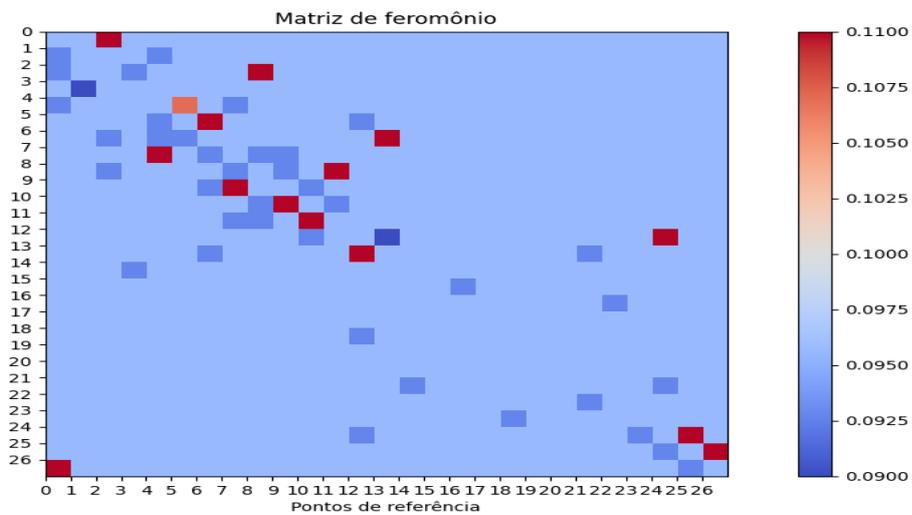


Figura A.23: Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs

Tabela A.12: Resultados da procura e recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

Parâmetro	Número máximo de robôs						
Robôs	1	2	3	4	5	6	7
TMP (s)	63,75	66,85	62,43	62,28	68,23	66,85	57,71
TME (s)	4,48	1,38	5,8	5,95	0	1,38	11,12
TMR (s)	93,49	91,71	85,22	62,28	77,99	81,53	57,71

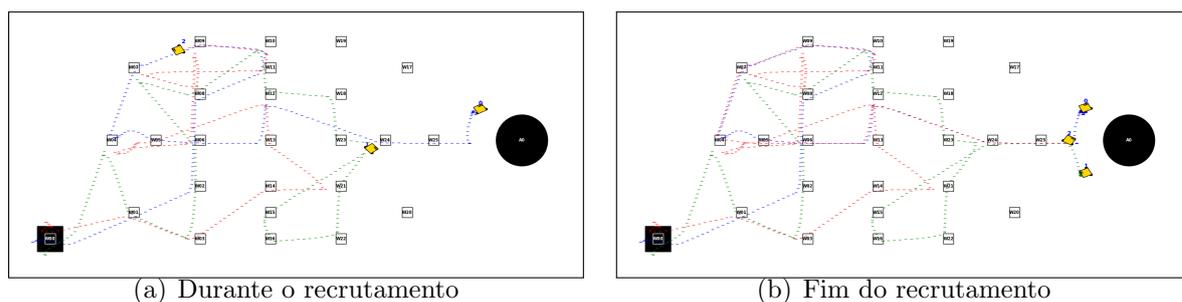


Figura A.24: Etapa de recrutamento com o número mínimo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

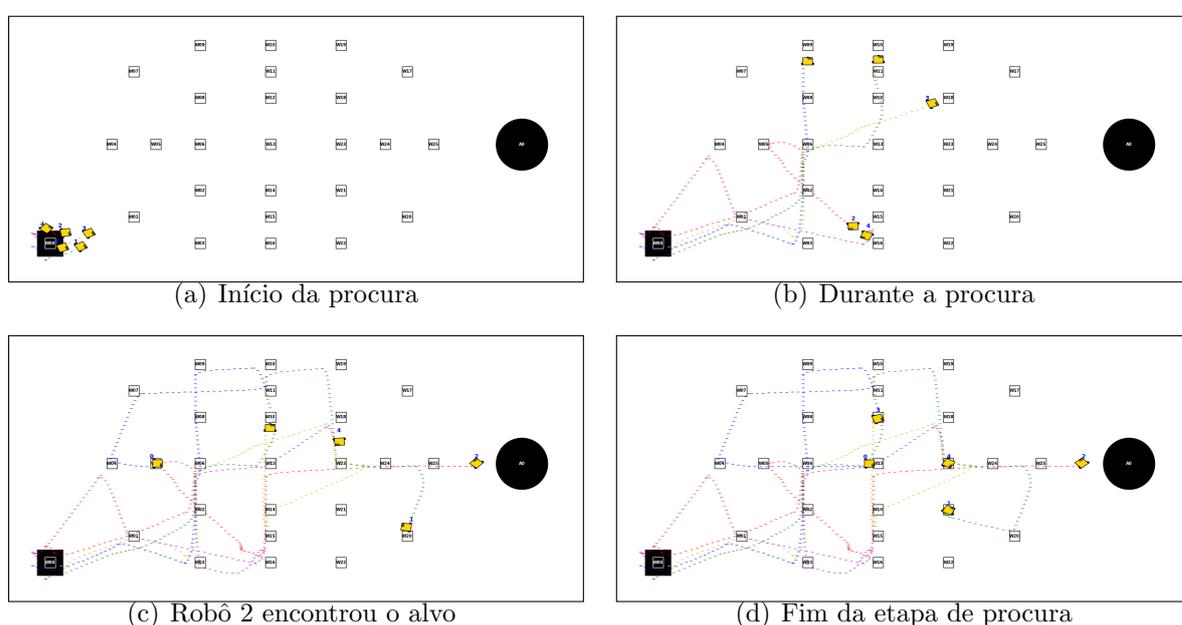


Figura A.25: Etapa de procura com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

e  $\theta_{max}$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,01 rad, na etapa de transporte do objeto. A Tabela A.17 mostra os resultados utilizando esses ângulos  $\theta$  e o erro angular  $\Delta\theta_0$  igual a 0,01 rad.

### A.2.2 Impacto do Número de Robôs

As Figuras A.36 a A.38 mostram a etapa de posicionamento inicial dos robôs e a etapa de transporte do objeto. É utilizado o ângulo  $\theta_{max}$ .

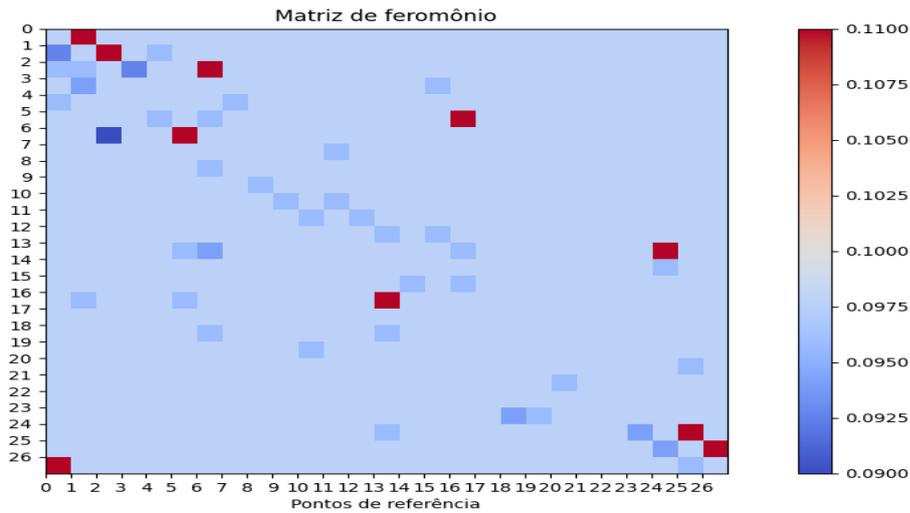


Figura A.26: Matriz de feromônio com o número médio de robôs

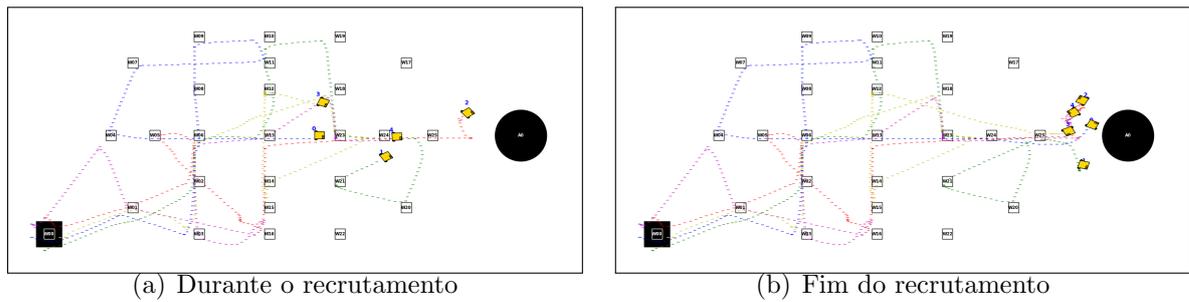


Figura A.27: Etapa de recrutamento com o número médio de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

Tabela A.13: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 1$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	45	33	36
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,5736	6,5404	6,3744
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,016	0,0043	0,0178
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,2796	0,2347	0,0822
Tempo para transportar o objeto (s)	1984,23	1889,56	1437,99

### A.2.3 Impacto das Características do Objeto

As Figuras A.39 a A.42 e a Tabela A.18 exibem os resultados para alteração da massa  $M$  do objeto. Já as Figuras A.43 a A.46 e a Tabela A.19 exibem os resultados para alteração no diâmetro  $D$  do objeto, e utilizando o número mínimo de robôs para impulsionar o objeto.

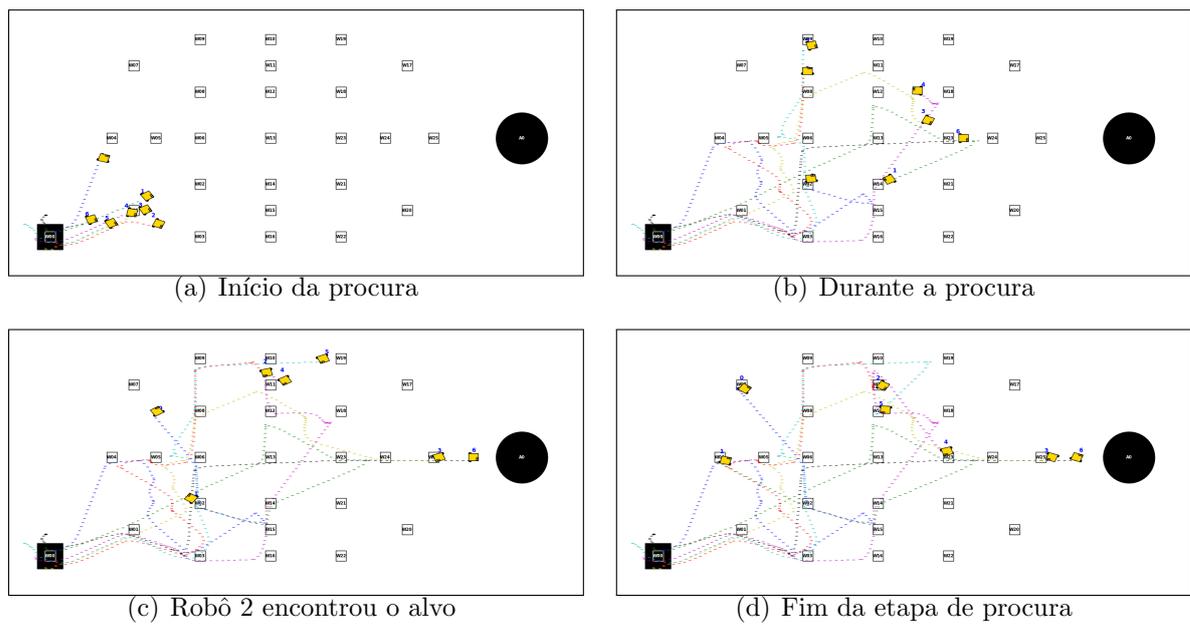


Figura A.28: Etapa de procura com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

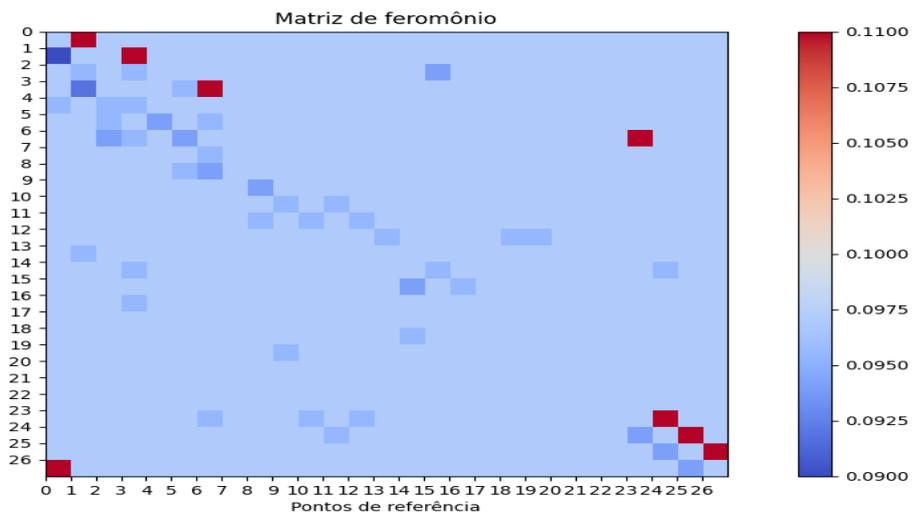


Figura A.29: Matriz de feromônio com o número máximo de robôs

Por fim, as Figuras A.47 a A.50 e a Tabela A.20 exibem os resultados para alteração no diâmetro  $D$  do objeto, e utilizando o número máximo de robôs para impulsionar o objeto.

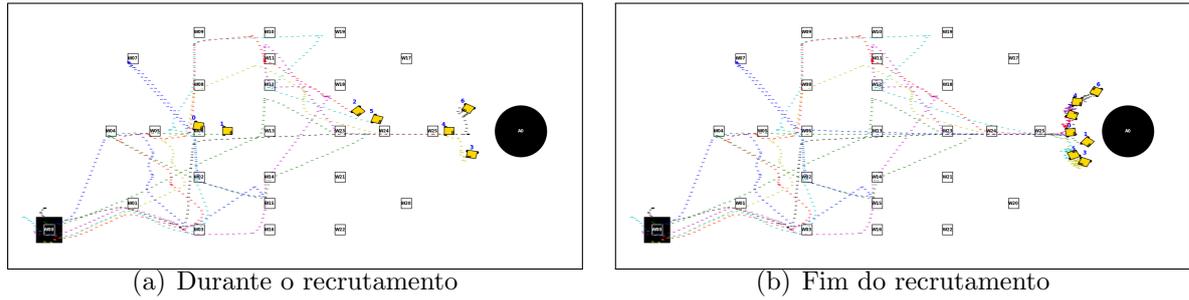


Figura A.30: Etapa de recrutamento com o número máximo de robôs utilizando deslocamento para frente/trás e utilizando o método de procura ACS

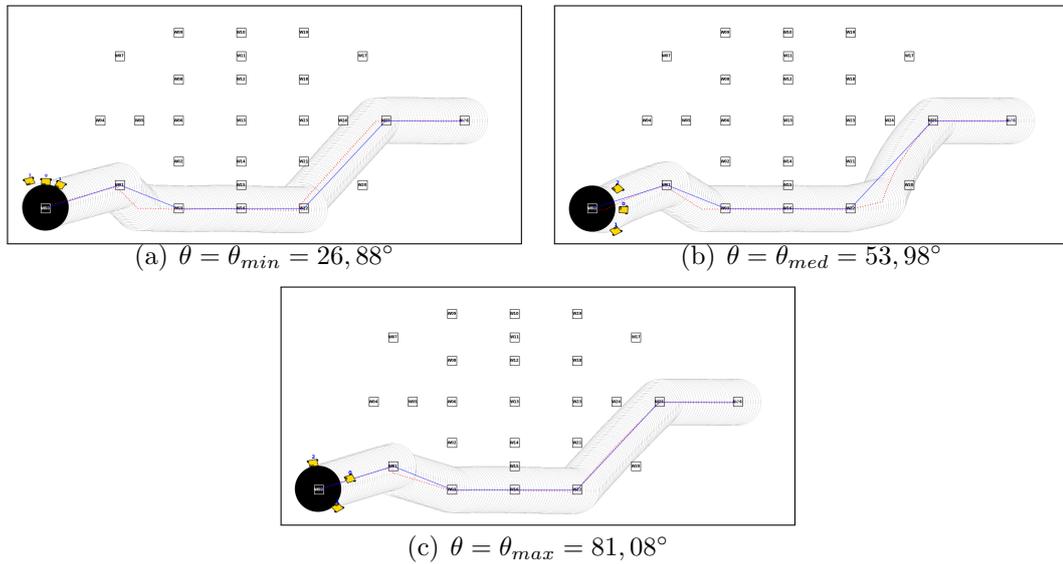


Figura A.31: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 1$  rad

Tabela A.14: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,7$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	49	34	42
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,3744	6,474	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,016	0,0043	0,0178
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,0804	0,1683	0,0158
Tempo para transportar o objeto (s)	1569,52	1762,02	2376,94

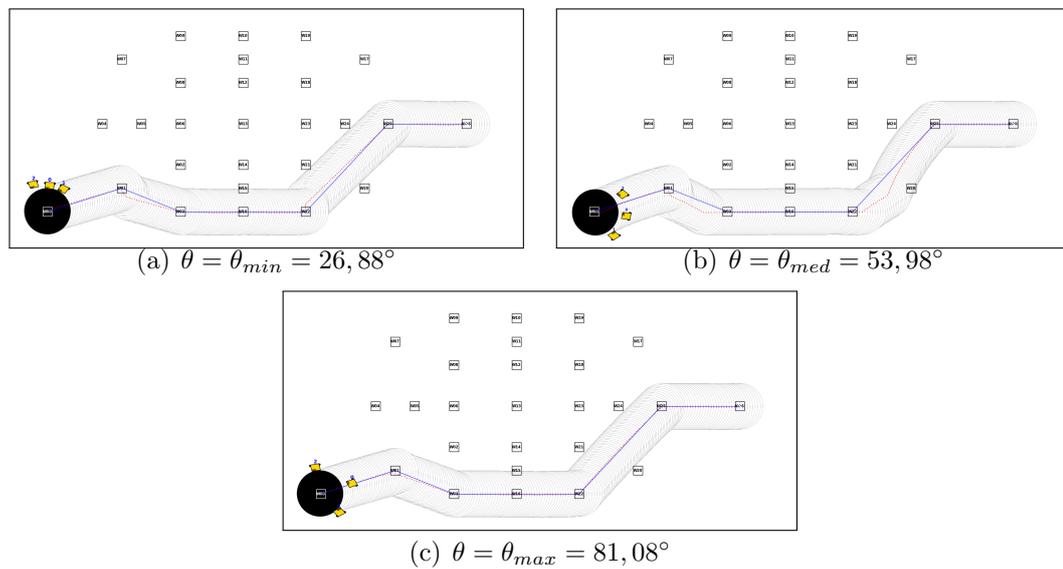


Figura A.32: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,7$  rad

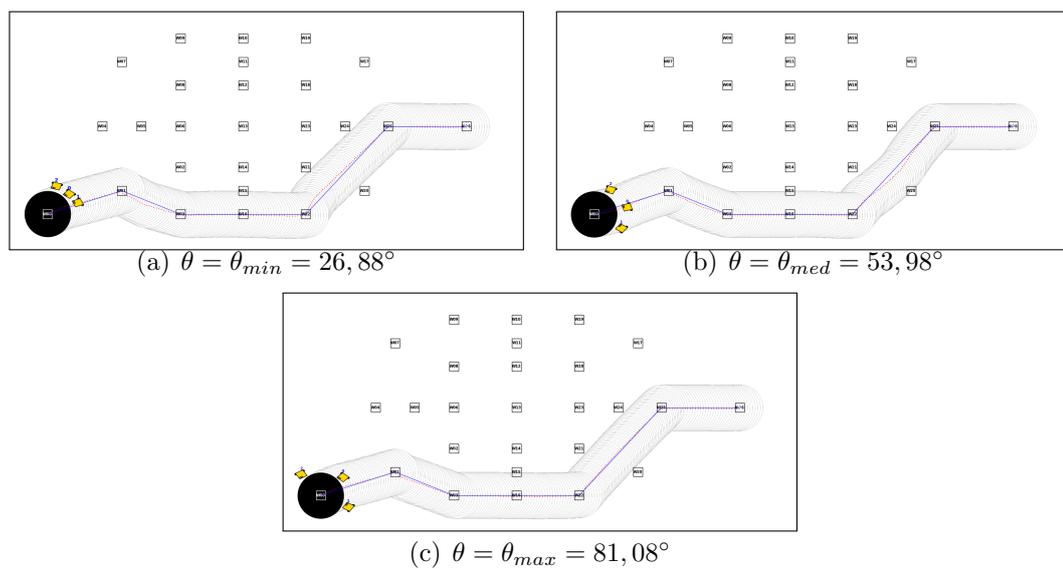
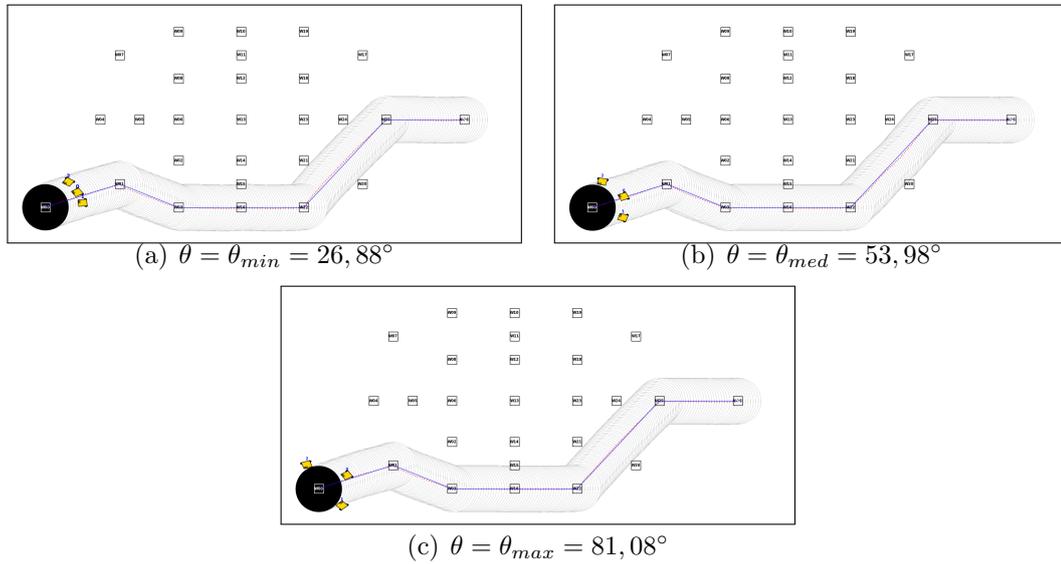


Figura A.33: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,261799$  rad

Tabela A.15: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,261799$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	50	40	44
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,3412	6,3412	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,016	0,0043	0,0178
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,0472	0,0355	0,0158
Tempo para transportar o objeto (s)	1586,9	2003,72	1834,96

Figura A.34: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,1$  radTabela A.16: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,1$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	68	46	51
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,308	6,308	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,016	0,0043	0,0178
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,014	0,0023	0,0158
Tempo para transportar o objeto (s)	1563,3	1727,59	1800,14

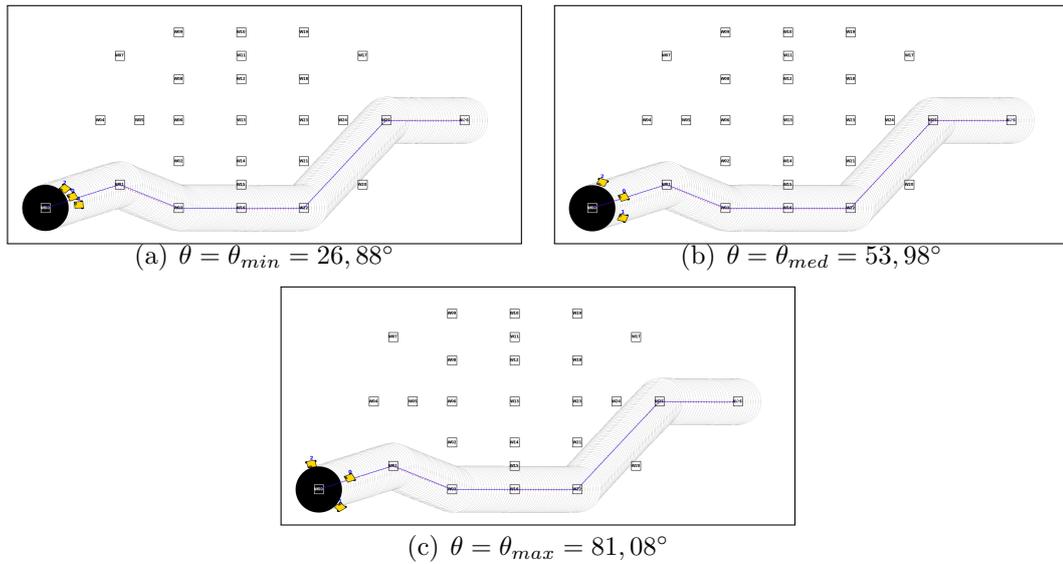


Figura A.35: Trajetória do centro de massa do objeto utilizando variando o ângulo  $\theta$  entre os robôs e o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,01$  rad

Tabela A.17: Impacto do ângulo no posicionamento dos robôs, o erro angular  $\Delta\theta_0 = 0,01$  rad

Parâmetro	$\theta_{min}$	$\theta_{med}$	$\theta_{max}$
Ângulo $\theta$ ( $^\circ$ ) entre os robôs	26,88	53,98	81,08
Quantidade de mudança no posicionamento dos robôs	167	100	155
Comprimento da rota $C^*$ (m)	6,31	6,31	6,31
Comprimento do percurso do objeto (m)	6,308	6,308	6,308
Distância do objeto para o ponto $w_0$ (m)	0,0031	0,0012	0,0012
Erro no comprimento do percurso do objeto (m)	0,0011	-0,0008	-0,0008
Tempo para transportar o objeto (s)	1144,73	1110	1437,99

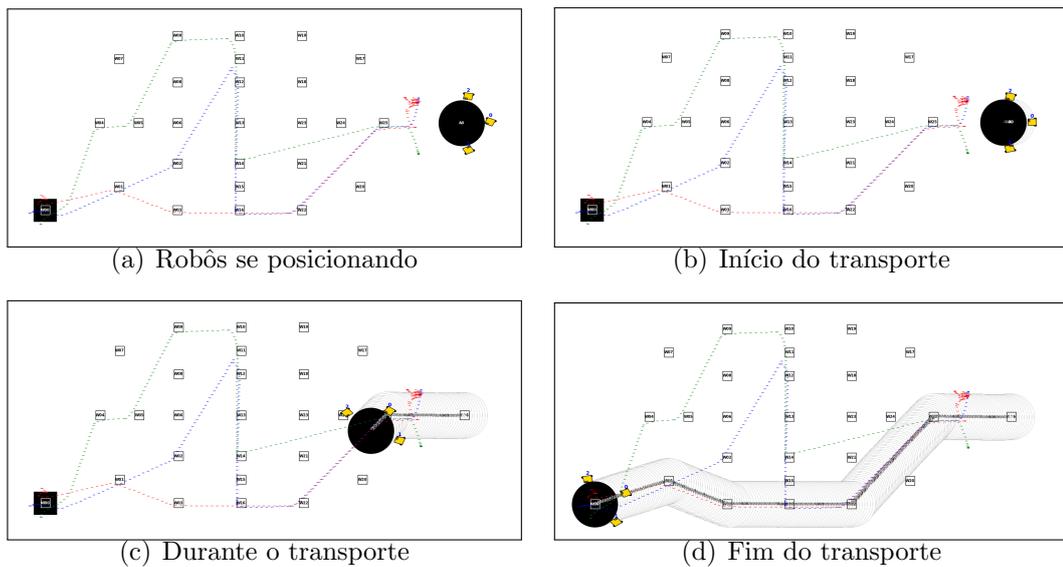


Figura A.36: Etapa de transporte com número mínimo de robôs para impulsionar o objeto

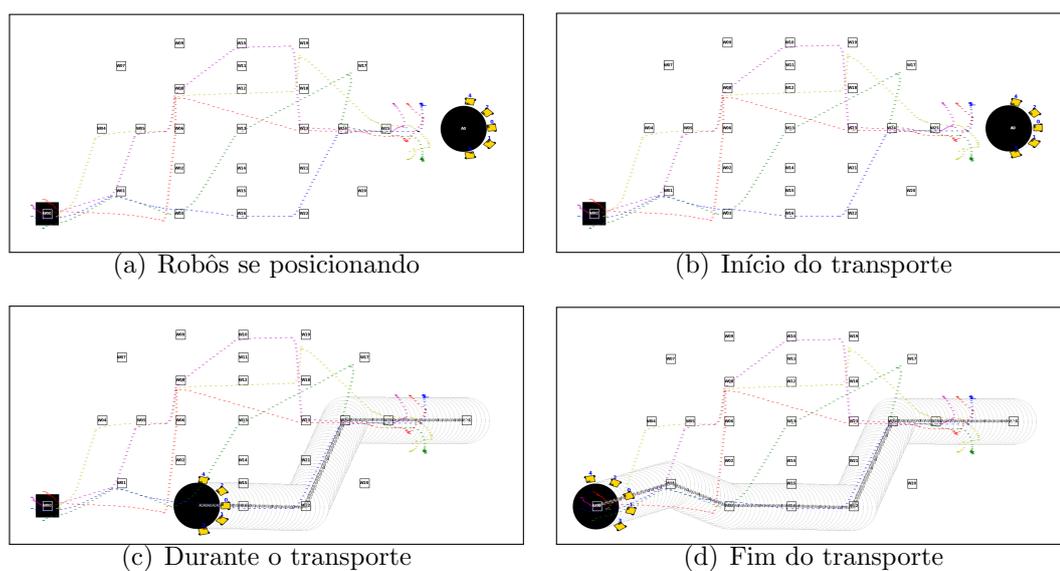


Figura A.37: Etapa de transporte com número médio de robôs para impulsionar o objeto

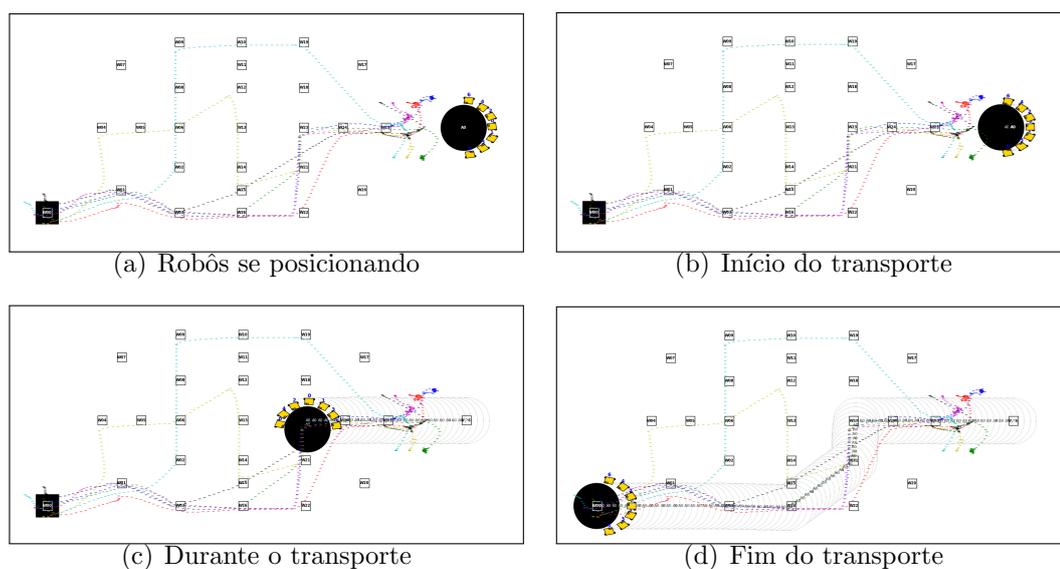


Figura A.38: Etapa de transporte com número máximo de robôs para impulsionar o objeto

Tabela A.18: Resultado das etapas com o número mínimo de robôs

Parâmetro	Número mínimo de robôs			
	1	2	3	4
Robôs				
Tempo da etapa de procura (s)	43,63	42,84	40,43	46,76
Tempo de espera (s)	3,13	3,92	6,33	0
Tempo para chegar ao objeto (s)	59,8	42,84	40,43	55,33
Tempo para se posicionarem (s)	12,6	12,6	12,6	12,6
Tempo para transportar o objeto (s)	1550,3	1550,3	1550,3	1550,3

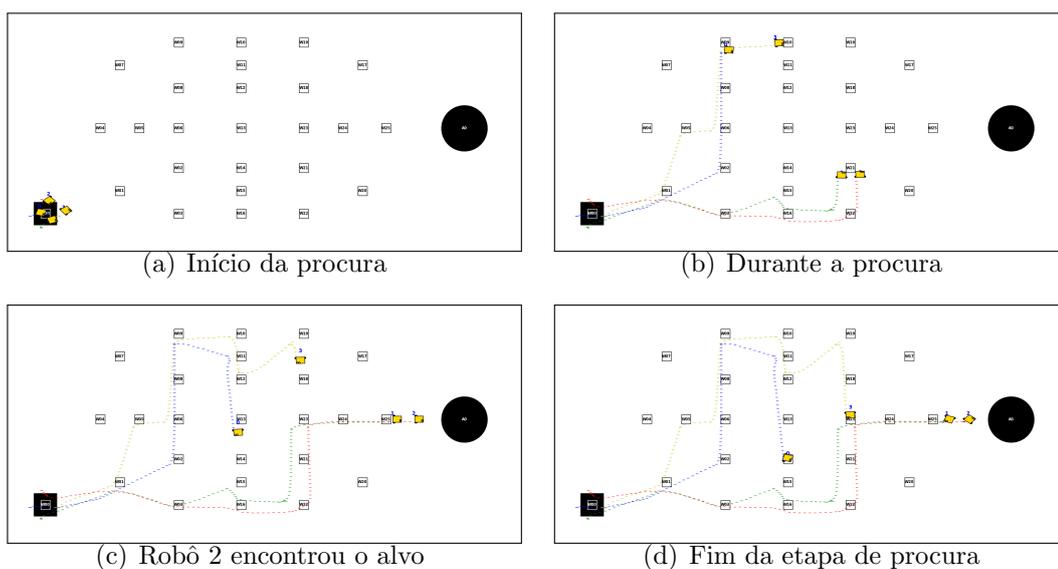


Figura A.39: Etapa de procura com o número mínimo de robôs

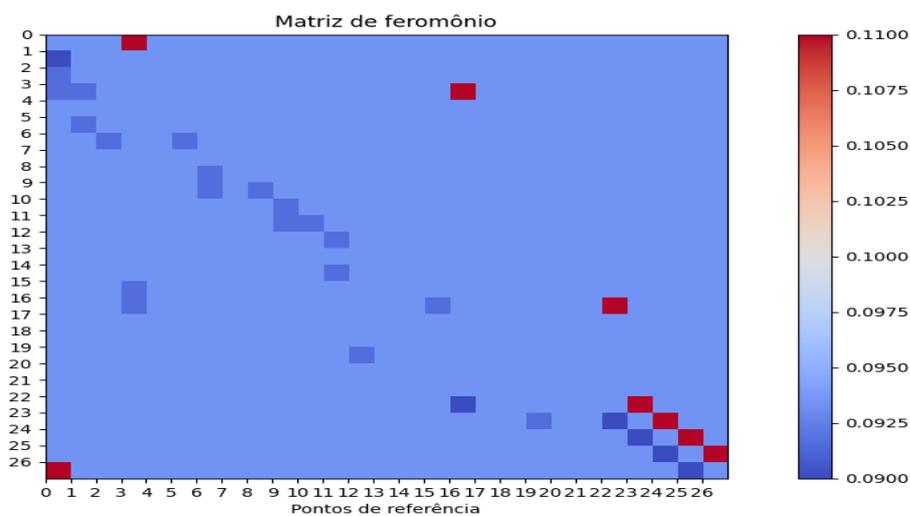


Figura A.40: Matriz de feromônio com o número mínimo de robôs

Tabela A.19: Resultado das etapas com o novo diâmetro do objeto e utilizando número mínimo de robôs

Parâmetro	Número mínimo de robôs			
	1	2	3	4
Tempo da etapa de procura (s)	31,53	32,45	36,64	33,61
Tempo de espera (s)	5,11	4,19	0	3,03
Tempo para chegar ao objeto (s)	31,53	42,04	39,69	42,55
Tempo para se posicionarem (s)	11,98	11,88	11,79	11,82
Tempo para transportar o objeto (s)	1526,2	1526,2	1526,2	1526,2

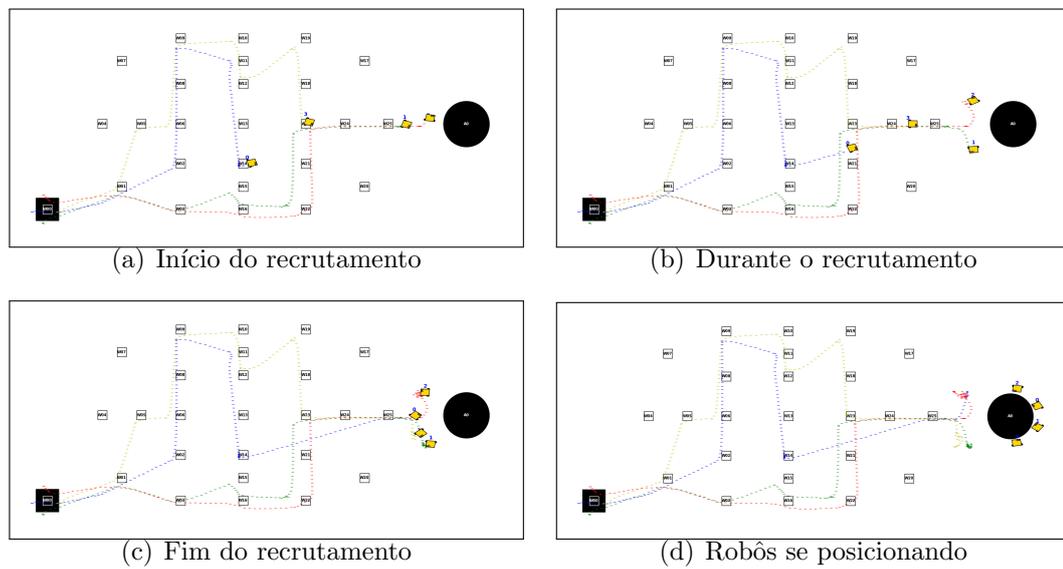


Figura A.41: Etapa de recrutamento e posicionamento inicial com o número mínimo de robôs

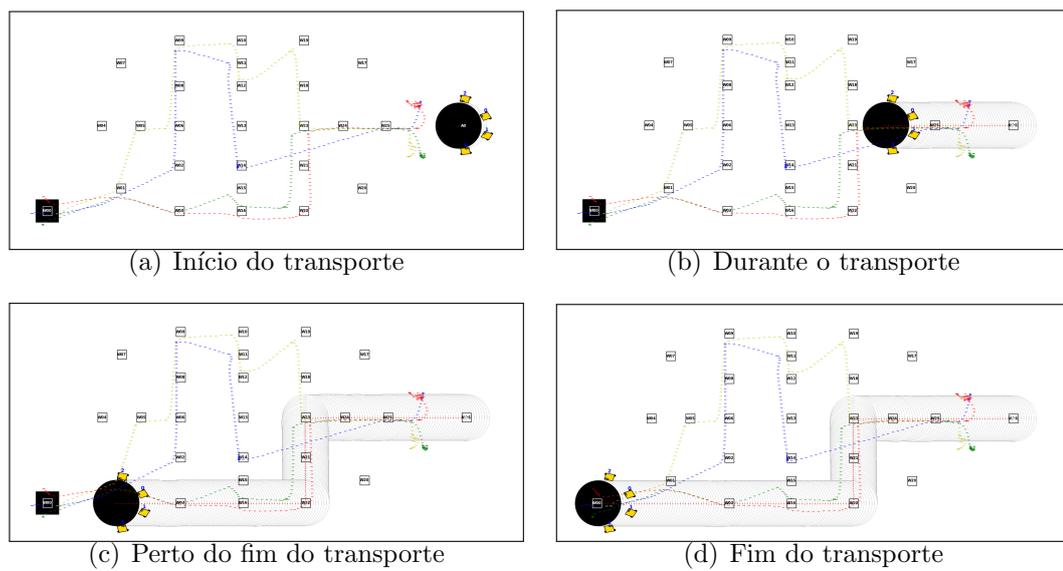


Figura A.42: Etapa do transporte do objeto com o número mínimo de robôs



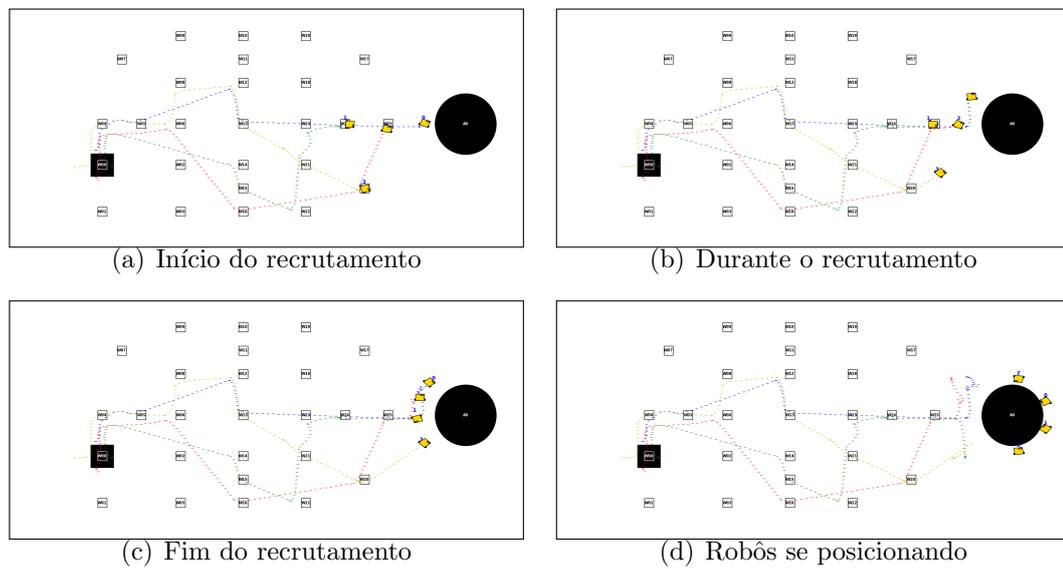


Figura A.45: Etapa de recrutamento e posicionamento inicial com o número mínimo de robôs

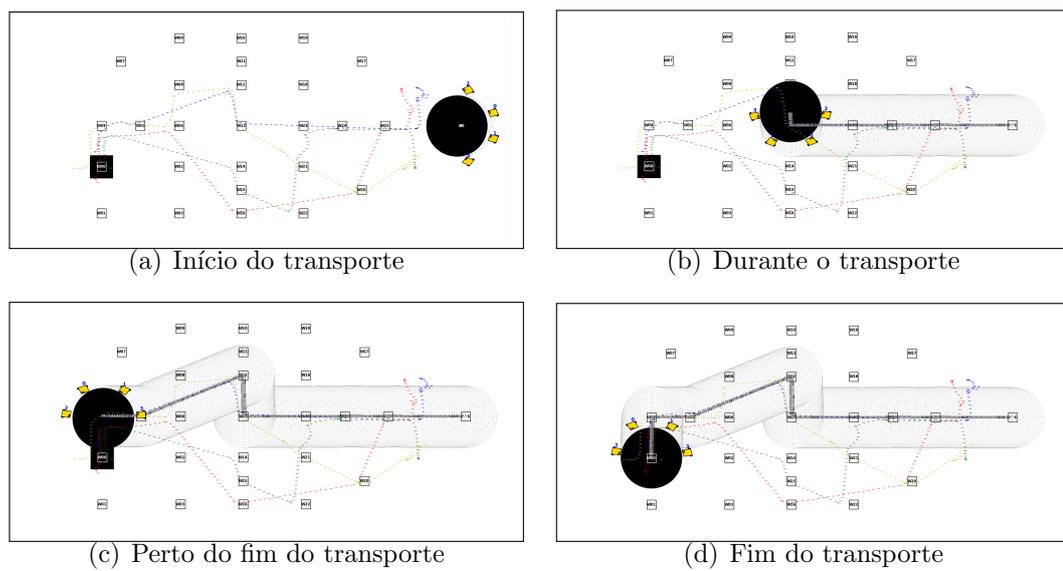


Figura A.46: Etapa do transporte do objeto com o número mínimo de robôs

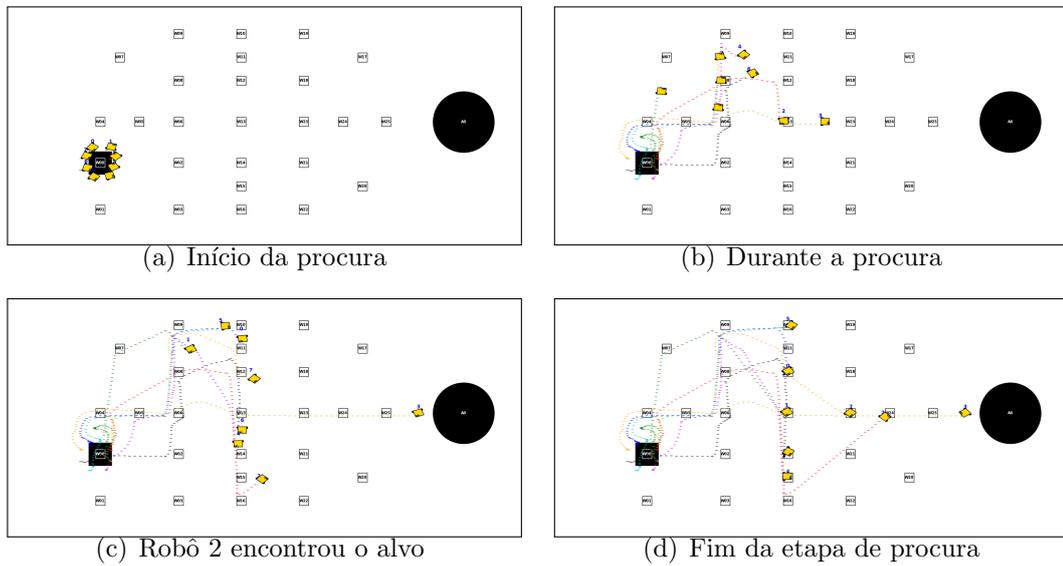


Figura A.47: Etapa de procura com o número máximo de robôs

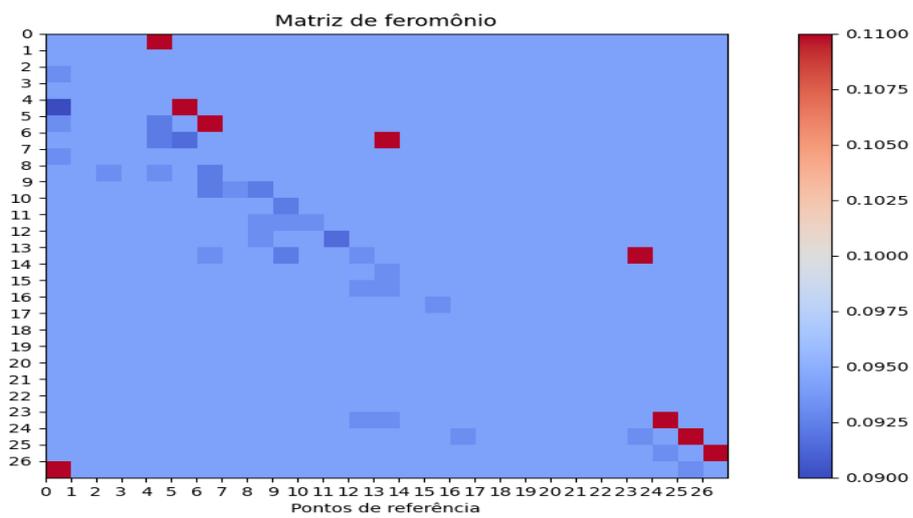


Figura A.48: Matriz de feromônio com o número máximo de robôs

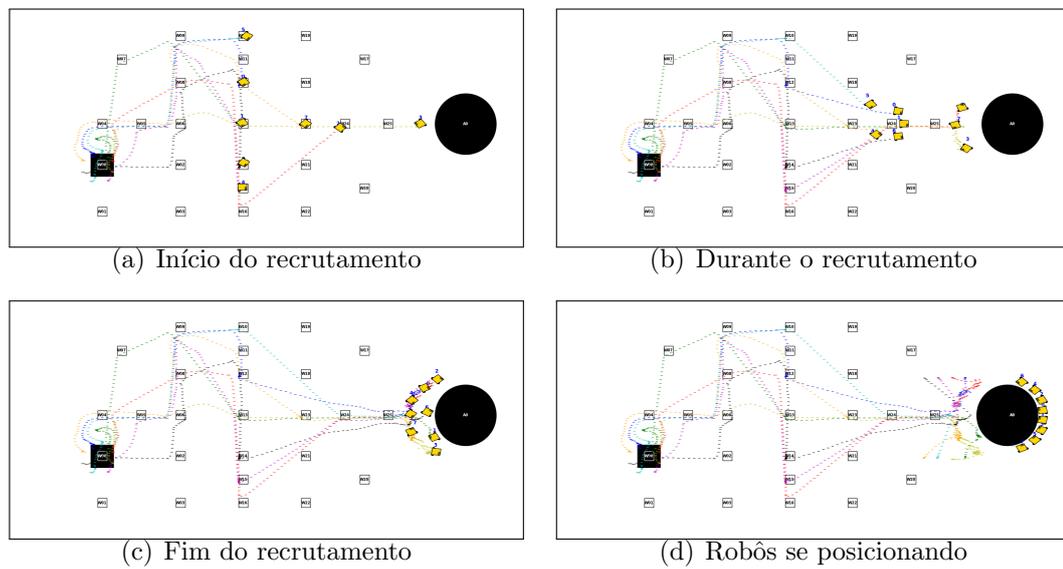


Figura A.49: Etapa de recrutamento e posicionamento inicial com o número máximo de robôs

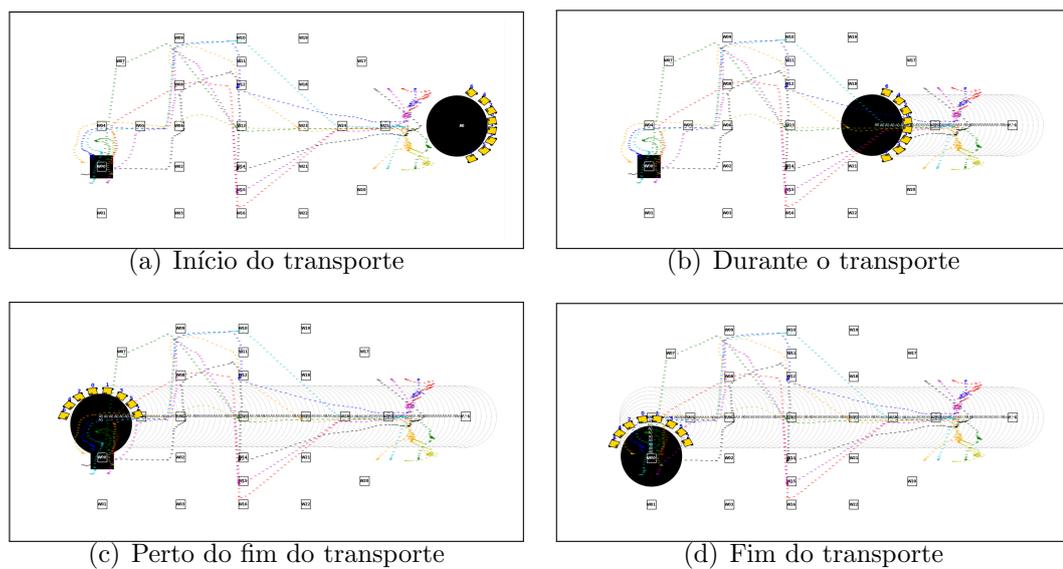


Figura A.50: Etapa do transporte do objeto com o número máximo de robôs