

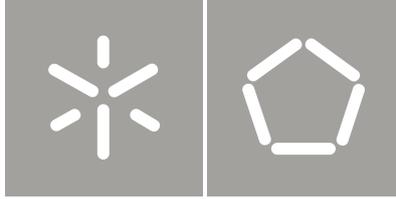


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Sara Filipa Martins de Sá

**Planeamento de Movimentos  
Compreensíveis pelo Humano para o Robô  
Sawyer**





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Sara Filipa Martins de Sá

**Planeamento de Movimentos  
Compreensíveis pelo Humano para o Robô  
Sawyer**

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de  
Mestre em Electrónica Industrial e Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação de  
**Professora Doutora Estela Bicho**

## DECLARAÇÃO

Nome: Sara Filipa Martins de Sá

Endereço eletrónico: sa.sfm22@gmail.com

Telefone: +351924009332

Cartão de Cidadão: 14611567 8 ZY2

Título da dissertação: Planeamento de Movimentos Compreensíveis pelo Humano para o Robô Sawyer

Orientador: Professora Doutora Estela Bicho

Ano de Conclusão: 2018

Designação do Mestrado: Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 30/01/2018

Assinatura: \_\_\_\_\_



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Estela Bicho, pelo apoio científico, motivação, incentivo e disponibilidade ao longo de todo este projeto. Obrigada pela confiança depositada e pela oportunidade de trabalhar num tema tão desafiante, com uma das plataformas robóticas mais inovadoras do mercado.

Um agradecimento muito especial ao Gianpaolo Gulleta, por estar sempre disponível para esclarecer as minhas dúvidas e por me ter ajudado na resolução dos diversos problemas que surgiram ao longo deste projeto. Admiro muito a tua capacidade de trabalho e o teu espírito de entreatajuda. Grazie per il vostro supporto, Gianpaolo!

Agradeço também ao João Sepúlveda, por me acompanhar na entrada no mundo da robótica e pela ajuda na resolução de alguns problemas relacionados com o robô Sawyer.

Agradeço a todos os meus restantes colegas do Laboratório de Robótica Móvel e Antropomórfica da Universidade do Minho, pelo bom ambiente e pelo espírito de entreatajuda. Muito obrigada Carlos, Flora, Luís, Nafiseh, Paulo, Ricardo, Tiago e Weronika!

Não poderia também deixar de agradecer às pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais Ludovina e Carlos. Obrigada por acreditarem em mim e por me proporcionarem o acesso a oportunidades que nunca tiveram. Devo tudo a vocês!

Agradeço também à minha restante família, em particular à minha avó e às minhas tias, por estarem sempre presentes e serem - muitas vezes - o meu porto de abrigo.

O meu enorme obrigada aos meus amigos, os de sempre e os da vida universitária, por nunca me deixarem sozinha nos bons e nos maus momentos. Muito obrigada Ana Pereira, Ângela, Bruno, Eduarda, Ana Rodrigues, Cátia, Cristian, David, Filipa, Filipe, Joana, Marisa, Miguel, Nelson, Rafael, Sérgio Branco, Sérgio Caxide e Sérgio Gomes!

Por fim, ao meu namorado Pedro Pereira, pela paciência ao longo de todo este projeto. Um obrigada não chega para agradecer todo o teu apoio, carinho e preocupação!



# Resumo

---

*Planeamento de Movimentos Compreensíveis pelo Humano para o Robô Sawyer*

---

Os robôs colaborativos, homologados para partilhar o espaço de trabalho com os humanos, têm sido aplicados em diversas áreas da indústria. Apesar das vantagens associadas à sua utilização, atualmente, os movimentos destas plataformas robóticas são gerados através de sistemas de replicação de trajetórias. Na presente dissertação, com base nos trabalhos anteriormente desenvolvidos por Bicho et al. (2011), Costa e Silva (2011) e Gulletta et al. (2015), desenvolveu-se um método de planeamento de movimentos que permitiu dotar o robô colaborativo Sawyer com a capacidade de autonomamente alcançar, agarrar e manipular objetos, de forma similar à executada pelos humanos.

Considerando o modelo baseado nas características dos movimentos dos membros superiores humanos, proposto por Rosenbaum et al. (2001), na presente dissertação, os ângulos das juntas da plataforma robótica são a solução de problemas de otimização não-lineares sujeitos a restrições. Esta metodologia permite que o processo de planeamento de movimentos seja independente da derivação da cinemática inversa do robô, dividindo-se em dois subproblemas: (i) a seleção da postura final e (ii) a seleção da trajetória.

A validação do método proposto foi realizada no contexto de duas tarefas de interação: (i) a montagem de um *Toy Vehicle* e (ii) a assistência a um humano com mobilidade reduzida. Os resultados obtidos demonstram que o método de planeamento proposto permite: (i) gerar trajetórias com características similares às observadas em trabalhos experimentais realizados com os membros superiores humanos e (ii) prevenir colisões com os obstáculos existentes no espaço de trabalho, com o operador e com corpo do próprio robô.



# Abstract

---

*Human Aware Motion Planning for the Sawyer Robot*

---

The collaborative robots, designed to share the workspace with the humans, have been used in several areas of industry. Despite the advantages associated with their use, currently the movements of these robotic platforms are generated through trajectory replication systems. Based in Bicho et al. (2011), Costa e Silva (2011) and Gulletta et al. (2015) works, in this dissertation was developed a method for motion planning of the collaborative robot Sawyer, making it capable to autonomously reach, grasp and manipulate objects, similar to that performed by humans.

Considering the model based on the characteristics of the upper limbs movements by Rosenbaum et al. (2001), in this dissertation the joints angles of the robotic platform are the solution of nonlinear constrained optimization problems. This methodology allows the process of motion planning to be independent of the derivation of Sawyer's inverse kinematics. This process is divided into two subproblems: (i) selection of final posture and (ii) selection of trajectory.

The validation of the proposed method was performed in the context of two interaction tasks: (i) assembling a Toy Vehicle and (ii) assisting a human with reduced mobility. The obtained results demonstrate that the proposed planning method allows: (i) to generate trajectories with characteristics similar to those observed in the experimental work performed with human upper limbs and (ii) prevent collisions with existing obstacles in the workspace, with the operator and the robot's own body.



---

# Conteúdo

---

<b>I</b>	<b>Âmbito da Dissertação</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Robôs Colaborativos . . . . .	4
1.2	Motivação e Objetivos . . . . .	8
1.3	Enquadramento . . . . .	9
1.4	Estrutura da Dissertação . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Controlo Motor na Robótica</b>	<b>13</b>
2.1	Introdução . . . . .	13
2.2	Métodos de Planeamento de Movimentos . . . . .	14
2.2.1	<i>Probabilistic Roadmap Method</i> (PRM) . . . . .	16
2.2.2	<i>Rapidly-Exploring Random Tree</i> (RRT) . . . . .	17
2.2.3	Campos Potenciais . . . . .	19
2.2.4	Atractores Dinâmicos . . . . .	21
2.2.5	Métodos de Otimização . . . . .	23
2.3	Discussão . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Controlo Motor nos Humanos</b>	<b>27</b>
3.1	Classificação dos Movimentos da Mão Humana . . . . .	27
3.2	Modelos Computacionais Baseados no Planeamento de Movimentos nos Humanos . . . . .	29
3.2.1	Características dos Movimentos dos Membros Superiores Humanos . . . . .	30
3.2.2	Movimento do Braço Humano Durante o Desvio de Obstáculos . . . . .	33

---

<b>II</b>	<b>Sistema de Planeamento de Movimentos</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Plataforma Robótica Sawyer</b>	<b>39</b>
4.1	Especificações Básicas . . . . .	39
4.2	Modelo Cinemático do Manipulador . . . . .	40
4.2.1	Fundamentos Teóricos . . . . .	42
4.2.2	Braço Robótico . . . . .	43
4.2.2.1	Cinemática Direta . . . . .	45
4.2.3	Mão Robótica . . . . .	48
4.2.3.1	Cinemática Direta . . . . .	50
4.2.3.2	Cinemática Inversa . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Planeamento de Movimentos</b>	<b>55</b>
5.1	Visão geral . . . . .	56
5.2	Classificação dos Movimentos . . . . .	57
5.3	Estratégia de Planeamento . . . . .	61
5.4	Modelação do Robô e dos Objetos Existentes no Espaço de Trabalho . . . . .	63
5.4.1	Modelo do Corpo do Robô . . . . .	64
5.4.2	Modelo do Braço do Robô . . . . .	65
5.4.3	Modelo da Mão Robótica <i>BH8-series</i> . . . . .	72
5.4.4	Modelo dos Objetos . . . . .	73
5.5	Problemas de Otimização . . . . .	75
5.5.1	Seleção da Postura Final . . . . .	75
5.5.2	Seleção da Postura <i>Bounce</i> . . . . .	83
5.6	<i>Software</i> de Otimização . . . . .	86
5.6.1	<i>A Modeling Programming Language</i> (AMPL) . . . . .	87
5.6.2	<i>Interior-Point Optimizer</i> (IPOPT) . . . . .	87
<b>III</b>	<b>Validação do Sistema de Planeamento de Movimentos</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>Planeamento de Movimentos em Cenários de Interação Humano-Robô</b>	<b>91</b>
6.1	Visão Geral . . . . .	92
6.2	Métricas de Avaliação . . . . .	93

6.3	Tarefa 1: Assemblagem de um <i>Toy Vehicle</i> . . . . .	94
6.3.1	Descrição da Tarefa . . . . .	95
6.3.2	Sequência de Movimentos e Resultados Obtidos . . . . .	96
6.3.2.1	Ação Motora 1: Alcançar e Agarrar a Coluna Magenta . . .	97
6.3.2.2	Ação Motora 2: Transportar e Inserir a Coluna Magenta na Base . . . . .	99
6.3.2.3	Ação Motora 3: Retornar à Postura Inicial . . . . .	101
6.3.3	Comparação com o Desempenho do Robô Antropomórfico ARoS . .	103
6.4	Tarefa 2: Assistência a um Humano com Mobilidade Reduzida . . . . .	106
6.4.1	Descrição da Tarefa . . . . .	107
6.4.2	Sequência de Movimentos e Resultados Obtidos . . . . .	109
6.4.2.1	Ação Motora 1: Alcançar e Agarrar a Garrafa de Sumo . .	109
6.4.2.2	Ação Motora 2: Transportar a Garrafa de Sumo . . . . .	111
6.4.2.3	Ação Motora 3: Entornar o Líquido no Copo . . . . .	113
6.4.2.4	Ação Motora 4: Posicionar a Garrafa de Sumo . . . . .	115
6.4.2.5	Ação Motora 5: Colocar a Garrafa de Sumo na Mesa . . . .	117
6.4.2.6	Ação Motora 6: Retornar à Postura Inicial . . . . .	119
6.4.3	Comparação com o Desempenho do Robô Antropomórfico ARoS . .	121
6.5	Discussão . . . . .	124
<b>IV</b>	<b>Conclusão</b>	<b>127</b>
<b>7</b>	<b>Discussão e Trabalho Futuro</b>	<b>129</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>133</b>



---

# Lista de Abreviaturas

---

<i>E<sub>off</sub></i>	Centro do <i>Offset</i> do Cotovelo
<i>E</i>	Centro do Cotovelo
<i>H</i>	Centro da Palma da Mão
<i>S<sub>off</sub></i>	Centro do <i>Offset</i> do Ombro
<i>S</i>	Centro do Ombro
<i>W<sub>off</sub></i>	Centro do <i>Offset</i> do Pulso
<i>W</i>	Centro do Pulso
AMPL	<i>A Modeling Programming Language</i>
ARoS	<i>Anthropomorphic Robotic System</i>
DOF	<i>Degree of Freedom</i> - Grau de Liberdade
DRM	<i>Dynamic Roadmap Method</i>
HUMP	<i>Human-like upper-limb motion planner</i>
IPOPT	<i>Interior-Point Optimizer</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização
MAR Lab	Laboratório de Robótica Móvel e Antropomórfica
NJS	<i>Normalized Jerk Score</i> - Pontuação Normalizada da Variação da Aceleração
NMU	<i>Number of Movement Units</i> - Número de Unidades de Movimento

<b>PRM</b>	<i>Probabilistic Roadmap Method</i>
<b>RPP</b>	<i>Randomized Path Planner</i>
<b>RRG</b>	<i>Rapidly-Exploring Random Graph</i>
<b>RRT</b>	<i>Rapidly-Exploring Random Tree</i>
<b>SNC</b>	Sistema Nervoso Central
<b>TGB</b>	<i>Time Base Generator</i>

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Robô industrial tradicional e robô colaborativo . . . . .	5
1.2	Exemplos de robôs colaborativos disponíveis no mercado . . . . .	7
2.1	Ilustração das diferentes fases do método PRM . . . . .	16
2.2	Ilustração da operação de extensão, efetuada pelo método RRT . . . . .	18
2.3	Ilustração da abordagem dos campos potenciais . . . . .	20
2.4	Representação da <i>direção de navegação</i> da extremidade do manipulador, utilizada no método dos atractores dinâmicos . . . . .	22
3.1	Taxonomia associada às diferentes posturas de manipulação da mão humana, utilizadas durante a execução de movimentos preênsais . . . . .	28
3.2	Diagrama de transição de estados de uma tarefa <i>pick-and-place</i> . . . . .	32
3.3	Perfil de velocidade do pulso de um sujeito, durante a colocação de um pino numa concavidade com 9,5 mm de diâmetro . . . . .	32
3.4	Representação do movimento executado a partir da postura inicial até ao objeto a ser alcançado, na ausência de obstáculos . . . . .	34
3.5	Representação do movimento executado a partir da postura inicial até ao objeto a ser alcançado, na presença de obstáculos . . . . .	34
4.1	Robô colaborativo Sawyer e o seu respetivo pedestal . . . . .	40
4.2	<i>Grippers</i> disponibilizadas pela empresa <i>Rethink Robotics</i> para a plataforma robótica Sawyer . . . . .	42
4.3	Relação entre a cinemática direta e inversa . . . . .	43
4.4	Ilustração do manipulador robótico Sawyer . . . . .	44

4.5	Manipulador robótico Sawyer na sua posição nula e representação dos eixos coordenados $\hat{x}_i\hat{y}_i\hat{z}_i$ . . . . .	46
4.6	Ilustração da mão robótica <i>BH8-series</i> . . . . .	49
4.7	Ilustração do movimento <i>spread</i> , executado pela mão robótica <i>BH8-series</i> . . . . .	49
4.8	Mão robótica <i>BH8-series</i> na sua posição nula e representação dos eixos coordenados $\hat{x}_i\hat{y}_i\hat{z}_i$ do dedo F1 . . . . .	51
4.9	Representação dos ângulos entre as juntas da mão robótica <i>BH8-series</i> e das distâncias $d_{FF}$ e $d_{FH}$ . . . . .	53
5.1	Diagramas de transição de estados dos movimentos <i>pick-and-place</i> e <i>move</i> . . . . .	58
5.2	Ilustração de um movimento <i>move</i> . . . . .	58
5.3	Ilustração dos diferentes estágios de um movimento <i>pick</i> . . . . .	59
5.4	Ilustração dos diferentes estágios de um movimento <i>place</i> . . . . .	60
5.5	Fluxograma da estratégia de planeamento de movimentos . . . . .	62
5.6	Representação do corpo do robô colaborativo Sawyer . . . . .	65
5.7	Exemplos da representação do braço de uma plataforma robótica . . . . .	66
5.8	Modelo do braço da plataforma robótica Sawyer . . . . .	72
5.9	Modelo da mão robótica <i>BH8-series</i> . . . . .	73
5.10	Modelos dos objetos existentes no espaço de trabalho do robô que não são utilizados durante a realização da tarefa proposta . . . . .	74
5.11	Modelo do objeto a transportar, durante a fase <i>manipulation</i> . . . . .	74
5.12	Exemplo da relação entre a postura final da mão do manipulador e a postura do objeto a agarrar . . . . .	77
5.13	Ilustração da restrição aplicada ao problema de seleção da postura final, para evitar a existência de colisões entre o braço e o corpo do robô . . . . .	78
5.14	Ilustração da restrição aplicada ao problema de seleção da postura final, para evitar a existência de colisões entre o braço do robô e os objetos existentes no espaço de trabalho . . . . .	82
6.1	Processamento da validação do método de planeamento de movimentos, em ambiente simulado . . . . .	92
6.2	Cenário de montagem de um <i>Toy Vehicle</i> , em ambiente de simulação . . . . .	95
6.3	Seqüência de movimentos a executar, durante a simulação da tarefa 1 . . . . .	96

---

6.4	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 1 (Tarefa 1) . . . . .	97
6.5	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 1, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 1) . . . . .	99
6.6	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 2 (Tarefa 1) . . . . .	100
6.7	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 2, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 1) . . . . .	101
6.8	Movimento planeado para a ação motora 3 (Tarefa 1) . . . . .	102
6.9	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 3, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 1) . . . . .	103
6.10	Características cinemáticas obtidas para o robô colaborativo Sawyer, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 1 . . . . .	104
6.11	Robô antropomórfico ARoS no cenário de montagem de um <i>Toy Vehicle</i> , em ambiente de simulação . . . . .	105
6.12	Características cinemáticas obtidas para o robô antropomórfico ARoS, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 1 . . . . .	106
6.13	Cenário de assistência a um humano com mobilidade reduzida, em ambiente de simulação . . . . .	107
6.14	Sequência de movimentos a executar, durante a simulação da tarefa 2 . . . . .	108
6.15	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 1 (Tarefa 2) . . . . .	110
6.16	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 1, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 2) . . . . .	111
6.17	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 2 (Tarefa 2) . . . . .	112
6.18	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 2, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 2) . . . . .	113
6.19	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 3 (Tarefa 2) . . . . .	114
6.20	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 3, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 2) . . . . .	115
6.21	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 4 (Tarefa 2) . . . . .	116
6.22	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 4, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 2) . . . . .	117

---

6.23	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 5 (Tarefa 2) . . . . .	118
6.24	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 5, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 2) . . . . .	119
6.25	Sequência de movimentos planeada para a ação motora 6 (Tarefa 2) . . . . .	120
6.26	Características cinemáticas obtidas para a ação motora 6, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto (Tarefa 2) . . . . .	120
6.27	Robô antropomórfico ARoS no cenário de assistência a um humano com mobilidade reduzida, em ambiente de simulação . . . . .	121
6.28	Características cinemáticas obtidas para o robô colaborativo Sawyer, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 2 . . . . .	122
6.29	Características cinemáticas obtidas para o robô antropomórfico ARoS, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 2 . . . . .	123

---

# Lista de Tabelas

---

4.1	Especificações básicas da plataforma robótica Sawyer . . . . .	41
4.2	Limites das juntas da plataforma robótica Sawyer . . . . .	44
4.3	Dimensões dos segmentos da plataforma robótica Sawyer . . . . .	45
4.4	Parâmetros de Denavit-Hartenberg da plataforma robótica Sawyer . . . . .	46
4.5	Dimensões e outros parâmetros da mão robótica <i>BH8-series</i> . . . . .	50
4.6	Parâmetros de Denavit-Hartenberg para cada dedo $k$ da mão robótica <i>BH8-series</i> . . . . .	51
5.1	Pontos do braço definidos para um manipulador com <i>offsets</i> nas juntas do ombro, cotovelo e pulso, modelado por um conjunto máximo de 14 esferas .	67
5.2	Pontos mais expostos a colisões, definidos para a mão robótica <i>BH8-series</i> .	73
6.1	Postura inicial do robô colaborativo Sawyer, no cenário da tarefa 1 . . . . .	96
6.2	Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 1 (Tarefa 1) . . . . .	98
6.3	Resultados do planeamento da ação motora 1 (Tarefa 1) . . . . .	99
6.4	Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 2 (Tarefa 1) . . . . .	100
6.5	Resultados do planeamento da ação motora 2 (Tarefa 1) . . . . .	101
6.6	Problemas de otimização definidos para a ação motora 3 (Tarefa 1) . . . . .	102
6.7	Resultados do planeamento da ação motora 3 (Tarefa 1) . . . . .	103
6.8	Postura inicial do robô antropomórfico ARoS, no cenário da tarefa 1 . . . . .	104
6.9	Resultados do planeamento da tarefa 1, no robô antropomórfico ARoS . . . . .	106

---

6.10	Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 1 (Tarefa 2) . . . . .	109
6.11	Resultados do planeamento da ação motora 1 (Tarefa 2) . . . . .	111
6.12	Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 2 (Tarefa 2) . . . . .	112
6.13	Resultados do planeamento da ação motora 2 (Tarefa 2) . . . . .	113
6.14	Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 3 (Tarefa 2) . . . . .	114
6.15	Resultados do planeamento da ação motora 3 (Tarefa 2) . . . . .	115
6.16	Problemas de otimização definidos para a ação motora 4 (Tarefa 2) . . . . .	116
6.17	Resultados do planeamento da ação motora 4 (Tarefa 2) . . . . .	117
6.18	Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 5 (Tarefa 2) . . . . .	118
6.19	Resultados do planeamento da ação motora 5 (Tarefa 2) . . . . .	119
6.20	Problema de otimização definido a ação motora 6 (Tarefa 2) . . . . .	120
6.21	Resultados do planeamento da ação motora 6 (Tarefa 2) . . . . .	121
6.22	Resultados do planeamento da tarefa 2, no robô antropomórfico ARoS . . . . .	124

## Parte I

# Âmbito da Dissertação



# Capítulo 1

---

## Introdução

---

Ao longos dos últimos 60 anos, a área da robótica centrou-se no desenvolvimento de novas soluções que permitissem corresponder às necessidades técnicas dos humanos e conseqüentemente, melhorassem a sua qualidade de vida. Numa primeira fase, as plataformas robóticas eram apenas utilizadas em processos de montagem e manufatura, executando tarefas repetitivas, precisas e/ou com elevados riscos para os operadores humanos (Garcia et al., 2007; Schaal, 2007). A implementação desta metodologia de trabalho, nas linhas de produção industrial, contribuí para o crescimento de várias empresas, proporcionando: o aumento da produção diária, a redução dos custos associados à mão-de-obra, o aumento da qualidade dos produtos fabricados e a redução de acidentes em horário laboral.

Com a evolução tecnológica centrada na inteligência artificial, no início do século XXI, começaram a ser desenvolvidos e comercializados os primeiros mecanismos robóticos, capazes de partilhar o espaço de trabalho e/ou interagir socialmente com os humanos (Schaal, 2007). A comunidade científica promoveu a criação de novas soluções para mercados fora do setor industrial (Garcia et al., 2007), associados a: (i) atividades domésticas (como o robô móvel Roomba Vacuum de Forlizzi & DiSalvo (2006)), (ii) missões de busca e salvamento (como a plataforma móvel USAR ETR de Wolf et al. (2003)), (iii) assistência em processos neurocirúrgicos (como o braço robótico Minerva de Fankhauser et al. (1994)), (iv) explorações espaciais (como o robô humanoide Robonaut da NASA (Blüthmann et al., 2003; Diftler et al., 2011)) e (v) projetos direcionados para a área da construção civil (como o braço robótico móvel ROCCO de Gambao et al. (1997)).

Na atualidade, os grupos de investigação encontram-se especialmente focados no desenvolvimento e na integração de robôs sociais, em diversas atividades do quotidiano. Estes sistemas são utilizados como parceiros, colegas ou assistentes dos humanos (Fong et al., 2003), sendo aplicados em inúmeras tarefas direcionadas para a assistência e a prestação de cuidados de saúde, como por exemplo: (i) sessões de terapia para crianças com distúrbios neurológicos (como os robôs humanoides introduzidos no projeto Aurora (Robins et al., 2005)), (ii) atividades lúdicas e educacionais (como os robôs humanoides RUBI e QRIO de Movellan et al. (2005)), (iii) sessões de fisioterapia (como o robô móvel Pioneer 2-DX de Gockley & Mataric (2006)) e (iv) prestação de auxílio a pessoas idosas ou com mobilidade reduzida (como o robô móvel CareO-bot de Graf et al. (2002)).

Além dos sistemas mencionados anteriormente, ao longo da última década, várias empresas começaram a desenvolver e a comercializar robôs colaborativos para linhas de produção industriais. Estes sistemas são produzidos para cooperar com os operadores humanos, durante a execução de tarefas de montagem ou manufatura, partilhando o mesmo espaço de trabalho de forma segura e eficaz (Bogue, 2017). O Sawyer (Rethink Robotics), o YuMi (ABB) e o UR10 (Universal Robots) são algumas das plataformas robóticas colaborativas atualmente disponíveis no mercado.

A presente dissertação centra-se, particularmente, na problemática dos robôs colaborativos, sendo na próxima secção descrita: (i) a sua evolução no setor industrial, (ii) as suas diferenças em relação aos robôs tradicionais e (iii) as normas de segurança aplicadas na sua integração em ambientes partilhados. Posteriormente, nas secções 1.2 e 1.3 serão apresentadas as principais motivações associadas à realização do presente projeto de dissertação, sendo destacados os trabalhos realizados no âmbito da área de planeamento de movimentos, anteriormente desenvolvidos no Laboratório de Robótica Móvel e Antropométrica (MAR Lab) da Universidade do Minho. Por fim, na secção 1.4 será apresentada a estrutura da presente dissertação.

## 1.1 Robôs Colaborativos

Numa fase inicial da expansão robótica no setor industrial, o mercado disponha apenas de mecanismos robustos e de grandes dimensões, colocados no interior de barreiras de segurança (Siciliano & Khatib, 2008) de forma a delimitar as áreas passíveis de serem

frequentadas pelos operadores humanos (na figura 1.1a). Este tipo de plataformas robóticas apresentava uma elevada capacidade de alcance e manipulação, atingindo velocidades consideráveis e assegurando uma produção altamente eficiente (Krüger et al., 2009). Com a evolução da tecnologia, ao longo da última década, as tarefas de montagem começaram a englobar a manipulação de materiais com pequenas dimensões, obrigando as empresas a otimizar as suas metodologias de trabalho para garantir custos de produção sustentáveis e tempos de execução baixos. Considerando esta problemática, a comunidade científica propôs o desenvolvimento de novos sistemas capazes de colaborar diretamente e partilhar o espaço de trabalho com os operadores (na figura 1.1b) (Siciliano & Khatib, 2008; Bloss, 2016; Bogue, 2017; Fryman & Matthias, 2012).



(a) Robô industrial tradicional



(b) Robô colaborativo

**Figura 1.1:** Na indústria automóvel, inicialmente, eram apenas utilizados sistemas robóticos de grandes dimensões e com elevadas capacidades de carga (a). Na atualidade, vários processos de montagem são executados através da interação humano-robô (b) <sup>1</sup>.

Os trabalhos experimentais realizados no âmbito da colaboração humano-robô, comprovam que as tarefas de interação possibilitam a nível industrial, a execução de processos de manufatura e montagem mais eficientes, rápidos e seguros para os trabalhadores (Bloss, 2016). O desenvolvimento de soluções robóticas colaborativas reúne um conjunto de competências específicas dos humanos e dos sistemas robóticos, essenciais para assegurar uma maior flexibilidade e adaptabilidade dos intervenientes, em diferentes tipos de aplicações (Thomas et al., 2016; Krüger et al., 2009). Tipicamente, as plataformas robóticas são caracterizadas pela elevada precisão dos seus movimentos (Thomas et al., 2016), podendo executar tarefas com velocidades limitadas, sem demonstrar sinais de fadiga ou

<sup>1</sup>Imagens retiradas dos sites <http://www.robotinvestment.dk/> e <https://www.manufacturingtomorrow.com/>.

cansaço (Siciliano & Khatib, 2008; Krüger et al., 2009). Apesar das vantagens associadas, estes mecanismos exigem uma programação prévia, apresentando limitações associadas à adição de novos elementos nas linhas de produção (Krüger et al., 2009). Os humanos, pelo contrário, possuem capacidades cognitivas para solucionar situações imprevisíveis (Thomas et al., 2016), manifestando problemas de precisão e perturbações físicas e/ou motoras, originadas pela constante repetição de movimentos (Siciliano & Khatib, 2008).

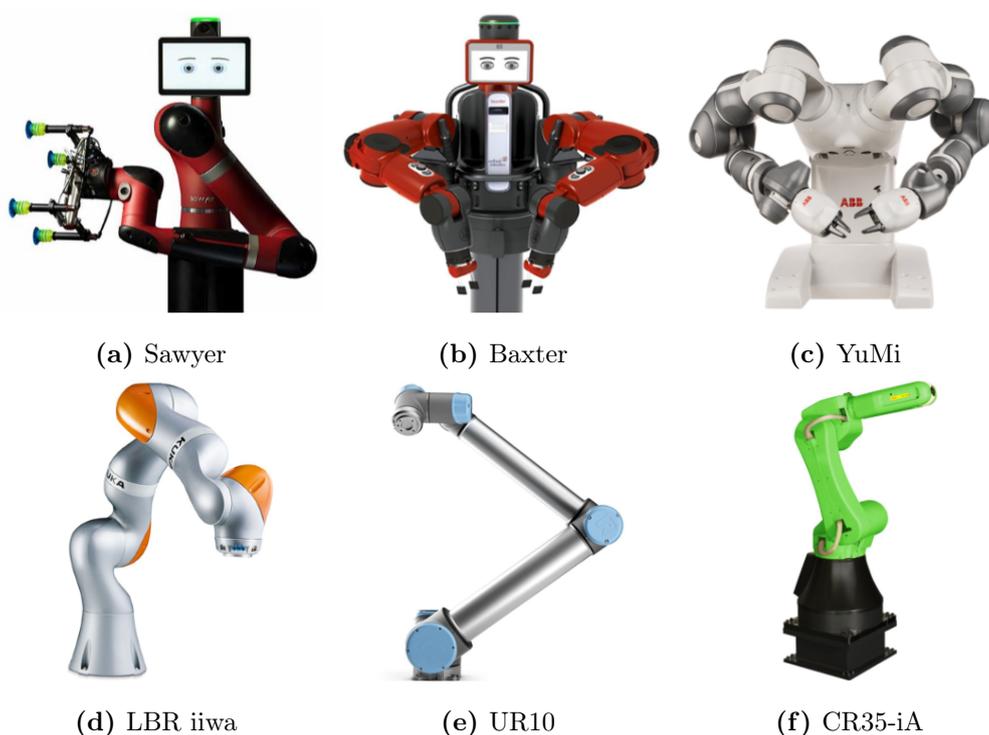
No mercado atual encontram-se disponíveis várias plataformas robóticas colaborativas, homologadas para partilhar o espaço de trabalho com os humanos e executar tarefas com diferentes níveis de complexidade. Segundo diversas publicações<sup>2</sup>, este tipo de sistemas encontra-se inserido nas tecnologias implementadas no novo plano estratégico de revolução industrial, denominado de *Indústria 4.0*. O Sawyer e o Baxter da *Rethink Robotics*, o YuMi da *ABB*, o LBR iiwa da *KUKA*, o UR10 da *Universal Robots* e o CR35-iA da *FANUC* (na figura 1.1) são apenas alguns exemplos de robôs colaborativos projetados para a automatização de uma ampla gama de processos - soldadura, embalamento e distribuição de produtos, inspeção de qualidade, montagem ou logística (Bloss, 2016) - executados em contextos industriais.

Ao contrário dos robôs tradicionais e em semelhança ao referido anteriormente, os sistemas robóticos colaborativos são desenvolvidos para colaborar e interagir com os operadores humanos, reunindo um conjunto de especificações que possibilitam a diminuição do número de acidentes ocorridos em horário laboral. Equipados com sistemas de limitação de força e potência, estes robôs são programados para quantificar as forças aplicadas nas suas juntas. Esta característica proporciona a deteção de forças anormais, originadas - por exemplo - após o contacto físico com objetos ou humanos, sendo ativados mecanismos que permitem o sistema parar automaticamente ou mover-se na direção oposta.

Fisicamente, os robôs colaborativos apresentam superfícies arredondadas, necessárias para: (i) dissipar forças após impactos com grandes superfícies, (ii) ocultar os motores das juntas e (iii) garantir a integridade física dos operadores humanos e do espaço de trabalho. Neste contexto, para proporcionar os níveis de segurança necessários durante a execução de tarefas de interação, a *Organização Internacional de Normalização (ISO)* definiu um conjunto de requisitos a serem respeitados pelos sistemas colaborativos. Em concreto,

---

<sup>2</sup>Informações retiradas de notícias publicadas em meios de comunicação, nomeadamente, no *Jornal de Negócios* - versão *online* disponível no *site* <http://www.jornaldenegocios.pt> - e no *Jornal Económico* - versão *online* disponível no *site* <http://www.jornaleconomico.sapo.pt/>.



**Figura 1.2:** Exemplos de robôs colaborativos disponíveis no mercado<sup>3</sup>.

para estes mecanismos são aplicáveis a normas internacionais ISO 10218 - comuns a todas as plataformas robóticas industriais - e as especificações técnicas ISO/TS 15066<sup>4</sup> (Bloss, 2016; Bogue, 2017) - definidas apenas para robôs colaborativos - nas quais se encontram especificados os valores máximos de potência, força e velocidade a serem aplicados pelo sistema. De realçar que estes mecanismos podem também ser delimitados por barreiras de segurança, aplicáveis em processos de manipulação de produtos tóxicos ou perigosos.

As características dos robôs colaborativos referidas anteriormente, associadas aos seus níveis de flexibilidade e adaptabilidade a diferentes tarefas, proporcionam ao setor industrial a implementação de uma automação de elevado desempenho. Atualmente, considerando o desenvolvimento do mercado, é expectável que a comercialização deste tipo de plataformas robóticas apresente um crescimento exponencial. Segundo a *Federação Internacional de Robótica*, no ano de 2018 prevê-se que sejam adquiridos mais de 1.3 milhões

<sup>3</sup>Imagens retiradas dos sites <http://www.claycon.com/>, <https://www.robotverhuur.nl/>, <http://new.abb.com/>, <https://store.clearpathrobotics.com/>, <https://www.universal-robots.com/> e <http://www.flexibleautomationsupply.com/>.

<sup>4</sup>As normas internacionais ISO 10218 e as especificações técnicas ISO/TS 15066, podem ser consultadas no site <https://www.iso.org/>.

de robôs industriais<sup>5</sup>. A evolução desta área da robótica é também sustentada por um estudo realizado, em parceria, pelas empresas *Oracle* e *Intel*. O documento disponibilizado no último trimestre de 2016, concluiu que aproximadamente 62% das empresas, a nível mundial, utilizam ou pretendem utilizar - num futuro próximo - sistemas robóticos nos seus processos de montagem e manufatura<sup>6</sup>. Nas informações facultadas é possível observar uma emancipação dos países associados à produção automóvel, com destaque para a África do Sul (72%), a França (65%) e a Alemanha (65%), onde são fabricados diversos componentes para marcas como: a *Ford*, a *Mercedes-Benz*, a *Toyota* e a *Volkswagen*.

## 1.2 Motivação e Objetivos

Na atualidade, as empresas de desenvolvimento de mecanismos colaborativos para o setor industrial, têm-se focado na projeção de sistemas de fácil programação, proporcionando aos operadores humanos a definição dos movimentos a executar através da sua demonstração. No caso específico do robô Sawyer, utilizado na validação do presente projeto de dissertação e comercializado desde março de 2016, as trajetórias realizadas durante uma determinada tarefa são especificadas por intermédio da plataforma de *software* *Intera 5.2*, disponibilizada pelo seu fabricante - a empresa *Rethink Robotics*<sup>7</sup>.

Considerando a problemática associada à ausência de autonomia dos robôs colaborativos, na presente dissertação pretende-se dotar a plataforma robótica Sawyer - de 7DOF's - com a capacidade de alcançar, agarrar e manipular objetos de forma similar à executada pelos humanos. A projeção do método de planeamento proposto pressupõe a geração de movimentos facilmente compreensíveis e inferidos pelos operadores. Esta característica é, na realidade, essencial para assegurar uma interação/cooperação mais eficiente, como comprovado pelo estudo desenvolvido por Sebanz et al. (2006).

Relacionado com o objetivo anteriormente definido, o planeamento dos movimentos executados pelo robô colaborativo deve, na perceção do humano, ser processado em tempo real. Em contextos de interação é necessário que os sistemas percecionem e respondam rapidamente às necessidades dos utilizadores. Adicionalmente, pretende-se que o método proposto considere a existência de obstruções no espaço de trabalho da plataforma robótica,

---

<sup>5</sup>Estudo disponível no *site* <https://ifr.org/>.

<sup>6</sup>Estudo disponível no *site* <https://go.oracle.com/>.

<sup>7</sup>Para mais informações consultar o *site* <http://www.rethinkrobotics.com/>.

evitando que esta colida com o operador humano, com os objetos existentes ao seu redor ou com o seu próprio corpo.

O método de planeamento de movimentos a ser desenvolvido será validado em ambiente de simulação, no contexto de duas tarefas de interação: (i) a montagem de um *Toy Vehicle* e (ii) a assistência a um humano com mobilidade reduzida. Em concreto, nestes cenários pretende-se avaliar o desempenho e o comportamento da plataforma robótica Sawyer como: (i) parceiro robótico, em contextos similares aos verificados nas linhas de produção industriais e (ii) assistente robótico, em atividades do quotidiano direcionadas a indivíduos com problemas cognitivos e/motores.

A realização do presente projeto de dissertação, considerando os objetivos e aplicações mencionadas anteriormente, é do interesse de grande parte da indústria e da comunidade científica. Os métodos de planeamento de movimentos disponíveis na atualidade - descritos no capítulo 2 - não fornecem soluções robustas que permitam gerar trajetórias semelhantes às executadas pelos humanos e englobem as três condições de interação referidas. As características do método proposto associadas aos custos de aquisição, à morfologia e aos mecanismos de segurança do robô colaborativo Sawyer constituem um conjunto de fatores que poderão contribuir para a aceitação de seres artificiais, por parte dos trabalhadores, em tarefas de cooperação realizadas em diversos processos industriais.

### 1.3 Enquadramento

O presente projeto de dissertação surge no seguimento de um conjunto de trabalhos realizados no MAR Lab da Universidade do Minho, especialmente focados na transferência de conhecimentos da área do controlo motor humano para o domínio da robótica.

O método de planeamento de movimentos anteriormente desenvolvido por Bicho et al. (2011), Costa e Silva (2011) e Gulletta et al. (2015), baseou-se em trabalhos experimentais realizados com humanos e nos modelos funcionais dos seus membros superiores, em particular no modelo associado à problemática do desvio de obstáculos proposto por Rosenbaum et al. (2001) - o *Posture-based motion planning model*. Os resultados obtidos pelos autores, comprovam que o braço e a mão do robô antropomórfico ARoS - com 7-DOF's - executam movimentos suaves, fluentes e livres de colisões, durante a realização de diferentes tarefas inseridas em cenários de interação/cooperação.

Os ângulos das juntas do manipulador, no método descrito, são a solução de problemas de otimização não-lineares sujeitos a restrições (Costa e Silva et al., 2011a,b), sendo estes independentes da derivação da cinemática inversa. Nos testes experimentais realizados, os autores concluíram que os movimentos executados apresentavam características similares às observadas nos membros superiores humanos.

No contexto da presente dissertação, considerando as vantagens e as características descritas e a estrutura física do robô colaborativo Sawyer - as soluções numéricas e analíticas do processo de derivação da sua cinemática inversa são computacionalmente dispendiosas - pretende-se generalizar o método de planeamento de movimentos anteriormente desenvolvido pelo MAR Lab, para todas as tipologias de manipuladores com 7-DOF's.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro partes, organizadas da seguinte forma:

Na **Parte I** são apresentadas as motivações gerais para o desenvolvimento do projeto proposto e o estado da arte referente ao controlo motor na robótica e nos humanos.

Além do presente capítulo, esta parte é constituída por outros dois tópicos:

- No **Capítulo 2** são introduzidos os métodos de planeamento de movimentos mais utilizados atualmente, em manipuladores robóticos;
- No **Capítulo 3** são abordadas as principais características dos movimentos dos membros superiores humanos, derivadas de conhecimentos adquiridos durante a realização de trabalhos experimentais.

Na **Parte II** é apresentada a plataforma robótica Sawyer e o método de planeamento de movimentos proposto na presente dissertação. Esta parte encontra-se dividida em dois capítulos:

- No **Capítulo 4** são abordadas as especificações básicas da plataforma robótica Sawyer, utilizada na implementação e validação do projeto. Em concreto, são apresentados os modelos cinemáticos da mão e do braço do manipulador;

- No **Capítulo 5** é descrito o método de planeamento de movimentos proposto, com destaque para o sistema de classificação de movimentos e a estratégia de planeamento utilizada. Além destes tópicos, são também apresentados os modelos do robô e dos objetos existentes no espaço de trabalho, essenciais para a formalização dos problemas de otimização não-lineares.

Na **Parte III**, constituída apenas pelo **Capítulo 6**, são especificadas as duas tarefas de interação humano-robô, utilizadas para validar o sistema de planeamento de movimentos. Em detalhe, neste capítulo são descritas as tarefas de montagem de um *Toy Vehicle* e de assistência num cenário de refeições, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada ação motora executada pela plataforma robótica.

Por último, na **Parte IV** são apresentadas as conclusões da presente dissertação. Na realidade, esta parte é apenas constituída pelo **Capítulo 7**, no qual são analisados os resultados obtidos e introduzidas algumas questões a serem solucionadas em trabalhos futuros.



# Capítulo 2

---

## Controlo Motor na Robótica

---

Neste capítulo será apresentado o estado da arte do planeamento de movimentos em manipuladores robóticos. Na secção 2.1 serão abordados alguns conceitos associados ao problema de planeamento de movimentos, destacando as suas diferentes classificações. Posteriormente, na secção 2.2 será apresentada uma breve introdução sobre os métodos de planeamento, sendo descritos os mais aplicados, atualmente, em plataformas robóticas com vários graus de liberdade. Por fim, na secção 2.3 serão discutidas as principais características dos métodos analisados anteriormente.

### 2.1 Introdução

A constante evolução da área da robótica, originou uma necessidade crescente de proceder ao desenvolvimento de algoritmos que permitissem converter as especificações alto-nível de uma determinada tarefa, num conjunto de primitivas de baixo-nível sobre o movimento a executar (Choset et al., 2005; Latombe, 1991; LaValle, 2006). Os termos *planeamento de movimentos* e *planeamento de trajetórias* são, habitualmente, associados a este tipo de problemas (LaValle, 2006).

Ao longo das últimas décadas, os algoritmos de planeamento foram aplicados em diversas áreas, como: a indústria, a construção, a exploração espacial e submarina, a cirurgia médica, a prestação de cuidados de saúde, a navegação, os jogos de computador, entre outras (Choset et al., 2005; Latombe, 1991; LaValle, 2006; Latombe, 1999).

Do ponto de vista dos humanos, o planeamento de movimentos aparenta ser um processo bastante simples, sendo executado constantemente e sem manifestas dificuldades. No entanto, tarefas elementares realizadas de forma inconsciente pelos humanos - como preparar e servir um café, construir um brinquedo ou mover um objeto - são extremamente complicadas de replicar num robô computacionalmente controlado (Latombe, 1991).

Matematicamente, o problema do planeamento de movimentos consiste na determinação das entradas de controlo  $u(t)$  que produzam uma trajetória  $q(t)$  que evite colisões, coloque o sistema no estado desejado e eventualmente, otimize alguma função objetivo (Choset et al., 2005). Segundo Hwang & Ahuja (1992), este problema pode apresentar diferentes classificações, relacionadas nomeadamente com: (i) o tipo de informação disponibilizada sobre obstáculos, (ii) a existência de possíveis alterações no espaço de trabalho do robô ou nas configurações dos objetos ou (iii) a aplicação de restrições durante o planeamento dos movimentos.

No caso da informação sobre os obstáculos ser fornecida *à priori*, o planeamento é classificado como estático, sendo o movimento do robô planeado com base na informação disponibilizada. Pelo contrário, no planeamento dinâmico são utilizadas apenas informações parciais para o planeamento da trajetória. Durante a sua execução são obtidas informações sobre os obstáculos - como a posição, orientação, tamanho, etc - permitindo atualizar em tempo real a representação do espaço de trabalho e alterar o movimento do robô, no caso de serem detetadas colisões. Quando o espaço de trabalho ou as configurações dos obstáculos são suscetíveis a alterações, o planeamento é classificado de variável no tempo (Hwang & Ahuja, 1992).

No caso das restrições, o problema de planeamento de movimentos pode ser denominado de restritivo ou não-restritivo, dependendo da existência de restrições independentes do mecanismo de desvio de obstáculos. Estas restrições abrangem, por exemplo, a velocidade e a aceleração da extremidade da plataforma robótica, durante o transporte de uma chávena de café (Hwang & Ahuja, 1992).

## 2.2 Métodos de Planeamento de Movimentos

Na atualidade, a área da robótica dispõe de diversos métodos adequados para a resolução de problemas de planeamento de movimentos, sendo alguns extensíveis a inúmeras

variações do problema, enquanto outros apresentam um número limitado de aplicações (Latombe, 1991; Hwang & Ahuja, 1992).

As abordagens mais antigas de planeamento de movimentos - denominados de métodos clássicos ou combinatórios - incluem o *roadmap*, o *cell decomposition* e os campos potenciais (Choset et al., 2005). A maior parte dos problemas de planeamento podem ser resolvidos com recurso a estas abordagens, sendo as suas combinações frequentemente utilizadas para o desenvolvimento de novos métodos (Hwang & Ahuja, 1992) - como o proposto por Zhang et al. (2007). A implementação das abordagens descritas apresenta, no entanto, elevados custos computacionais em ambientes com várias dimensões e obstruídos por um grande número de obstáculos. Este problema relaciona-se com o facto destes métodos dependerem da representação explícita dos obstáculos no espaço de configuração (LaValle, 2006).

Com o intuito de resolver o problema anteriormente descrito, no início da década de 90 começaram a ser desenvolvidos os métodos baseados em amostragem. Ao contrário dos métodos clássicos, estes evitam a representação explícita dos obstáculos, utilizando um sistema de amostragem que investiga continuamente o espaço de configuração (LaValle, 2006).

Segundo Hwang & Ahuja (1992), também os métodos de planeamento de movimentos apresentam diferentes classificações, podendo ser denominados de métodos globais ou locais. No caso dos métodos globais, o processo de planeamento considera toda a informação do espaço de trabalho da plataforma robótica, sendo determinado o movimento desde a sua configuração inicial até à sua configuração final. Os algoritmos baseados em amostragem, o *roadmap* e o *cell decomposition* são exemplos de métodos globais.

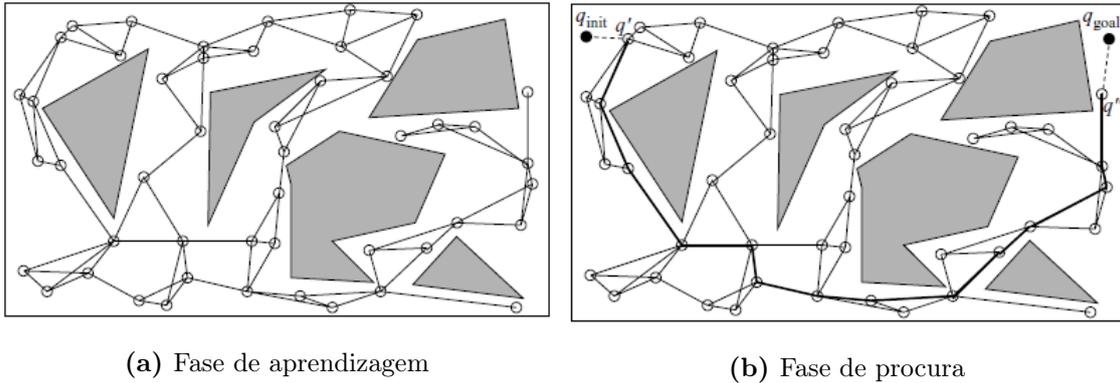
Os métodos locais - como os campos potenciais - pelo contrário, são projetados para evitar obstáculos nas proximidades do robô, pelo que apenas são utilizadas informações sobre os obstáculos mais próximos. Geralmente, estes métodos são implementados como um recurso de segurança para evitar obstruções inesperadas que não estejam representadas no espaço de configuração, mas sejam detetadas pelos sensores durante a execução do movimento (Hwang & Ahuja, 1992).

Nos próximos subcapítulos serão apresentados os métodos de planeamento de movimentos mais utilizados, atualmente, em manipuladores robóticos, sendo evidenciados os seus problemas e os resultados obtidos em diferentes cenários de aplicação.

### 2.2.1 Probabilistic Roadmap Method (PRM)

O *Probabilistic Roadmap* (PRM) de Kavraki et al. (1996) é um método baseado em amostragem, desenvolvido inicialmente para o planeamento de trajetórias livres de colisões em ambientes estáticos, envolvendo plataformas robóticas com vários graus de liberdade.

A implementação deste método processa-se em duas fases distintas: (i) a fase de aprendizagem e (ii) a fase de procura. Na primeira fase, através da geração e conexão de um grande número de configurações aleatórias do robô, é construído um *roadmap* probabilístico no espaço livre. Tal como se encontra representado na figura 2.1a, o *roadmap* é armazenado como um grafo não-direcionado, no qual os nodos e as arestas correspondem, respetivamente, às configurações e aos caminhos livres de colisões gerados entre estas. Na fase da procura, as configurações iniciais e finais são adicionadas ao *roadmap* (figura 2.1b), sendo em seguida, processada uma pesquisa para determinar a sequência de arestas que permite a sua conexão.



**Figura 2.1:** Ilustração das diferentes fases do método PRM: (a) Na fase de aprendizagem é construído um *roadmap*. As áreas cinzentas representam os obstáculos, enquanto, os círculos e as linhas retas correspondem aos nodos e às arestas do *roadmap*; (b) Na fase de procura, as configurações  $q_{init}$  e  $q_{goal}$  são conectadas aos nodos mais próximos, através das arestas  $q'$  e  $q''$ . O caminho mais curto entre ambas as configurações encontra-se assinalado pelas linhas a preto<sup>1</sup>.

Os resultados experimentais obtidos por Kavraki et al. (1996), comprovaram que o método PRM permite resolver com eficácia problemas de planeamento com níveis de complexidade elevados. Contudo, apesar do tempo de procura ser bastante reduzido, a fase de aprendizagem necessária para a construção do *roadmap* pode ser, especialmente, de

<sup>1</sup>Imagens retiradas de Choset et al. (2005).

morada em problemas associados plataformas robóticas com vários graus de liberdade. Como possíveis aplicações, os autores referem que o PRM é particularmente adequado para manipuladores que executem movimentos ponto-a-ponto, necessários em tarefas como: a manutenção de tubos de refrigeração em centrais nucleares, a limpeza da fuselagem dos aviões ou a soldadura ponto-a-ponto, utilizada na construção de veículos automóveis.

Estudos mais recentes permitiram melhorar o desempenho do método de Kavraki et al. (1996), através do desenvolvimento de novas estratégias de amostragem e de seleção dos nodos vizinhos, com os quais são conectadas as configurações iniciais e finais do robô (Choset et al., 2005). Estas estratégias encontram-se explicadas no estudo comparativo de Geraerts & Overmars (2004), realizado com o objetivo de auxiliar na seleção das técnicas mais adequadas para cada tipo de problema.

Ao longo das últimas décadas, foram também desenvolvidos novos mecanismos para a verificação da existência de colisões. Na pesquisa do estado da arte realizada por Elbanhawi & Simic (2014) são referenciadas as variantes mais utilizadas nesta problemática, com destaque para o *Lazy* PRM de Bohlin & Kavraki (2000). Neste método, as colisões são apenas verificadas depois de ser encontrado o caminho entre a configuração inicial e final do robô. Este procedimento foi implementado num manipulador robótico com 6-DOF's - o ABB400 - utilizado em processos de fabrico, realizados em contexto industrial. Os resultados obtidos permitiram concluir que, ao contrário do PRM que verifica a existência de colisões em todo o *roadmap*, o *Lazy* PRM analisa apenas uma pequena fração, correspondente a menos de 0,1%.

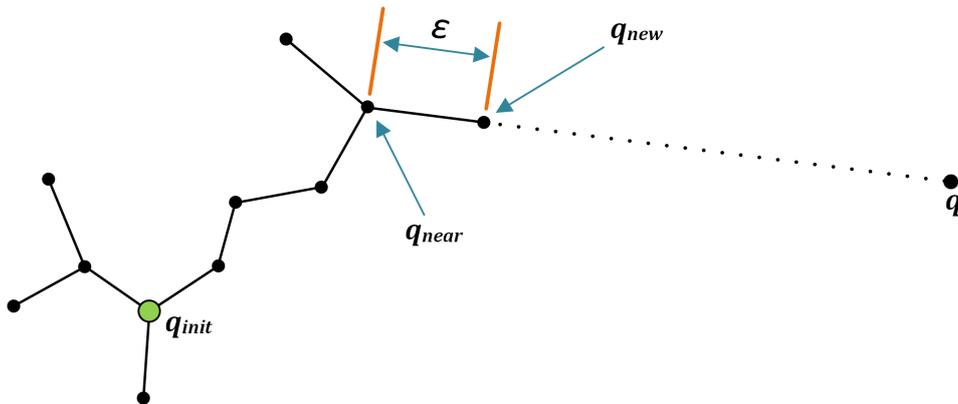
Com a evolução da área da robótica, surgiu a necessidade de expandir o método de Kavraki et al. (1996) para o planeamento de movimentos em espaços de trabalho dinâmicos ou parcialmente conhecidos. O estudo realizado por Short et al. (2016) apresenta as variantes dos métodos baseados em amostragem desenvolvidas para problemas dinâmicos. No caso do PRM é destacado o método *Dynamic Roadmap* (DRM), proposto por Leven & Hutchinson (2002), no qual é gerada uma representação do espaço de configuração que pode ser facilmente alterada em tempo real.

### 2.2.2 *Rapidly-Exploring Random Tree* (RRT)

O *Rapidly-Exploring Random Tree* (RRT) - proposta por LaValle (1998) - é um método baseado em amostragem, projetado para lidar com restrições algébricas e diferenciais, em

plataformas robóticas com vários graus de liberdade (Kuffner & LaValle, 2000; LaValle & Kuffner, 2000). Ao contrário do PRM de Kavraki et al. (1996), este método pode ser diretamente aplicado em problemas de planeamento não-holonómicos, cinemáticos ou dinâmicos, uma vez que não necessita de construir um *roadmap* baseado na geração e conexão de milhares de configurações (LaValle, 1998; LaValle & Kuffner, 2000).

Fundamentalmente, o algoritmo RRT consiste na criação iterativa de uma árvore de trajetórias exequíveis, tendo em conta a configuração inicial do robô. Para cada iteração é gerada aleatoriamente uma configuração  $q$ , pertencente ao espaço de configuração livre de colisões. Em seguida, tal como se encontra ilustrado na figura 2.2, é selecionada a configuração mais próxima de  $q$ , designada de  $q_{near}$ . Por fim, é criada uma nova configuração ( $q_{new}$ ) através da transição de  $q_{near}$  em direção a  $q$ , tendo em conta uma determinada distância  $\epsilon$ . Caso não se verifique a existência de colisões, a configuração  $q_{new}$  é adicionada aos ramos da árvore aleatória, sendo este procedimento repetido até que  $q_{new}$  coincida com a configuração final desejada.



**Figura 2.2:** Ilustração da operação de extensão, efetuada pelo método RRT, na qual é selecionada a configuração mais próxima de  $q$  - designada de  $q_{near}$ <sup>2</sup>.

Em semelhança ao verificado em outros métodos de planeamento de movimentos, ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidos novos estudos que permitiram aumentar o desempenho do algoritmo RRT em diferentes cenários de aplicação. Os trabalhos realizados para otimizar a expansão das RRTs no espaço de configuração - como o *Dynamic-Domain* RRT de Yershova et al. (2005) - e adaptar a sua implementação em ambientes dinâmicos ou parcialmente conhecidos - como o *Dynamic* RRT de Ferguson et al. (2006)) - encontram-se

<sup>2</sup>Imagem adaptada de Kuffner & LaValle (2000).

sumariados nos estudos realizados por Elbanhawi & Simic (2014) e Short et al. (2016).

No início do século XXI, diversos autores focaram-se igualmente no desenvolvimento de novos mecanismos que permitissem otimizar os tempos de execução, determinados durante o planeamento da trajetória a ser efetuada. Neste contexto, a variante mais utilizada é o algoritmo *RRT-Connect* de Kuffner & LaValle (2000), no qual são criadas iterativamente duas RRTs, sendo uma proveniente da configuração inicial da plataforma robótica e a outra originada a partir da sua configuração final. Por conseguinte, as RRTs são utilizadas como esquema de amostragem e estrutura de dados, disponibilizando uma rápida e uniforme exploração do espaço de configuração. Os resultados experimentais obtidos por Kuffner & LaValle (2000) em ambientes com diversos obstáculos, concluíram que o tempo de execução pode ser 3 a 4 vezes inferior ao obtido por intermédio da implementação do método RRT.

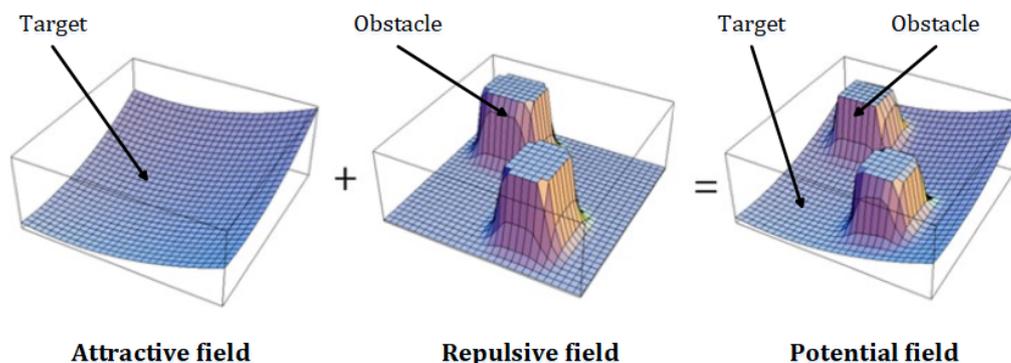
Recentemente, Karaman & Frazzoli (2011) comprovaram que os métodos RRT e PRM não tendem a convergir para a solução com menores custos de navegação. Para resolver esta limitação, os autores propuseram três novos algoritmos: o PRM\*, o *Rapidly-exploring Random Graph* (RRG) e o RRT\*. No caso deste último, a seleção da trajetória processa-se de forma similar à realizada pelo método RRT, com exceção de dois procedimentos: (i) a seleção das configurações mais próximas e (ii) a adição da nova configuração aos ramos da árvore aleatória. No método RRT\*, são selecionadas as configurações mais próximas que se encontrem num determinado raio, sendo escolhida a que apresentar um caminho mais curto desde a configuração inicial especificada. Os testes experimentais efetuados pelos autores, comprovaram que este algoritmo tende a convergir para a solução ótima. Contudo, este apresenta tempos de computação muito elevados, não sendo apropriado para aplicações em tempo real (Elbanhawi & Simic, 2014).

### 2.2.3 Campos Potenciais

O método dos campos potenciais, proposto por Khatib (1986), é amplamente reconhecido como o primeiro método local a ser desenvolvido na área do planeamento de movimentos. A sua utilização, em tempo real e sem conhecimento *à priori* do espaço de configuração, permitiu dotar as plataformas robóticas com a capacidade de planear autonomamente os seus movimentos.

Como se pode observar na figura 2.3, esta abordagem pressupõe que a posição a ser alcançada exerce um potencial negativo (atrativo) sobre a extremidade do manipulador.

Os obstáculos existentes no espaço de trabalho, pelo contrário, são representados por potenciais positivos (repulsivos), aplicados aos diferentes elos da plataforma robótica. A soma dos potenciais anteriormente descritos define o campo potencial, sendo a trajetória da extremidade do manipulador determinada através do seu gradiente negativo.



**Figura 2.3:** A posição a ser alcançada pelo manipulador e os obstáculos existentes no espaço de configuração são representados por potenciais atrativos e repulsivos, respetivamente. O campo potencial é o resultado da soma de ambos os potenciais<sup>3</sup>.

Diversos autores reconhecem que o método dos campos potenciais é mais simples, rápido, eficaz e computacionalmente menos dispendioso que as restantes abordagens clássicas (Warren, 1989; Latombe, 1991; Tsuji et al., 1996). Contudo, segundo Tsuji et al. (1996), este apresenta duas grandes desvantagens: (i) o problema dos mínimos locais - também referido por Khatib (1986) e Warren (1989) - e (ii) o facto do comportamento temporal da trajetória não poder ser regulado.

O problema dos mínimos locais ocorre quando o potencial atrativo da posição desejada é igual ao potencial repulsivo dos obstáculos, não correspondendo à configuração final especificada para a extremidade do manipulador - associada ao mínimo global da função. Segundo Latombe (1991), para a resolução deste problema existem duas possíveis soluções: (i) projetar funções potenciais que não possuam mínimos locais, como as funções harmónicas de Kim & Khosla (1992) e o campo potencial baseado na equação de Laplace (Sato, 1992) ou (ii) completar a abordagem básica do método dos campos potenciais com mecanismos que permitam o sistema "sair" dos mínimos locais, como por exemplo, o *Randomized Path Planner* (RPP) (Barraquand et al., 1997).

<sup>3</sup>Imagem adaptada do *site* <https://taylorwang.wordpress.com/>.

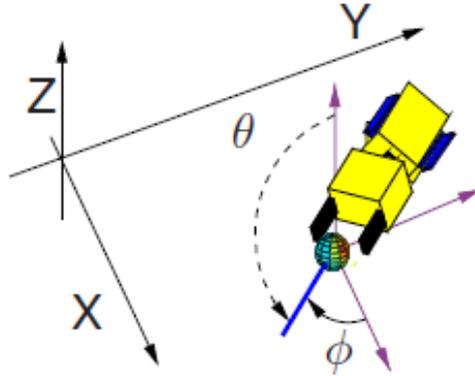
A segunda desvantagem, associada ao método dos campos potenciais, impossibilita que o tempo total do movimento - desde a posição inicial até à posição final - e o perfil da velocidade da extremidade do manipulador possam ser regulados. Estas complicações dificultam a utilização deste método na geração de trajetórias para manipuladores robóticos em tempo real. Para a resolução deste problema, Tsuji et al. (1996) introduziram o conceito de *Time Base Generator* (TGB) na abordagem dos campos potenciais em manipuladores com várias juntas. Fundamentalmente, o TGB consiste num gerador de séries de tempo, cujo o sinal gerado apresenta uma duração finita e um perfil de velocidade em forma de sino. O comportamento temporal da trajetória pode, desta forma, ser regulado através da alteração deste parâmetro.

#### 2.2.4 Atratores Dinâmicos

A abordagem dos atratores dinâmicos foi, inicialmente, desenvolvida para o controlo e planeamento de movimentos em robôs móveis (Bicho & Schöner, 1997), sendo *à posteriori* aplicada em contextos de navegação (Steinhage & Schöner, 1997) e cooperação entre plataformas robóticas (Monteiro et al., 2004). No início dos anos 2000, Iossifidis & Schöner (2004) estenderam esta abordagem para a geração de trajetórias livres de colisões em manipuladores robóticos, viabilizando a sua utilização para o alcance e transporte de objetos em ambientes partilhados.

Formalmente, o método dos atratores dinâmicos consiste numa variação matemática dos campos potenciais (Khatib, 1986). Nesta abordagem, a trajetória obtida é caracterizada pela evolução temporal dos ângulos de *direção* - a elevação ( $\theta(t)$ ) e o azimute ( $\phi(t)$ ) - representados na figura 2.4. Esta evolução temporal é determinada através da resolução de um sistema dinâmico, para o qual o alvo e os obstáculos contribuem com forças atrativas e repulsivas, respetivamente (Iossifidis & Schöner, 2004). A análise matemática dos atratores e das suas bifurcações permite que sejam evitados problemas associados à abordagem de Khatib (1986), nomeadamente o problema dos mínimos locais (Iossifidis & Schöner, 2006).

Para a demonstração da implementação do método dos atratores dinâmicos, Iossifidis & Schöner (2004) utilizaram o assistente robótico CORA, constituído por um braço antropomórfico com 7-DOF's. Neste contexto, os autores propuseram que as colisões com os obstáculos existentes no espaço de trabalho, fossem evitadas por intermédio de um al-



**Figura 2.4:** A posição da extremidade do manipulador (esfera) é representada com base no sistema de coordenadas do mundo, fixado na superfície do espaço de trabalho ( $z=0$ ). A *direção de navegação* instantânea da extremidade é representada pelos ângulos relativos ao eixo vertical (elevação,  $\theta$ ) e ao eixo  $x$  (azimute,  $\phi$ )<sup>4</sup>.

goritmo baseado na redundância do cotovelo. Esta metodologia permite, essencialmente, controlar a posição espacial do cotovelo (i.e. elevar ou baixar), em função da distância a que este se encontra dos obstáculos. Os resultados obtidos foram bastante positivos, uma vez que comprovaram a inexistência de problemas associados aos mínimos locais. Além disso, verificou-se que na ausência de obstáculos, a extremidade do manipulador move-se em linha reta até ao objeto-alvo, apresentando características similares às observadas em trabalhos experimentais realizados sobre o comportamento dos membros superiores humanos (Flash & Hogan, 1985).

Em trabalhos mais recentes, Reimann et al. (2010) aplicaram o método dos atratores dinâmicos a todos os segmentos do robô CORA, impedindo que estes colidissem com os diversos obstáculos existentes no espaço de trabalho. Os resultados obtidos permitiram verificar que esta abordagem planeia corretamente trajetórias com diferentes níveis de complexidade e com um número variável de obstáculos. Contudo, foram detetados alguns problemas relacionados, nomeadamente, com: (i) a insuficiente redução da velocidade em tarefas no *null space*, impedindo que o sistema selecione trajetórias válidas para o alcance da posição alvo e (ii) a geração de trajetórias próximas de obstáculos, originando desvios bruscos dos mesmos e consequentemente, impedindo uma fácil inferência das intenções motoras do sistema robótico. Como trabalho futuro, os autores referem a necessidade

<sup>4</sup>Imagem retirada de Iossifidis & Schoner (2006).

de: (i) considerar os limites máximos das juntas, (ii) adicionar restrições que impeçam a existência de colisões entre os diferentes segmentos do manipulador e (iii) proceder à validação do sistema em ambientes dinâmicos.

### 2.2.5 Métodos de Otimização

Em contexto industrial, os manipuladores robóticos são frequentemente utilizados em linhas de produção automática, executando tarefas repetitivas associadas a processos de soldadura, corte ou colagem. Com o objetivo de garantir a redução dos custos de produção e o aumento dos níveis de produtividade, ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidos métodos de otimização para o planeamento dos movimentos deste tipo de sistemas robóticos (Santos et al., 2008).

Nos métodos de otimização, a trajetória do sistema é determinada tendo em conta as restrições impostas pela: (i) natureza da tarefa a ser executada, (ii) o espaço de trabalho e (iii) a configuração da plataforma robótica (Chettibi et al., 2004). Desta forma, os obstáculos e os limites das juntas do manipulador são definidos como restrições, permitindo que sejam evitadas colisões com os objetos existentes no espaço de trabalho e que os limites dinâmicos e cinemáticos do robô sejam respeitados. A trajetória mais adequada para a realização da tarefa é selecionada através da definição de uma ou mais funções objetivo, relacionadas com a minimização de determinados critérios de desempenho (Gasparetto & Zanotto, 2010).

Os primeiros métodos de otimização propostos para o planeamento de movimentos - desenvolvidos por Lin et al. (1983), Shin & McKay (1985), Bobrow (1988) e Fiorini & Shiller (1996) - utilizavam a minimização do tempo de execução como função objetivo. A aplicação deste critério de desempenho possibilitou um aumento da produtividade no setor industrial. Contudo, as trajetórias geradas por alguns destes algoritmos apresentavam valores descontínuos de aceleração e torque ao nível das juntas, originando problemas dinâmicos durante a execução dos movimentos planeados (Bazaz & Tondu, 1999; Bianco & Piazzzi, 2002; Gasparetto & Zanotto, 2010). Para resolver este problema, são geralmente implementadas funções polinomiais cúbicas - como na abordagem proposta por Lin et al. (1983) - nas quais o tempo de execução é minimizado considerando as restrições impostas pelos limites das juntas.

A expansão dos métodos de otimização na geração de trajetórias, originou o desenvolvi-

mento de abordagens alternativas baseadas na definição de novos critérios de desempenho, como: (i) a minimização da energia consumida durante a execução do movimento (Field & Stepanenko, 1996; Saramago & Steffen, 1998) e (ii) a minimização da variação da aceleração (Piazzi & Visioli, 2000; Gasparetto & Zanotto, 2008).

Atualmente, as abordagens baseadas no último critério referido são bastante aplicadas ao nível industrial, apresentando diversas vantagens, como por exemplo: (i) a diminuição dos erros de posicionamento das juntas, (ii) a geração de movimentos coordenados e suaves, similares aos executados pelos humanos, (iii) a limitação das frequências de ressonância do robô e (iv) a diminuição do desgaste dos atuadores do manipulador e da sua respetiva estrutura (Gasparetto & Zanotto, 2008; Piazzi & Visioli, 2000). Neste contexto, um dos métodos mais recentes e relevantes foi desenvolvido por Gasparetto & Zanotto (2008), no qual a trajetória a executar é selecionada por intermédio de uma função objetivo, composta por dois critérios a serem minimizados: (i) o tempo de execução e (ii) a variação da aceleração. Ao contrário de outras abordagens de planeamento de movimentos, este método tem em consideração as restrições cinemáticas do manipulador - os limites máximos de velocidade, aceleração e respetiva variação - sendo independente da definição prévia do tempo total de execução.

## 2.3 Discussão

Os métodos de planeamento de movimentos, desenvolvidos ao longo das últimas décadas e descritos nas secções anteriores, possibilitaram a crescente integração de sistemas robóticos computacionalmente controlados, em linhas de produção industrial. Neste contexto, os métodos baseados em amostragem - o PRM (Kavraki et al., 1996) e o RRT (LaValle, 1998) - têm sido massivamente implementados, solucionando problemas de planeamento com níveis de complexidade elevados. Apesar das vantagens associadas, os testes experimentais realizados pela comunidade científica comprovam a ineficiência destes métodos para aplicações em tempo real, executadas em plataformas robóticas com vários graus de liberdade (Kavraki et al., 1996; Elbanhawi & Simic, 2014).

A abordagem dos campos potenciais (Khatib, 1986), segundo Warren (1989) e Latombe (1991), constituiu um processo de planeamento simples, eficaz e computacionalmente sustentável. No entanto e em semelhança ao referido anteriormente, este método apresenta

problemas relacionados com: (i) os mínimos locais e (ii) a regulação do tempo total do movimento e do perfil de velocidade da extremidade do manipulador (Tsuji et al., 1996).

Tal como referido na secção 2.2.4, nos testes experimentais realizados com recurso ao método dos atratores dinâmicos, Iossifidis & Schoner (2004) verificaram que na ausência de obstáculos, a extremidade do assistente robótico CORA se movia em linha reta até ao seu objeto-alvo. Este comportamento é similar ao observado por Flash & Hogan (1985), em trabalhos associados ao comportamento do braço humano. Apesar dos bons resultados obtidos pelo método, Reimann et al. (2010) constataram que a geração de trajetórias próximas de objetos, originam desvios bruscos dos mesmos, dificultando uma fácil inferência das intenções motoras do sistema robótico.

Associados a processos de manufatura e montagem executados em contextos industriais, os métodos de otimização descritos na secção anterior, determinam a trajetória dos manipuladores através de funções objetivo, relacionadas com a minimização de determinados critérios de desempenho (Gasparetto & Zanotto, 2010). Apesar destes métodos incluem um processo de seleção sujeito a restrições - impostas para evitar colisões com os obstáculos existentes no espaço de trabalho e respeitar os limites físicos das juntas do manipulador - as trajetórias planeadas não apresentam características similares às observadas nos trabalhos experimentais realizados com os membros superiores humanos.

Efetivamente, as abordagens mais utilizadas na área da robótica englobam apenas soluções para o planeamento de movimentos focadas nos níveis de eficácia e nos tempos de computação, garantindo o aumento da produtividade e a redução dos custos em contextos industriais. Na atualidade, com a integração de plataformas robóticas em espaços de trabalho partilhados com os operadores, a área da robótica têm-se focado no estudo e no desenvolvimento de métodos que permitam planear movimentos semelhantes aos executados pelos humanos. Efetivamente, neste contexto pretende-se dotar os manipuladores robóticos com a capacidade de alcançar, agarrar e manipular objetos de forma similar aos humanos. Apesar dos métodos descritos apresentarem características relevantes a nível industrial, atualmente, a comunidade científica ainda não dispõe de soluções capazes de proceder à transferência dos conhecimentos do controlo motor humano para o domínio da robótica. No próximo capítulo serão, em concreto, introduzidas as principais características dos movimentos dos membros superiores humanos, derivadas de testes experimentais realizados durante a execução de tarefas de manipulação.



# Capítulo 3

---

## Controlo Motor nos Humanos

---

O desenvolvimento de um método de planeamento de movimentos que assegure a geração de trajetórias compreensíveis, implica a transferência de conhecimentos e características dos modelos funcionais dos membros superiores humanos para o domínio da robótica. Neste capítulo será apresentado o estado da arte do controlo motor humano, nomeadamente, os trabalhos experimentais realizados sobre os movimentos dos seus membros superiores.

Na secção 3.1 serão classificados os movimentos da mão humana, essenciais para compreender a forma como os objetos são agarrados, em função da tarefa a ser executada. Posteriormente, na secção 3.2 serão introduzidas as diferentes abordagens de modelação dos problemas de planeamento de movimentos nos humanos. Na secção 3.2.1 serão abordadas as principais características dos movimentos dos seus membros superiores. Por fim, na secção 3.2.2 será apresentados os trabalhos experimentais realizados para compreender os movimentos do braço humano na presença de obstáculos. Neste contexto, será destacado o *The Posture-based motion planning model* de Rosenbaum et al. (2001), no qual se baseou o método de planeamento de movimentos desenvolvido na presente dissertação - descrito no capítulo 5.

### 3.1 Classificação dos Movimentos da Mão Humana

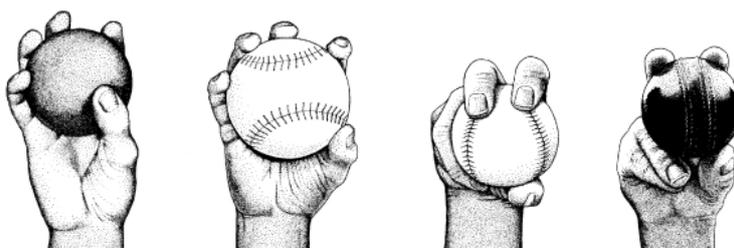
A necessidade de criar um sistema de classificação para os movimentos da mão humana, surgiu com o aumento das investigações associadas à conceção de próteses e à quantificação

da extensão de deficiências em indivíduos com problemas cognitivos ou motores (Cutkosky & Howe, 1990). Segundo Napier (1956), os movimentos da mão podem ser divididos em dois grupos: (i) os movimentos preênses e (ii) os movimentos não-preênses. No primeiro caso, os objetos são agarrados e mantidos parcialmente ou totalmente no interior da mão. Pelo contrário, nos movimentos não-preênses, os objetos são apenas manipulados - levantados ou empurrados - através de um pequeno contacto com a mão ou com os dedos.

Apesar da aparente existência de uma extensa variedade de movimentos preênses, o autor concluiu que, apenas, dois padrões fornecem as bases anatómicas para todas as atividades deste tipo, denominados de: (i) *power grip* e (ii) *precision grip*. Em semelhança ao ilustrado na figura 3.1a, no primeiro padrão referido, o objeto é agarrado entre a palma da mão e os dedos parcialmente fletidos. Os movimentos preênses com padrão *precision grip*, pelo contrário, são caracterizados por manter o objeto entre as pontas dos dedos e o polegar (na figura 3.1b).



(a) Postura *power grip*



(b) Postura *precision grip*

**Figura 3.1:** Taxonomia associada às diferentes posturas de manipulação da mão humana, utilizadas durante a execução de movimentos preênses<sup>1</sup>.

Segundo Napier (1956), o tipo de *grip* selecionado para executar uma determinada tarefa, é maioritariamente influenciado pelas características do objeto, como: a forma, o tamanho, o peso, a textura ou a temperatura. No entanto, fatores externos - como medo ou

<sup>1</sup>Imagens retiradas do *site* <http://www.odec.ca/>.

a fome - podem também condicionar a seleção da postura, em determinadas circunstâncias.

## 3.2 Modelos Computacionais Baseados no Planeamento de Movimentos nos Humanos

Com a expansão da área da neurociência e da psicologia, a comunidade científica começou a desenvolver diversas investigações relacionadas com o controlo motor humano. Alguns dos estudos realizados focaram-se na geração de movimentos nos membros superiores, em particular, na forma como o Sistema Nervoso Central (SNC) considera diferentes variáveis e fatores para proceder ao planeamento de um determinado movimento.

Segundo Rosenbaum (1991), os movimentos são realizados como resposta a uma grande variedade de sinais, podendo estes ser provenientes de ambientes externos - como a alteração da cor de um semáforo - ou internos - relacionados com pensamentos ou sentimentos. Para a realização de um determinado movimento, o sistema de controlo motor humano utiliza uma estrutura hierárquica composta por três níveis: o planeamento motor, a programação motora e a execução motora. Durante a realização do movimento, estes três níveis interagem constantemente, permitindo ao sistema atualizar ou alterar a trajetória (Andani & Bahrami, 2012).

No caso do planeamento motor, este pode ser considerado um processo computacional de seleção de uma única solução, uma vez que para a execução de uma simples tarefa - como mover a mão até um determinado alvo - existe um número infinito de trajetórias, perfis de velocidade e conseqüentemente, combinações dos ângulos das juntas que podem ser aplicadas (Wolpert, 1997). Com o intuito de resolver este problema, ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidas diversas abordagens computacionais para modelar e descrever os problemas de planeamento nos humanos. Segundo Andani & Bahrami (2012), estas abordagens podem ser categorizadas em dois grupos: (i) os modelos baseados em dados e (ii) os modelos baseados em otimização.

Os modelos baseados em dados - como o proposto Park et al. (2004) - utilizam um conjunto de dados comportamentais empíricos para construir uma base de dados, correspondente a um determinado movimento. Através desta base de dados, são desenvolvidos os modelos cinemáticos diretos e inversos utilizados para prever o movimento a ser realizado, mediante as suas características gerais - como a posição inicial e final - e os seus dados

antropométricos - como o peso e o comprimento dos segmentos do braço. Apesar dos bons resultados obtidos, o desempenho e validação deste modelos encontram-se extremamente dependentes das informações disponibilizadas para a construção da base de dados (Andani & Bahrami, 2012).

No caso dos modelos baseados em otimização, são utilizadas funções de custo para avaliar quantitativamente o desempenho de cada solução - correspondente a um movimento - sendo selecionada a que apresentar um menor custo num determinado intervalo de tempo (Wolpert, 1997). Os critérios de desempenho mais utilizados relacionam-se, geralmente, com a suavidade - como o *Minimum jerk* de Flash & Hogan (1985) ou *Minimum torque change* de Uno et al. (1989) - ou com a variabilidade do movimento - como *Minimum variance* de Harris & Wolpert (1998).

Segundo Wolpert (1997), os modelos baseados em otimização podem ser também distinguidos em duas categorias: (i) os modelos cinemáticos e (ii) os modelos cinéticos ou dinâmicos. Nos modelos cinemáticos são utilizadas propriedades geométricas e temporais para planejar o movimento. Pelo contrário nos modelos cinéticos, a função de custo depende da dinâmica do braço, relacionada essencialmente com o torque das juntas, a força exercida na mão e os comandos dos músculos. A principal diferença entre estes dois modelos é a separação entre o planeamento e a execução. No primeiro caso, o movimento é especificado em termos de posição e velocidade, pelo que é necessário executar os dois processos em separado. Enquanto que nos modelos cinéticos, como o movimento é especificado por comandos motores, os processos são executados em conjunto.

Na maior parte dos casos, os modelos baseados em otimização permitem gerar movimentos similares aos dos humanos, contudo não são consideradas algumas das suas capacidades fundamentais, nomeadamente o planeamento em tempo real. Além disso, este tipo de modelos apresenta elevados custos a nível computacional (Andani & Bahrami, 2012).

### **3.2.1 Características dos Movimentos dos Membros Superiores Humanos**

Na área do controlo motor humano, a geração de movimentos nos membros superiores tem sido uma das problemáticas mais abordadas. Inicialmente, os estudos desenvolvidos concentraram-se na resolução do problema da redundância, sendo as investigações mais recentes relacionadas com os movimentos realizados durante o alcance, manipulação e

recolocação de objetos - habitualmente designados de *pick-and-place*.

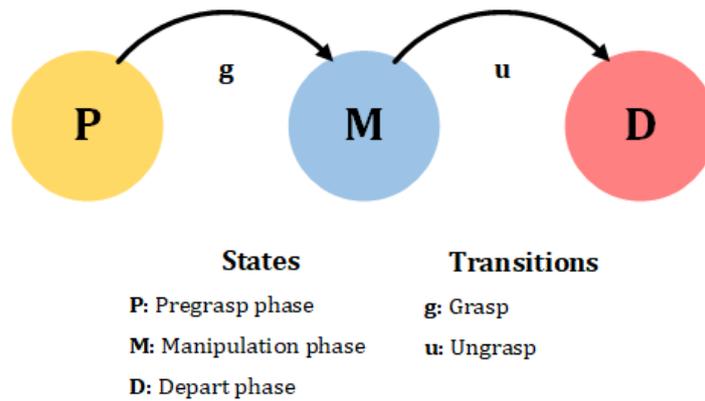
Os primeiros testes experimentais - efetuados por Flash & Hogan (1985) - ao comportamento do braço humano, permitiram concluir que estes tendem a gerar trajetórias em linha reta até à posição alvo, apresentando um perfil de velocidade em forma de sino. Este comportamento revelou-se independente do espaço de trabalho utilizado para a execução do movimento.

Anos mais tarde, Rosenbaum et al. (1995) apresentaram um modelo focalizado na seleção da postura final a utilizar para agarrar um determinado objeto - o *Knowledge Model*. Neste modelo, os autores consideram que o SNC seleciona a postura final a partir de uma série de posturas previamente memorizadas. Esta seleção é processada a partir da atribuição de determinados pesos - relacionados com os custos de deslocamento das juntas e o erro espacial - a cada postura armazenada, podendo estes variar consoante a tarefa a ser executada.

Em continuação do trabalho desenvolvido anteriormente, Gréa et al. (2000) e Rosenbaum et al. (2001) realizaram novos estudos, cujos resultados experimentais suportam a ideia de que a postura final a ser alcançada é planeada antecipadamente e utilizada como variável de controlo pelo SNC. Com base nestas conclusões, Rosenbaum et al. (2001) propuseram a divisão do processo de planeamento de movimentos em dois sub-problemas: (i) a seleção da postura final e (ii) a seleção da trajetória. Este modelo será apresentado com maior detalhe na secção 3.2.2.

Simultaneamente, no início dos anos 90, foram também realizadas investigações para descrever a divisão temporal de uma tarefa *pick-and-place*. Segundo Kang & Ikeuchi (1994), através da análise da velocidade da mão humana e da área poligonal da ponta dos dedos, pode-se dividir uma tarefa *pick-and-place* numa série de estados e transições, como se encontra representado no diagrama da figura 3.2.

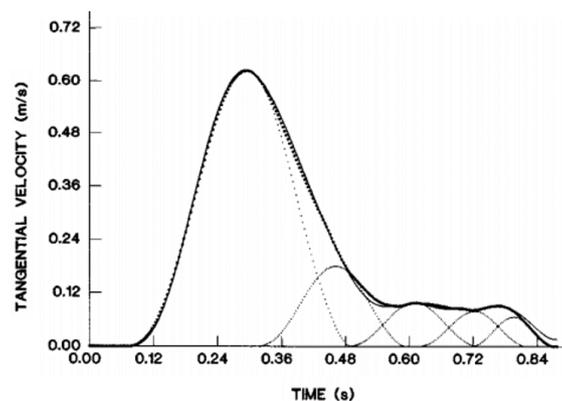
No diagrama proposto, os autores consideram que a fase *pregasp* engloba a trajetória realizada pela mão e a alteração do valor das juntas dos dedos, de modo a que o objeto seja agarrado corretamente. A trajetória executada é influenciada pela distância inicial entre a mão e o objeto, sendo as suas características geométricas utilizadas para definir o valor das juntas dos dedos. Após o humano entrar em contacto com o objeto-alvo, inicia-se a transição *grasp*. Este é então agarrado e transportado até à sua posição final - fase *manipulation*. Com a conclusão da fase *manipulation*, sucede-se a transição *ungrasp*, na



**Figura 3.2:** Diagrama de transição de estados de uma tarefa *pick-and-place*<sup>2</sup>.

qual ocorre a abertura da mão e a consequente libertação do objeto. A tarefa *pick-and-place* é apenas concluída após a fase *depart*, correspondente ao movimento executado pela mão para se afastar da sua posição anterior.

Além dos estudos mencionados anteriormente, foram também realizadas investigações para compreender as dificuldades apresentadas pelos humanos, na execução de movimentos rápidos e precisos. Após a realização de testes experimentais com sujeitos entre os 19 e os 31 anos, Milner (1992) propôs que os movimentos do pulso - representados pelo seu perfil de velocidade - fossem decompostos em séries de um ou mais sub-movimentos (na figura 3.3). O modelo proposto considera que um sub-movimento pode ser originado pela alteração abrupta da direção do movimento da mão ou pela diminuição do valor das componentes de velocidade.



**Figura 3.3:** Perfil de velocidade do pulso de um sujeito, durante a colocação de um pino numa concavidade com 9,5 mm de diâmetro<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>Imagem adaptada de Kang & Ikeuchi (1994).

### 3.2.2 Movimento do Braço Humano Durante o Desvio de Obstáculos

No quotidiano, a maior parte das tarefas realizadas pelos humanos implica que os seus membros superiores, evitem colisões com os diversos obstáculos existentes no espaço de trabalho. Para descrever esta capacidade dos humanos, Rosenbaum et al. (2001) e Vaughan et al. (2006) desenvolveram um modelo baseado em trabalhos experimentais - o *The Posture-based motion planning model* - que conforme demonstrado por outros estudos (Bicho et al., 2011; Costa e Silva, 2011; Gulletta et al., 2015), permite gerar movimentos suaves, fluentes e livres de colisões.

A utilização deste método de planeamento de movimentos, implica a definição de um conjunto de restrições - ordenadas por prioridade - relacionadas com a tarefa a ser realizada. Para a execução de movimentos de alcance e manipulação, tal como referido anteriormente, os autores propõem a divisão do planeamento de movimentos em dois sub-problemas: (i) a seleção da postura final e (ii) a seleção da trajetória.

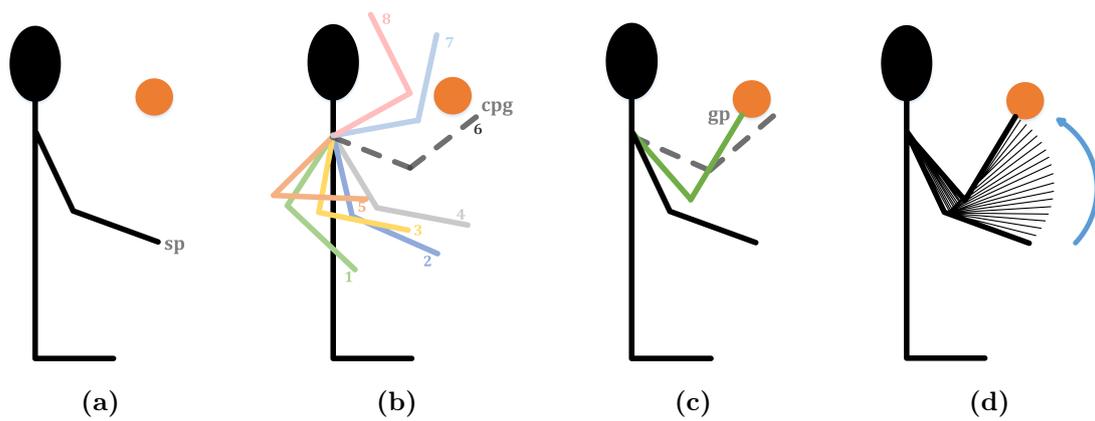
Segundo Rosenbaum et al. (2001), em torno da postura armazenada mais adequada para a realização da tarefa (na figura 3.4b), são geradas novas posturas até ser atingido um determinado prazo pré-estabelecido - procedimento denominado de *diffusion 'till deadline*. A seleção da postura final é processada através da avaliação do desempenho das novas posturas, tendo em conta o conjunto de restrições impostas pela tarefa. Desta forma, a postura gerada que satisfizer um maior número de restrições é selecionada como postura final (na figura 3.4c).

Posteriormente, caso não se verifique a existência de colisões, é executado um movimento direto entre a postura inicial e a postura final, através de uma interpolação em linha reta realizada no espaço das juntas (na figura 3.4d). Para os casos em que se verifique a existência de colisões, o modelo proposto por Rosenbaum et al. (2001) prevê a realização de um segundo movimento, designado de *back-and-forth*. Este movimento é somado ao movimento direto, permitindo a geração de uma trajetória livre de colisões até à postura final anteriormente determinada, como se encontra representado na figura 3.5d.

Na realidade, o movimento *back-and-forth* encontra-se dividido em dois sub-movimentos: (i) o movimento *forth* - da postura inicial para a postura *bounce* e (ii) o movimento *back* - da postura *bounce* para a postura inicial. A geração e seleção da postura *bounce* mais

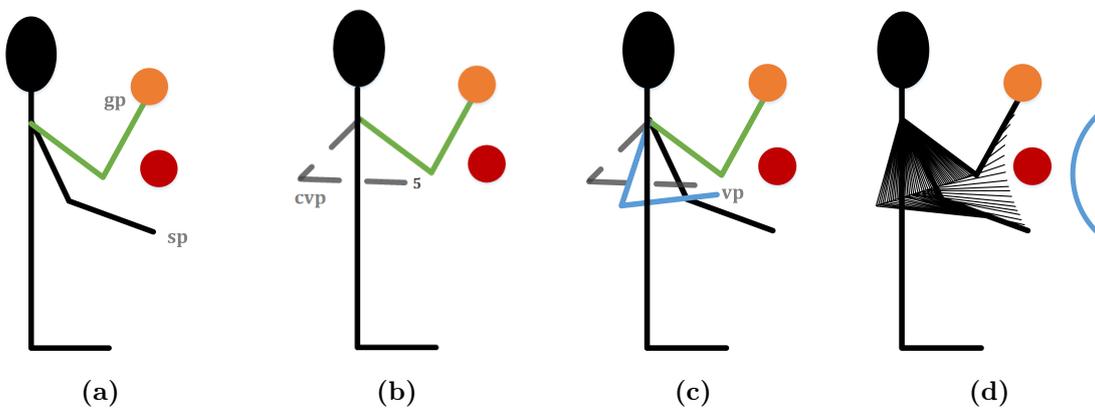
---

<sup>3</sup>Imagem adaptada de Milner (1992).



**Figura 3.4:** Representação do movimento executado a partir da postura inicial até ao objeto a ser alcançado, na ausência de obstáculos: (a) Postura inicial (sp) e objeto a ser alcançado (círculo laranja); (b) Postura armazenada mais adequada (cpg) para a realização da tarefa; (c) Postura gerada (gp) a ser utilizada como postura final; (d) Movimento direto a ser executado entre a postura inicial e a postura final<sup>4</sup>.

apropriada para a realização da tarefa (nas figuras 3.5b e 3.5c), processa-se através de um método semelhante ao utilizado para a postura final, divergindo no conjunto de restrições aplicado.



**Figura 3.5:** Representação do movimento executado a partir da postura inicial até ao objeto a ser alcançado, na presença de obstáculos: (a) Postura inicial (sp) e postura final (gp) anteriormente determinada; (b) Postura armazenada mais adequada (cvp) para ser utilizada como postura *bounce*; (c) Postura gerada (vp) a ser utilizada como postura *bounce*; (d) Movimento composto a ser executado entre a postura inicial e a postura final<sup>5</sup>.

<sup>4</sup>Imagens adaptadas de Vaughan et al. (2001).

<sup>5</sup>Imagens adaptadas de Vaughan et al. (2001).

---

De acordo com Vaughan et al. (2001), uma possível alternativa ao mecanismo de desvio de obstáculos proposto por Rosenbaum et al. (2001), passaria pela divisão do movimento em dois sub-movimentos sucessivos: (i) o primeiro executado a partir da postura inicial até à postura *bounce* e (ii) o segundo realizado da postura *bounce* até à postura final. Contudo, o planeamento individual de cada um dos sub-movimentos, resulta na geração de uma trajetória irrealista, caracterizada pela existência de várias alterações bruscas na direção do movimento.



## Parte II

# Sistema de Planeamento de Movimentos



# Capítulo 4

---

## Plataforma Robótica Sawyer

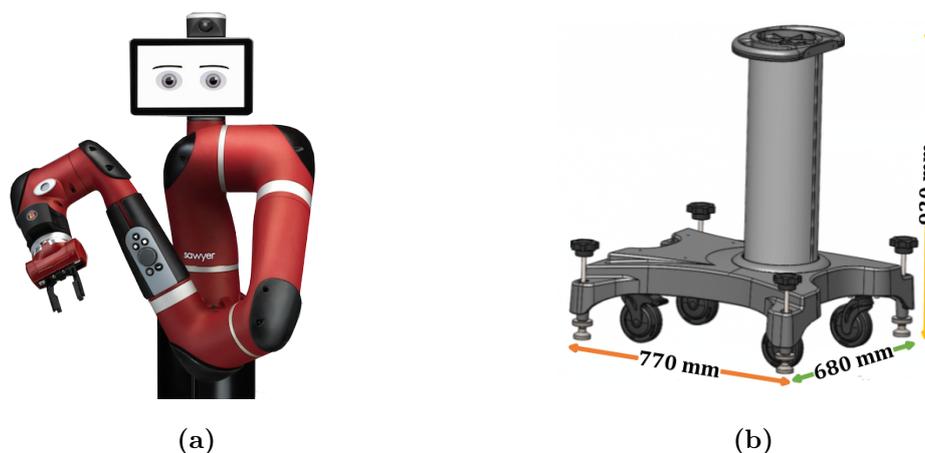
---

Neste capítulo será apresentada a plataforma robótica Sawyer, utilizada na implementação e validação do presente projeto de dissertação. Na secção 4.1 será introduzida uma breve descrição do robô, com destaque para as suas principais especificações e aplicações na indústria. Posteriormente, na secção 4.2.1 serão abordados alguns conceitos teóricos relacionados com a cinemática direta e inversa. Nas secções seguintes (4.2.2 e 4.2.3) serão apresentados detalhadamente o braço e a mão do manipulador, incluindo a derivação dos seus respetivos modelos cinemáticos.

### 4.1 Especificações Básicas

O robô colaborativo Sawyer (na figura 4.1a), é uma das plataformas robóticas mais inovadoras e recentes do mercado. Desenvolvido pela empresa *Rethink Robotics* e comercializado desde março de 2016, o Sawyer foi projetado para fornecer à indústria uma automação de elevado desempenho, essencial para a execução de uma ampla gama de tarefas que exijam elevada flexibilidade e que sejam efetuadas em espaços de trabalho partilhados com humanos.

Fisicamente, o robô Sawyer é constituído por um pedestal - representado na figura 4.1b - e por um braço robótico com 7-DOF's que permite um alcance máximo de 1260 mm e uma manipulação de objetos com peso inferior a 4 kg. Além das características referidas, esta plataforma possui um sistema de visão integrado na cabeça e no pulso que proporciona



**Figura 4.1:** Robô colaborativo Sawyer (a) e o seu respetivo pedestal (b)<sup>1</sup>.

um mecanismo de posicionamento, essencial para a reorientação dinâmica do manipulador e para uma maior precisão e repetibilidade dos seus movimentos.

Ao contrário da maior parte dos robôs industriais, o Sawyer é controlado simultaneamente pelo torque e pela posição das juntas, monitorizando a força aplicada em diferentes direções e garantindo um comportamento semelhante ao dos humanos, durante a realização das tarefas propostas. Na realidade, atualmente, esta plataforma robótica não apresenta autonomia dos seus movimentos, sendo estes executados através da replicação das trajetórias demonstradas pelo humano, com recurso à plataforma de *software* Intera 3.3.

Segundo a *Rethink Robotics*, o robô Sawyer é adequado para diversas aplicações industriais, como: a construção e manipulação de PCB's, o fabrico de metais, aplicações de embalagem, operações de moldagem de plásticos ou para o teste e inspeção de linhas de produção. Na tabela 4.1 encontram-se sumariadas as suas principais especificações, sendo nas secções 4.2.2 e 4.2.3 apresentados, em detalhe, o seu braço e a sua mão robótica.

## 4.2 Modelo Cinemático do Manipulador

O método de planeamento de movimentos utilizado na presente dissertação, depende da derivação dos modelos cinemáticos do braço e da mão do manipulador. Desta forma, nas próximas secções serão introduzidos alguns conceitos teóricos relacionados com a ci-

<sup>1</sup>Imagens retiradas e adaptadas dos *sites* <https://www.active8robots.com/> e <http://mfg.rethinkrobotics.com/>.

**Tabela 4.1:** Especificações básicas da plataforma robótica Sawyer<sup>2</sup>.

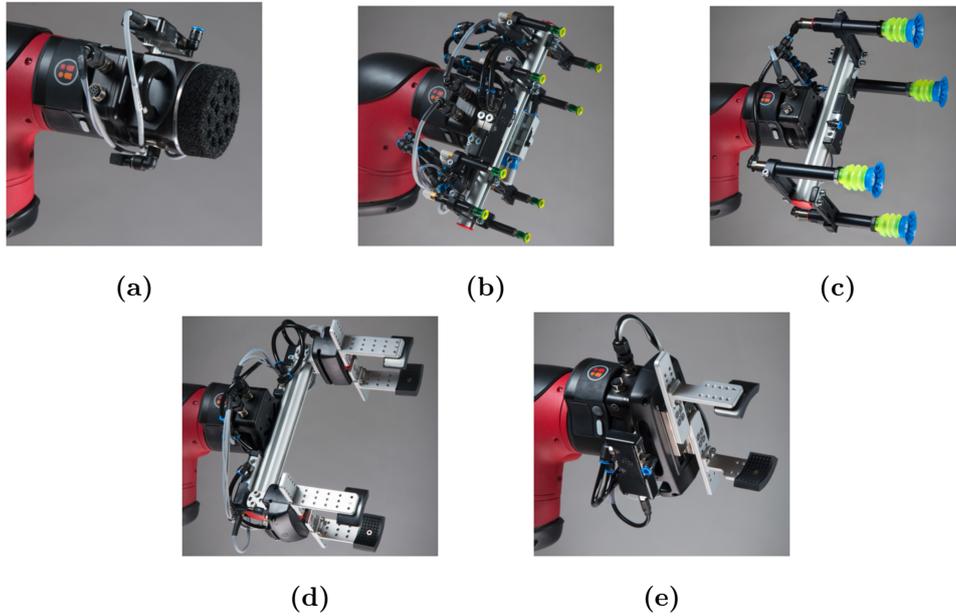
<b>Graus de liberdade</b>	7
<b>Alcance máximo</b>	1260 mm
<b>Alcance na posição nula</b>	900 mm
<b>Carga máxima</b>	4 kg
<b>Repetibilidade</b>	± 0,1 mm
<b>Velocidade média</b>	1,5 m/s
<b>Especificações energéticas</b>	100-240 VAC, 47-63 Hz, 4 A (Máx.)
<b>Temperatura de operação</b>	5°C-40°C, 80% de Humidade Relativa
<b>Comunicação</b>	Modbus TCP, TCP/IP
<b>Normas colaborativas</b>	ISO 10218-1:2011

nemática (na secção 4.2.1) e apresentadas as especificações de *hardware* do manipulador robótico Sawyer (nas secções 4.2.2 e 4.2.3).

No caso da presente dissertação, para o braço robótico é apenas derivado o modelo cinemático direto, visto que o método de planeamento de movimentos desenvolvido é independente da utilização da cinemática inversa para a obtenção dos ângulos das juntas do manipulador. Neste método, o conjunto de posturas admissíveis é determinado através de problemas de otimização não-lineares sujeitos a restrições, possibilitando um processo de planeamento de movimentos mais rápido e computacionalmente menos dispendioso.

Outro aspeto importante a realçar é a utilização da mão robótica *BH8-series* da empresa *BarrettHand*, para a validação do modelo desenvolvido nos diferentes cenários de aplicação. Os diversos tipos de *grippers* disponibilizados pela empresa *Rethink Robotics* (na figura 4.2) não apresentam as características necessárias para manipular e transportar objetos com as dimensões pretendidas. Para colmatar este problema optou-se por utilizar uma *BarrettHand* com três dedos, cujos movimentos são controlados por intermédio de uma junta com um limite máximo de 140°.

<sup>2</sup>Tabela adaptada do *site* <http://www.rethinkrobotics.com/>.



**Figura 4.2:** *Grippers* disponibilizadas pela empresa *Rethink Robotics* para a plataforma robótica Sawyer: (a) *Vacuum Foam Gripper*; (b) *Vacuum Small Gripper*; (c) *Vacuum Large Gripper*; (d) *Pneumatic Small Gripper*; (e) *Pneumatic Large Gripper*<sup>3</sup>.

#### 4.2.1 Fundamentos Teóricos

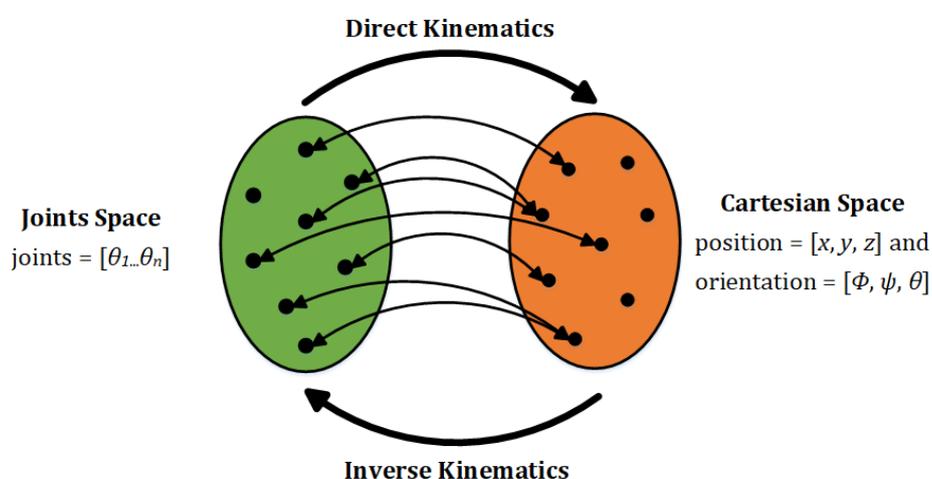
Segundo Craig (1989), a cinemática consiste no estudo das propriedades geométricas e temporais do movimento, não tendo em consideração as forças envolvidas na sua origem. No caso dos manipuladores - descritos como um conjunto de segmentos conectados por juntas - o autor afirma que o seu estudo cinemático pode ser processado através dos quatro parâmetros estabelecidos pela notação de Denavit-Hartenberg, sendo estes:

- $a_{i-1}$ : a distância entre  $\hat{z}_{i-1}$  e  $\hat{z}_i$ , medida ao longo de  $\hat{x}_{i-1}$ ;
- $\alpha_{i-1}$ : o ângulo entre  $\hat{z}_{i-1}$  e  $\hat{z}_i$ , medido ao longo de  $\hat{x}_{i-1}$ ;
- $d_i$ : a distância entre  $\hat{x}_{i-1}$  e  $\hat{x}_i$ , medida ao longo de  $\hat{z}_i$ ;
- $\theta_i$ : o ângulo entre  $\hat{x}_{i-1}$  e  $\hat{x}_i$ , medido ao longo de  $\hat{z}_i$ .

O modelo cinemático pode ser, consoante o espaço no qual são representadas a posição e orientação da extremidade do manipulador, denominado de direto - representação no

<sup>3</sup>Imagens retiradas do *site* <http://www.rethinkrobotics.com/>.

espaço das juntas - ou inverso - representação no espaço cartesiano. Tal como se encontra ilustrado na figura 4.3, a cinemática direta consiste no cálculo da posição e orientação da extremidade do manipulador, a partir de um dado conjunto de ângulos das juntas. Pelo contrário, a cinemática inversa relaciona-se com a definição do conjunto de ângulos das juntas que permite a extremidade do manipulador alcançar uma determinada posição e orientação. De realçar que o problema da cinemática inversa pode ser impossível de resolver ou pelo contrário, englobar a existência de múltiplas soluções, sendo considerado um processo computacionalmente dispendioso.



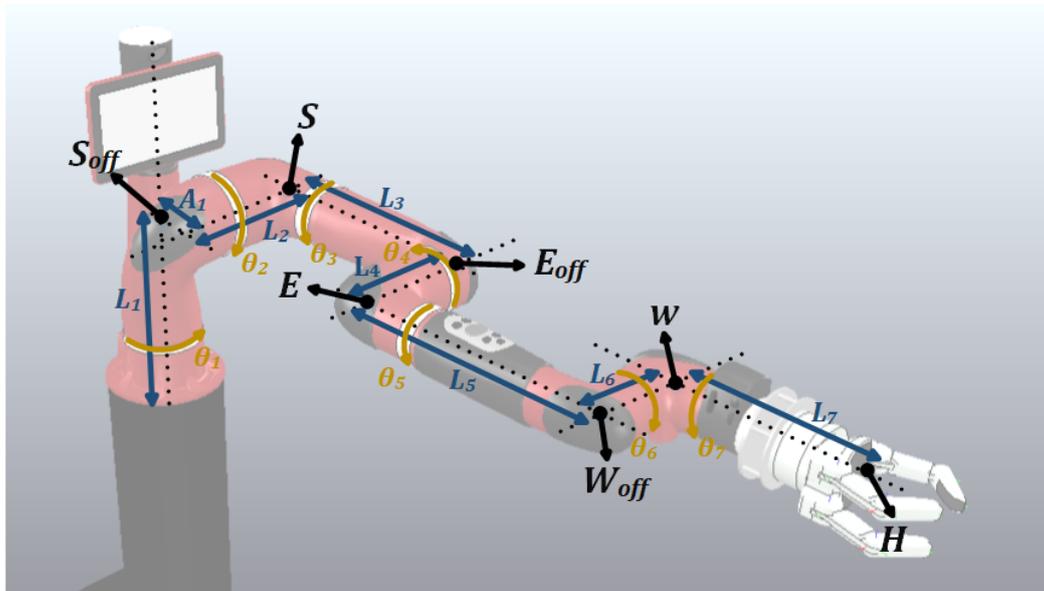
**Figura 4.3:** Relação entre a cinemática direta e inversa: uma determinada posição  $(x, y, z)$  e orientação  $(\phi, \psi, \theta)$  no espaço cartesiano pode ser alcançada através de diferentes configurações do manipulador  $(\theta_1... \theta_n)$ .

#### 4.2.2 Braço Robótico

A plataforma robótica Sawyer, tal como referido anteriormente, é constituída por um braço manipulador com 7-DOF's que permite alcançar e manipular objetos que se encontrem a uma distância máxima de 1260 mm e possuam um peso inferior a 4 kg.

Como se pode observar pela figura 4.4, as juntas do manipulador podem ser classificadas consoante o seu movimento, em duas diferentes categorias: as juntas do tipo *roll* ( $\theta_1$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_5$  e  $\theta_7$ ) e as juntas do tipo *pitch* ( $\theta_2$ ,  $\theta_4$  e  $\theta_6$ ). Os limites máximos de cada junta e a sua respetiva variação podem ser consultados na tabela 4.2.

Além das juntas do manipulador robótico, na figura 4.4 encontram-se também assinalados os seus segmentos - cujas dimensões podem ser consultadas na tabela 4.3 - e seus



**Figura 4.4:** Ilustração do manipulador robótico Sawyer, com destaque para os pontos classificados com base na nomenclatura estabelecida para as articulações e para a extremidade do braço humano. As direções de rotação das juntas e os seus respectivos segmentos encontram-se sinalizadas, respetivamente, a amarelo e a azul.

**Tabela 4.2:** Limites das juntas da plataforma robótica Sawyer<sup>4</sup>.

Junta	Limite da junta (em graus)	Varição (em graus)
$\theta_1$	[-174,8; 174,7]	349,5
$\theta_2$	[-218,8; 130,7]	349,5
$\theta_3$	[-174,8; 174,9]	349,7
$\theta_4$	[-174,8; 174,9]	349,7
$\theta_5$	[-171,0; 171,0]	342,0
$\theta_6$	[-171,0; 171,0]	342,0
$\theta_7$	[-269,9; 269,9]	539,8

respetivos pontos. Estes últimos são classificados com base na adaptação da nomenclatura definida para as articulações e para a extremidade do braço humano, sendo denominados

de: *offset* do ombro ( $S_{off}$ ), ombro ( $S$ ), *offset* do cotovelo ( $E_{off}$ ), cotovelo ( $E$ ), *offset* do pulso ( $W_{off}$ ), pulso ( $W$ ) e mão ( $H$ ).

**Tabela 4.3:** Dimensões dos segmentos da plataforma robótica Sawyer<sup>5</sup>.

Segmento	Comprimento (em mm)	Descrição
$L_1$	317,0	Deslocamento em $z$ entre a origem e $\theta_1$
$A_1$	81,0	Deslocamento em $x$ entre a origem e $\theta_1$
$L_2$	192,5	Deslocamento em $z$ entre $\theta_1$ e $\theta_2$
$L_3$	400,0	Deslocamento em $z$ entre $\theta_2$ e $\theta_3$
$L_4$	168,5	Deslocamento em $z$ entre $\theta_3$ e $\theta_4$
$L_5$	400,0	Deslocamento em $z$ entre $\theta_4$ e $\theta_5$
$L_6$	136,3	Deslocamento em $z$ entre $\theta_5$ e $\theta_6$
$L_7$	265,2	Deslocamento em $z$ entre $\theta_6$ e $\theta_7$

#### 4.2.2.1 Cinemática Direta

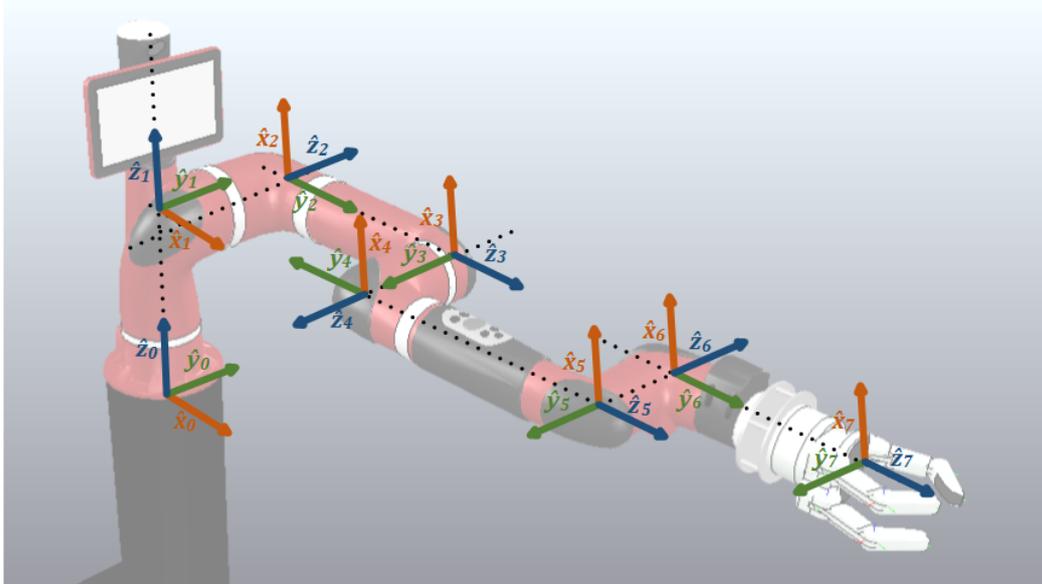
O processo de derivação da cinemática direta pressupõe, numa primeira fase, a colocação do manipulador na posição nula, definida - neste caso - com os valores de todas as juntas a zero. Posteriormente, é necessário atribuir um eixo coordenado  $\hat{x}_i\hat{y}_i\hat{z}_i$  a cada segmento do braço, considerando a convenção desenvolvida por Denavit-Hartenberg (para mais detalhes consultar Craig (1989)).

Como se pode observar na figura 4.5, no caso da plataforma robótica Sawyer, o primeiro conjunto de eixos coordenados -  $\hat{x}_0\hat{y}_0\hat{z}_0$  - é colocado no centro da base do manipulador. O segundo e terceiro referenciais -  $\hat{x}_1\hat{y}_1\hat{z}_1$  e  $\hat{x}_2\hat{y}_2\hat{z}_2$  - são representados no centro do *offset* do ombro e no centro do próprio ombro. Este procedimento repete-se para o quarto, quinto, sexto e sétimo conjuntos de eixos coordenados -  $\hat{x}_3\hat{y}_3\hat{z}_3$ ,  $\hat{x}_4\hat{y}_4\hat{z}_4$ ,  $\hat{x}_5\hat{y}_5\hat{z}_5$  e  $\hat{x}_6\hat{y}_6\hat{z}_6$  - sendo estes colocados nos centros do: *offset* do cotovelo, cotovelo, *offset* do pulso e pulso. Por

<sup>4</sup>Tabela adaptada do *site* <http://mfg.rethinkrobotics.com/>.

<sup>5</sup>Tabela adaptada do *site* <http://mfg.rethinkrobotics.com/>.

fim, o oitavo referencial -  $\hat{x}_7\hat{y}_7\hat{z}_7$  - é representado no centro da palma da mão. Na tabela 4.4 encontram-se descritos os parâmetros de Denavit-Hartenberg para cada uma das juntas do manipulador.



**Figura 4.5:** Manipulador robótico Sawyer na sua posição nula e representação dos eixos coordenados  $\hat{x}_i\hat{y}_i\hat{z}_i$ , atribuídos segundo a convenção desenvolvida por Denavit-Hartenberg.

**Tabela 4.4:** Parâmetros de Denavit-Hartenberg da plataforma robótica Sawyer.

$i$	$\alpha_{i-1}$ (em graus)	$a_{i-1}$ (em mm)	$d_i$ (em mm)	$\theta_i$ (em graus)
1	0	0	$L_1$	$\theta_1$
2	-90	$A_1$	$L_2$	$\theta_2 - 90$
3	-90	0	$L_3$	$\theta_3$
4	90	0	$L_4$	$\theta_4$
5	-90	0	$L_5$	$\theta_5$
6	90	0	$L_6$	$\theta_6$
7	-90	0	$L_7$	$\theta_7$

Em semelhança ao descrito por Craig (1989), com base nos parâmetros de Denavit-

Hartenberg é possível determinar as transformações entre as diferentes juntas do manipulador, utilizando a expressão geral (4.1).

$$\begin{aligned}
{}^{i-1}T_i &= Rot_x(\alpha_{i-1})Trans_x(a_{i-1})Trans_z(d_i)Rot_z(\theta_i) \\
&= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1})d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

Por conseguinte, considerando a primeira linha da tabela 4.4, a transformação entre a base e a primeira junta do manipulador é definida pela matriz (4.2).

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

As transformações entre a primeira e segunda juntas e quinta e sexta juntas, são estabelecidas respetivamente pelas matrizes (4.3) e (4.4).

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 - 90^\circ) & -\sin(\theta_2 - 90^\circ) & 0 & A_1 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ -\sin(\theta_2 - 90^\circ) & -\cos(\theta_2 - 90^\circ) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L_6 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Por fim, as transformações entre as restantes juntas do manipulador são determinadas pela matriz (4.5), na qual  $i = 3, 4, 5, 7$ .

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_i \\ -\sin(\theta_i) & -\cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Com a multiplicação de todas as matrizes de transformação homogêneas apresentadas anteriormente, obtém-se a matriz de transformação global (na matriz (4.6)), correspondente à transformação entre a base e a mão do manipulador.

$${}^0T_H = {}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \quad (4.6)$$

Contudo, por intermédio do processo descrito é também possível determinar as matrizes de transformação dos restantes pontos do manipulador - em relação ao referencial de origem - nomeadamente através das equações (4.7) - (4.12).

$${}^0T_{S_{off}} = {}^0T_1 \quad (4.7) \qquad {}^0T_S = {}^0T_2 \quad (4.8)$$

$${}^0T_{E_{off}} = {}^0T_3 \quad (4.9) \qquad {}^0T_E = {}^0T_4 \quad (4.10)$$

$${}^0T_{W_{off}} = {}^0T_5 \quad (4.11) \qquad {}^0T_W = {}^0T_6 \quad (4.12)$$

De realçar que as matrizes de transformação homogêneas - derivadas da expressão geral (4.1) - permitem obter a orientação  $(\phi, \psi, \theta)$  e a posição  $(x, y, z)$  dos diferentes pontos do braço em relação a um determinado referencial, como se encontra exemplificado na matriz (4.13). Por conseguinte e a título de exemplo, com base na matriz de transformação global é possível determinar a orientação  $(\phi_H, \psi_H, \theta_H)$  e a posição  $(x_H, y_H, z_H)$  da mão, considerando o referencial de origem.

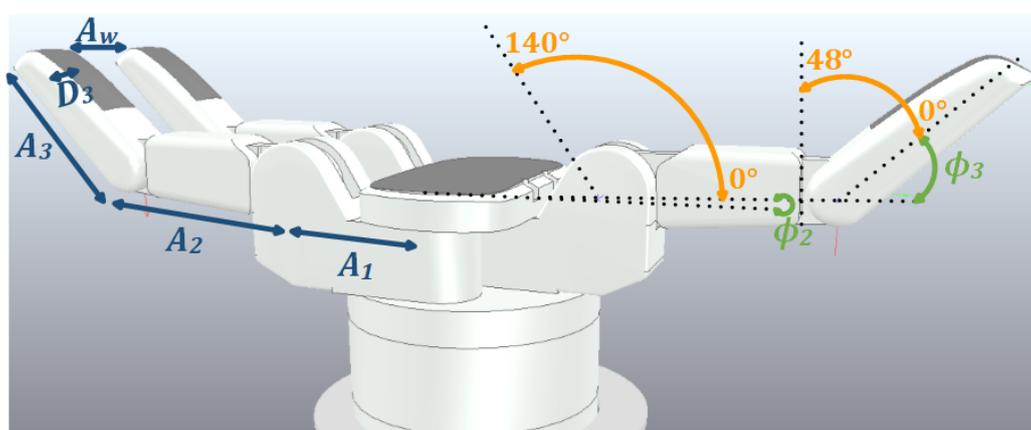
$${}^{i-1}T_i = \left[ \begin{array}{c|c} Rot_{3 \times 3}(\phi, \psi, \theta) & Trans_{3 \times 1}(x, y, z) \\ \hline 0_{1 \times 3} & 1 \end{array} \right] \quad (4.13)$$

### 4.2.3 Mão Robótica

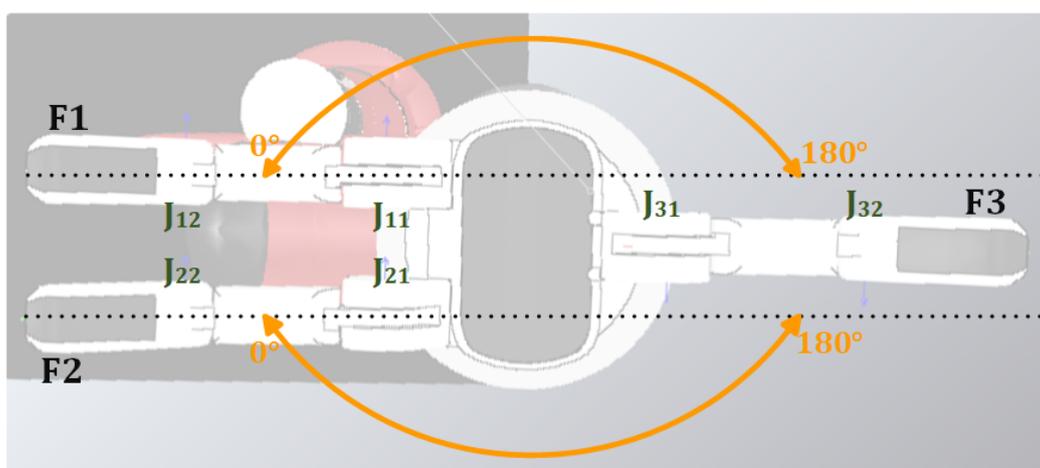
Tal como referido anteriormente, na presente dissertação, o robô colaborativo Sawyer é constituído pela mão robótica *BH8-series* da empresa *BarrettHand*. Composta por três

dedos e com um diâmetro de cerca de 335 mm, esta *gripper* permite a manipulação de objetos com um peso máximo de 6 kg.

Como se pode observar nas figuras 4.6 e 4.7, os dedos da mão robótica *BH8-series* são constituídos por duas juntas, limitadas a movimentos máximos de  $140^\circ$  e  $48^\circ$ . Na presente dissertação, para cada dedo será apenas controlado o movimento da junta  $J_1$ , sendo atribuído  $\frac{1}{3}$  do seu valor à sua respetiva junta  $J_2$ . Adicionalmente, os dedos F1 e F2 podem executar um movimento denominado de *spread* (na figura 4.7) que consiste na rotação sincronizada dos dedos em torno da base da mão, num limite máximo de  $180^\circ$ .



**Figura 4.6:** Os dedos da mão robótica *BH8-series* são constituídos por duas juntas, limitadas a movimentos de  $140^\circ$  e  $48^\circ$ . Os segmentos da mão e os ângulos existentes entre as suas respetivas juntas encontram-se sinalizados, respetivamente, a azul e a verde.



**Figura 4.7:** Os dedos F1 e F2 podem realizar uma rotação sincronizada em torno da base da mão, sendo este movimento denominado de *spread*.

Na tabela 4.5 encontram-se descritas as dimensões da mão robótica e outros parâmetros relevantes, sinalizados na figura 4.6.

**Tabela 4.5:** Dimensões e outros parâmetros da mão robótica *BH8-series*<sup>6</sup>.

Parâmetro	Valor	Descrição
$A_w$	25 mm	Distância entre os dedos F1 e F2
$A_1$	50 mm	Deslocamento em $x$ entre a base da mão e a junta J1
$A_2$	70 mm	Deslocamento em $x$ entre a junta J1 e a junta J2
$A_3$	50 mm	Deslocamento em $x$ entre a junta J2 e o centro da extremidade do dedo
$D_3$	9,5 mm	Deslocamento em $z$ entre a junta J2 e o centro da extremidade do dedo
$\phi_2$	2,46°	Ângulo entre a base da mão e a junta J1
$\phi_3$	50°	Ângulo entre a junta J1 e a junta J2

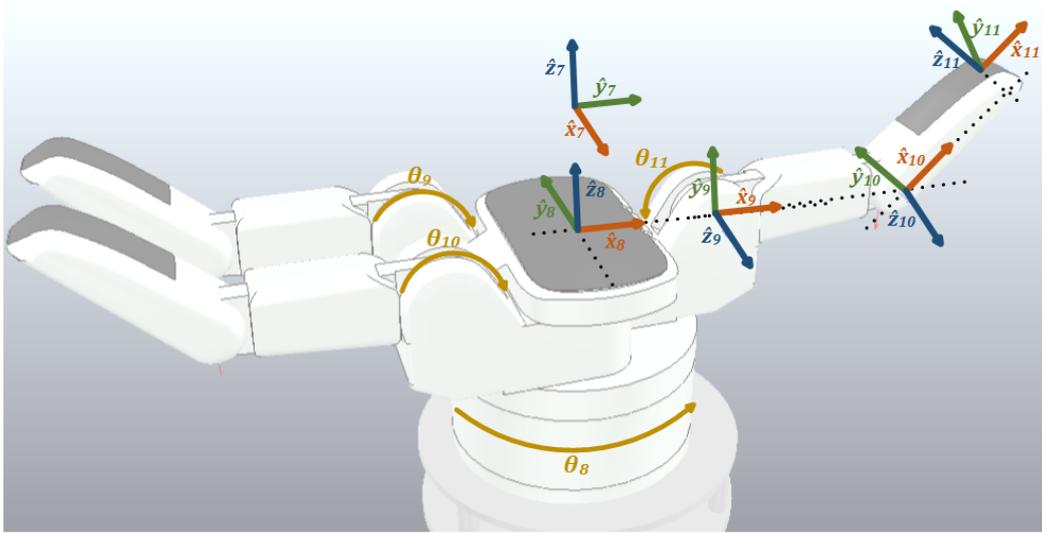
#### 4.2.3.1 Cinemática Direta

O movimento da mão robótica *BH8-series* é controlado por intermédio de quatro juntas: (i) a junta  $\theta_8$ , correspondente ao movimento *spread* (na figura 4.7) e (ii) as juntas  $\theta_9$ ,  $\theta_{10}$  e  $\theta_{11}$ , utilizadas para definir a trajetória a ser executada pelo dedos do manipulador.

A derivação da cinemática direta da mão robótica será, em semelhança ao descrito anteriormente para o braço do manipulador (na secção 4.2.2.1), processada através da convenção desenvolvida por Denavit-Hartenberg. A título de exemplo, na figura 4.8 encontram-se representados os eixos coordenados  $\hat{x}_i\hat{y}_i\hat{z}_i$  atribuídos ao dedo F1. No caso específico dos dedos F2 e F3, a metodologia utilizada é similar à ilustrada na figura anteriormente referida, dependendo da sua posição em relação ao centro da palma da mão. Na tabela 4.6 encontram-se descritos os parâmetros de Denavit-Hartenberg obtidos para cada dedo  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ), por intermédio das transformações entre os referenciais das suas juntas.

Em concreto, as matrizes de transformação homogéneas entre as juntas de um deter-

<sup>6</sup>Tabela adaptada de Costa e Silva (2011).



**Figura 4.8:** Mão robótica *BH8-series* na sua posição nula e representação dos eixos coordenados  $\hat{x}_i\hat{y}_i\hat{z}_i$  do dedo F1, atribuídos segundo a convenção desenvolvida por Denavit-Hartenberg.

**Tabela 4.6:** Parâmetros de Denavit-Hartenberg para cada dedo  $k$  da mão robótica *BH8-series*, em que  $r_k = [-1, 1, 0]$  e  $j_k = [1, 1, -1]$  para  $k = 1, 2, 3$ .

$i$	$\alpha_{i-1}$ (em graus)	$a_{i-1}$ (em mm)	$d_i$ (em mm)	$\theta_i$ (em graus)
$k, 8$	0	$A_w r_k$	0	$a = \theta_8 r_k - 90 j_k$
$k, 9$	90	$A_1$	0	$b = \phi_2 + \theta_{8+k}$
$k, 10$	0	$A_2$	0	$c = \phi_3 + \frac{1}{3}\theta_{8+k}$
$k, 11$	-90	$A_3$	$D_3$	0

minado dedo  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) - deduzidas através da expressão geral (4.1) - são definidas por intermédio das matrizes (4.14) - (4.17).

$${}^7T_{k,8} = \begin{bmatrix} \cos(a) & -\sin(a) & 0 & A_w r_k \\ \sin(a) & \cos(a) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$${}^{k,8}T_{k,9} = \begin{bmatrix} \cos(b) & \sin(b) & 0 & A_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(b) & \cos(b) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$${}^{k,9}T_{k,10} = \begin{bmatrix} \cos(c) & -\sin(c) & 0 & A_2 \\ \sin(c) & \cos(c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16) \quad {}^{k,10}T_{k,11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_3 \\ 0 & 0 & 1 & D_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Com base nas matrizes especificadas é possível obter a matriz de transformação entre a base do manipulador e a extremidade de cada dedo  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ), nomeadamente através da equação (4.18). De realçar que a variável  ${}^0T_7$  corresponde à matriz de transformação global do manipulador, determinada *à priori* por intermédio da equação (4.6).

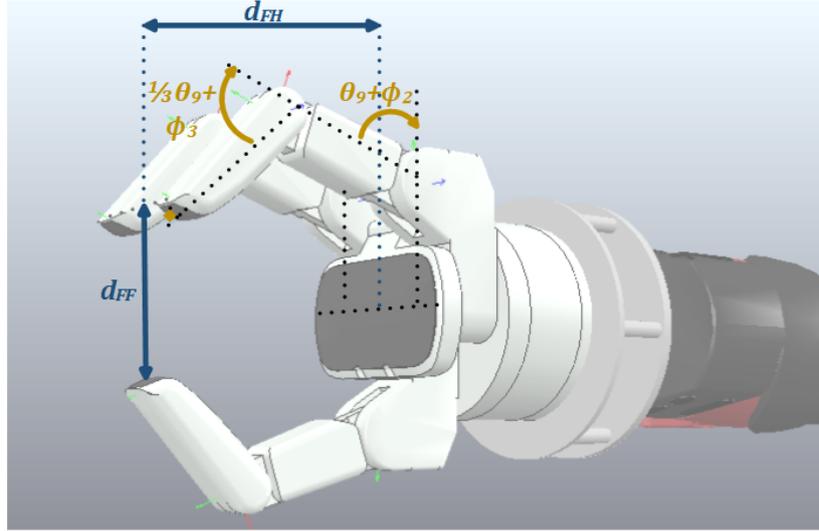
$${}^0T_{k,11} = {}^0T_7 {}^7T_{k,8} {}^{k,8}T_{k,9} {}^{k,9}T_{k,10} {}^{k,10}T_{k,11} \quad (4.18)$$

A orientação  $(\phi_{tip}, \psi_{tip}, \theta_{tip})$  e a posição  $(x_{tip}, y_{tip}, z_{tip})$  da extremidade de cada dedo  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ), em relação ao referencial de origem, podem também ser obtidas recorrendo à matriz de transformação, como descrito e exemplificado na secção 4.2.2.1.

#### 4.2.3.2 Cinemática Inversa

A solução da cinemática inversa para a mão robótica *BH8-series*, desenvolvida por Costa e Silva (2011), engloba apenas o cenário em que os dedos F1 e F2 são opostos a F3 - ou seja,  $\theta_8 = 0$  e  $\theta_9 = \theta_{10} = \theta_{11}$ . Para este caso e em semelhança ao representando na figura 4.9, são definidas duas distâncias em função de  $\theta_9$ : (i) a distância desde o ponto médio estabelecido entre F1 e F2 até F3 - denominada de  $d_{FF}$  - e (ii) a distância desde o centro da palma da mão até ao ponto médio estabelecido entre F1 e F2 - denominada de  $d_{FH}$ . Em concreto, estas duas distâncias podem ser obtidas através equações (4.19) e (4.20), nas quais  $\phi_2$ ,  $\phi_3$ ,  $D_3$  e  $A_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) correspondem aos parâmetros especificados na tabela 4.5.

$$\begin{aligned} d_{FF} &= 2 \left[ A_1 + A_2 \cos(\theta_9 + \phi_2) + A_3 \cos\left(\frac{4}{3}\theta_9 + \phi_3 + \phi_2\right) + D_3 \cos\left(90^\circ + \frac{4}{3}\theta_9 + \phi_3 + \phi_2\right) \right] \\ &= 2[A_1 + A_2 \cos(\theta'_9) + A_3 \cos(\theta''_9) + D_3 \cos(90^\circ + \theta''_9)] \\ &= 2[A_1 + A_2 \cos(\theta'_9) + A_3 \cos(\theta''_9) - D_3 \sin(\theta''_9)] \end{aligned} \quad (4.19)$$



**Figura 4.9:** Representação dos ângulos entre as juntas e das distâncias  $d_{FF}$  e  $d_{FH}$ , utilizadas na derivação da cinemática inversa da mão robótica *BH8-series*.

$$\begin{aligned}
 d_{FH} &= A_2 \sin(\theta_9 + \phi_2) + A_3 \sin\left(\frac{4}{3}\theta_9 + \phi_3 + \phi_2\right) + D_3 \sin\left(90^\circ + \frac{4}{3}\theta_9 + \phi_3 + \phi_2\right) \\
 &= A_2 \sin(\theta'_9) + A_3 \sin(\theta''_9) + D_3 \sin(90^\circ + \theta''_9) \\
 &= A_2 \sin(\theta'_9) + A_3 \sin(\theta''_9) + D_3 \cos(\theta''_9)
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Considerando que a distância entre os dedos deve ser igual ao diâmetro do objeto a agarrar ( $d_{obj}$ ), é possível determinar o valor de  $\theta_9$  - e por conseguinte de  $\theta_{10}$  e  $\theta_{11}$  - por intermédio da resolução da equação (4.21).

$$2[A_1 + A_2 \cos(\theta'_9) + A_3 \cos(\theta''_9) - D_3 \sin(\theta''_9)] = d_{obj} \tag{4.21}$$



# Capítulo 5

---

## Planeamento de Movimentos

---

Neste capítulo será descrito o método de planeamento de movimentos proposto na presente dissertação. Tal como referido anteriormente, este método baseia-se na transferência de conhecimentos do controlo motor humano para o domínio da robótica, sendo uma extensão do trabalho desenvolvido por Bicho et al. (2011), Costa e Silva (2011) e Gulletta et al. (2015) - contextualizados e descritos na secção 1.3.

Na secção 5.1 serão apresentadas as características dos movimentos dos membros superiores humanos, transferidas para o domínio da robótica e utilizadas como premissas no desenvolvimento do método proposto. Posteriormente, na secção 5.2 serão descritos e classificados os diferentes tipos de movimentos a serem executados pelo manipulador, durante a realização de uma determinada tarefa. Na secção 5.3 será explicada a estratégia de planeamento de movimentos adotada na presente dissertação, sendo destacado o mecanismo implementado para evitar colisões com obstáculos. Seguidamente, na secção 5.4 serão apresentados os modelos do robô - corpo, braço e mão - e dos objetos existentes no seu espaço de trabalho. Estes modelos são utilizados para definir as restrições dos problemas de otimização, relacionadas com o mecanismo de desvio de colisões. Na secção 5.5, o problema de planeamento de movimentos será matematicamente formalizado como um problema de otimização não-linear, sendo generalizados os problemas de seleção da postura final - na secção 5.5.1 - e de seleção da postura *bounce* - na secção 5.5.2. Por fim, na secção 5.6 será apresentado o *software* de otimização, utilizado na resolução dos problemas anteriormente referidos.

## 5.1 Visão geral

Para a execução de uma simples tarefa - como alcançar e agarrar um determinado objeto - o manipulador robótico pode realizar várias trajetórias, considerando diferentes requisitos de tempo ou velocidade. Nesta dissertação propõe-se a utilização de um método de planeamento de movimentos - denominado de *Human-like upper-limb motion planner* (**HUMP**) - para a resolução destes problemas de redundância. O modelo proposto baseia-se em diversos trabalhos experimentais realizados na área do controlo motor humano (consultar as secções 3.2.1 e 3.2.2), apresentando as seguintes características:

- i. o planeamento de movimentos é processado no espaço das juntas (Osherson et al., 1990; Rosenbaum, 1991; Desmurget & Prablanc, 1997; Graziano et al., 2002; Flanagan & Ostry, 1990);
- ii. as juntas movem-se em sincronia (Breteler & Meulenbroek, 2006);
- iii. o planeamento de movimentos é dividido em dois subproblemas (Meulenbroek et al., 2001; Rosenbaum et al., 2001; Elsinger & Rosenbaum, 2003):
  - (a) a seleção da postura final;
  - (b) a seleção da trajetória.
- iv. a postura final é selecionada antes da trajetória (Gréa et al., 2000; Elsinger & Rosenbaum, 2003);
- v. a postura final varia em função da postura inicial (Soechting et al., 1995; Fischer et al., 1997; Desmurget et al., 1998);
- vi. os obstáculos presentes no espaço de trabalho são evitados através da sobreposição de dois movimentos (Rosenbaum et al., 1999; Meulenbroek et al., 2001; Vaughan et al., 2006).
  - (a) o movimento direto;
  - (b) o movimento *back-and-forth*.
- vii. as juntas apresentam um perfil de velocidade angular em forma de sino (Wada & Kawato, 2004; Rosenbaum et al., 1995);

viii. os movimentos dos membros superiores podem ser decompostos em séries de sub-movimentos (Milner, 1992; Burdet & Milner, 1998; Burdet et al., 2013).

## 5.2 Classificação dos Movimentos

Os movimentos a serem executados pelo manipulador, durante a realização de uma determinada tarefa, podem ser intuitivamente classificados de: *pick*, *place* ou *move*. Os movimentos *pick-and-place*, tal como referido anteriormente, encontram-se relacionados com a manipulação de um determinado objeto. Basicamente, o movimento *pick* corresponde ao movimento executado para alcançar e agarrar o objeto, enquanto o movimento *place* engloba o seu transporte e colocação numa dada posição do espaço de trabalho. Por sua vez, os movimentos *move* correspondem apenas ao planeamento da trajetória da mão até uma determinada posição.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Kang & Ikeuchi (1994) - referido na secção 3.2.1 - os movimentos *pick-and-place* podem ser divididos numa série de estados e transições, como se encontra representado no diagrama da figura 3.2. Adicionalmente, outras investigações relacionadas com a execução de movimentos rápidos e precisos, propuseram que o movimento do pulso humano fosse decomposto em séries de sub-movimentos (Milner, 1992). Nos testes experimentais realizados observou-se uma diminuição da velocidade tangencial do pulso, à medida que a mão se aproximava da sua posição alvo (ver a figura 3.3). Deste modo, tendo como base os trabalhos desenvolvidos por Kang & Ikeuchi (1994) e Milner (1992), na presente dissertação considera-se que os movimentos *pick-and-place* e *move* são descritos pelos diagramas de transição de estados representados na figura 5.1.

Como se pode observar nos diagramas propostos, os movimentos podem ser divididos em três estágios, designados de: *plan*, *approach* e *retreat*. Na realidade, o movimento *move* é composto apenas pelo estágio *plan*, enquanto os restantes movimentos são habitualmente constituídos pelos três estágios mencionados. Esta diferença relaciona-se com o facto das tarefas *pick-and-place* envolverem a manipulação de objetos, sendo necessário garantir uma maior suavidade e precisão dos movimentos a executar. Para dotar os movimentos com estas características e tendo em conta o trabalho desenvolvido por Milner (1992), no diagrama de transição de estados dos movimentos *pick-and-place* adicionou-se o estágio *approach*. Este estágio é caracterizado pela redução gradual da velocidade tangencial da

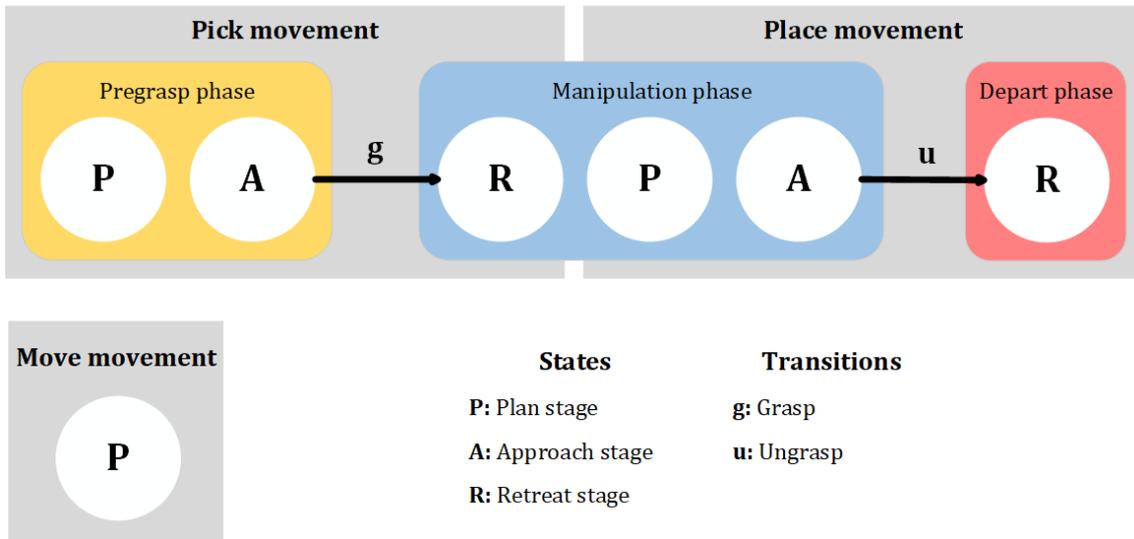


Figura 5.1: Diagramas de transição de estados dos movimentos *pick-and-place* e *move*.

mão (os valores da velocidade tangencial do pulso e da mão são similares) à medida que esta se aproxima da sua posição alvo. O estágio *retreat*, pelo contrário, corresponde ao afastamento da mão do manipulador em relação à sua posição anterior, verificando-se um aumento progressivo da velocidade tangencial.

Tal como se encontra ilustrado no exemplo da figura 5.2, no caso do movimento *move*, o estágio *plan* engloba o planeamento da trajetória do manipulador desde a sua posição inicial até à posição final desejada. De salientar que esta deve ser alcançada com o tipo de *grip* determinado à *priori*.

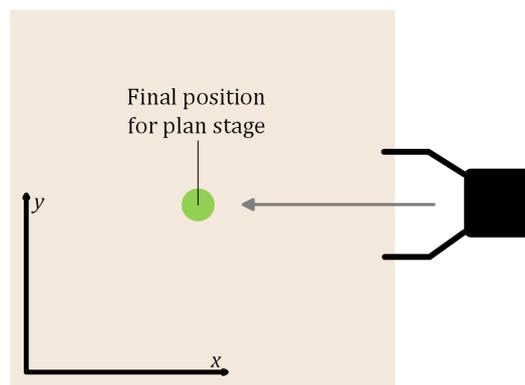
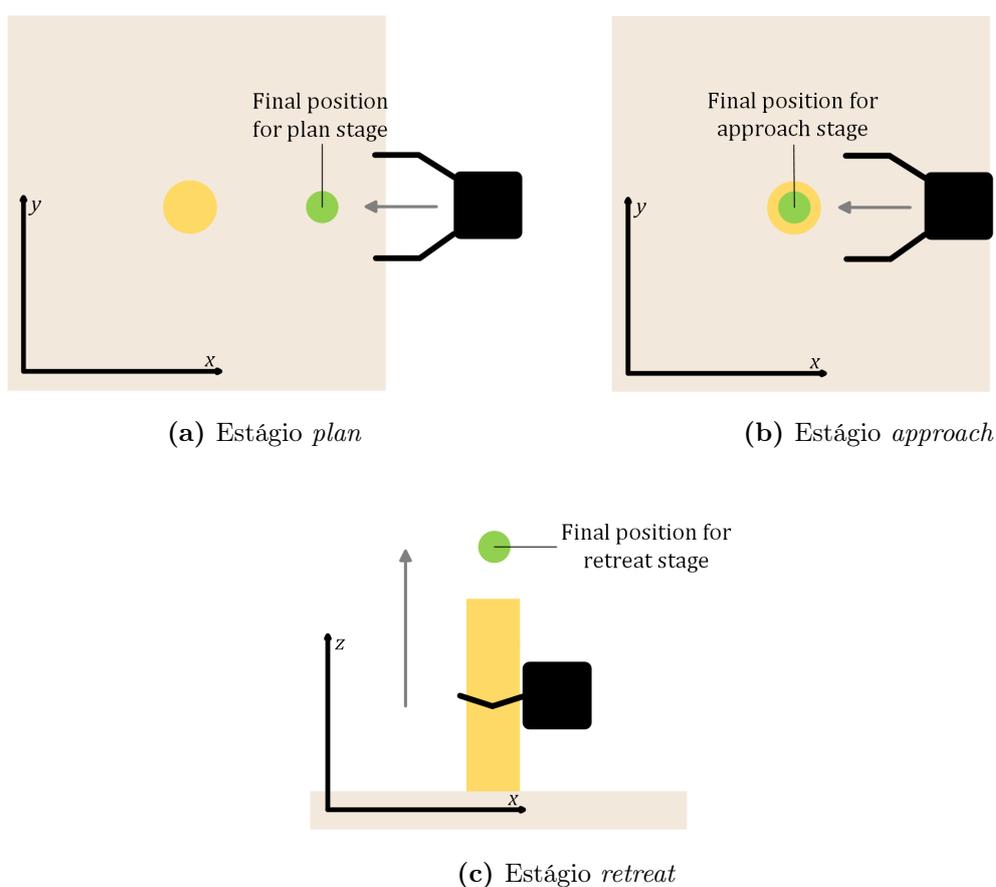


Figura 5.2: Ilustração de um movimento *move*. O estágio *plan* engloba o deslocamento da mão, ao longo do eixo *x*, até ser alcançada a posição final previamente especificada - círculo verde.

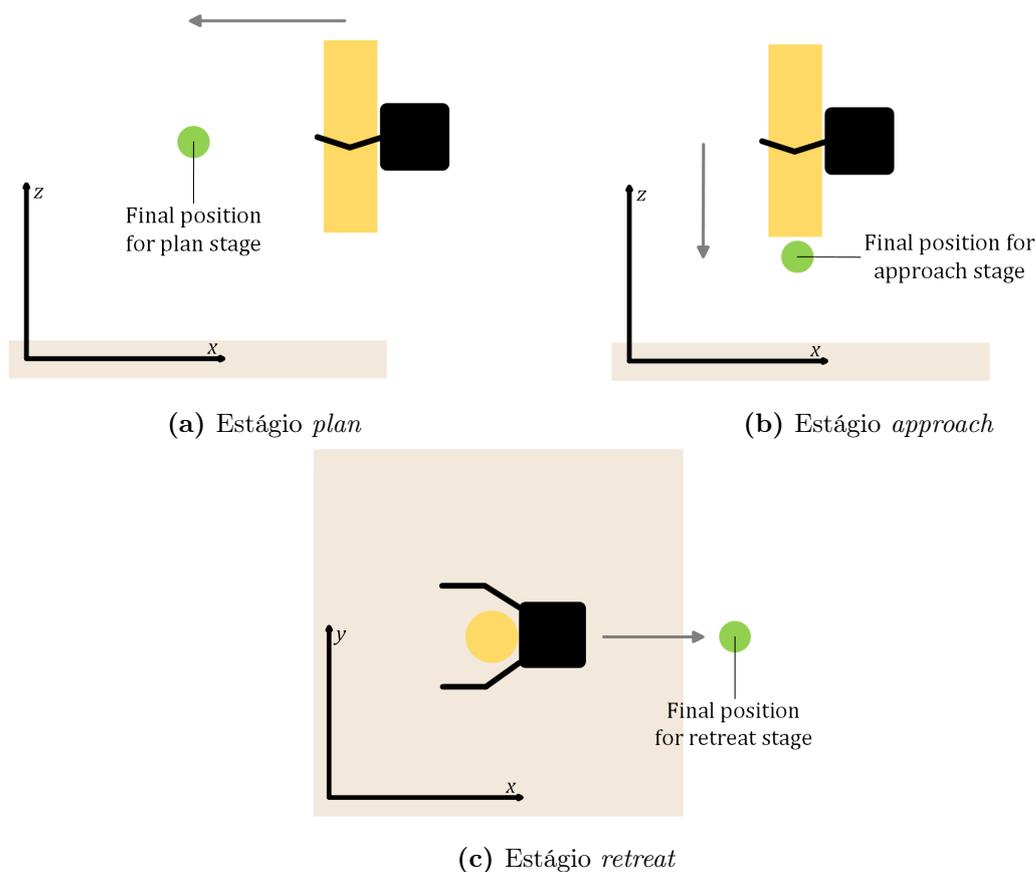
No caso do movimento *pick*, considerando o diagrama da figura 5.1, este é constituído

pelas fases *pregasp* e *manipulation*. Neste contexto, o estágio *plan* corresponde à trajetória a executar entre a posição inicial do manipulador e uma determinada posição, estabelecida a uma certa distância do objeto a agarrar (exemplo ilustrado na figura 5.3a). Paralelamente, durante este estágio é também iniciada a abertura da mão, sendo esta concluída no final do estágio *approach*, no qual o objeto é alcançado (exemplo ilustrado na figura 5.3b). Por conseguinte, após este ser agarrado - na transição *grasp* - inicia-se a fase *manipulation*. Durante esta fase, o estágio *retreat* é responsável pelo afastamento da mão da sua posição anterior, como se encontra ilustrado no exemplo da figura 5.3c.



**Figura 5.3:** Ilustração dos diferentes estágios de um movimento *pick*. A área sinalizada a castanho representa ao tampo da mesa, no qual se encontra o objeto a agarrar - cilindro amarelo. O estágio *plan* (a) engloba o alcance de uma determinada posição - círculo verde - localizada nas proximidades do objeto. Este é então alcançado no final do estágio *approach* (b), sendo de realçar que durante ambos movimentos, a mão se desloca ao longo do eixo  $x$ . Posteriormente, o objeto é então agarrado, iniciando-se o estágio *retreat* (c). Este estágio é caracterizado pelo o afastamento da mão - ao longo do eixo  $z$  - até a uma determinada posição previamente especificada.

Relativamente ao movimento *place* e em semelhança ao que se sucede no movimento *pick*, o estágio *plan* engloba o planeamento da trajetória da mão até a uma determinada posição, definida nas proximidades da posição final especificada para o objeto (exemplo ilustrado na figura 5.4a). Como se encontra ilustrado no exemplo da figura 5.4b, o objeto é colocado na sua posição final após a execução do estágio *approach*. Posteriormente, com a abertura da mão do manipulador - transição *ungrasp* - inicia-se a fase *depart*. Durante esta fase, o estágio *retreat* corresponde ao afastamento da mão em relação ao objeto anteriormente manipulado (exemplo ilustrado na figura 5.4c).



**Figura 5.4:** Ilustração dos diferentes estágios de um movimento *place*. A área sinalizada a castanho representa ao tampo da mesa, no qual se pretende colocar o objeto - cilindro amarelo. Durante o estágio *plan* (a) é alcançada uma determinada posição - círculo verde - estabelecida nas proximidades da posição final desejada para o objeto. Esta última posição é então alcançada através do deslocamento da mão ao longo do eixo  $z$ , realizado durante o estágio *approach* (b). Posteriormente, ocorre a abertura da mão do manipulador, iniciando-se o seu afastamento - ao longo do eixo  $x$  - até à posição final especificada para o estágio *retreat* (c).

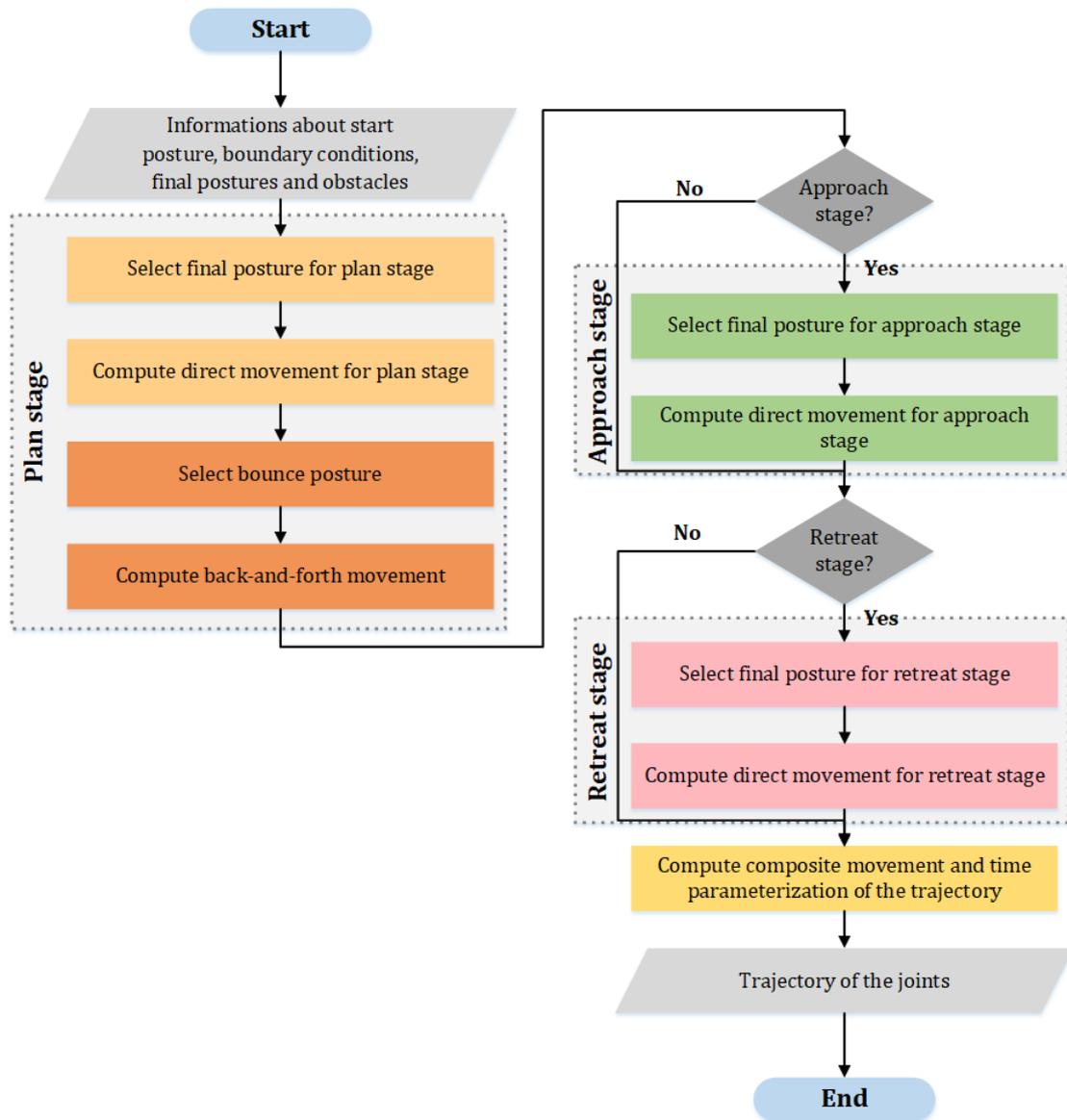
### 5.3 Estratégia de Planeamento

A estratégia de planeamento utilizada na presente dissertação, tal como referido anteriormente, baseia-se nas características dos movimentos dos membros superiores humanos, em particular no modelo proposto por Rosenbaum et al. (2001) e Vaughan et al. (2006) - o *The Posture-based motion planning model* (mais informações na secção 3.2.2). Como se pode observar no fluxograma da figura 5.5, o movimento a executar é planeado considerando os diferentes estágios introduzidos na secção anterior. De realçar que todos os movimentos são constituídos pelo estágio *plan*. No entanto, os movimentos *pick-and-place* podem também englobar os estágios *approach* e *retreat*, dependendo da tarefa a ser executada e das configurações especificadas pelo utilizador.

Numa fase inicial do processo de planeamento de movimentos são obtidas informações sobre o manipulador, o espaço de trabalho e a tarefa a ser executada. Essencialmente, estas informações englobam: a postura inicial da mão e do braço do manipulador, os valores iniciais e finais para a velocidade e aceleração das juntas, a postura dos obstáculos no espaço de trabalho, a posição final de cada estágio do movimento e no caso específico dos movimentos *pick-and-place*, o tipo de *grip* a ser utilizado.

Em analogia ao que sucede no modelo apresentado por Rosenbaum et al. (2001), para o estágio *plan*, o processo de planeamento começa por selecionar a postura final mais adequada para a realização da tarefa. Esta metodologia processa-se através de um problema de otimização não-linear sujeito a restrições, no qual é selecionada a postura que apresentar o menor custo associado ao deslocamento das juntas. Posteriormente, após a seleção da postura final, o método utilizado determina o movimento direto a ser executado entre a posição inicial do manipulador e a posição final especificada para o estágio. Este movimento é definido com base no critério de minimização da variação da aceleração - na literatura, a variação da aceleração é denominada de *jerk* - considerando os limites máximos das juntas.

Com o objetivo de assegurar a geração de trajetórias livres de colisões, na estratégia de planeamento adotada, implementou-se o mecanismo de desvio de obstáculos proposto por Rosenbaum et al. (2001). Numa fase inicial e através de um processo similar ao utilizado para a postura final, este mecanismo seleciona a postura *bounce* mais adequada. Esta postura é definida como um sub-objetivo do movimento *back-and-forth*, somado à *posteriori* ao movimento direto anteriormente definido.



**Figura 5.5:** Fluxograma da estratégia de planeamento de movimentos.

Formalmente, como se pode observar no fluxograma da figura 5.5, o mecanismo de desvio de colisões encontra-se apenas implementado no estágio *plan*. O método proposto considera que os restantes estágios são executados em áreas livres de colisões, estabelecidas nas proximidades das posições a alcançar. Deste modo, o utilizador pode seleccionar a direção e a distância a percorrer durante a execução do estágio, sendo o movimento corretamente planeado se existir, pelo menos, um caminho livre de colisões.

O processo de planeamento, nos casos dos estágios *approach* e *retreat*, engloba então a seleção da postura final mais adequada e a determinação do movimento direto a executar.

As metodologias utilizadas no processo de seleção são similares às descritas anteriormente, contudo existem algumas particularidades associadas à determinação do movimento direto, essenciais para assegurar a fluidez da trajetória entre os diferentes estágios. Tal como referido na secção anterior, durante o estágio *approach* verifica-se uma redução constante da velocidade tangencial da mão, à medida que esta se aproxima da sua posição alvo. Desta forma, para garantir a fluidez dos movimentos é necessário que os valores da velocidade e da aceleração das juntas no seu início do referido estágio, coincidam com os valores verificados no final do estágio *plan*. O mesmo procedimento é executado para o estágio *retreat*, porém neste caso, os valores da velocidade e da aceleração das juntas no final do estágio deverão ser iguais ao definidos pelo utilizador para o início do movimento do manipulador.

Com a definição dos movimentos a realizar durante a execução da tarefa proposta, na última fase do planeamento é determinado o movimento composto e processada a parametrização temporal de cada estágio. Este último procedimento é essencial para garantir que os limites máximos das juntas do manipulador são respeitados, nomeadamente, os valores da velocidade e da aceleração angular.

Nos trabalhos anteriormente desenvolvidos, a estratégia de planeamento descrita foi apenas aplicada em plataformas robóticas antropomórficas (Bicho et al., 2011; Costa e Silva, 2011; Gulletta et al., 2015). Para proceder à sua validação no robô colaborativo Sawyer, a presente dissertação concentrou-se na generalização dos processos de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce*. Efetivamente, para ambos os manipuladores, a trajetória a executar é selecionada através do método desenvolvido por Costa e Silva (2011). Deste modo, nas próximas secções serão apenas descritos: (i) o processo de modelação do robô e dos objetos existentes no espaço de trabalho (na secção 5.4) e (ii) os problemas de otimização não-lineares sujeitos a restrições (na secção 5.5).

## 5.4 Modelação do Robô e dos Objetos Existentes no Espaço de Trabalho

Nos problemas de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce*, serão impostas restrições para prevenir que o braço do robô colida com o seu próprio corpo ou com os obstáculos presentes no espaço de trabalho. Para evitar colisões, numa primeira fase, é necessário definir o modo como o método de planeamento de movimentos interpreta o

cenário, no qual será executada a tarefa. Nas próximas secções serão descritos os modelos utilizados para representar o robô - em particular, o seu corpo, braço e mão - e os objetos existentes nos diferentes cenários de aplicação.

### 5.4.1 Modelo do Corpo do Robô

No trabalho desenvolvido por Costa e Silva (2011), para garantir a integridade da plataforma robótica durante o planeamento da trajetória, a autora considera que o corpo do robô antropomórfico ARoS é representado por um cilindro elíptico. Esta superfície quádrlica é obtida através da equação (5.1), na qual  $x_0$  e  $y_0$  representam a posição inicial do robô e  $a, b \in \mathfrak{R}^+$  correspondem às dimensões do seu corpo nos eixos  $x$  e  $y$ .

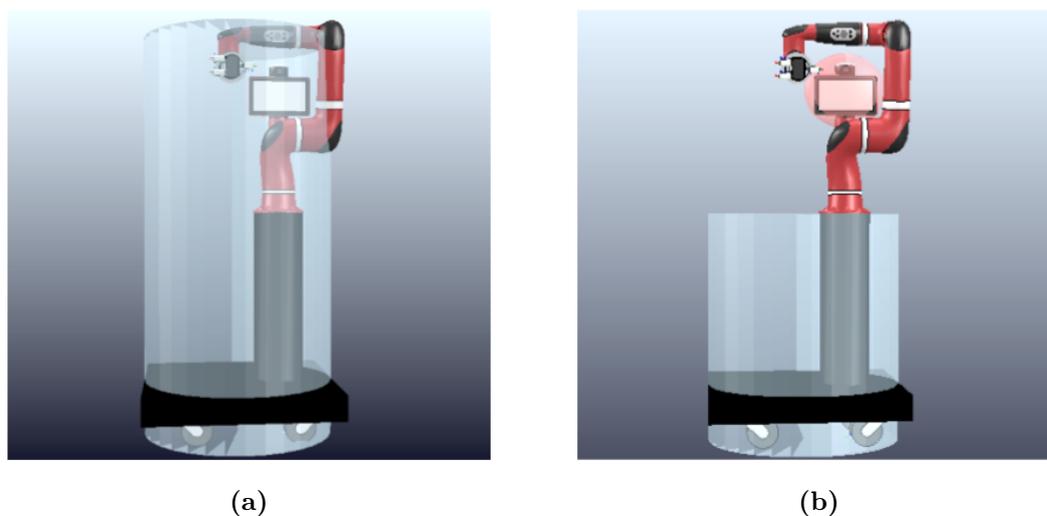
$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1 \quad (5.1)$$

A utilização do modelo proposto, na realidade, é apenas viável em plataformas robóticas em que o braço seja perpendicular ao corpo. Como se pode observar na equação (5.1), a formula matemática do cilindro elíptico não considera a dimensão do corpo no eixo  $z$ . Desta forma, esta superfície quádrlica não pode ser utilizada, por exemplo, para representar o corpo da plataforma robótica Sawyer. Fisicamente, o corpo deste robô é apenas constituído pelo pedestal, no entanto, a sua modelação através de um cilindro elíptico englobaria parte do braço (na figura 5.6a).

Para solucionar o problema referido anteriormente, na presente dissertação optou-se por modelar o corpo do robô através de uma superelipsoide. Esta superfície superquádrlica é descrita pela equação (5.2), em que  $a, b, c \in \mathfrak{R}^+$  correspondem às dimensões do corpo nos eixos  $x, y$  e  $z$ . Os parâmetros  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in \mathfrak{R}^+$  determinam a forma da superelipsoide nas secções de intersecção perpendiculares e paralelas ao plano  $xy$ .

$$\left(\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} + \left(\frac{y}{b}\right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}}\right)^{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} + \left(\frac{z}{c}\right)^{\frac{2}{\varepsilon_1}} \leq 1 \quad (5.2)$$

Numa primeira fase, para representar - de maneira aproximada - o corpo do robô através de uma superelipsoide, é necessário definir os valores dos parâmetros  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ . Tendo em conta os diversos tipos de manipuladores existentes no mercado e o trabalho desenvolvido por Costa e Silva (2011), na presente dissertação considera-se que  $\varepsilon_1 = 0,1$  e  $\varepsilon_2 = 1$ . Como se pode observar na figura 5.6b, o corpo do Sawyer continua a ser representado por um



**Figura 5.6:** O corpo do robô colaborativo Sawyer é apenas constituído pelo pedestal. A sua representação através de um cilindro elíptico (a) - a azul - englobaria parte do braço do manipulador. Para solucionar este problema, na presente dissertação (b), o corpo do robô é modelado através de uma superelipsoide - a azul - em que  $\varepsilon_1 = 0,1$  e  $\varepsilon_2 = 1$ . A cabeça do robô é considerada um objeto a evitar, sendo representada por uma elipsoide - a vermelho.

cilindro elíptico, sendo neste caso considerada a sua dimensão no eixo  $z$ .

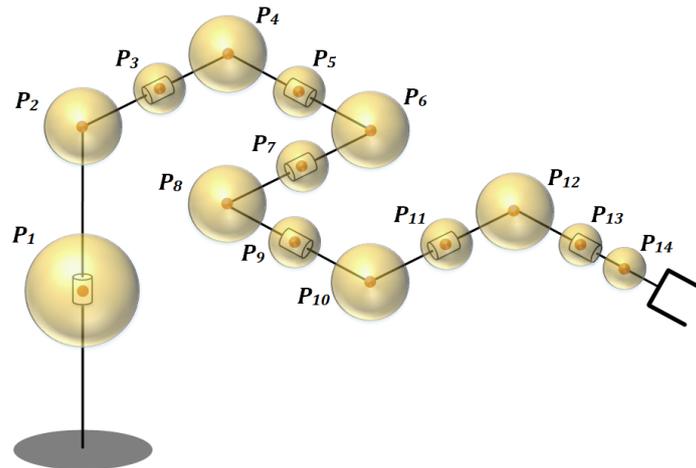
Ao contrário do que se verificava no modelo proposto anteriormente, neste contexto, a representação do corpo não engloba a cabeça da plataforma robótica. Desta forma, para prevenir colisões, esta é considerada um objeto a evitar durante a geração da trajetória. Na secção 5.4.4 será explicado o modelo utilizado para definir a cabeça do robô e os diversos objetos existentes no espaço de trabalho.

#### 5.4.2 Modelo do Braço do Robô

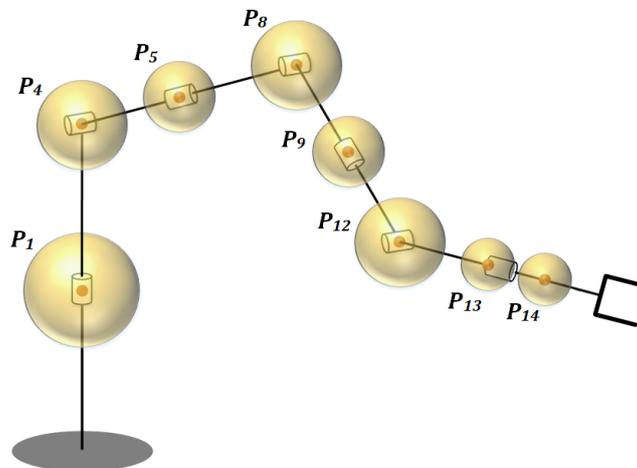
Nos problemas de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce*, o braço do robô é representado por um conjunto de esferas com tamanho variável. Estas esferas correspondem ao centro dos pontos do manipulador que se encontram mais expostos a colisões, sendo estes obtidos através da derivação da cinemática direta.

O número de esferas necessárias para modelar um manipulador depende, essencialmente, da sua tipologia e das dimensões dos seus segmentos. O robô colaborativo Sawyer, por exemplo, apresenta uma das estruturas mais complexas, em consequência da existência de *offsets* nas juntas do ombro ( $\theta_2$ ), cotovelo ( $\theta_4$ ) e pulso ( $\theta_6$ ). Como se pode observar

na figura 5.7a, o braço de um manipulador com estas características pode, dependendo das dimensões dos seus segmentos, ser representado por um conjunto máximo de 14 esferas. Tal como referido anteriormente, estas esferas correspondem ao centro dos pontos do manipulador que se encontram mais expostos a colisões, sendo estes determinados por intermédio das equações descritas na tabela 5.1 - consultar a secção 4.2.2.1.



(a) Manipulador com *offsets* nas juntas do ombro ( $\theta_2$ ), cotovelo ( $\theta_4$ ) e pulso ( $\theta_6$ )



(b) Manipulador sem *offsets*

**Figura 5.7:** O braço de um manipulador com *offsets* nas juntas do ombro ( $\theta_2$ ), cotovelo ( $\theta_4$ ) e pulso ( $\theta_6$ ), pode ser representado, no máximo, por um conjunto de 14 esferas (a). O modelo de um manipulador sem *offsets*, dependendo do tamanho dos seus segmentos, poderá englobar um conjunto máximo de 8 esferas<sup>1</sup>(b).

<sup>1</sup>A nomenclatura estabelecida para o manipulador sem *offsets* baseia-se na descrita na tabela 5.1, com exceção das esferas  $P_1$ ,  $P_5$  e  $P_9$  que correspondem aos pontos médios definidos entre: (i) a base e o ombro, (ii) o ombro e o cotovelo e (iii) o cotovelo e o pulso.

**Tabela 5.1:** Pontos do braço definidos para um manipulador com *offsets* nas juntas do ombro ( $\theta_2$ ), cotovelo ( $\theta_4$ ) e pulso ( $\theta_6$ ), modelado por um conjunto máximo de 14 esferas.

Esfera	Ponto do Braço	Descrição
$P_1$	$\frac{P_{Base} + P_{S_{off}}}{2}$	Ponto médio entre a base e o <i>offset</i> do ombro
$P_2$	$P_{S_{off}}$	<i>Offset</i> do ombro
$P_3$	$\frac{P_{S_{off}} + P_S}{2}$	Ponto médio entre o <i>offset</i> do ombro e o ombro
$P_4$	$P_S$	Ombro
$P_5$	$\frac{P_S + P_{E_{off}}}{2}$	Ponto médio entre o ombro e o <i>offset</i> do cotovelo
$P_6$	$P_{E_{off}}$	<i>Offset</i> do cotovelo
$P_7$	$\frac{P_{E_{off}} + P_E}{2}$	Ponto médio entre o <i>offset</i> do cotovelo e o cotovelo
$P_8$	$P_E$	Cotovelo
$P_9$	$\frac{P_E + P_{W_{off}}}{2}$	Ponto médio entre o cotovelo e o <i>offset</i> do pulso
$P_{10}$	$P_{W_{off}}$	<i>Offset</i> do pulso
$P_{11}$	$\frac{P_{W_{off}} + P_W}{2}$	Ponto médio entre o <i>offset</i> do pulso e o pulso
$P_{12}$	$P_W$	Pulso
$P_{13}$	$P_W + 0,45 \times (P_H - P_W)$	Ponto entre o pulso e a palma da mão
$P_{14}$	$P_W + 0,75 \times (P_H - P_W)$	Ponto entre o pulso e a palma da mão

Os manipuladores sem *offsets*, pelo contrário, apresentam a tipologia mais simples, sendo o seu braço modelado por um conjunto máximo de 8 esferas (na figura 5.7b). Na realidade, este número depende dos tamanhos dos segmentos da plataforma robótica, variando entre 5 e 8. Esta discrepância relaciona-se com o facto do modelo do braço, em determinados manipuladores, não englobar a representação das esferas centradas nos pontos médios dos seus segmentos (esferas  $P_1$ ,  $P_5$  e  $P_9$ ).

Na presente dissertação, para generalizar o modelo proposto para todas as tipologias de manipuladores com 7-DOF's, os pontos mais expostos a colisões são determinados através

de um algoritmo baseado no parâmetro  $d_i$  da notação de Denavit-Hartenberg. Fundamentalmente, considera-se que um manipulador pode, no máximo, ser representado por um conjunto de 14 esferas, designadas de acordo com a nomenclatura descrita na tabela 5.1.

Como se pode observar no algoritmo 1, numa primeira fase, para determinar o modelo do braço são obtidos os tamanhos das esferas, definidos *à priori* pelo utilizador. Por intermédio do método proposto são indicadas as esferas necessárias para modelar o braço e a sua respetiva localização. Deste modo, o utilizador pode definir as dimensões das esferas assinaladas, em função das dimensões reais da plataforma robótica e do tipo de movimento a ser planeado.

---

**Algoritmo 1:** Parâmetros utilizados para determinar o modelo do braço do robô.

---

```

/* Get the size of the spheres */
 $S_{Rad}[14] \leftarrow getSpheresRadius()$ 

/* Get the DH parameters */
 $Arm_{DH}[7][4] \leftarrow getDHParams()$ 

/* Get the parameter  $d$  */
 $Arm_{DH\_d}[7] \leftarrow getDHParam_d(Arm_{DH})$ 

/* Get the transformation matrix of the arm base */
 $T_{WA} \leftarrow getTWorldToArm()$ 

/* Condition to create a sphere at the midpoint of a segment (in mm) */
 $d_{MaxLen} = 350$ 

```

---

Além dos tamanhos das esferas, são também obtidas informações relacionadas com o manipulador, nomeadamente: (i) os seus parâmetros de Denavit-Hartenberg e (ii) a matriz de transformação entre o sistema de coordenadas do mundo e a base do seu braço. Tendo em conta as dimensões das plataformas robóticas comercializadas para atividades industriais, é igualmente definida a condição utilizada para representar as esferas centradas nos pontos médios dos segmentos do manipulador -  $d_{MaxLen}$ . Efetivamente e a título de exemplo, nos manipuladores com *offset* na junta do ombro ( $\theta_2$ ), a esfera  $P_3$  é apenas representada se o segmento correspondente apresentar um comprimento superior a 350 mm.

Baseado nas informações anteriormente referidas, a modelação do braço processa-se em três etapas, nas quais são representados o ombro, o cotovelo e o pulso da plataforma robótica. Como se pode observar no algoritmo 2, a representação do ombro depende dos

valores do parâmetro  $d_i$ . Para os manipuladores com *offset* na junta  $\theta_2$  são consideradas as esferas  $P_2$  e  $P_4$ . No entanto, o modelo do braço de um manipulador com estas características, dependendo do tamanho dos seus segmentos, pode ainda englobar a representação das esferas  $P_1$  e  $P_3$ , centradas nos pontos médios definidos entre: (i) a base e o *offset* do ombro e (ii) o *offset* do ombro e o ombro. Em semelhança ao ilustrado na figura 5.7b, para os manipuladores sem *offset* na junta  $\theta_2$ , o modelo do braço pode incluir a representação das esferas  $P_1$  e  $P_4$ . Na realidade, a primeira esfera é apenas caso se verifique a condição imposta anteriormente.

---

**Algoritmo 2:** Representação do ombro do robô.
 

---

```

if  $Arm_{DH\_d}[2]! = 0$  then                                     /* Manipulator with shoulder offset */
  /* Create the sphere 2 */
   $P_{S_{off}} \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 1)$ 
   $createSphere(P_{S_{off}}, S_{Rad}[2])$ 

  /* Create the sphere 4 */
   $P_S \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 2)$ 
   $createSphere(P_{S_{off}}, S_{Rad}[4])$ 

  /* Create the sphere 1 */
  if  $Arm_{DH\_d}[1] \geq d_{MaxLen}$  then
     $P_{Base} \leftarrow getPosition(T_{WA})$ 
     $createSphere((P_{Base} + P_{S_{off}})/2, S_{Rad}[1])$ 
  end

  /* Create the sphere 3 */
  if  $Arm_{DH\_d}[2] \geq d_{MaxLen}$  then
     $createSphere((P_{S_{off}} + P_S)/2, S_{Rad}[3])$ 
  end
else                                                         /* Manipulator without shoulder offset */
  /* Create the sphere 4 */
   $P_S \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 2)$ 
   $createSphere(P_{S_{off}}, S_{Rad}[4])$ 

  /* Create the sphere 1 */
  if  $Arm_{DH\_d}[1] \geq d_{MaxLen}$  then
     $P_{Base} \leftarrow getPosition(T_{WA})$ 
     $createSphere((P_{Base} + P_S)/2, S_{Rad}[1])$ 
  end
end

```

---

Em relação à representação do cotovelo do manipulador, esta processa-se de forma similar à descrita para o ombro. Para os manipuladores com *offset* na junta  $\theta_4$ , o modelo do braço pode englobar a representação das esferas  $P_5$ ,  $P_6$ ,  $P_7$  e  $P_8$ . No entanto, como se pode observar no algoritmo 3, a modelação das esferas definidas nos pontos médios entre o ombro e o *offset* do cotovelo -  $P_5$  - e o *offset* do cotovelo e o cotovelo -  $P_7$  - depende dos tamanho dos segmentos do manipulador. Por sua vez, os manipuladores sem *offset* na junta  $\theta_4$  podem, no máximo, ser representados pelas esferas  $P_5$  e  $P_8$ , centras nos pontos definidos: (i) entre o ombro e o cotovelo e (ii) o cotovelo.

---

**Algoritmo 3:** Representação do cotovelo do robô.
 

---

```

if  $Arm_{DH\_d}[4]! = 0$  then                                     /* Manipulator with elbow offset */
  /* Create the sphere 6 */
   $P_{E_{off}} \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 3)$ 
   $createSphere(P_{E_{off}}, S_{Rad}[6])$ 

  /* Create the sphere 8 */
   $P_E \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 4)$ 
   $createSphere(P_E, S_{Rad}[8])$ 

  /* Create the sphere 5 */
  if  $Arm_{DH\_d}[3] \geq d_{MaxLen}$  then
    |  $createSphere((P_S + P_{E_{off}})/2, S_{Rad}[5])$ 
  end

  /* Create the sphere 7 */
  if  $Arm_{DH\_d}[4] \geq d_{MaxLen}$  then
    |  $createSphere((P_{E_{off}} + P_E)/2, S_{Rad}[7])$ 
  end
else                                                         /* Manipulator without elbow offset */
  /* Create the sphere 8 */
   $P_E \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 4)$ 
   $createSphere(P_E, S_{Rad}[8])$ 

  /* Create the sphere 5 */
  if  $Arm_{DH\_d}[3] \geq d_{MaxLen}$  then
    |  $createSphere((P_S + P_E)/2, S_{Rad}[5])$ 
  end
end
  
```

---

Por último, no algoritmo 4 encontra-se ilustrado o processo de modelação do pulso da plataforma robótica. Como se pode observar na figura 5.7a, os braços dos manipuladores

com *offset* na junta  $\theta_6$ , dependendo do tamanho dos seus segmentos, podem ser representados pelas esferas  $P_9, P_{10}, P_{11}$  e  $P_{12}$ . Pelo contrário, os manipuladores sem *offset* na junta  $\theta_6$  podem, no máximo, englobar a modelação das esferas  $P_9$  e  $P_{12}$ . Independentemente da tipologia do manipulador, no modelo do braço é ainda incluída a representação das esferas  $P_{13}$  e  $P_{14}$ . Estas são definidas entre o pulso e a mão, sendo essenciais para assegurar que a extremidade da plataforma robótica não colide com os obstáculos presentes no espaço de trabalho.

---

**Algoritmo 4:** Representação do pulso do robô.
 

---

```

if  $Arm_{DH\_d}[6] \neq 0$  then                                     /* Manipulator with wrist offset */
  /* Create the sphere 10 */
   $P_{W_{off}} \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 5)$ 
   $createSphere(P_{W_{off}}, S_{Rad}[10])$ 

  /* Create the sphere 12 */
   $P_W \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 6)$ 
   $createSphere(P_W, S_{Rad}[12])$ 

  /* Create the sphere 9 */
  if  $Arm_{DH\_d}[5] \geq d_{MaxLen}$  then
    |  $createSphere((P_E + P_{W_{off}})/2, S_{Rad}[9])$ 
  end

  /* Create the sphere 11 */
  if  $Arm_{DH\_d}[6] \geq d_{MaxLen}$  then
    |  $createSphere((P_{W_{off}} + P_W)/2, S_{Rad}[11])$ 
  end
else                                                         /* Manipulator without wrist offset */
  /* Create the sphere 12 */
   $P_W \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 6)$ 
   $createSphere(P_W, S_{Rad}[12])$ 

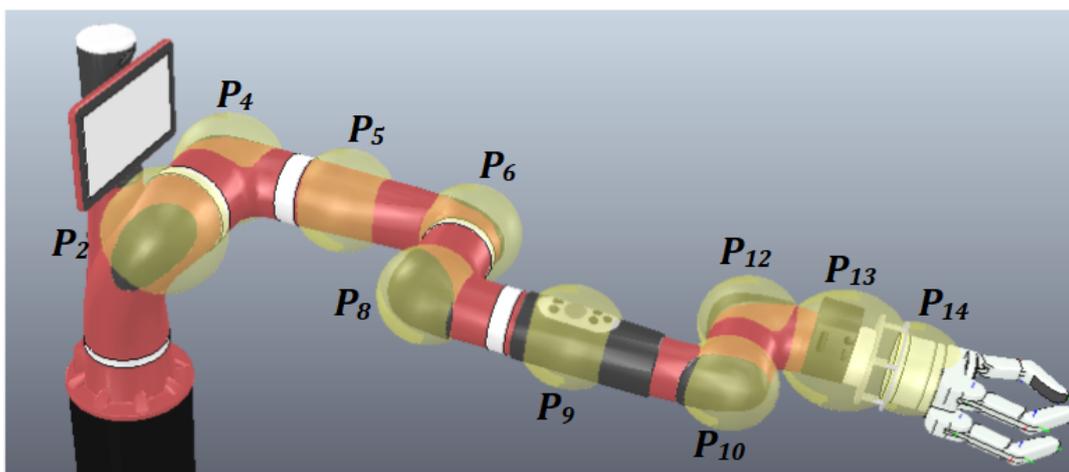
  /* Create the sphere 9 */
  if  $Arm_{DH\_d}[5] \geq d_{MaxLen}$  then
    |  $createSphere((P_E + P_W)/2, S_{Rad}[9])$ 
  end
end

/* For all manipulators are created the spheres 13 and 14 */
 $P_H \leftarrow getPosition(T_{WA}, Arm_{DH}, 7)$ 
 $createSphere(P_W + 0.45 \times (P_H - P_W), S_{Rad}[13])$ 
 $createSphere(P_W + 0.75 \times (P_H - P_W), S_{Rad}[14])$ 

```

---

Considerando o algoritmo proposto, a tipologia e as dimensões do robô colaborativo Sawyer, o seu braço pode então ser representado por um conjunto de 10 esferas. Como se pode observar na figura 5.8, efetivamente, são apenas modeladas as extremidades do manipulador que se encontram mais suscetíveis a colisões, não sendo replicada com precisão a sua geometria.

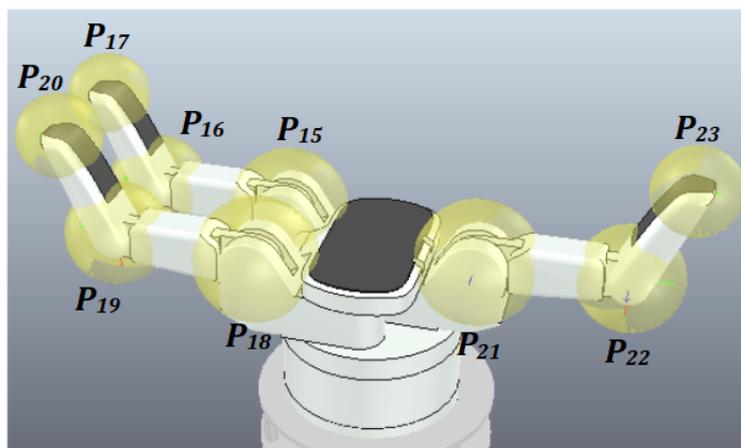


**Figura 5.8:** Modelo do braço da plataforma robótica Sawyer.

#### 5.4.3 Modelo da Mão Robótica *BH8-series*

Em semelhança ao descrito na secção anterior, na presente dissertação considera-se que a mão do robô é também representada por um conjunto de esferas, centradas nos pontos mais expostos a colisões. O tamanho destas esferas é igualmente selecionado pelo utilizador, variando em função das dimensões da mão robótica e do tipo de movimento a ser planeado.

No caso específico da mão *BH8-series* - comum a todos os manipuladores validados com o método de planeamento de movimento proposto - como se pode observar na figura 5.9 e tendo em conta o trabalho desenvolvido por Costa e Silva (2011), esta pode ser representada por um conjunto de 9 esferas. Estas esferas correspondem ao centro dos pontos definidos nas falanges e nas extremidades dos dedos, sendo estes obtidos através da derivação da cinemática direta, nomeadamente, por intermédio das equações descritas na tabela 5.1 - consultar a secção 4.2.3.1.



**Figura 5.9:** Modelo da mão robótica *BH8-series*.

**Tabela 5.2:** Pontos mais expostos a colisões, definidos para a mão robótica *BH8-series*.

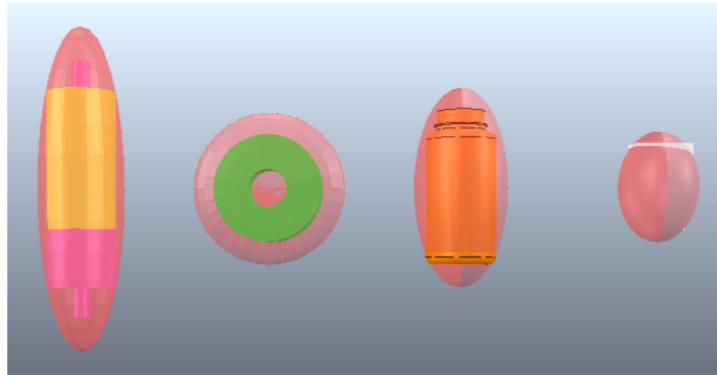
Esfera	Ponto do Braço	Descrição
$P_{15}$	$P_{F_{1,1}}$	Falange proximal do dedo F1
$P_{16}$	$P_{F_{1,2}}$	Falange média do dedo F1
$P_{17}$	$P_{F_{1,tip}}$	Extremidade do dedo F1
$P_{18}$	$P_{F_{2,1}}$	Falange proximal do dedo F2
$P_{19}$	$P_{F_{2,2}}$	Falange média do dedo F2
$P_{20}$	$P_{F_{2,tip}}$	Extremidade do dedo F2
$P_{21}$	$P_{F_{3,1}}$	Falange proximal do dedo F3
$P_{22}$	$P_{F_{3,2}}$	Falange média do dedo F3
$P_{23}$	$P_{F_{3,tip}}$	Extremidade do dedo F3

#### 5.4.4 Modelo dos Objetos

Nos problemas de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce*, os objetos existentes no espaço de trabalho do robô são representados por elipsoides, como se pode observar nos exemplos ilustrados na figura 5.10. Estas superfícies quádricas são obtidas através da equação (5.3), em que  $a, b, c \in \mathbb{R}^+$  correspondem às dimensões dos objetos

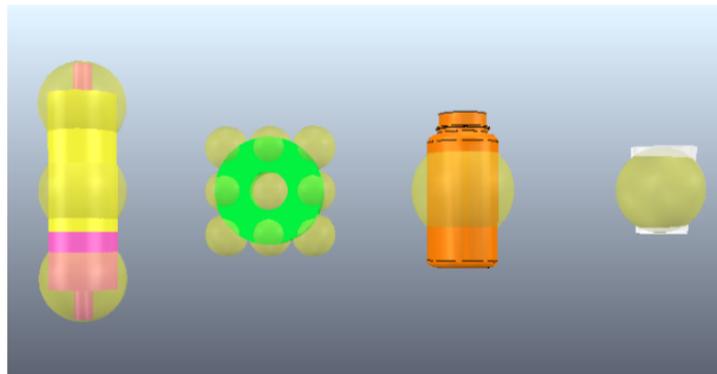
nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , multiplicadas por um fator de acréscimo de 30%. A aplicação desta metodologia permite obter uma representação mais aproximada dos objetos, garantindo o planeamento de trajetórias livres de colisões.

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (5.3)$$



**Figura 5.10:** Os objetos existentes no espaço de trabalho do robô - não utilizados durante a realização da tarefa proposta - são representados por elipsoides - a vermelho.

Na realidade, o processo de modelação descrito é apenas aplicado nos objetos que não são utilizados durante a realização da tarefa proposta. Na fase *manipulation*, como objeto a transportar se encontra anexado à extremidade do robô, nos problemas de otimização considera-se que este é representado por um conjunto de esferas (na figura 5.11). Formalmente, o número de esferas necessárias para modelar o objeto é determinado através de um algoritmo baseado nas dimensões do seus eixos.



**Figura 5.11:** Durante a fase *manipulation*, o objeto a transportar é representado por um conjunto de esferas - a amarelo.

## 5.5 Problemas de Otimização

Nas próximas secções serão matematicamente formalizados os problemas de seleção da postura final (na secção 5.5.1) e de seleção da postura *bounce* (na secção 5.5.2). Para cada problema de otimização serão descritas, em detalhe, as diversas restrições aplicadas.

### 5.5.1 Seleção da Postura Final

A postura final mais adequada -  $\boldsymbol{\theta}_f$  - para a realização de uma tarefa, é selecionada a partir de um conjunto de posturas admissíveis -  $\Theta \subset \mathfrak{R}^{11}$  - que: (i) possibilitem alcançar uma determinada posição ou agarrar um dado objeto, utilizando o tipo de *gripper* estabelecido *à priori* -  $\boldsymbol{\theta}_{h,f} = (\theta_{8,f}, \dots, \theta_{11,f})^T$  - e (ii) minimizem o custo associado ao deslocamento das juntas, desde a postura inicial -  $\boldsymbol{\theta}_{a,0} = (\theta_{1,0}, \dots, \theta_{7,0})^T$  - até à postura final do manipulador -  $\boldsymbol{\theta}_{a,f} = (\theta_{1,f}, \dots, \theta_{7,f})^T$ .

Numa primeira fase, considerando o tipo de *gripper* selecionado pelo utilizador e o tamanho do objeto a ser transportado, o método proposto começa por determinar a postura final da mão do manipulador -  $\boldsymbol{\theta}_{h,f}$ . Os valores das juntas dos dedos são obtidos através da resolução da equação (4.19), na qual a distância  $d_{FF}$  corresponde ao tamanho do objeto ao longo da direção do eixo coordenado  $\hat{y}_7$  (mais detalhes em Costa e Silva (2011)).

A seleção da postura final do braço do manipulador -  $\boldsymbol{\theta}_{a,f}$  - por sua vez, processa-se através de um problema de otimização não-linear sujeito a restrições. Tal como referido anteriormente, a postura final é determinada com base no custo associado ao deslocamento das juntas, desde a postura inicial -  $\boldsymbol{\theta}_{a,0}$  - até à postura final do manipulador -  $\boldsymbol{\theta}_{a,f}$ . Este custo pode ser obtido através da equação (5.4), considerando que a trajetória é definida pelo princípio da minimização da variação da aceleração.

$$C(\boldsymbol{\theta}_{a,f}) = \frac{360}{T^5} \sum_{k=1}^7 (\theta_{k,0} - \theta_{k,f})^2 \quad (5.4)$$

No entanto, segundo Rosenbaum et al. (2001), as juntas podem apresentar diferentes fatores de custo, sendo a sua contribuição para a seleção da postura final variável, de acordo com as especificações previamente definidas pelo utilizador. Com base neste princípio, Costa e Silva (2011) propôs que a função de custo, utilizada para determinar a postura final mais adequada, fosse definida pela equação (5.5). Nesta equação, o parâmetro  $\lambda_k \geq 0$

corresponde ao fator de custo associado a cada junta do manipulador.

$$C(\boldsymbol{\theta}_{a,f}) = \sum_{k=1}^7 \lambda_k (\theta_{k,0} - \theta_{k,f})^2, \lambda_k \geq 0 \quad (5.5)$$

Formalmente, a postura final do braço é então determinada através da função objetivo definida pela equação (5.6), sendo impostas as restrições representadas pelas equações (5.7) - (5.11). Nos próximos tópicos serão descritas, em detalhe, as restrições aplicadas.

$$\min_{\boldsymbol{\theta}_{a,f} \in \mathbb{R}^7} \sum_{k=1}^7 \lambda_k (\theta_{k,0} - \theta_{k,f})^2, \lambda_k \geq 0 \quad (5.6)$$

$$s.t. \quad h_{tar_1}(\boldsymbol{\theta}_f; \mathbf{P}_{tar}) = 0 \quad (5.7)$$

$$h_{tar_2}(\boldsymbol{\theta}_f; \mathbf{O}_{tar}) = 0 \quad (5.8)$$

$$h_{obs_1}(\boldsymbol{\theta}_f) \geq 0 \quad (5.9)$$

$$h_{obs_2}(\boldsymbol{\theta}_f; \zeta_{obs}) \geq 0 \quad (5.10)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{a,m} \leq \boldsymbol{\theta}_{a,f} \leq \boldsymbol{\theta}_{a,M} \quad (5.11)$$

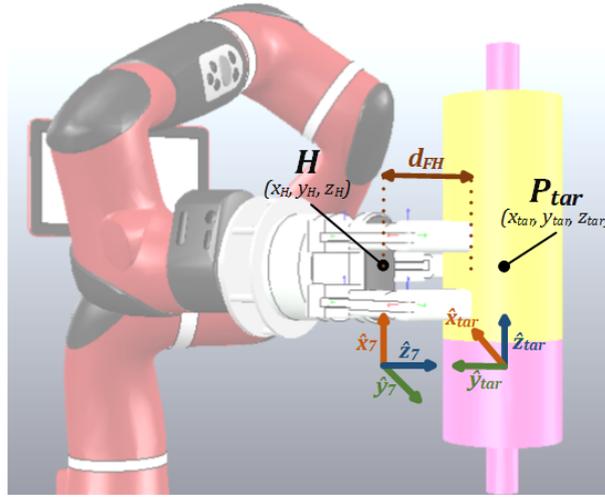
### • Restrição 1

A restrição não-linear de igualdade definida pela equação (5.7), estabelece que a posição final da mão do manipulador, em relação ao objeto-alvo, é determinada em função da distância  $d_{FH}$ . Em concreto, esta restrição é imposta através da equação (5.12), em que  $\mathbf{P}_H(\boldsymbol{\theta}_{a,f})$ ,  $\hat{z}_7(\boldsymbol{\theta}_{a,f})$  e  $\mathbf{P}_{tar}$  correspondem, respetivamente e como se pode observar na figura 5.12: (i) à posição final do centro da palma da mão, (ii) à rotação da mão em torno do eixo  $z$  e (iii) à posição do centro do objeto.

$$h_{tar_1}(\boldsymbol{\theta}_{a,f}) = \|\mathbf{P}_H(\boldsymbol{\theta}_{a,f}) + d_{FH} \hat{z}_7(\boldsymbol{\theta}_{a,f}) - \mathbf{P}_{tar}\|^2 \quad (5.12)$$

### • Restrição 2

A restrição não-linear de igualdade definida pela equação (5.8), em semelhança à restrição anteriormente abordada, estabelece a relação entre a orientação final da mão do manipulador e a orientação do objeto-alvo -  $\mathbf{O}_{tar} = (\hat{x}_{tar}, \hat{y}_{tar}, \hat{z}_{tar})$ . No contexto do presente problema de otimização, esta relação é derivada por intermédio da equação (5.13), na qual a rotação da mão em torno do eixo  $z$  é automaticamente determinada, com base



**Figura 5.12:** As restrições não-lineares definidas pelas equações (5.7) e (5.8), estabelecem a relação entre a postura final da mão do manipulador e a postura do objeto-alvo. De realçar que a distância  $d_{FH}$  é obtida através da equação (4.20), com base nos valores determinados para cada uma das juntas dos dedos.

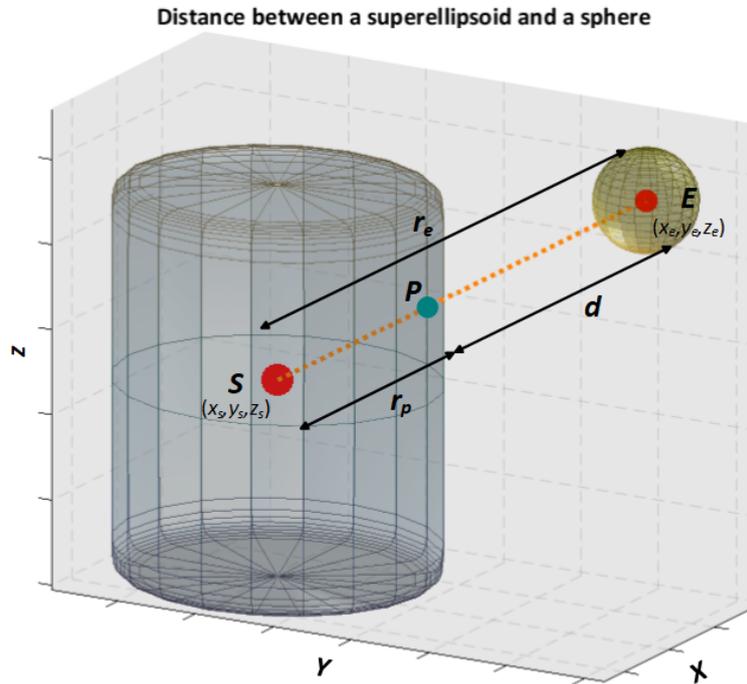
na restrição imposta nos eixos coordenados  $\hat{x}_7(\theta_{a,f})$  e  $\hat{y}_7(\theta_{a,f})$ .

$$h_{tar_2}(\theta_{a,f}) = \|\hat{x}_7(\theta_{a,f}) - \hat{x}_{tar}\|^2 + \|\hat{y}_7(\theta_{a,f}) - \hat{y}_{tar}\|^2 \quad (5.13)$$

### • Restrição 3

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.9), previne a existência de colisões entre o braço e o corpo do robô. Tal como referido nas secções anteriores, nos problemas de otimização considera-se que o braço da plataforma robótica é representado por um conjunto de esferas com tamanho variável, enquanto o seu corpo é modelado através de uma superelipsoide. Como se pode observar na figura 5.13, neste caso específico, para prevenir a ocorrência de colisões é necessário garantir que: (i) os centros das esferas - o ponto  $E$  - que modelam o braço do manipulador, se encontram no exterior da superelipsoide e (ii) a distância euclidiana -  $d$  - entre a superelipsoide - ponto  $P$  - e os centros das esferas é superior aos raios, previamente, especificados pelo utilizador.

A distância euclidiana pode, tal como se encontra representado na equação (5.14), ser obtida através da diferença entre os parâmetros  $r_e$  e  $r_p$ . Estes correspondem, como se pode observar na figura anteriormente referida, às distancias estabelecidas entre: (i) o centro da superelipsoide - ponto  $S$  - e o centro da esfera e (ii) o centro da superelipsoide e o ponto



**Figura 5.13:** O braço do robô é representado por um conjunto de esferas - exemplo representado a amarelo e centrado no ponto  $E$  - enquanto o seu corpo é modelado por uma superelipsoide - representada a azul e centrada no ponto  $S$ . Para prevenir a existência de colisões entre as duas superfícies é necessário assegurar que: (i) o ponto  $E$  se encontra no exterior da superelipsoide e (ii) a distância euclidiana  $d$  entre os pontos  $P$  e  $E$  é superior ao raio da esfera.

da sua superfície mais próximo da esfera - ponto  $P$ .

$$d = |r_e - r_p| \quad (5.14)$$

Considerando que a posição do ponto  $P$  é derivada da multiplicação do escalar  $\beta$  pela posição do centro da esfera -  $P = (\beta x_e, \beta y_e, \beta z_e)$  - e tendo em conta que este se encontra na superfície da superelipsoide, matematicamente, o ponto  $P$  é definido através da equação (5.15) - para mais informações consultar a secção 5.4.1.

$$F(\beta x_e, \beta y_e, \beta z_e) = \left( \left( \frac{\beta x_e}{a} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} + \left( \frac{\beta y_e}{b} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} \right)^{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} + \left( \frac{\beta z_e}{c} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_1}} = 1 \quad (5.15)$$

Com base na equação anteriormente referida, concluí-se que  $\beta = F(x_e, y_e, z_e)^{-\frac{\varepsilon_1}{2}}$ , em que  $F(x_e, y_e, z_e)$  corresponde à função designada de *inside-outside*, baseada na fórmula ma-

temática introduzida na secção 5.4.1 e utilizada para verificar a posição de um determinado ponto, em relação à superelipsoide. Deste modo e tendo em conta as observações descritas, alternativamente, a distância euclidiana entre a superelipsoide e o centro da esfera pode ser determinada através da equação (5.16).

$$d = |r_e| \left| 1 - F(x_e, y_e, z_e)^{\frac{-e_1}{2}} \right| \quad (5.16)$$

Efetivamente, neste caso específico, a função *inside-outside* permite verificar se o centro de uma determinada esfera -  $P_e = (x_e, y_e, z_e)$  - se encontra na superfície -  $F(x_e, y_e, z_e) = 1$  - no interior -  $F(x_e, y_e, z_e) < 1$  - ou no exterior -  $F(x_e, y_e, z_e) > 1$  - da superelipsoide. Contudo e como se pode observar pela equação (5.15), esta função considera que os pontos  $(x_e, y_e, z_e)$  são definidos em relação ao sistema de coordenadas local  $(x_s, y_s, z_s)$ .

Desta forma, para representar a superfície superquádrica no sistema de coordenadas mundo  $(x_w, y_w, z_w)$  e por conseguinte, verificar a posição geral das esferas que modelam o robô, é necessário considerar a matriz de transformação homogénea  $\mathbf{T}$  (equação (5.17)). Em semelhança ao referido nas secções anteriores, esta matriz engloba a rotação  $(\phi, \psi, \theta)$  e translação  $(x, y, z)$  do centro da superelipsoide, em relação ao referencial especificado.

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ sendo } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_{\hat{x}_s} & o_{\hat{x}_s} & a_{\hat{x}_s} & p_{x_s} \\ n_{\hat{y}_s} & o_{\hat{y}_s} & a_{\hat{y}_s} & p_{y_s} \\ n_{\hat{z}_s} & o_{\hat{z}_s} & a_{\hat{z}_s} & p_{z_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Considerando que  $[x_s, y_s, z_s, 1]^T = \mathbf{T}^{-1}[x_w, y_w, z_w, 1]^T$ , um determinado ponto definido no sistema de coordenadas mundo  $(x_w, y_w, z_w)$  é obtido em relação ao referencial local  $(x_s, y_s, z_s)$ , através da expressão geral (5.18).

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{\hat{x}_s}x_w + n_{\hat{y}_s}y_w + n_{\hat{z}_s}z_w - p_{x_s}n_{\hat{x}_s} - p_{y_s}n_{\hat{y}_s} - p_{z_s}n_{\hat{z}_s} \\ o_{\hat{x}_s}x_w + o_{\hat{y}_s}y_w + o_{\hat{z}_s}z_w - p_{x_s}o_{\hat{x}_s} - p_{y_s}o_{\hat{y}_s} - p_{z_s}o_{\hat{z}_s} \\ a_{\hat{x}_s}x_w + a_{\hat{y}_s}y_w + a_{\hat{z}_s}z_w - p_{x_s}a_{\hat{x}_s} - p_{y_s}a_{\hat{y}_s} - p_{z_s}a_{\hat{z}_s} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

A função *inside-outside* para uma superelipsoide na posição e orientação geral, por intermédio das expressões deduzidas anteriormente, é então definida pela equação (5.19).

$$F(x_w, y_w, z_w) = \left( \left( \frac{n_{\hat{x}_s} x_w + n_{\hat{y}_s} y_w + n_{\hat{z}_s} z_w - p_{x_s} n_{\hat{x}_s} - p_{y_s} n_{\hat{y}_s} - p_{z_s} n_{\hat{z}_s}}{a} \right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} + \left( \frac{o_{\hat{x}_s} x_w + o_{\hat{y}_s} y_w + o_{\hat{z}_s} z_w - p_{x_s} o_{\hat{x}_s} - p_{y_s} o_{\hat{y}_s} - p_{z_s} o_{\hat{z}_s}}{b} \right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} \right)^{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \left( \frac{a_{\hat{x}_s} x_w + a_{\hat{y}_s} y_w + a_{\hat{z}_s} z_w - p_{x_s} a_{\hat{x}_s} - p_{y_s} a_{\hat{y}_s} - p_{z_s} a_{\hat{z}_s}}{c} \right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} \quad (5.19)$$

Deste modo, tendo em conta as condições inicialmente descritas, para evitar colisões entre o braço e o corpo do robô é imposta a restrição definida pela equação (5.20). Basicamente, esta restrição permite determinar o valor da distância euclidiana (obtida através da equação (5.16)) e verificar se os centros das esferas que modelam o braço, se encontram no exterior da superfície superquádrica (através da expressão  $-sgn(1 - F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f)))$ ).

$$h_{obs_1}^k(\boldsymbol{\theta}_f) = -sgn \left( 1 - F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f)) \right) \left| r_k(\boldsymbol{\theta}_f) \right| \left| 1 - F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f))^{\frac{-\epsilon_1}{2}} \right| - S_{Rad_k} \quad (5.20)$$

No entanto, considerando que  $-sgn(1 - F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f))) = sgn(1 - F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f))^{\frac{-\epsilon_1}{2}})$ , matematicamente, a restrição imposta pode também ser estabelecida por intermédio da equação (5.21). Nesta equação, o vetor  $k = 1, \dots, n_S$  e os parâmetros  $r_k(\boldsymbol{\theta}_f)$ ,  $F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f))$  e  $S_{Rad_k}$  representam, respetivamente: (i) as esferas necessárias para modelar o braço e a mão do robô, (ii) a distância entre o centro de uma determinada esfera  $k$  -  $\mathbf{P}_k(\boldsymbol{\theta}_f) = (x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f))^T$  - e o centro da superelipsoide -  $\mathbf{P}_b = (x_b, y_b, z_b)^T$  - obtida através da equação (5.22), (iii) a função *inside-outside* definida pela equação (5.19) e (iv) o raio da esfera  $k$  estabelecido *à priori* pelo utilizador.

$$h_{obs_1}^k(\boldsymbol{\theta}_f) = \left| r_k(\boldsymbol{\theta}_f) \right| \left( 1 - F(x_k(\boldsymbol{\theta}_f), y_k(\boldsymbol{\theta}_f), z_k(\boldsymbol{\theta}_f))^{\frac{-\epsilon_1}{2}} \right) - S_{Rad_k} \quad (5.21)$$

$$\left| r_k(\boldsymbol{\theta}_f) \right| = \sqrt{(x_k(\boldsymbol{\theta}_f) - x_b)^2 + (y_k(\boldsymbol{\theta}_f) - y_b)^2 + (z_k(\boldsymbol{\theta}_f) - z_b)^2} \quad (5.22)$$

Alternativamente, as colisões entre o braço e o corpo do robô poderiam ser evitadas através da restrição definida pela equação (5.23). Para garantir que a distância euclidiana entre a superelipsoide e uma determinada esfera  $k$  é superior ao raio definido pelo utilizador, nesta metodologia considera-se a soma deste valor com as dimensões da superfície superquádrica nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Contudo, nos testes realizados ao método de planeamento de movimentos - descritos no capítulo 6 - concluí-se que esta expressão matemática apresenta um custo computacional, consideravelmente, superior ao obtido pela equação (5.21).

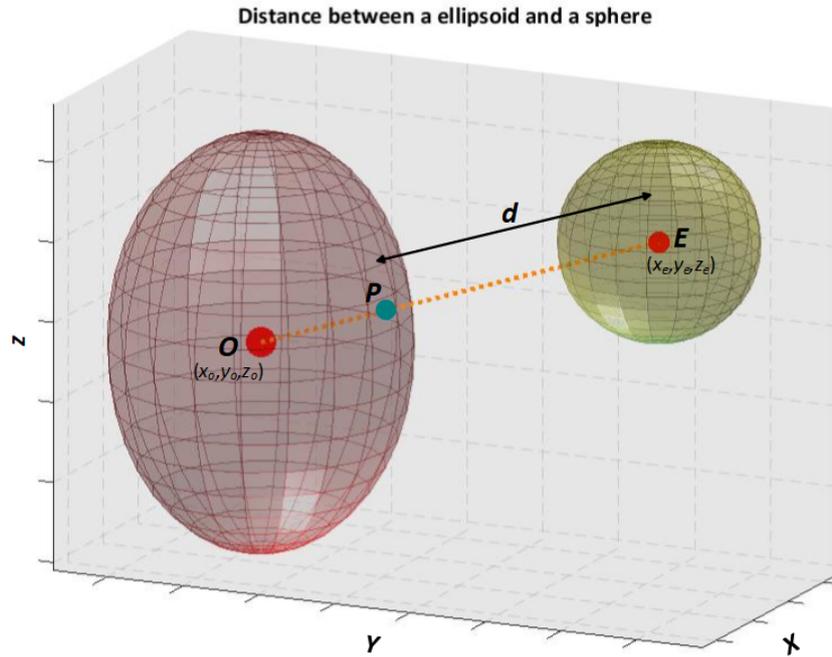
$$h_{obs_1}^k(\boldsymbol{\theta}_f) = \left( \left( \frac{n_{\hat{x}_s} x_k(\boldsymbol{\theta}_f) + n_{\hat{y}_s} y_k(\boldsymbol{\theta}_f) + n_{\hat{z}_s} z_k(\boldsymbol{\theta}_f) - x_s n_{\hat{x}_s} - y_s n_{\hat{y}_s} - z_s n_{\hat{z}_s}}{a_s + S_{Rad_k}} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} + \left( \frac{o_{\hat{x}_s} x_k(\boldsymbol{\theta}_f) + o_{\hat{y}_s} y_k(\boldsymbol{\theta}_f) + o_{\hat{z}_s} z_k(\boldsymbol{\theta}_f) - x_s o_{\hat{x}_s} - y_s o_{\hat{y}_s} - z_s o_{\hat{z}_s}}{b_s + S_{Rad_k}} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} \right)^{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} + \left( \frac{a_{\hat{x}_s} x_k(\boldsymbol{\theta}_f) + a_{\hat{y}_s} y_k(\boldsymbol{\theta}_f) + a_{\hat{z}_s} z_k(\boldsymbol{\theta}_f) - x_s a_{\hat{x}_s} - y_s a_{\hat{y}_s} - z_s a_{\hat{z}_s}}{c_s + S_{Rad_k}} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_1}} - 1 \quad (5.23)$$

#### • Restrição 4

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.10), previne a existência de colisões entre o braço do robô e os objetos presentes no espaço de trabalho. Tal como referido anteriormente, o braço do robô é modelado por um conjunto de esferas com tamanho variável, enquanto os objetos são representados por elipsoides. Como se pode observar na figura 5.14, para evitar colisões entre as duas superfícies é aplicada uma metodologia similar à descrita na secção anterior. No entanto, neste contexto, a restrição imposta é definida pela equação (5.24), na qual os vetores  $k = 1, \dots, n_S$  e  $l = 1, \dots, n_{Obj}$  correspondem, respetivamente: (i) ao conjunto de esferas necessárias para modelar o braço e mão do robô e (ii) aos objetos existentes no espaço de trabalho.

$$h_{obs_2}^{k,l}(\boldsymbol{\theta}_f) = (\mathbf{P}_k(\boldsymbol{\theta}_f) - \mathbf{P}_l)^T \mathbf{R}_l^T \mathbf{A}_{l,k} \mathbf{R}_l (\mathbf{P}_k(\boldsymbol{\theta}_f) - \mathbf{P}_l) - 1 \quad (5.24)$$

A restrição imposta pela equação anteriormente referida, na realidade, é derivada da expressão geral da elipsoide -  $(\mathbf{x} - \mathbf{v})^T \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{v}) = 1$  - permitindo verificar se o centro de uma determinada esfera  $k$  -  $\mathbf{P}_k(\boldsymbol{\theta}_f)$  - se encontra no seu exterior. Para esta restrição são



**Figura 5.14:** O braço do robô é representado por um conjunto de esferas - exemplo representado a amarelo e centrado no ponto  $E$  - enquanto os objetos existentes no espaço de trabalho são modelados por elipsoides - exemplo representado a vermelho e centrado no ponto  $O$ . Para prevenir a existência de colisões entre as duas superfícies é necessário assegurar que: (i) o ponto  $E$  se encontra no exterior da elipsoide e (ii) a distância euclidiana  $d$  entre os pontos  $P$  e  $E$  é superior ao raio da esfera.

considerados os valores dos parâmetros  $P_l$  e  $R_l$  que correspondem ao centro e à matriz de rotação de cada objeto (elipsoide  $l$ ). Além destes parâmetros, é também definida a matriz  $A_{l,k} = \text{diag}((a_l + S_{Rad_k} + \zeta_{obs})^{-2}, (b_l + S_{Rad_k} + \zeta_{obs})^{-2}, (c_l + S_{Rad_k} + \zeta_{obs})^{-2})$ , na qual  $a_l, b_l, c_l \in \mathbb{R}^+$ ,  $S_{Rad_k}$  e  $\zeta_{obs} > 0$  representam, respetivamente: (i) as dimensões da elipsoide  $l$  nos eixos  $x, y$  e  $z$ , (ii) o raio da esfera  $k$  estabelecido *à priori* pelo utilizador e (iii) a distância mínima de segurança definida entre o braço do robô e os objetos existentes no espaço de trabalho.

#### • Restrição 5

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.11), garante que a postura final do braço -  $\theta_{a,f}$  - respeita os limites mínimos -  $\theta_{a,m}$  - e máximos -  $\theta_{a,M}$  - estabelecidos para cada uma das juntas do manipulador.

### 5.5.2 Seleção da Postura *Bounce*

Em semelhança ao processo descrito na secção anterior, a postura *bounce* mais adequada -  $\theta_b$  - para a realização de uma determinada tarefa, é selecionada a partir de um conjunto de posturas admissíveis -  $\Theta \subset \mathbb{R}^{11}$  - que: (i) permitam executar um movimento livre de colisões, considerando os limites físicos do manipulador e (ii) minimizem o custo associado ao deslocamento das juntas, desde a postura inicial -  $\theta_{a,0} = (\theta_{1,0}, \dots, \theta_{11,0})^T$  - até à postura *bounce* -  $\theta_b = (\theta_{1,b}, \dots, \theta_{11,b})^T$ .

Formalmente, a função de custo utilizada para determinar a postura *bounce* mais adequada é definida pela equação (5.25), na qual os parâmetros  $n_j$  e  $\lambda_k \geq 0$  correspondem, respetivamente: (i) ao número de juntas estabelecidas através do processo de otimização e (ii) ao fator de custo associado a cada junta do manipulador.

$$C(\theta_b) = \sum_{k=1}^{n_j} \lambda_k (\theta_{k,0} - \theta_{k,b})^2, \lambda_k \geq 0 \quad (5.25)$$

Ao contrário do que se verifica no processo de seleção da postura final, o número de juntas envolvidas no presente problema de otimização, depende do tipo de movimento a ser planeado. Esta discrepância relaciona-se com o facto do processo de seleção, em alguns movimentos, não incluir a determinação dos valores das juntas da mão do manipulador. Efetivamente e a título de exemplo, no caso do movimento *move*, a postura *bounce* da mão -  $\theta_{h,b} = (\theta_{8,b}, \dots, \theta_{11,b})^T$  - é também determinada através do problema de otimização não-linear sujeito a restrições descrito *à posteriori*. Pelo contrário, durante o estágio *plan* do movimento *place*, como o objeto a transportar se encontrar anexado à mão do manipulador, considera-se que a sua postura *bounce* coincide com a verificada no instante inicial -  $\theta_{h,b} = \theta_{h,0} = (\theta_{8,0}, \dots, \theta_{11,0})^T (t = 0)$ .

Tal como referido nas secções anteriores, a seleção da postura *bounce* processa-se apenas durante o planeamento do estágio *plan*. A trajetória das juntas do manipulador no referido estágio -  $\mathcal{T}_{plan}(t)$  - é obtida através da sobreposição do movimento *back-and-forth* -  $\mathcal{T}_{plan}^{bk}(t)$  - e do movimento direto -  $\mathcal{T}_{plan}^{dir}(t)$ .

Em concreto, para formalizar o presente problema de otimização, considera-se que o tempo total da trajetória -  $t \in [0, T]$  - é discretizado num determinado número de *steps* -  $N_{steps}$  - definidos em intervalos fixos  $t_i = i\Delta$  (em que  $\Delta = \frac{T}{N_{steps}}$  é o tamanho do *step* e  $i = 0, \dots, N_{steps}$ ). Como se pode observar pela equação (5.26), o número de *steps* depende,

essencialmente, da diferença entre a postura inicial -  $\boldsymbol{\theta}_0$  - e a postura final do manipulador -  $\boldsymbol{\theta}_f$ . Nesta equação, os parâmetros  $N_m$  e  $N_M$  correspondem ao número mínimo e máximo de *steps* definidos pelo utilizador, enquanto  $\boldsymbol{\theta}_n$  e  $\boldsymbol{\theta}_M$  representam os limites mínimos e máximos das juntas do manipulador.

$$N_{steps} = \left\lceil N_m + (N_M - N_m) \frac{\|\boldsymbol{\theta}_f - \boldsymbol{\theta}_0\|}{\|\boldsymbol{\theta}_M - \boldsymbol{\theta}_n\|} \right\rceil \quad (5.26)$$

Desta forma e tendo em conta as observações referidas anteriormente, para cada instante  $t_i$  da trajetória das juntas do estágio *plan* -  $\mathcal{T}_{plan}(t_i)$  - a postura *bounce* do manipulador é determinada através da função objetivo definida pela equação (5.27), sendo impostas as restrições representadas pelas equações (5.28) - (5.32). Estas restrições serão descritas nos próximos tópicos.

$$\min_{\boldsymbol{\theta}_b \in \mathbb{R}^{n_j}} \sum_{k=1}^{n_j} \lambda_k (\theta_{k,0} - \theta_{k,b})^2, \lambda_k \geq 0 \quad (5.27)$$

$$s.t. \quad \boldsymbol{\theta}_m \leq \mathcal{T}_{plan}(t_i) \leq \boldsymbol{\theta}_M \quad (5.28)$$

$$h_{obs_{b_1}}(\mathcal{T}_{plan}(t_i)) \geq 0 \quad (5.29)$$

$$h_{obs_{b_2}}(\mathcal{T}_{plan}(t_i), \zeta_{obs_b}(t_i)) \geq 0 \quad (5.30)$$

$$h_{tar_b}(\mathcal{T}_{plan}(t_i), \zeta_{obs_b}(t_i)) \geq 0 \quad (5.31)$$

$$\boldsymbol{\theta}_m \leq \boldsymbol{\theta}_b \leq \boldsymbol{\theta}_M \quad (5.32)$$

### • Restrição 1

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.28), garante que a trajetória do manipulador -  $\mathcal{T}_{plan}(t_i)$  - para cada instante  $t_i$ , respeita os limites mínimos -  $\boldsymbol{\theta}_m$  - e máximos -  $\boldsymbol{\theta}_M$  - estabelecidos para cada uma das juntas do manipulador.

### • Restrição 2

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.29), permite para cada instante  $t_i$  da trajetória das juntas, prevenir a existência de colisões entre o braço e o corpo do robô. Em semelhança ao descrito na secção anterior, esta restrição é imposta através da equação (5.33), em que o vetor  $k = 1, \dots, n_s$  representa o conjunto de esferas -

centradas, em cada instante  $t_i$ , no ponto  $P_k(t_i) = (x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i))^T$  - necessárias para modelar o braço e a mão do robô. Os parâmetros  $r_k(t_i)$ ,  $F(x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i))$  e  $S_{Rad_k}$  representam, respetivamente: (i) a distância entre o centro de uma determinada esfera  $k$  e o centro da superelipsoide -  $P_b = (x_b, y_b, z_b)^T$  - obtida através da equação (5.34), (iii) a função *inside-outside* definida pela equação (5.19) e (iv) o raio da esfera  $k$  estabelecido *à priori* pelo utilizador.

$$h_{obs_1}^k(t_i) = |r_k(t_i)| \left( 1 - F(x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i))^{\frac{-e_1}{2}} \right) - S_{Rad_k} \quad (5.33)$$

$$|r_k(t_i)| = \sqrt{(x_k(t_i) - x_b)^2 + (y_k(t_i) - y_b)^2 + (z_k(t_i) - z_b)^2} \quad (5.34)$$

### • Restrição 3

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.30), permite para cada instante  $t_i$  da trajetória das juntas, prevenir a existência de colisões entre o braço do robô e os obstáculos presentes no espaço de trabalho. Em analogia ao descrito na secção 5.5.1, esta restrição é derivada da expressão geral da superfície que modela os obstáculos - a elipsoide - sendo imposta através da equação (5.35). Nesta equação, os vetores  $k = 1, \dots, n_S$  e  $l = 1, \dots, n_{Obj}$  correspondem, respetivamente: (i) às esferas necessárias para modelar o braço e a mão do robô - centradas, em cada instante  $t_i$ , no ponto  $P_k(t_i)$  - e (ii) às elipsoides - centradas no ponto  $P_l$  e com uma matriz de rotação  $R_l$  - utilizadas para representar os obstáculos existentes no espaço de trabalho. A matriz  $A_{l,k}(t_i) = \text{diag}((a_l + S_{Rad_k} + \zeta_{obs}(t_i))^{-2}, (b_l + S_{Rad_k} + \zeta_{obs}(t_i))^{-2}, (c_l + S_{Rad_k} + \zeta_{obs}(t_i))^{-2})$ , por sua vez, é definida por intermédio dos parâmetros  $a_l, b_l, c_l \in \mathfrak{R}^+$ ,  $S_{Rad_k}$  e  $\zeta_{obs}(t_i) > 0$ , sendo que estes representam: (i) as dimensões da elipsoide  $l$  nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , (ii) o raio da esfera  $k$  estabelecido *à priori* pelo utilizador e (iii) a distância mínima de segurança definida entre o braço do robô e os objetos existentes no espaço de trabalho - para cada instante  $t_i$ .

$$h_{obs_{b_2}}^{k,l}(t_i) = (P_k(t_i) - P_l)^T R_l^T A_{l,k}(t_i) R_l (P_k(t_i) - P_l) - 1 \quad (5.35)$$

### • Restrição 4

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.31), permite para cada instante  $t_i$  da trajetória das juntas dos movimentos *pick*, prevenir colisões entre o braço do

robô e o objeto a agarrar. Efetivamente, durante planeamento deste tipo de movimento, o objeto-alvo não é considerado um obstáculo, sendo no entanto, necessário assegurar que a extremidade do manipulador não colide com o mesmo. Por conseguinte, para solucionar este problema, no processo de seleção da postura *bounce* é imposta a restrição definida pela equação (5.36).

$$h_{tar_b}^k(t_i) = (\mathbf{P}_k(t_i) - \mathbf{P}_{obj})^T \mathbf{R}_{obj}^T \mathbf{A}_{obj,k}(t_i) \mathbf{R}_{obj} (\mathbf{P}_k(t_i) - \mathbf{P}_{obj}) - 1 \quad (5.36)$$

Em semelhança ao descrito no tópico anterior, a restrição aplicada é derivada da expressão geral da elipsoide -  $(\mathbf{x} - \mathbf{v})^T \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{v}) = 1$  - sendo o vetor  $k = 1, \dots, n_S$  utilizado para representar o conjunto de esferas necessárias para modelar o braço e a mão do robô - centradas, em cada instante  $t_i$ , no ponto  $\mathbf{P}_k(t_i)$ . A matriz  $\mathbf{A}_{obj,k}(t_i) = \text{diag}((a_{obj} + S_{Rad_k} + \zeta_{obj}(t_i))^{-2}, (b_{obj} + S_{Rad_k} + \zeta_{obj}(t_i))^{-2}, (c_{obj} + S_{Rad_k} + \zeta_{obj}(t_i))^{-2})$  é determinada através dos parâmetros  $a_{obj}, b_{obj}, c_{obj} \in \mathfrak{R}^+$ ,  $S_{Rad_k}$  e  $\zeta_{obj}(t_i) > 0$  que correspondem, respetivamente: (i) às dimensões do objeto-alvo - centrado no ponto  $\mathbf{P}_{obj}$  e com uma matriz de rotação  $\mathbf{R}_{obj}$  - nos eixos  $x, y$  e  $z$ , (ii) ao raio da esfera  $k$  estabelecido *à priori* pelo utilizador e (iii) à distância mínima de segurança definida entre o braço do robô e os objetos existentes no espaço de trabalho - para cada instante  $t_i$ .

#### • Restrição 5

A restrição não-linear de desigualdade definida pela equação (5.32), garante que a postura *bounce* -  $\boldsymbol{\theta}_b$  - respeita os limites mínimos -  $\boldsymbol{\theta}_m$  - e máximos -  $\boldsymbol{\theta}_M$  - estabelecidos para cada uma das juntas do manipulador.

## 5.6 Software de Otimização

Os processos de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce*, tal como referido nas secções anteriores, são considerados problemas de otimização não-lineares sujeitos a restrições. Na presente dissertação, estes problemas são codificados na linguagem de modelação AMPL (*A Modeling Programming Language*) e solucionados através do *solver* IPOPT (*Interior Point Optimizer*).

### 5.6.1 *A Modeling Programming Language (AMPL)*

AMPL é uma linguagem de modelação algébrica, desenvolvida para descrever e resolver problemas de otimização lineares e não-lineares. Projetada e implementada por Fourer et al. (1989), esta linguagem suporta diversos tipos de *solvers*, como por exemplo: o IPOPT, o KNITRO, o Gurobi, o CPLEX e o MINOS. O *solver* usado na determinação da solução ótima do problema é selecionado previamente pelo utilizador, podendo este definir também as opções relacionadas com o seu desempenho.

Devido à sua sintaxe bastante intuitiva, atualmente, a linguagem AMPL é a mais utilizada na resolução de problemas de otimização<sup>2</sup>. Na realidade, como os modelos matemáticos são escritos numa notação algébrica compacta e perceptível, facilmente, utilizadores sem conhecimentos de programação podem usufruir desta linguagem para a resolução dos seus problemas.

### 5.6.2 *Interior-Point Optimizer (IPOPT)*

O *solver* IPOPT consiste numa biblioteca de *software open-source*, utilizada para resolver problemas de otimização com diversas variáveis e restrições. Implementado em *C++* por Wächter & Biegler (2006), este tipo de *solver* permite determinar as soluções locais dos problemas de otimização, através de uma estratégia de procura designada de *Interior-Point Filter Line*.

Tal como referido secção anterior, atualmente, existem diversos tipos de *solvers* utilizados para resolver problemas de otimização lineares e não-lineares. Contudo e considerando o trabalho desenvolvido por Costa e Silva et al. (2011a) - no robô antropomórfico ARoS - no método de planeamento de movimentos proposto encontra-se apenas implementada ferramenta de otimização IPOPT. Efetivamente, nos testes realizados pelos autores comprovou-se que esta ferramenta apresenta custos computacionais inferiores ao obtidos pelos, por exemplo, *solvers* KNITRO, SNOPT e LOQO.

---

<sup>2</sup>Informação retirada do *site* <https://neos-server.org/>.



## Parte III

# Validação do Sistema de Planeamento de Movimentos



## Capítulo 6

---

# Planeamento de Movimentos em Cenários de Interação Humano-Robô

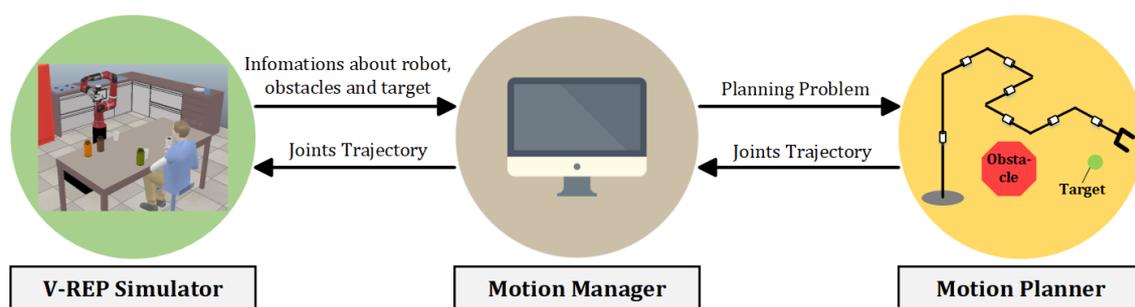
---

Para validar o método de planeamento de movimentos proposto, na presente dissertação será considerada a execução de duas tarefas de interação: (i) a montagem de um *Toy Vehicle* e (ii) a assistência a um humano com mobilidade reduzida. Neste capítulo será avaliado o desempenho do robô colaborativo Sawyer na execução das duas tarefas referidas anteriormente, sendo percebido o seu comportamento como: (i) parceiro robótico, em contextos similares às linhas de produção automática utilizadas na indústria e (ii) assistente robótico, em atividades do quotidiano direcionadas as indivíduos com deficiências cognitivas e/ou motoras.

Na secção 6.1 será descrito o processo de validação do método de planeamento de movimentos proposto, em ambiente de simulação. Posteriormente, na secção 6.2 serão apresentadas as métricas de avaliação, utilizadas para analisar a suavidade dos movimentos executados. Nas secções 6.3 e 6.4 serão, detalhadamente, explicadas as tarefas a serem realizadas pela plataforma robótica. Para cada tarefa será descrita a sequência de movimentos planeada por intermédio do método proposto e efetuada uma breve comparação com o desempenho obtido pelo robô antropomórfico ARoS, durante a execução da tarefa referida. Por último, na secção 6.5 serão analisados e discutidos os resultados obtidos.

## 6.1 Visão Geral

Para garantir a integridade da plataforma robótica e do espaço de trabalho envolvente, a validação do método de planeamento de movimentos proposto é, numa primeira fase, realizada em ambiente de simulação. Como se pode observar na figura 6.1, a execução das ações motoras é processada através de um conjunto de módulos de *software*, denominados de: (i) simulador **V-REP** (*Virtual Robot Experimental Platform*), (ii) *Motion Manager* e (iii) *Motion Planner*.



**Figura 6.1:** A validação do método de planeamento de movimentos proposto, em ambiente simulado, é processada através de três módulos de *software*, denominados de: (i) simulador **V-REP**, (ii) *Motion Manager* e (iii) *Motion Planner*.

A comunicação entre os diferentes módulos é realizada por intermédio da *framework open-source ROS* (*Robot Operating System* de Quigley et al. (2009)), sendo o módulo *Motion Manager* utilizado para aceder às informações dos cenários de aplicação, relacionadas com: (i) a plataforma robótica, (ii) os obstáculos presentes no espaço de trabalho e o (ii) objeto-alvo. Em concreto, o módulo referido possibilita ao utilizador definir as especificações do movimento a planear, nomeadamente: (i) as distâncias de segurança a manter em relação aos obstáculos, (ii) a direção e a distância a percorrer durante os estágios *approach* e *retreat*, (iii) a velocidade e a aceleração inicial de cada junta da plataforma robótica, entre outras.

Com base nas informações especificadas, o problema de planeamento é, em seguida, processado e enviado para o módulo *Motion Planner*. Este módulo engloba, na realidade, a implementação - em *C++* - do método de planeamento de movimentos proposto, retornando mediante a estratégia anteriormente descrita, a trajetória a ser executada pelas juntas do manipulador.

Posteriormente e tal como se encontra representado na figura 6.1, a trajetória das juntas é enviada para o simulador robótico **V-REP** (Rohmer et al., 2013), no qual são projetados os cenários de interação validados na presente dissertação: (i) a assemblagem de um *Toy Vehicle* e (ii) a assistência a um humano com mobilidade reduzida. Em semelhança ao referido anteriormente, esta comunicação é processada através da *framework* **ROS** que permite controlar, de modo individual, cada uma das juntas da plataforma robótica.

## 6.2 Métricas de Avaliação

Tal como referido nos capítulos anteriores, o principal objetivo da presente dissertação relaciona-se com o desenvolvimento de um método de planeamento de movimentos que permita dotar o robô colaborativo Sawyer, com a capacidade de alcançar, agarrar e manipular objetos, de forma similar à executada pelos humanos. A avaliação do desempenho do método proposto será processada com base num conjunto de métricas quantitativas, normalmente aplicadas em estudos do movimento do braço humano, realizados nas áreas da psicologia e da neurociência.

Em concreto, na validação dos cenários de interação humano-robô será apenas analisada a suavidade do movimento, no entanto, existem diversos trabalhos experimentais efetuados com pacientes com distúrbios motores - como o realizado por Chang et al. (2005) - que abrangem outras características, como por exemplo: a velocidade, a força exercida e a estratégia de controlo. Considerando os estudos realizados por Chang et al. (2008) e Aboelnasr et al. (2017), o nível de suavidade do movimento é quantificado através de duas métricas cinemáticas: (i) a pontuação normalizada da variação da aceleração (*Normalized Jerk Score* - **NJS**) e (ii) o número de unidades de movimento (*Number of Movement Units* - **NMU**).

No caso da métrica adimensional **NJS**, segundo Chang et al. (2007), quanto menor for o seu valor, maior será a suavidade e a precisão do movimento a executar. Em concreto, o autor refere que este valor pode ser determinado a partir da expressão matemática descrita na equação (6.1), na qual os parâmetros  $T$  e  $D$  representam o tempo total do movimento e a distância percorrida pela mão - centrada na posição  $P_H = (x_H, y_H, z_H)$  - durante a sua execução.

$$NJS = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{T^5}{D^2} \right) \int \left( \left( \frac{d^3 x_H}{dt^3} \right)^2 + \left( \frac{d^3 y_H}{dt^3} \right)^2 + \left( \frac{d^3 z_H}{dt^3} \right)^2 \right) dt} \quad (6.1)$$

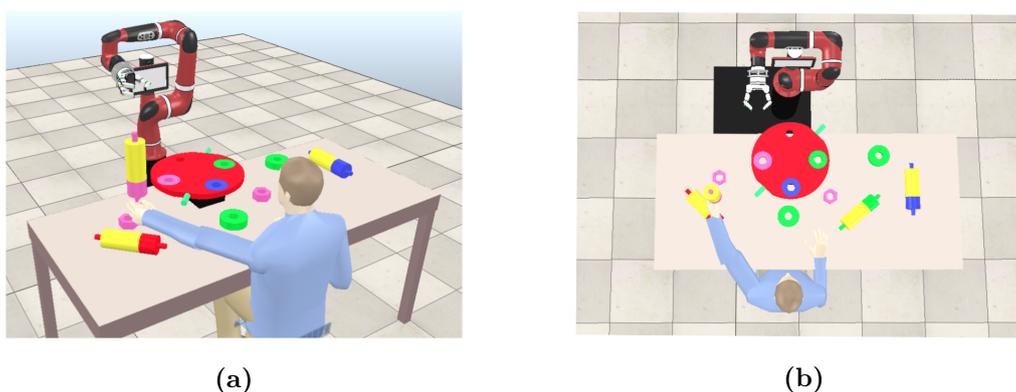
A métrica cinemática adimensional **NMU** apresenta um comportamento similar ao descrito anteriormente, verificando-se uma diminuição da suavidade do movimento com o aumento do seu valor (Chang et al., 2005). Tipicamente, os movimentos de alcance são caracterizados por uma única unidade de movimento, sendo este valor determinado com base na metodologia apresentada por Kamper et al. (2002) e Chang et al. (2005). Estes autores propõe que, numa primeira fase, seja processada a procura dos mínimos e máximos locais do perfil de velocidade da mão. Caso a velocidade entre o mínimo e o máximo adjacente seja superior o valor de *threshold* - 10% da velocidade máxima selecionada pelo utilizador - é considerada a existência de uma unidade de movimento.

### 6.3 Tarefa 1: Assemblagem de um *Toy Vehicle*

A validação do método de planeamento de movimentos proposto será realizada, numa primeira fase, num contexto similar às linhas de produção automática existentes no sector industrial. Neste cenário de interação pretende-se que a plataforma robótica coopere com o operador humano na construção de um *Toy Vehicle*, inspirado na estrutura mecânica dos robôs móveis disponíveis no Mar Lab.

Como se pode observar na figura 6.2, as peças que constituem o *Toy Vehicle* encontram-se dispostas numa mesa, colocada em frente do robô colaborativo Sawyer. Em concreto, a estrutura a construir é composta por uma base com quatro orifícios e dois eixos laterais, nos quais são respetivamente anexadas: (i) as colunas, em função da sua cor e (ii) as rodas, fixas por um conjunto de anilhas. De realçar que, algumas das peças referidas encontram-se fora espaço de trabalho do robô, sendo a sua manipulação apenas exequível com o auxílio do operador humano.

Nas próximas secções será descrita a tarefa a ser realizada pela plataforma robótica (na secção 6.3.1), sendo detalhadamente analisada a sequência de movimentos a executar, planeada através do método proposto na presente dissertação (na secção 6.3.2). Na secção 6.3.3 será realizada uma breve comparação entre os desempenhos obtidos pelos robôs Sawyer e ARoS, durante a execução da tarefa proposta, sendo consideradas: (i) as suas



**Figura 6.2:** Cenário de montagem de um *Toy Vehicle*, em ambiente de simulação.

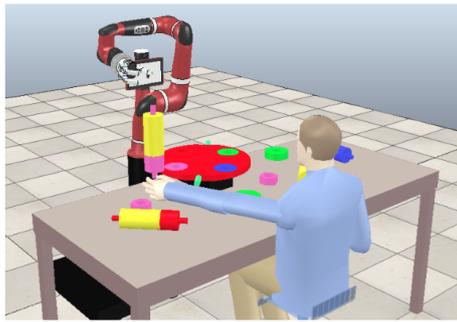
estruturas físicas, (ii) o número de restrições impostas nos seus problemas de otimização e (iii) as métricas de avaliação referidas anteriormente.

### 6.3.1 Descrição da Tarefa

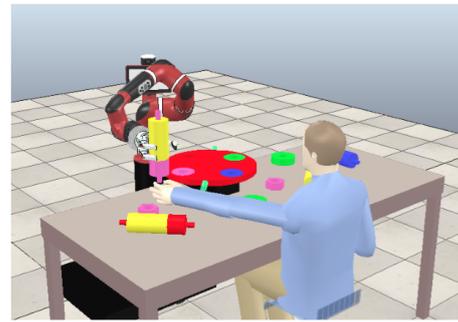
A primeira tarefa de validação proposta na presente dissertação e realizada no cenário descrito na secção anterior, consiste na cooperação entre a plataforma robótica Sawyer e o operador humano, durante a inserção da coluna magenta na base do *Toy Vehicle*.

Como se pode observar na figura 6.3, a execução desta tarefa pressupõe o planeamento de três ações motoras, nas quais o robô colaborativo deve realizar os seguintes movimentos: (i) alcançar e agarrar a coluna magenta, fornecida pelo operador humano (na figura 6.3b), (ii) transportar e inserir a referida coluna no orifício da base, com a cor correspondente (na figura 6.3c) e (iii) retornar à sua postura inicial (na figura 6.3d). Os movimentos descritos deverão, tal como referido anteriormente, ser compreensíveis e de fácil inferência para o operador humano, sendo evitadas colisões com os obstáculos presentes no espaço de trabalho e com o corpo da própria plataforma robótica.

Outro aspeto importante a realçar é a postura inicial do robô colaborativo no presente cenário de interação. Os valores das juntas apresentados na tabela 6.1 foram selecionados para garantir que a plataforma robótica, fora do horário laboral, ocupa uma pequena área do espaço de trabalho e mantém a sua mão afastada da mesa. Esta última metodologia permite que, durante o movimento ilustrado na figura 6.3d, a extremidade da plataforma robótica não colida com a estrutura do *Toy Vehicle*.



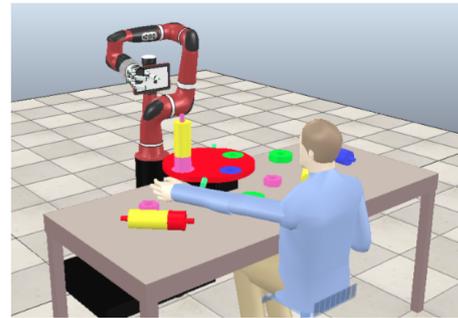
(a) Postura Inicial



(b) Alcançar e agarrar a coluna magenta



(c) Transportar e inserir a coluna na base



(d) Retornar à postura inicial

**Figura 6.3:** Sequência de movimentos a executar, durante a simulação da tarefa 1.**Tabela 6.1:** Postura inicial do robô colaborativo Sawyer, no cenário da tarefa 1.

Junta	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$
Valor (em graus)	0	-80	-90	90	-90	-90	90	0	70	70	70

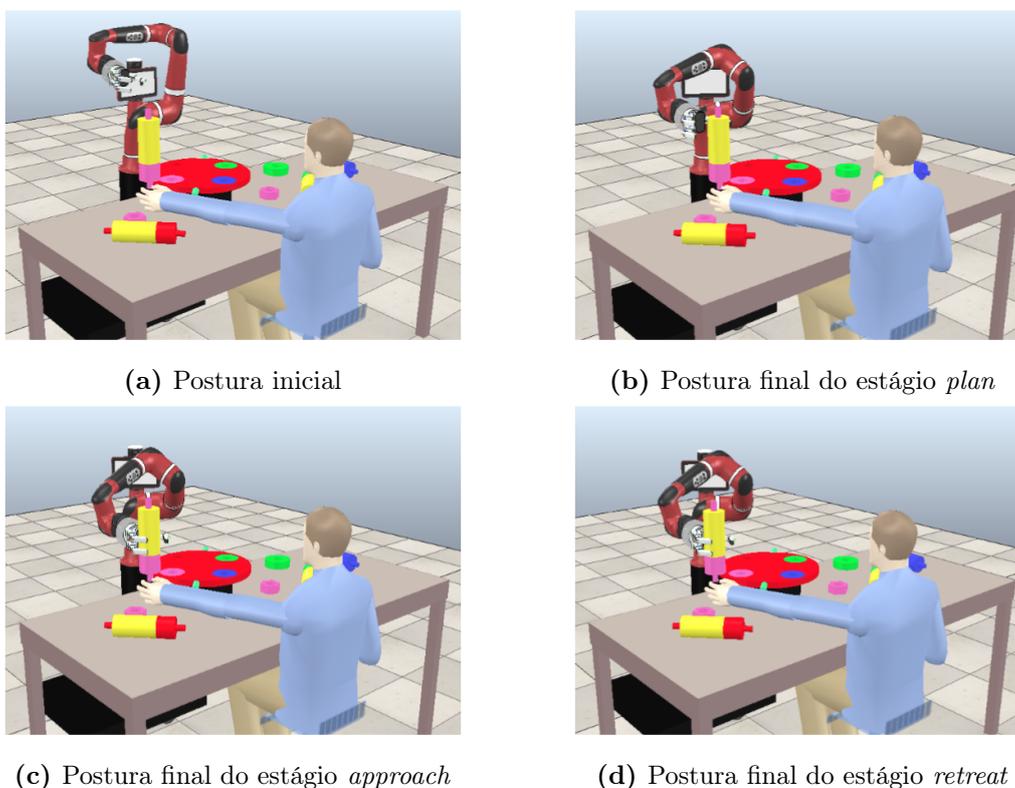
### 6.3.2 Sequência de Movimentos e Resultados Obtidos

Nas próximas secções serão analisadas as ações motoras a serem executadas pela plataforma robótica, durante a realização da tarefa de montagem de um *Toy Vehicle*. Tal como referido anteriormente, esta sequência de movimentos será planeada através do método proposto na presente dissertação, sendo referidos os problemas de otimização subjacentes e avaliados os resultados obtidos, em particular: (i) a posição e o perfil de velocidade mão e (ii) as métricas de avaliação de desempenho, introduzidas na secção 6.2. De salientar que os resultados numéricos apresentados, foram obtidos através de um processador Intel®

Core™ i5-3337U CPU @ 1.80 GHz, a correr o sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS de 64-bits, com uma placa gráfica NVIDIA GeForce GT 720M e 8 GB de memória RAM.

### 6.3.2.1 Ação Motora 1: Alcançar e Agarrar a Coluna Magenta

O movimento *pick* executado para alcançar e agarrar a coluna magenta, como se pode observar na figura 6.4, é constituído pelos estágios: *plan*, *approach* e *retreat*. Em semelhança ao referido anteriormente, a aplicação desta metodologia possibilita que a plataforma robótica execute movimentos suaves e precisos, fundamentais para a correta realização da tarefa proposta.



**Figura 6.4:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 1.

Considerando a estratégia de planeamento introduzida no capítulo 5, para o estágio *plan* são matematicamente formalizados os problemas de: (i) seleção da postura final (**P1.1a**) e (ii) seleção da postura *bounce* (**P1.1b**). Neste cenário de interação, a posição-alvo do referido estágio é definida a 120 mm da coluna magenta, possibilitando que os restantes estágios sejam executados em áreas livres de colisões. Efetivamente e tal como se encontra representado na tabela 6.2, o processo de planeamento para os estágios *approach* e *retreat*,

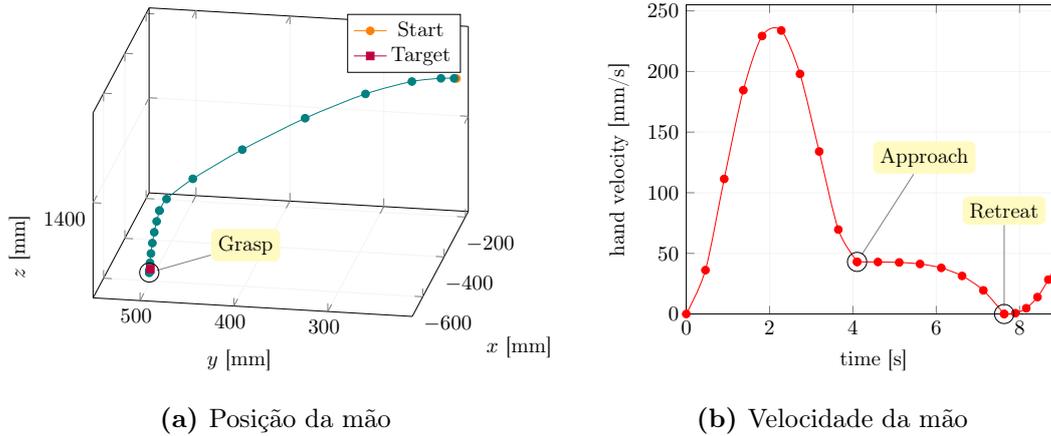
engloba apenas a seleção da postura final mais adequada (**P1.2a** e **P1.3a**, respetivamente). Neste contexto, a posição a ser alcançada no final do estágio *retreat* é estabelecida a 20 mm da coluna magenta - tendo em conta a direção do eixo  $\hat{z}_{tar}$  - sendo o seu centro associado à posição-alvo do estágio *approach*.

**Tabela 6.2:** Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 1.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P1.1a</b>	<b>P1.1b</b>
2	<i>Approach</i>	<b>P1.2a</b>	-
3	<i>Retreat</i>	<b>P1.3a</b>	-

Como se pode observar na figura 6.5, o movimento a ser executado para alcançar e agarrar a coluna magenta, apresenta características similares às observadas nos testes experimentais realizados com os membros superiores humanos. Efetivamente, este movimento *pick* é caracterizado por um perfil de velocidade da mão em forma de sino (figura 6.5b), executando uma trajetória ligeiramente curva (figura 6.5a). A metodologia utilizada para garantir que os valores de velocidade e de aceleração no início de um estágio, coincidem com os verificados no final do estágio anterior, permite que os movimentos executados sejam suaves e fluentes. Além do conjunto de características mencionado anteriormente, é ainda importante realçar que o robô colaborativo não colide com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o objeto-alvo, durante a realização da tarefa proposta.

Relativamente às métricas de avaliação introduzidas na secção 6.2 (na tabela 6.3), o valor de **NMU** é igual ao verificado nos movimentos de alcance executados pelos membros superiores humanos. A métrica **NJS**, por sua vez, apresenta um valor relativamente baixo (1448,36), evidenciando - em semelhança ao representado na figura 6.5a - a suavidade e a precisão do movimento executado pela plataforma robótica. De realçar que o tempo de resolução despendido pelo método de planeamento de movimentos, varia em função: (i) do tipo de processador utilizado, (ii) da complexidade do movimento, (iii) do número de esferas que modelam o braço e a mão do manipulador, (iv) da disposição do espaço de trabalho e (v) da postura inicial da plataforma robótica.



**Figura 6.5:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 1, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

**Tabela 6.3:** Resultados do planeamento da ação motora 1.

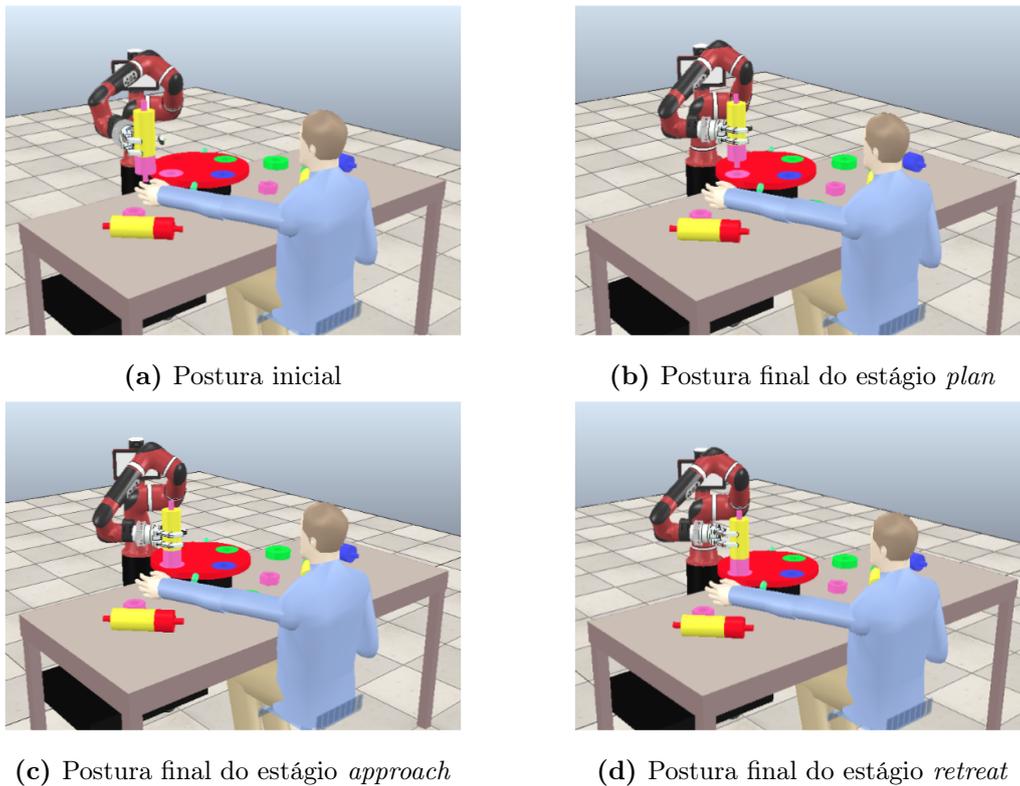
NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
1448,36	1	7229

### 6.3.2.2 Ação Motora 2: Transportar e Inserir a Coluna Magenta na Base

O movimento *place* executado para transportar e inserir a coluna magenta na base do *Toy Vehicle*, como se pode observar na figura 6.6, é também composto pelos estágios: *plan*, *approach* e *retreat*. Neste contexto, o estágio *plan* engloba o planeamento da trajetória da mão até às proximidades da base do *Toy Vehicle*, sendo o estágio *approach* responsável pela inserção da coluna magenta no orifício com a cor correspondente.

Os problemas de otimização definidos para cada um dos estágios encontram-se sumariados na tabela 6.4, sendo a estratégia de planeamento aplicada, similar à descrita para a ação motora anterior. De realçar que neste contexto, as posições a serem alcançadas nos estágios *plan* e *retreat* são definidas em relação à base do *Toy Vehicle*, assegurando: (i) a correta inserção da coluna magenta e (ii) a prevenção de colisões, durante a abertura e o afastamento da mão da plataforma robótica.

Com a utilização do método proposto para o planeamento da presente ação motora, o movimento a executar é caracterizado por um perfil de velocidade da mão em forma

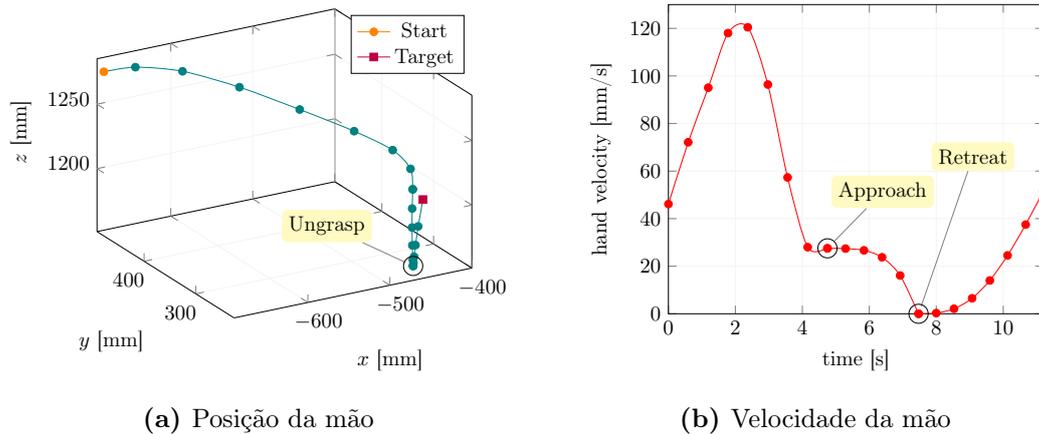


**Figura 6.6:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 2.

**Tabela 6.4:** Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 2.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P2.1a</b>	<b>P2.1b</b>
2	<i>Approach</i>	<b>P2.2a</b>	-
3	<i>Retreat</i>	<b>P2.3a</b>	-

de sino (na figura 6.7b). Neste contexto, a velocidade e a aceleração iniciais coincidem com as estabelecidas no final do movimento *pick*, planeado na secção anterior. Além desta característica e em semelhança ao observado nos primeiros trabalhos experimentais efetuados sobre o comportamento do braço humano (Flash & Hogan, 1985), durante o estágio *approach* verifica-se que a mão da plataforma robótica executa uma trajetória em linha reta - e livre de colisões - até ser alcançada a sua posição-alvo (na figura 6.7a).



**Figura 6.7:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 2, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

Em relação às métricas de avaliação apresentadas na tabela 6.5, o valor de **NJS** é consideravelmente superior ao registado na ação motora anterior, podendo este facto relacionar-se com: (i) a complexidade do movimento, (ii) a proximidade dos obstáculos existentes no espaço de trabalho, (iii) a postura inicial da plataforma robótica e/ou (iv) a distância e a duração dos estágios *approach* e *retreat*. Apesar disso, o valor da métrica **NMU** corresponde ao associado aos movimentos de alcance executados pelo braço humano, sendo planeada uma trajetória suave e fluente. De realçar que o tempo de resolução despendido pelo método de planeamento de movimentos é de aproximadamente 3272 ms.

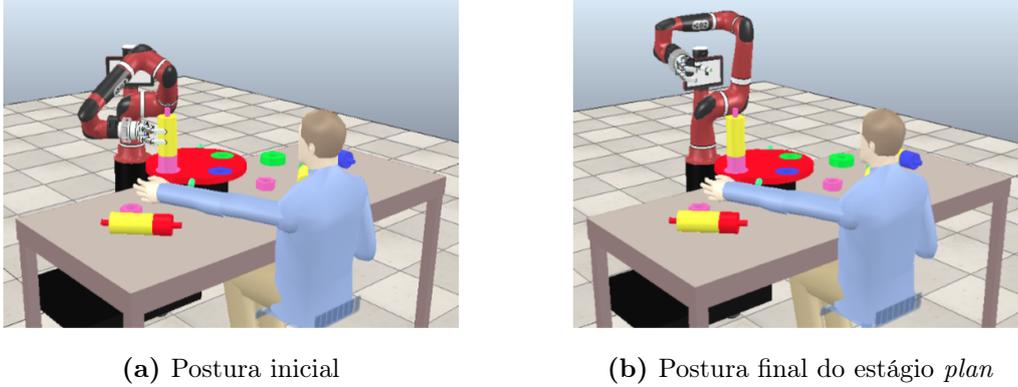
**Tabela 6.5:** Resultados do planeamento da ação motora 2.

NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
2502,39	1	3272

### 6.3.2.3 Ação Motora 3: Retornar à Postura Inicial

O movimento *move* executado para retornar à postura inicial da plataforma robótica, como se pode observar na figura 6.8, é constituído apenas pelo estágio *plan*. Tal como referido anteriormente, o processo de planeamento no referido estágio (na tabela 6.6) inclui o mecanismo de desvio de obstáculos proposto por Rosenbaum et al. (2001), englobando

os problemas: (i) de seleção da postura final (**P3.1a**) e (ii) de seleção da postura *bounce* (**P3.1b**).



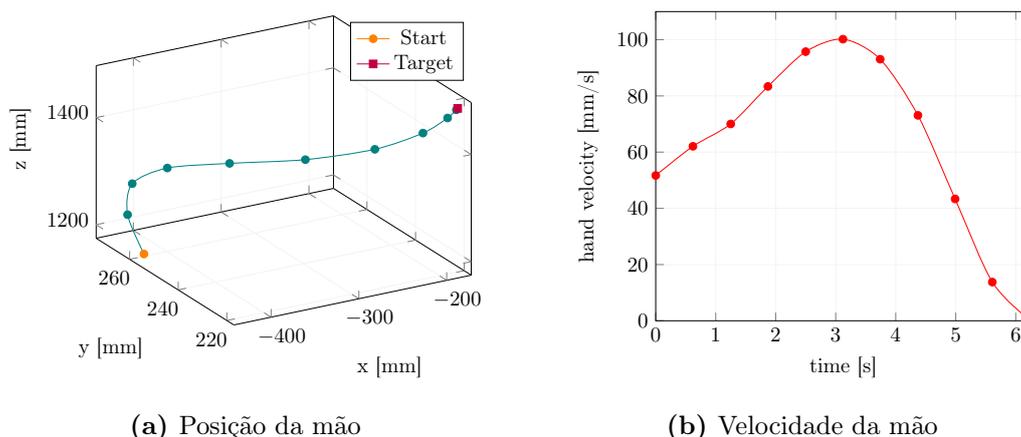
**Figura 6.8:** Movimento planeado para a ação motora 3.

**Tabela 6.6:** Problemas de otimização definidos para a ação motora 3.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P3.1a</b>	<b>P3.1b</b>

Como se pode observar na figura 6.9b, o movimento a executar apresenta um perfil de velocidade da mão em forma de sino. Em semelhança ao descrito nas secções anteriores, a velocidade e a aceleração iniciais coincidem com as estabelecidas no final do movimento *place*, permitindo que a trajetória da mão do manipulador seja suave e fluente (na figura 6.9a). De realçar que, durante a realização da tarefa proposta, a plataforma robótica não colide com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o seu próprio corpo.

As métricas de avaliação da suavidade, como se pode observar na tabela 6.7, apresentam valores baixos e no caso do **NMU**, similares aos verificados nos movimentos dos membros superiores humanos. A discrepância dos valores da métrica **NJS** encontra-se relacionada com a ausência dos processos de seleção da postura final, determinados nas ações motoras anteriores, para os estágios *approach* e *retreat*. Em relação ao tempo de resolução despendido pelo método proposto, o movimento é planeado em aproximadamente 4120 ms.



**Figura 6.9:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 3, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

**Tabela 6.7:** Resultados do planeamento da ação motora 3.

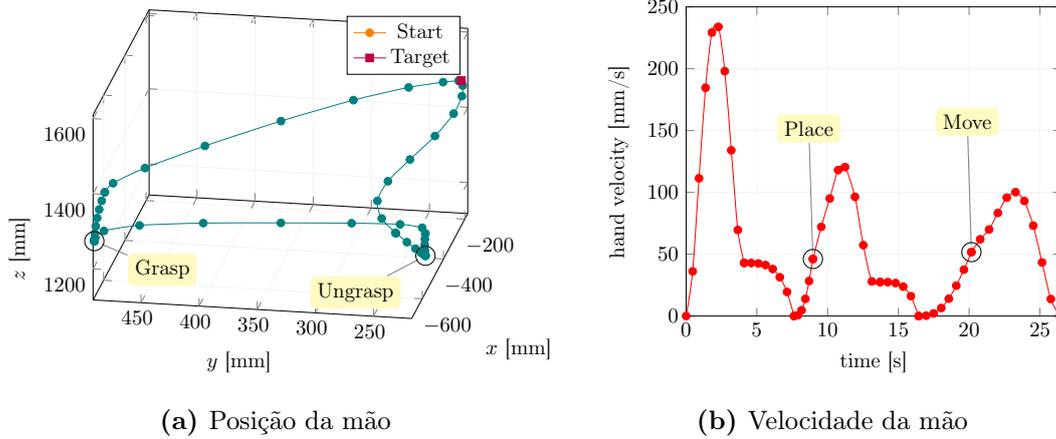
NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
22,89	1	4120

### 6.3.3 Comparação com o Desempenho do Robô Antropomórfico ARoS

Nos trabalhos anteriormente desenvolvidos pelo MAR Lab, a estratégia de planeamento de movimentos proposta foi apenas implementada no robô antropomórfico ARoS. Com a generalização dos problemas de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce*, na presente dissertação compararam-se os desempenhos obtidos por ambas as plataformas robóticas, durante a execução da tarefa de montagem de um *Toy Vehicle*.

Em relação ao robô colaborativo Sawyer, considerando as ações motoras anteriormente determinadas, as características cinemáticas do movimento composto<sup>1</sup> a ser executado encontram-se ilustradas na figura 6.10. Neste cenário de interação, a mão da plataforma robótica percorre uma trajetória ligeiramente curva, sendo perceptível que a sua posição inicial em  $z$  é superior à da coluna magenta (na figura 6.10a). Como se pode observar na figura 6.10b, em todos os movimentos executados, o perfil de velocidade da mão é similar ao observado nas investigações associadas ao comportamento do braço humano.

<sup>1</sup>O registo em vídeo do robô Sawyer a executar a tarefa 1, pode ser consultado em [https://www.dropbox.com/sh/znofh90fidup583/AAD61BUN9nBDs\\_f56q\\_MO6Ha?dl=0](https://www.dropbox.com/sh/znofh90fidup583/AAD61BUN9nBDs_f56q_MO6Ha?dl=0).



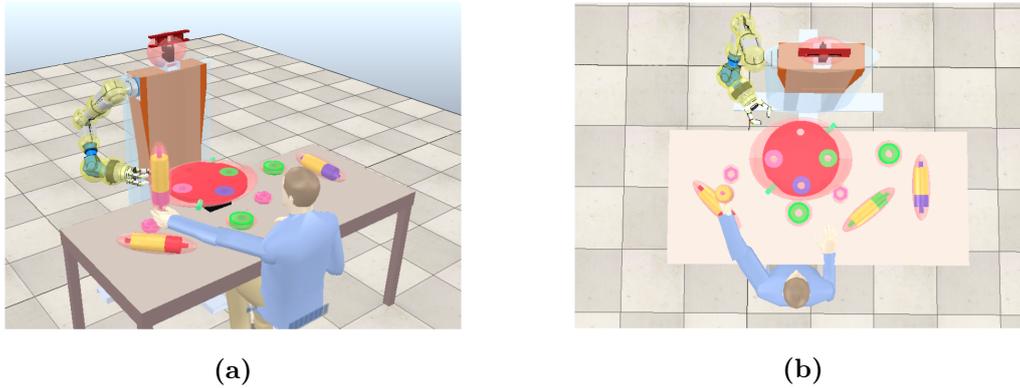
**Figura 6.10:** Características cinemáticas obtidas para o robô colaborativo Sawyer, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 1.

Para o robô antropomórfico ARoS, neste processo de comparação foram replicadas as condições descritas para o robô colaborativo Sawyer, nomeadamente: (i) o espaço de trabalho - com exceção para a postura inicial (na tabela 6.8) e para os limites de velocidade e aceleração - e (ii) os problemas de otimização referidos nas secções anteriores - a direcção e a distância a percorrer durante os estágios diverge em algumas ações motoras. Como se pode observar na figura 6.11, o braço desta plataforma robótica é modelado por um conjunto de 16 esferas, obtidas por intermédio do algoritmo proposto na secção 5.4.2. Ao contrário do que se verifica no robô colaborativo Sawyer, nesta plataforma, o braço robótico é perpendicular ao corpo, existindo uma maior probabilidade de ocorrer colisões durante a execução das diferentes ações motoras.

**Tabela 6.8:** Postura inicial do robô antropomórfico ARoS, no cenário da tarefa 1.

Junta	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$
Valor (em graus)	-137,5	-77,9	106,6	-95,4	-43,3	-64,0	48,0	0,0	70,0	70,0	70,0

A utilização do método proposto no planeamento dos movimentos no robô antropomórfico ARoS, no contexto da presente tarefa de interação, apresenta resultados cinemáticos próximos dos verificados nos membros superiores humanos<sup>2</sup>. A mão da plataforma robó-

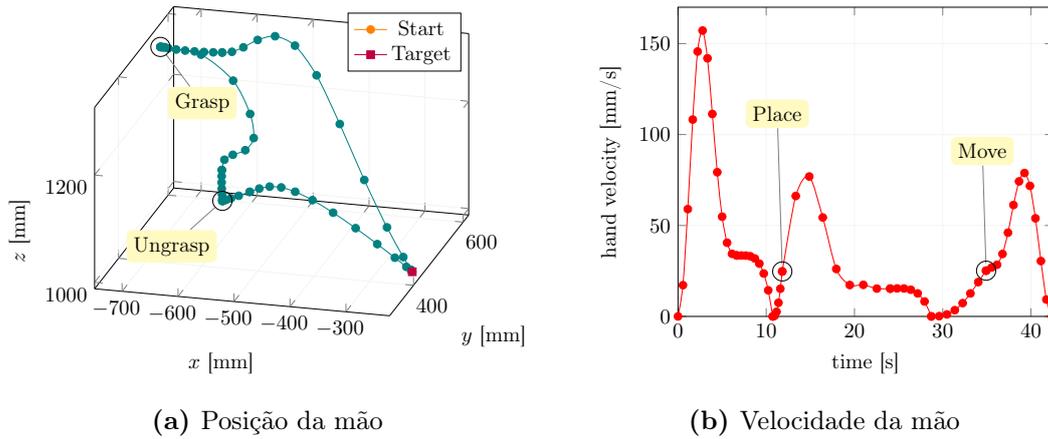


**Figura 6.11:** Robô antropomórfico ARoS no cenário de montagem de um *Toy Vehicle*, em ambiente de simulação. O corpo da plataforma robótica é modelado por uma superelipsoide ( $\varepsilon_1 = 0.1$  e  $\varepsilon_2 = 1$ ) - a azul - sendo o seu braço representado por um conjunto de 16 esferas - a amarelo.

tica, em semelhança ao referido anteriormente, durante o estágio *approach* do movimento *place* percorre uma trajetória em linha reta (na figura 6.12a), garantindo a correta inserção da coluna magenta na base do *Toy Vehicle*. Neste contexto, no início e no final do movimento, a posição da mão em  $z$  é inferior à da coluna magenta. Além destas características, todos os movimentos planeados são caracterizados por um perfil de velocidade da mão em forma de sino, sendo o seu valor inicial igual ao verificado no final do movimento precedente (na figura 6.12b). De realçar que o tempo total do movimento (42,37 s) é superior ao verificado no robô colaborativo Sawyer (26,40 s), em consequência dos limites de velocidade e aceleração impostos pelo fabricante.

Em relação às métricas de avaliação de desempenho referidas nas secções anteriores, a plataforma robótica ARoS apresenta valores de **NJS** superiores aos obtidos pelo robô Sawyer. Na realidade, estes manipuladores apresentam tipologias com diferentes níveis de complexidade, não sendo possível realizar uma comparação pormenorizada dos resultados obtidos. Contudo, no contexto da presente tarefa verifica-se que, apesar de ser imposto um maior número de restrições nos problemas de otimização do Sawyer, o processo de planeamento associado ao robô ARoS é computacionalmente mais dispendioso. Este facto pode estar relacionado com: (i) a sua postura inicial e/ou (ii) a distância entre o braço e o corpo, durante a execução do movimento. Em teoria, como o braço robótico do ARoS é perpendicular ao seu corpo, a probabilidade de ocorrerem colisões é superior à verificada

<sup>2</sup>O registo em vídeo do robô ARoS a executar a tarefa 1, pode ser consultado em [https://www.dropbox.com/sh/m9v0l2l87casbk0/AAA-GJ3L7bHE\\_AF5O4JrxEvha?dl=0](https://www.dropbox.com/sh/m9v0l2l87casbk0/AAA-GJ3L7bHE_AF5O4JrxEvha?dl=0).



**Figura 6.12:** Características cinemáticas obtidas para o robô antropomórfico ARoS, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 1.

na plataforma robótica Sawyer.

**Tabela 6.9:** Resultados do planeamento da tarefa 1, no robô antropomórfico ARoS.

Ação Motora	NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
1	1615,29	1	13264
2	7891,59	1	6493
3	18,10	1	3416

## 6.4 Tarefa 2: Assistência a um Humano com Mobilidade Reduzida

A validação do método de planeamento de movimentos será realizada, numa segunda fase, num cenário de assistência a um humano com mobilidade reduzida. Em concreto, nesta tarefa de interação pretende-se que a plataforma robótica prepare uma bebida para um indivíduo com problemas motores e/ou cognitivos.

Como se pode observar na figura 6.13, na mesa colocada em frente ao robô colaborativo, encontram-se dispostas três garrafas (sumo, café e chá), dois copos e uma caneca. Em semelhança ao verificado no cenário da tarefa anterior, alguns dos objetos referidos

encontram-se fora do espaço de trabalho da plataforma robótica, sendo a sua manipulação apenas exequível com o auxílio do humano.



**Figura 6.13:** Cenário de assistência a um humano com mobilidade reduzida, em ambiente de simulação.

Na próximas secções será descrita a tarefa a ser realizada (na secção 6.4.1), sendo detalhadamente analisada a sequência de movimentos a executar, planeada através do método proposto na presente dissertação (na secção 6.4.2). Em semelhança ao efetuado para a tarefa anterior, na secção 6.4.3 será realizada uma breve comparação entre os desempenhos obtidos pelos robôs Sawyer e ARoS, durante a execução da tarefa proposta.

#### 6.4.1 Descrição da Tarefa

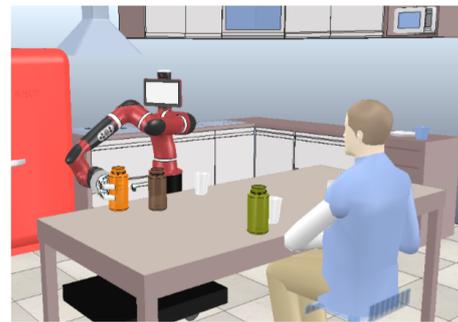
A segunda tarefa de validação proposta na presente dissertação, apresenta um nível de complexidade, manifestamente, superior ao verificado durante a inserção da coluna magenta na base do *Toy Vehicle*. Neste cenário de interação pretende-se que o robô colaborativo Sawyer prepare um copo de sumo para um humano com mobilidade reduzida.

Como se pode observar na figura 6.14, a execução desta tarefa pressupõe o planeamento de 6 ações motoras, nas quais a plataforma robótica deve realizar os seguintes movimentos: (i) alcançar e agarrar a garrafa de sumo (na figura 6.14b), (ii) transportar a referida garrafa até às proximidades do copo (na figura 6.14c), (iii) entornar o sumo no copo (na figura 6.14d), (iv) reposicionar a garrafa (na figura 6.14e), (v) colocar a garrafa na mesa (na figura 6.14f) e (vi) retornar à sua postura inicial (na figura 6.14g) - coincidente com a apresentada na tabela 6.1. Em semelhança ao referido anteriormente, os movimentos descritos deverão ser compreensíveis e de fácil inferência para o humano, sendo evitadas colisões com os

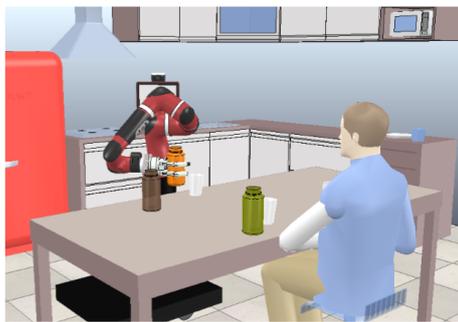
obstáculos presentes no espaço de trabalho e com o corpo da própria plataforma robótica.



(a) Postura Inicial



(b) Alcançar e agarrar a garrafa de sumo



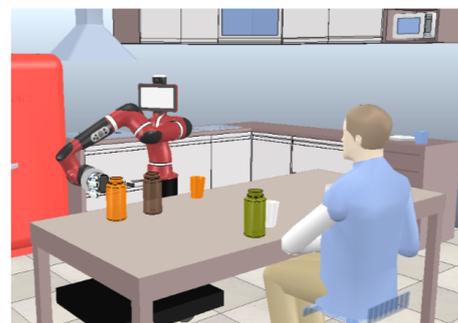
(c) Transportar a garrafa



(d) Entornar o sumo no copo



(e) Reposicionar a garrafa



(f) Colocar a garrafa na mesa



(g) Retornar à postura inicial

**Figura 6.14:** Sequência de movimentos a executar, durante a simulação da tarefa 2.

### 6.4.2 Sequência de Movimentos e Resultados Obtidos

Nas próximas secções serão analisadas as ações motoras a serem executadas pelo robô colaborativo Sawyer, durante a assistência a um humano com mobilidade reduzida. Em semelhança ao descrito na secção 6.3.2, esta sequência de movimentos será planeada através do método proposto na presente dissertação, sendo referidos os problemas de otimização subjacentes e avaliados os resultados obtidos. De salientar que, estes foram também determinados por intermédio de um processador Intel® Core™ i5-3337U CPU @ 1.80 GHz, a correr o sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS de 64-bits, com uma placa gráfica NVIDIA GeForce GT 720M e 8 GB de memória RAM.

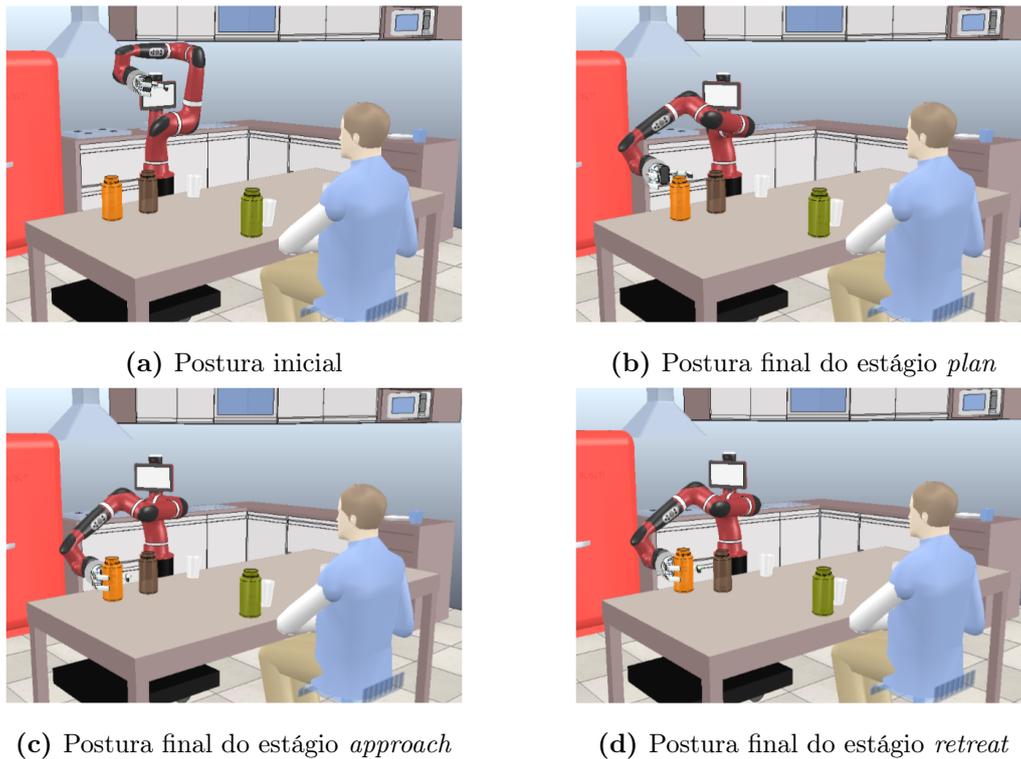
#### 6.4.2.1 Ação Motora 1: Alcançar e Agarrar a Garrafa de Sumo

O movimento *pick* executado para alcançar e agarrar a garrafa de sumo, como se pode observar na figura 6.15, é composto pelos estágios: *plan*, *approach* e *retreat*. Em semelhança ao referido na tarefa anterior, matematicamente, estes movimentos são determinados através dos problemas de otimização apresentados na tabela 6.10. Neste contexto, as especificações definidas pelo utilizador para o estágio *retreat* - distância a percorrer e direção - devem considerar o transporte da garrafa de sumo, durante a ação motora descrita na próxima secção. Efetivamente, a complexidade do planeamento de movimentos, no presente cenário interação, encontra-se relacionada com a execução das ações motoras 2 e 5, nas quais existe uma elevada probabilidade da extremidade da plataforma robótica colidir com os obstáculos presentes no espaço de trabalho.

**Tabela 6.10:** Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 1.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P1.1a</b>	<b>P1.1b</b>
2	<i>Approach</i>	<b>P1.2a</b>	-
3	<i>Retreat</i>	<b>P1.3a</b>	-

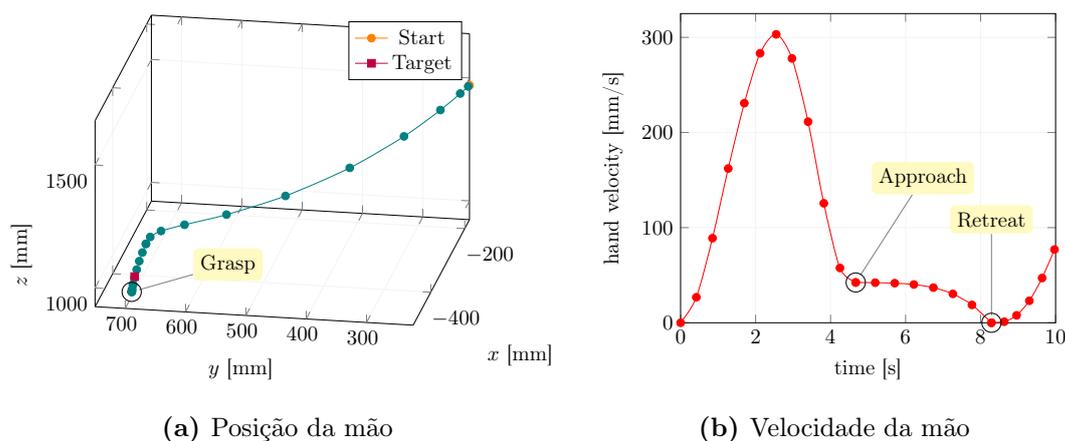
Como se pode observar na figura 6.16, o movimento a executar na presente ação motora, apresenta características similares às observadas em testes experimentais realizados com



**Figura 6.15:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 1.

os membros superiores humanos. Em concreto, este movimento *pick* é caracterizado por um perfil de velocidade da mão em forma de sino (na figura 6.16b), sendo visível a redução da velocidade durante o estágio *approach*. A metodologia utilizada para garantir que os valores da velocidade e de aceleração no início de um estágio, coincidem com os verificados no final do estágio anterior, permite que os movimentos executados sejam suaves e fluentes (na figura 6.16a).

Em relação às métricas de avaliação descritas na secção 6.2 (na tabela 6.11), o valor de **NJS** é próximo dos registados nos movimentos compostos pelos três estágios de planeamento, determinados para a tarefa anterior. Neste contexto, o valor obtido para a métrica **NMU** corresponde ao associado habitualmente aos movimentos executados pelos humanos, durante a realização de tarefas de alcance. De salientar que, o tempo de resolução despendido pelo método de planeamento de movimentos é superior ao verificado nas ações motoras da tarefa de montagem de um *Toy Vehicle*. Tal como referido anteriormente, este facto pode estar relacionado com: (i) a complexidade da tarefa, (ii) a posição do objeto-alvo e/ou (iii) a disposição do espaço de trabalho.



**Figura 6.16:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 1, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

**Tabela 6.11:** Resultados do planeamento da ação motora 1.

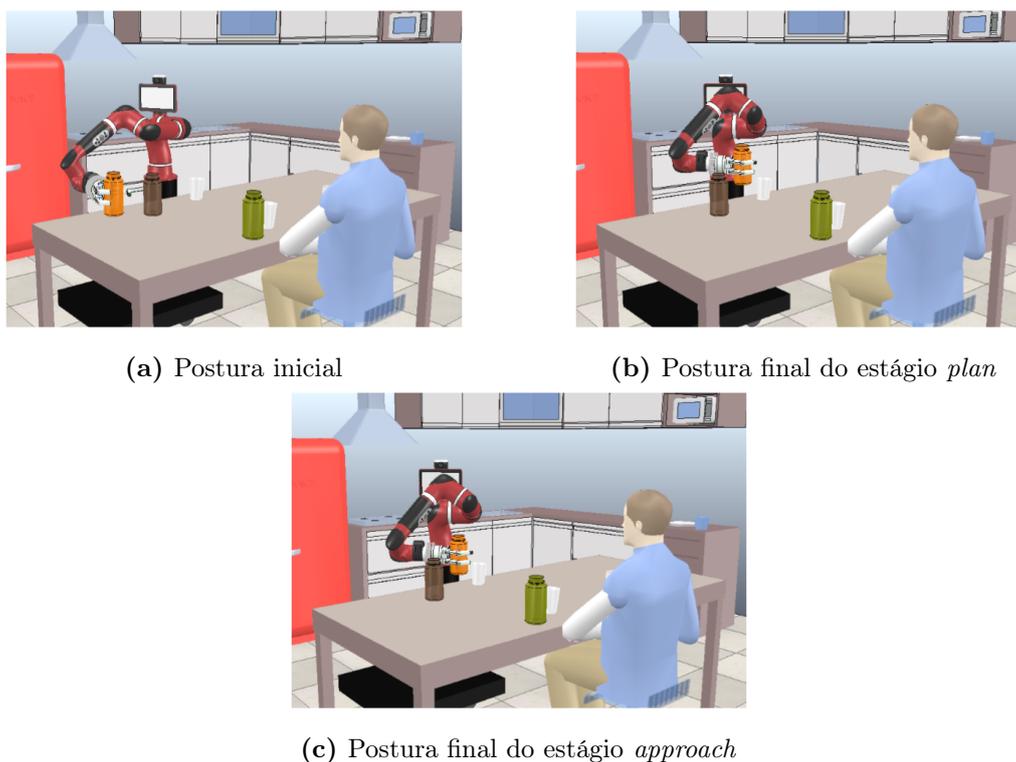
NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
1505,95	1	12239

#### 6.4.2.2 Ação Motora 2: Transportar a Garrafa de Sumo

O movimento *place* executado para transportar a garrafa de sumo até às proximidades do copo, como se pode observar na figura 6.17, é constituído pelos estágios: *plan* e *approach*. Tal como referido anteriormente, durante a execução deste movimento existe uma elevada probabilidade da plataforma robótica colidir com a garrafa de café ou com o copo. Efetivamente, o robô colaborativo Sawyer possui um reduzido espaço de trabalho para executar os seus movimentos, tendo em conta a sua tipologia e a sua postura inicial.

Os problemas de otimização definidos para cada um dos estágios do movimento, no âmbito da presente ação motora, encontram-se sumariados na tabela 6.12. De realçar que neste contexto, as posições a alcançar são estabelecidas nas proximidades do copo, sendo necessário garantir que: (i) o líquido não é derramado durante a execução do movimento e (ii) a plataforma robótica e o objeto a transportar não colidem com a garrafa de café ou com o copo.

Como se pode observar na figura 6.18, o movimento a executar para transportar a



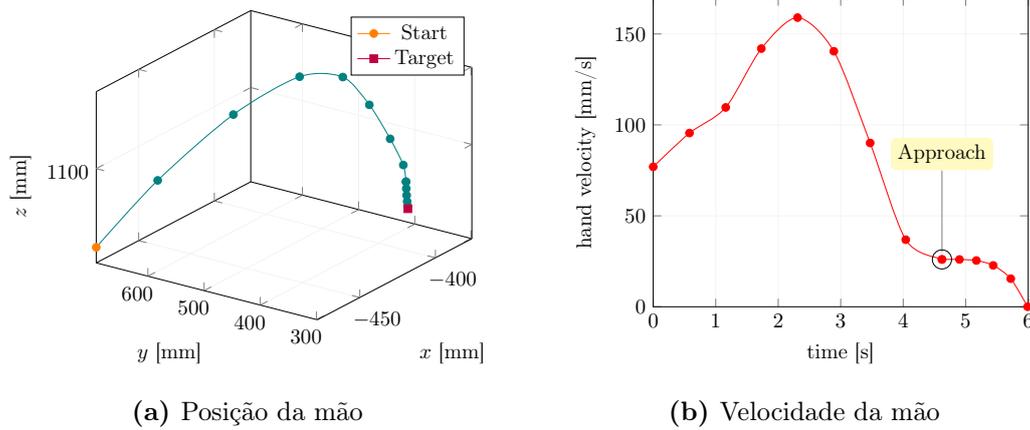
**Figura 6.17:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 2.

**Tabela 6.12:** Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 2.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P2.1a</b>	<b>P2.1b</b>
2	<i>Approach</i>	<b>P2.2a</b>	-

garrafa de sumo apresenta um perfil de velocidade da mão em forma de sino (na figura 6.18b). Tal como referido anteriormente, neste contexto a velocidade e a aceleração iniciais são iguais às verificadas no final do movimento *pick*, planeado na secção anterior. Outro aspeto importante a realçar é o facto da plataforma robótica não colidir com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o seu próprio corpo, sendo a trajetória executada (na figura 6.18a) fluente, suave e facilmente inferida pelo humano.

As métricas de avaliação da suavidade, como se pode observar na tabela 6.13, apresentam valores baixos e no caso do NMU, similares aos verificados nos movimentos dos membros superiores humanos. Em relação ao tempo de resolução despendido pelo método



**Figura 6.18:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 2, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

proposto, o movimento é planeado em apenas 3525 ms, sendo este valor baixo, quando comparado com os obtidos nas ações motoras anteriores e tendo em conta: (i) o processador usado na determinação dos resultados numéricos, (ii) a complexidade da tarefa e (iii) a postura inicial da plataforma robótica.

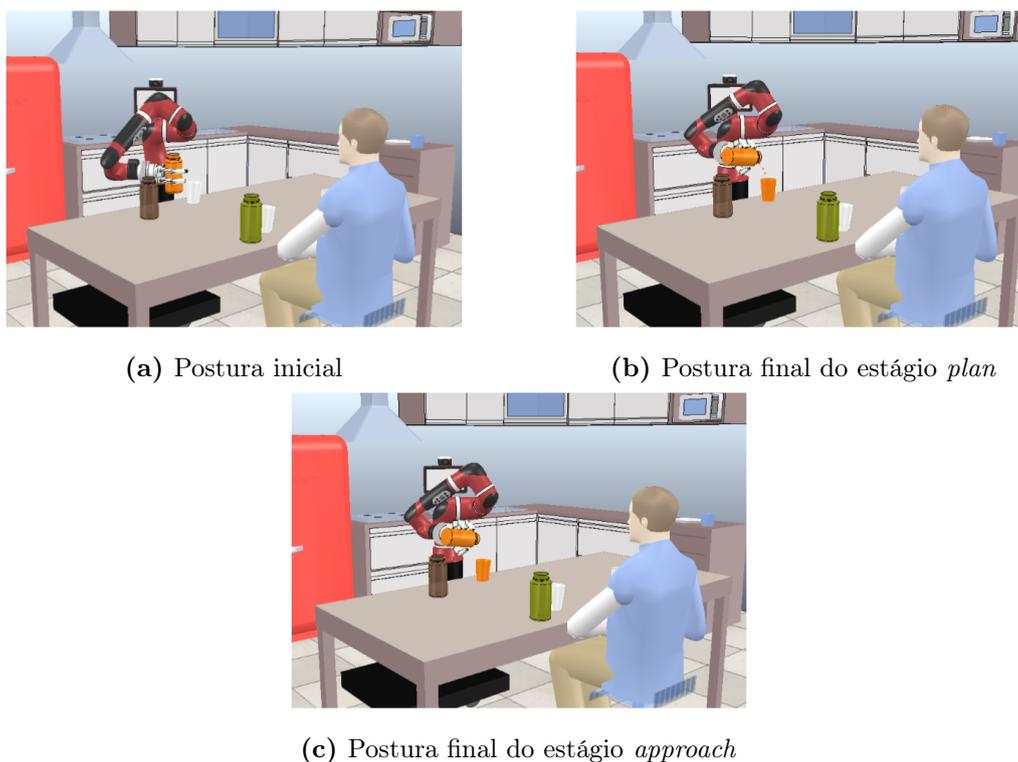
**Tabela 6.13:** Resultados do planeamento da ação motora 2.

NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
689,17	1	3525

#### 6.4.2.3 Ação Motora 3: Entornar o Líquido no Copo

O movimento *place* executado para entornar o sumo no copo, como se pode observar na figura 6.19, é constituído pelos estágios: *plan* e *approach*. Neste caso específico, o último estágio é responsável pela correta transferência do líquido existente na garrafa, evitando que este seja derramado durante a operação.

Os problemas de otimização determinados para a execução deste movimento encontram-se representados na tabela 6.14. Tal como referido nas secções anteriores, no estágio *plan* são matematicamente formalizados os problemas de: (i) seleção da postura final (**P3.1a**) e (ii) seleção da postura *bounce* (**P3.1b**). Neste cenário de interação, a posição-alvo do referido estágio é definida a 20 mm da pose estabelecida para entornar o sumo no



**Figura 6.19:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 3.

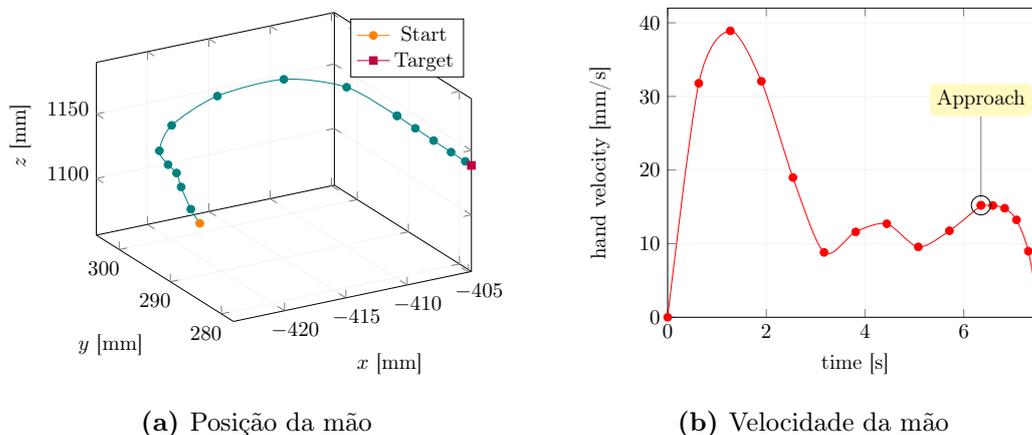
copo, possibilitando que o estágio *approach* seja executado numa área livre de colisões e consequentemente, englobe apenas a seleção da postura final mais adequada (**P3.2a**).

**Tabela 6.14:** Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 3.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P3.1a</b>	<b>P3.1b</b>
2	<i>Approach</i>	<b>P3.2a</b>	-

A aplicação do método de planeamento proposto, possibilita que o movimento a executar na presente ação motora, apresente características similares às observadas nos testes experimentais realizados com os membros superiores humanos. Em concreto, este movimento *place* é caracterizado por um perfil de velocidade da mão em forma de sino (na figura 6.20b), apresentando uma trajetória curva durante a execução do estágio *plan* (na figura 6.20a). Em semelhança ao observado por Flash & Hogan (1985), nos primeiros trabalhos

experimentais efetuados sobre o comportamento do braço humano, durante o estágio *approach* verifica-se que a mão da plataforma robótica executa uma trajetória em linha reta até à sua posição-alvo.



**Figura 6.20:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 3, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

Relativamente às métricas de avaliação apresentadas na tabela 6.15, o valor de **NJS** é consideravelmente superior aos observados nos movimentos anteriores, podendo este facto estar relacionado com a distância percorrida e o tempo de execução associado ao estágio *approach*. Apesar disso, o valor da métrica **NMU** coincide com o determinado em trabalhos experimentais realizados com os membros superiores humanos, evidenciando a suavidade e a precisão da trajetória planeada. De realçar que o tempo de resolução despendido pelo método de planeamento de movimentos, é próximo dos registados nos movimentos planeados nas secções anteriores.

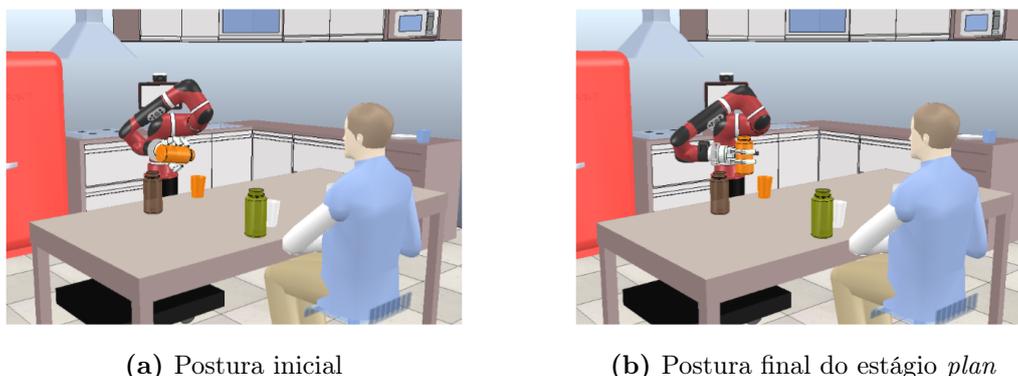
**Tabela 6.15:** Resultados do planeamento da ação motora 3.

NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
3061,26	1	4410

#### 6.4.2.4 Ação Motora 4: Posicionar a Garrafa de Sumo

O movimento *place* executado para posicionar a garrafa de sumo, como se pode observar na figura 6.21, é composto apenas pelo estágio *plan*. Neste contexto pretende-se que: (i)

a extremidade da plataforma robótica e a garrafa de sumo não colidam com os obstáculos presentes no espaço de trabalho e (ii) o restante líquido existente na garrafa não seja derramado sobre a mesa. Na tabela 6.16 encontram-se representados os problemas de otimização definidos para esta ação motora.



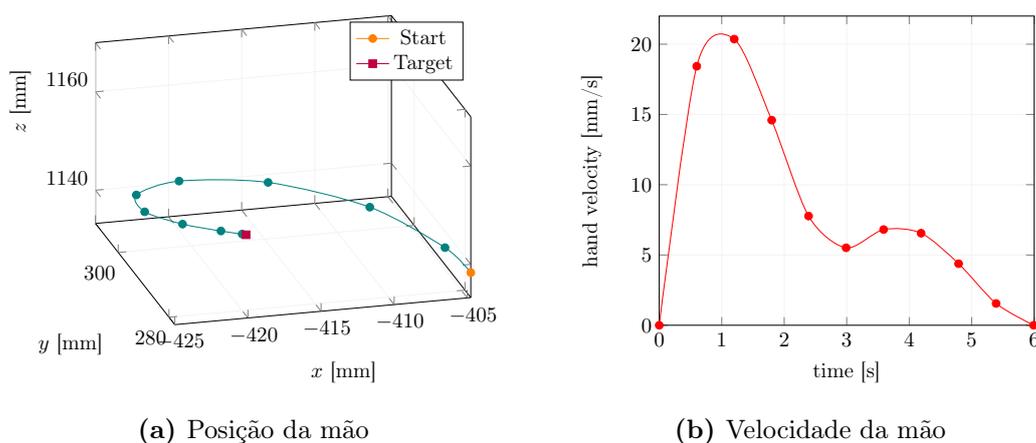
**Figura 6.21:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 4.

**Tabela 6.16:** Problema de otimização definidos para a ação motora 4.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	P4.1a	P4.1b

Efetivamente e em semelhança ao observado nos movimentos anteriores, o movimento a executar para posicionar a garrafa de sumo, apresenta um perfil de velocidade da mão em forma de sino (na figura 6.22b). Em concreto, a velocidade e a aceleração iniciais coincidem com as verificadas no final do movimento anterior, possibilitando a execução de uma trajetória suave e fluente (na figura 6.22a). Além destas características cinemáticas, é importante realçar que a mão da plataforma robótica executa uma trajetória curva, não colidindo com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o seu próprio corpo.

Nas métricas de avaliação da suavidade do movimento apresentadas na tabela 6.17, o valor de **NJS** é bastante inferior aos observados nas ações motoras planeadas anteriormente, sendo resultado: (i) da reduzida complexidade da tarefa e (ii) do número de problemas de otimização estabelecidos no seu processo de planeamento. Neste contexto, a métrica **NMU** e o tempo de resolução apresentam valores similares aos verificados nas secções anteriores.



**Figura 6.22:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 4, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

**Tabela 6.17:** Resultados do planeamento da ação motora 4.

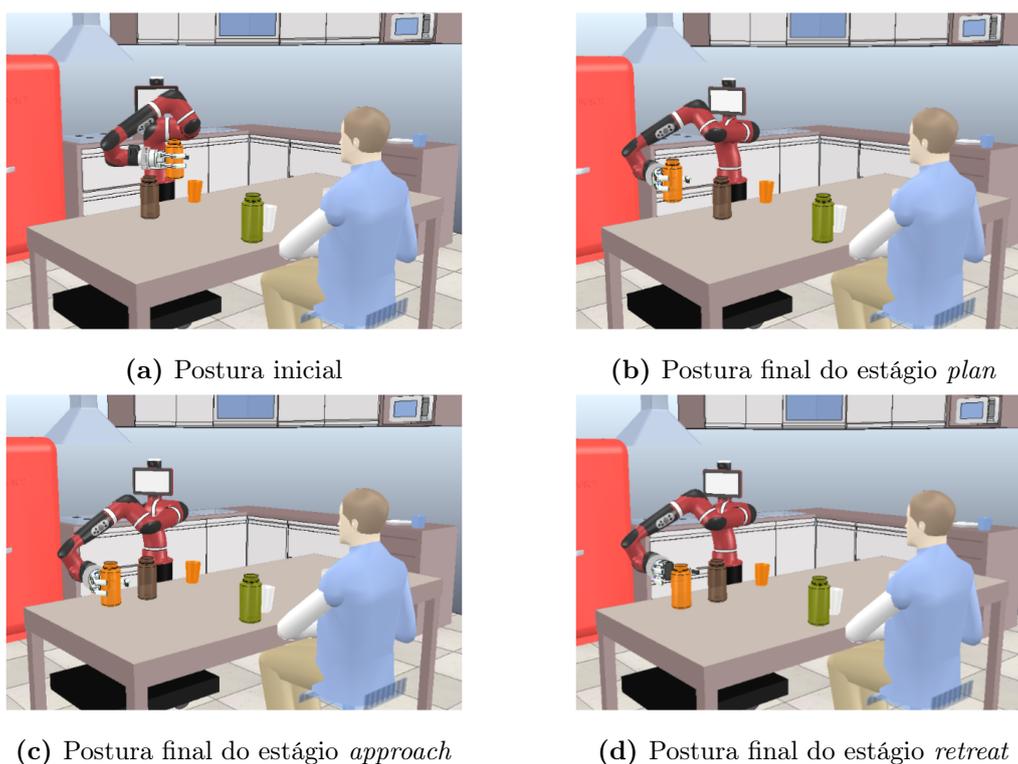
NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
200,70	1	2848

#### 6.4.2.5 Ação Motora 5: Colocar a Garrafa de Sumo na Mesa

O movimento *place* executado para colocar a garrafa de sumo na sua posição inicial, como se pode observar na figura 6.23, é composto pelos estágios: *plan*, *approach* e *retreat*. Em semelhança ao referido anteriormente, durante a execução deste movimento existe uma elevada probabilidade da extremidade da plataforma robótica colidir com a garrafa de café.

Considerando a estratégia de planeamento introduzida no capítulo 5, para o estágio *plan* são matematicamente formalizados os problemas de: (i) seleção da postura final (**P5.1a**) e (ii) seleção da postura *bounce* (**P5.1b**). Neste cenário de interação, a posição-alvo do referido estágio é definida a 150 mm da posição inicial da garrafa de sumo. Em semelhança ao representado na tabela 6.18, o processo de planeamento para os estágios *approach* e *retreat* engloba apenas a seleção da postura final mais adequada (**P5.2a** e **P5.3a**). Neste contexto, a posição a ser alcançada no final do estágio *retreat* é estabelecida a 80 mm da posição inicial da garrafa de sumo, sendo esta definida como a posição-alvo do estágio *approach*.

Como se pode observar na figura 6.24, o movimento a executar na presente ação motora,



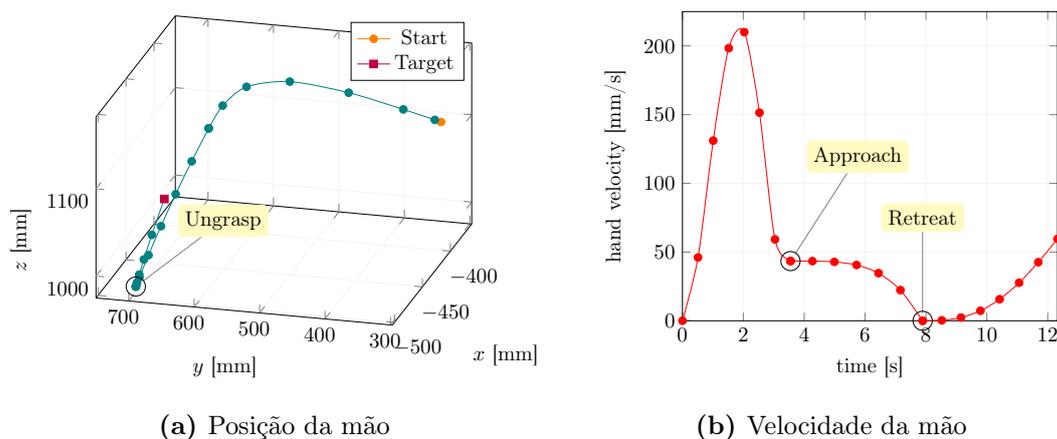
**Figura 6.23:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 5.

**Tabela 6.18:** Problemas de otimização definidos para cada estágio da ação motora 5.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	<b>P5.1a</b>	<b>P5.1b</b>
2	<i>Approach</i>	<b>P5.2a</b>	-
3	<i>Retreat</i>	<b>P5.3a</b>	-

apresenta características similares às observadas nos testes experimentais realizados com os membros superiores humanos. Efetivamente, este movimento *place* é caracterizado por um perfil de velocidade da mão em forma de sino (na figura 6.24b), apresentando uma trajetória curva durante o desvio da garrafa de café (na figura 6.24a). Além do conjunto de características mencionado, é ainda importante realçar que o movimento executado é suave, fluente e livre de colisões.

Relativamente às métricas de avaliação de desempenho introduzidas na secção 6.2 (na



**Figura 6.24:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 5, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

tabela 6.19), o valor de **NJS** é superior aos verificados nos movimentos anteriores, podendo este facto relacionar-se com: (i) a complexidade do movimento, (ii) a proximidade do obstáculo existente no espaço de trabalho, (iii) a postura inicial da plataforma robótica e/ou (iv) a distância e a duração dos estágios *approach* e *retreat*. Apesar disso e em semelhança ao sucedido nos restantes movimentos, o valor determinado para a métrica adimensional **NMU** corresponde ao observado nos testes experimentais realizados ao comportamento do braço humano. De realçar que, o tempo de resolução despendido pelo método de planeamento de movimentos é também superior ao registado nas ações motoras anteriores.

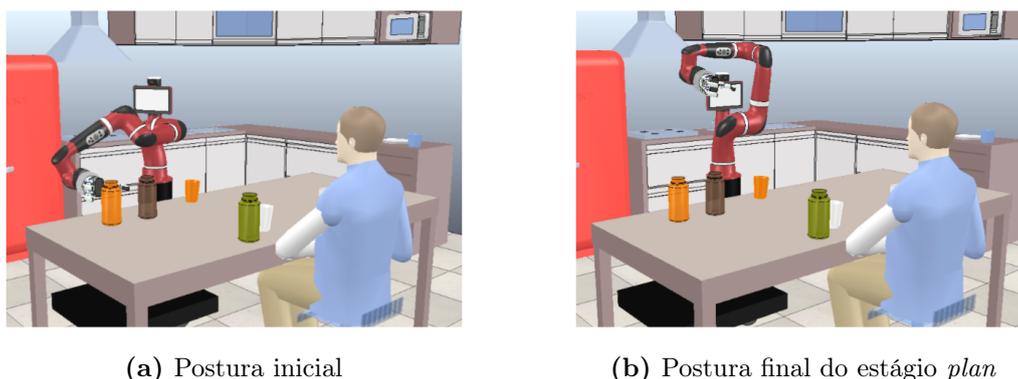
**Tabela 6.19:** Resultados do planeamento da ação motora 5.

NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
4987,46	1	13367

#### 6.4.2.6 Ação Motora 6: Retornar à Postura Inicial

O movimento *move* executado para retornar à postura inicial da plataforma robótica, como se pode observar na figura 6.25, é constituído apenas pelo estágio *plan*. Os problemas de otimização definidos para esta ação motora encontram-se descritos na tabela 6.20.

O movimento planeado por intermédio do método proposto na presente dissertação, em semelhança aos determinados nas secções anteriores, apresenta um perfil de velocidade da

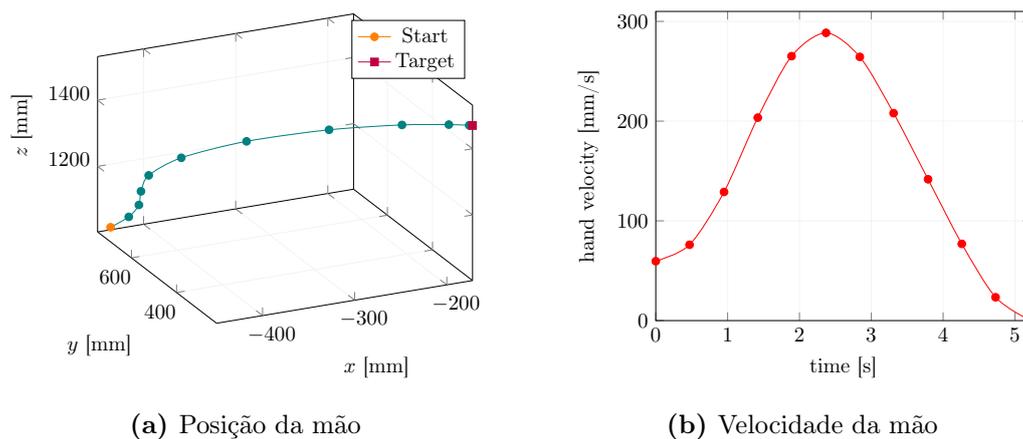


**Figura 6.25:** Sequência de movimentos planeada para a ação motora 6.

**Tabela 6.20:** Problema de otimização definido para a ação motora 6.

Problema	Estágio	Seleção da Postura Final	Seleção da Postura <i>Bounce</i>
1	<i>Plan</i>	P6.1a	P6.1b

mão em forma de sino (na figura 6.26b). Efetivamente, a velocidade e a aceleração iniciais coincidem com as estabelecidas no final do movimento *place*, permitindo que a trajetória da mão do manipulador seja suave e fluente (na figura 6.26a). Durante a realização da ação motora proposta, a plataforma robótica não colide com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o seu próprio corpo.



**Figura 6.26:** Características cinemáticas obtidas para a ação motora 6, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto.

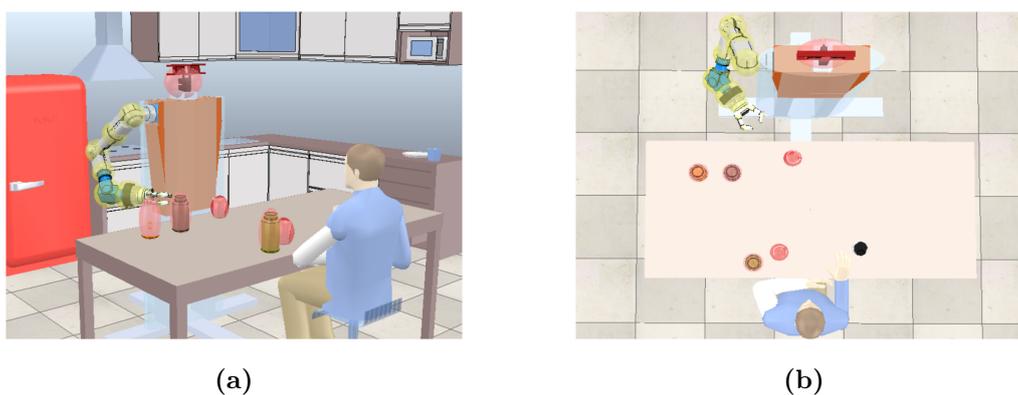
As métricas de avaliação da suavidade, como se pode observar na tabela 6.21, apresentam valores baixos e no caso do NMU, similares aos obtidos nos movimentos dos membros superiores humanos. Em relação ao tempo de resolução despendido pelo método proposto, o movimento é planeado em aproximadamente 3823 ms.

**Tabela 6.21:** Resultados do planeamento da ação motora 6.

NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
35,84	1	3823

### 6.4.3 Comparação com o Desempenho do Robô Antropomórfico ARoS

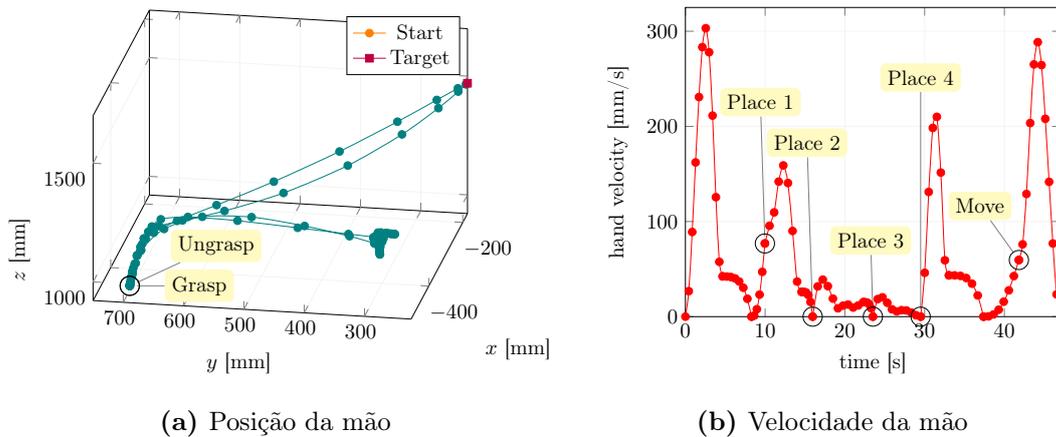
Em semelhança ao efetuado para o cenário de interação anterior, na presente dissertação foram igualmente comparados os desempenhos obtidos pelos robôs Sawyer e ARoS, durante a execução da tarefa de assistência a um humano com mobilidade reduzida. Na realidade, este processo de comparação é apenas qualitativo, sendo replicadas as condições anteriormente descritas para o robô colaborativo Sawyer, relacionadas em particular com: (i) o espaço de trabalho (na figura 6.27) - com exceção para a postura inicial (na tabela 6.8) e para os limites de velocidade e aceleração - e (ii) os problemas de otimização descritos nas secções anteriores - a direção e a distância a percorrer durante os estágios diverge em algumas ações motoras.



**Figura 6.27:** Robô antropomórfico ARoS no cenário de assistência a um humano com mobilidade reduzida, em ambiente de simulação.

Em relação ao robô colaborativo Sawyer, considerando as ações motoras planeadas

anteriormente, o movimento composto a ser executado<sup>3</sup> encontra-se representado na figura 6.28. Neste cenário de interação, a mão da plataforma robótica percorre uma trajetória ligeiramente curva (na figura 6.28a), parando no final das ações motoras 2, 3 e 4 (na figura 6.28b). Efetivamente, a realização desta tarefa pressupõe que os movimentos executados sejam suaves e precisos, evitando que: (i) o líquido existente na garrafa de sumo seja derramado e (ii) a extremidade da plataforma robótica colida com os obstáculos presentes no espaço de trabalho. Além das características mencionadas anteriormente, como se pode observar na figura 6.28b, todas as ações motoras planeadas apresentam um perfil de velocidade da mão similar ao observado em diversos testes experimentais realizados com humanos, no âmbito das áreas da neurociência e da psicologia (Rosenbaum et al., 2001; Flash & Hogan, 1985). De realçar que, durante a execução da tarefa, a extremidade da plataforma robótica não colide com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o seu próprio corpo, sendo perceptível a dificuldade associada ao correto planeamento das diferentes ações motoras.

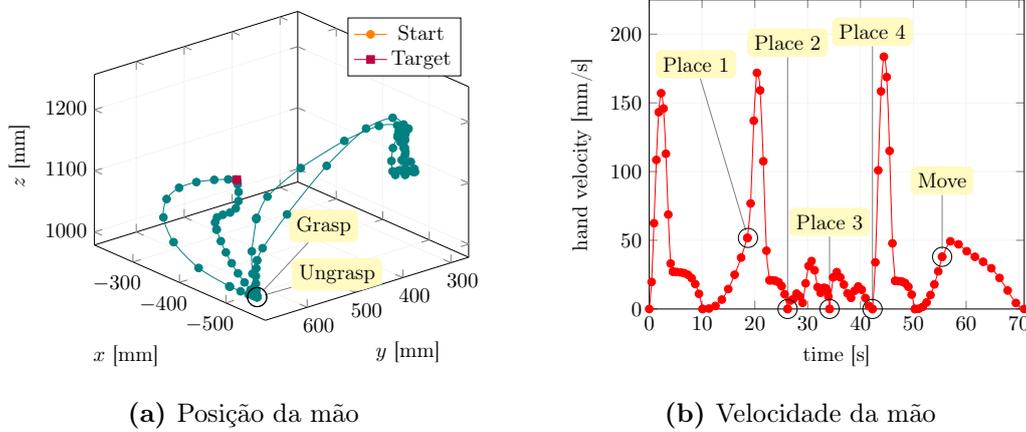


**Figura 6.28:** Características cinemáticas obtidas para o robô colaborativo Sawyer, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 2.

O planeamento dos movimentos do robô antropomórfico ARoS, por intermédio do método proposto na presente dissertação, apresenta resultados cinemáticos semelhantes aos observados nos membros superiores humanos<sup>4</sup>. Neste contexto, a extremidade da plataforma robótica percorre uma trajetória ligeiramente curva (na figura 6.29a), com exceção para os movimentos planeados para os estágios *approach* das ações motoras 2 e 3. Du-

<sup>3</sup>O registo em vídeo do robô Sawyer a executar a tarefa 2, pode ser consultado em <https://www.dropbox.com/sh/xcupg2vmoxrlt83/AAAUd8P-Sf77ahJ5j6jqdIsEa?dl=0>.

rante os referidos estágios, associados ao transporte e à manipulação da garrafa de sumo, o manipulador segue uma trajetória em linha reta até alcançar a sua posição-alvo. Em semelhança ao verificado na tarefa de interação anterior, todos os movimentos executados apresentam um perfil de velocidade da mão em forma de sino (na figura 6.29b), sendo o seu valor inicial igual ao verificado no final da ação motora precedente. Além destas características, é importante referir que, durante a realização da tarefa proposta, a extremidade da plataforma robótica não colide com os obstáculos presentes no espaço de trabalho ou com o seu próprio corpo, sendo executadas trajetória suaves, fluentes e facilmente inferidas pelo humano.



**Figura 6.29:** Características cinemáticas obtidas para o robô antropomórfico AROS, por intermédio do método de planeamento de movimentos proposto, durante a simulação da tarefa 2.

As métricas de avaliação da suavidade, obtidas para o robô antropomórfico AROS, encontram-se descritas na tabela 6.22. No geral e em semelhança ao verificado no cenário de interação anterior, a métrica adimensional **NJS** apresenta valores superiores aos determinados para a plataforma robótica Sawyer. De realçar que o processo de comparação descrito é meramente qualitativo, uma vez que os manipuladores analisados apresentam tipologias com diferentes níveis de complexidade. Neste cenário de interação, a métrica de avaliação de desempenho **NMU** apresenta valores superiores aos habitualmente registados em trabalhos experimentais realizados com os membros superiores humanos. Efetivamente, as ações motoras 3 e 4 são caracterizadas pela existência de duas unidades de movimento, estando esta discrepância relacionada com a alteração significativa da orientação do pulso,

<sup>4</sup>O registo em vídeo do robô AROS a executar a tarefa 2, pode ser consultado em <https://www.dropbox.com/sh/p587sbqqichynkg/AADoR7HG0BUIfOxk2D9C4ZO8a?dl=0>.

também observada por Rosenbaum et al. (2001), num estudo realizado sobre o comportamento do braço humano durante o desvio de obstáculos. Em relação ao tempo de resolução despendido pelo método proposto em média, para o robô antropomórfico ARoS, os movimentos são planeados em aproximadamente 5132,33 ms. Neste cenário, os processos de planeamento associados às diferentes plataformas robóticas, apresentam custos computacionais mais próximos do que os verificados na tarefa de interação anterior - no Sawyer e considerando todos os movimentos planeados, a média do tempo despendido é de aproximadamente 6702 ms. No entanto, tendo em conta a tipologia e a postura inicial do manipulador, o espaço de trabalho livre para a execução de movimentos é consideravelmente inferior no caso do robô Sawyer.

**Tabela 6.22:** Resultados do planeamento da tarefa 2, no robô antropomórfico ARoS.

Ação Motora	NJS	NMU	Tempo de resolução (ms)
1	8529,01	1	6106
2	824,21	1	2692
3	3672,02	2	7483
4	519,56	2	7315
5	5225,82	1	4682
6	58,44	1	2516

## 6.5 Discussão

A validação do método de planeamento de movimentos proposto processa-se através da realização de duas tarefas de interação: (i) a montagem de um *Toy Vehicle*, explorando a utilização do robô colaborativo Sawyer em ambientes industriais e (ii) a assistência a um humano com mobilidade reduzida, avaliando o seu desempenho durante a execução de atividades do quotidiano, direcionadas a indivíduos com deficiências cognitivas e/ou motoras.

Em semelhança ao descrito nas secções anteriores, o método de planeamento de movi-

mentos proposto permite, nos cenários de interação mencionados, gerar movimentos suaves, fluentes e livres de colisões, sendo estes facilmente compreensíveis e inferidos pelos operadores humanos. Na realidade, este método apresenta um comportamento eficaz, robusto e flexível, sendo capaz de planear trajetórias para plataformas robóticas com diferentes tipologias (nas secções 6.3.3 e 6.4.3).

A utilização do método proposto, possibilita a geração de trajetórias com características similares às observadas nos testes experimentais realizados sobre os membros superiores humanos, nas áreas da psicologia e da neurociência. Estas características relacionam-se, nomeadamente, com: (i) o perfil de velocidade da mão em forma de sino (Flash & Hogan, 1985; Rosenbaum et al., 1995; Wada & Kawato, 2004), (ii) a decomposição dos movimentos da mão em séries de sub-movimentos, durante a execução de tarefas com elevada precisão (Milner, 1992; Burdet & Milner, 1998; Burdet et al., 2013) e (iii) a existência de uma única unidade de movimento, durante a realização de tarefas de alcance - ou de duas unidades de movimento, quando ocorrem alterações significativas na orientação do pulso da plataforma robótica (Kamper et al., 2002; Chang et al., 2005; Rosenbaum et al., 2001).

Além das características mencionadas, nos cenários de interação, verifica-se que os movimentos planeados apresentam valores de **NJS** relativamente baixos. No planeamento das diferentes ações motoras conclui-se que, o valor desta métrica adimensional varia em função de um conjunto de fatores, associados: (i) à complexidade do movimento, (ii) à proximidade dos obstáculos presentes no espaço de trabalho, (iii) à postura inicial e à tipologia da plataforma robótica e /ou (iv) à distância e duração dos estágios *approach* e *retreat*.

Em relação ao tempo de resolução despendido pelo método proposto, teoricamente, o processo de planeamento apresenta custos computacionais superiores aos exigidos em tarefas de interação, executadas em ambiente real. Em condições normais, efetivamente, os humanos não necessitam de 13,37 seg - valor obtido para a ação motora 5 da tarefa de assistência a um humano com mobilidade reduzida - para processar e a reagir a informações provenientes do ambiente no qual se encontram inseridos. No entanto e tal como referido na secções anteriores, o tempo de resolução despendido varia em função de um conjunto de fatores, relacionados com: (i) o tipo de processador utilizado na obtenção dos resultados numéricos, (ii) a disposição do espaço de trabalho, (iii) a complexidade do movimento, (iv) o número de esferas que modelam o braço e a mão da plataforma robótica,

(v) a sua postura inicial e (vi) a distância entre o braço e corpo, durante a realização da tarefa proposta. Na realidade, para uma futura aplicação e validação do método proposto em ambiente real, será necessário proceder ao planeamento das trajetórias através de um processador com especificações mais avançadas, avaliando a sua eficácia e robustez em ambientes dinâmicos.

## Parte IV

# Conclusão



# Capítulo 7

---

## Discussão e Trabalho Futuro

---

A alteração dos paradigmas da robótica industrial ao longo da última década, proporcionou a projeção de novos mecanismos capazes de colaborar diretamente com os humanos e por conseguinte, partilhar o mesmo espaço de trabalho. As plataformas robóticas colaborativas disponíveis no mercado - no capítulo 1 - e inseridas nos planos estratégicos de vários governos europeus e asiáticos, permitiram automatizar uma ampla gama de tarefas repetitivas, precisas e/ou perigosas executadas em contextos industriais. Apesar destes mecanismos apresentarem diversas vantagens - relacionadas com os níveis de flexibilidade, adaptabilidade, segurança, facilidade de programação e outras características técnicas - atualmente, os seus movimentos não são autónomos. Na realidade, as trajetórias executadas pelos robôs colaborativos são o resultado da replicação de demonstrações efetuadas pelos operadores humanos.

Na presente dissertação, para dotar a plataforma colaborativa Sawyer com a capacidade de autonomamente alcançar, agarrar e manipular objetos, generalizou-se o método de planeamento de movimentos proposto por Bicho et al. (2011), Costa e Silva (2011) e Gulletta et al. (2015) para todas as tipologias de manipuladores com 7-DOF's. Neste contexto, considerou-se um conjunto de características necessárias para assegurar uma interação mais eficiente e natural, baseadas nos comportamentos dos humanos e particularmente relacionadas com: (i) a geração de movimentos compreensíveis e de fácil inferência para os operadores, (ii) a prevenção de colisões com os obstáculos presentes no espaço de trabalho, com os utilizadores e com o corpo da própria plataforma robótica e (iii) o planeamento de

movimentos em tempo real.

Atualmente, os métodos de planeamento mais utilizados na área da robótica - no capítulo 2 - englobam apenas soluções focadas na otimização dos níveis de eficácia e dos tempos de computação, sendo esta metodologia essencial para o aumento da produção e para a redução de custos associados aos diversos processos. Efetivamente, a comunidade científica não dispõe ainda de métodos robustos, capazes de transferir conhecimentos do controlo motor humano para o domínio da robótica, considerando as três condições de interação referidas anteriormente.

O método de planeamento de movimentos proposto - apresentado no capítulo 5 - engloba como premissas, um conjunto de características associadas ao comportamento do braço humano e aos modelos funcionais dos seus membros superiores - descritas no capítulo 3. Considerando os trabalhos experimentais desenvolvidos por Rosenbaum et al. (2001) e Vaughan et al. (2006) - o *The Posture-based motion planning model* - o processo de planeamento divide-se em dois subproblemas: (i) a seleção da postura final e (ii) a seleção da trajetória. Para o desvio de colisões com os obstáculos presentes no espaço de trabalho, prevê-se a execução de um segundo movimento - denominado de *back-and-forth* - que engloba a seleção da postura *bounce* mais adequada para a realização da tarefa. Neste contexto, a presente dissertação concentrou-se na generalização dos processos de seleção da postura final e de seleção da postura *bounce* para todas as tipologias de manipuladores com 7-DOF's, sendo estes determinados através de problemas de otimização não-lineares sujeitos a restrições. Efetivamente, o processo de seleção da trajetória é independente da tipologia da plataforma robótica, baseando-se no critério da minimização da variação da aceleração (Costa e Silva, 2011).

A validação do método de planeamento de movimentos proposto - no capítulo 6 - foi realizada no contexto de duas tarefas de interação: (i) a montagem de um *Toy Vehicle* e (ii) a assistência a um humano com mobilidade reduzida. Face aos objetivos apresentados anteriormente, o método proposto possibilitou a geração de movimentos suaves, fluentes e livres de colisões, sendo eficaz e flexível para plataformas robóticas com diferentes tipologias. As trajetórias planeadas apresentaram características similares às observadas em trabalhos experimentais realizados sobre o comportamento dos membros superiores humanos, como: (i) o perfil de velocidade da mão em forma de sino (Flash & Hogan, 1985; Rosenbaum et al., 1995; Wada & Kawato, 2004), (ii) a decomposição dos movimentos da

mão em séries de sub-movimentos, durante a execução de tarefas com elevada precisão (Milner, 1992; Burdet & Milner, 1998; Burdet et al., 2013), (iii) a existência de uma única unidade de movimento - ou de duas unidades de movimento, quando ocorrem alterações significativas na orientação do pulso (Rosenbaum et al., 2001) - durante a realização de tarefas de alcance (Kamper et al., 2002; Chang et al., 2005) e (iv) a obtenção de valores relativamente baixos para a métrica adimensional **NJS** (Chang et al., 2007). Considerando o conjunto de características mencionado, para avaliar se os movimentos da plataforma robótica são compreensíveis, sugere-se a realização de um caso de estudo com diferentes operadores. Alguns trabalhos experimentais, como os efetuados Chaminade et al. (2005) e Kupferberg et al. (2011), concluíram que os humanos tendem a antropomorfizar as trajetórias realizadas pelos mecanismos robóticos, relacionando diretamente a execução de intenções motoras de fácil inferência com a realização de tarefas de interação mais eficientes e naturais. Tal como mencionado nas secções anteriores, o robô colaborativo Sawyer não apresenta uma tipologia antropomórfica - sem *offsets* - sendo efetivamente necessário analisar a eficiência e eficácia do método proposto face à compreensão humana.

Em relação aos tempos de resolução despendidos durante o planeamento dos movimentos, o processador utilizado na obtenção dos resultados numéricos, não permite averiguar a aplicação do processo em tempo real. Em algumas ações motoras, os tempos obtidos são particularmente elevados - em condições normais, os humanos não necessitam de 13,37 seg para planejar o alcance de uma determinada posição, por exemplo - sendo fundamental proceder à realização de novos testes, através de um processador com especificações mais avançadas. Apesar desta discrepância, tendo em conta a estrutura física deste manipulador com 7-DOF's - descrita no capítulo 4 - a utilização do método proposto é vantajosa quando comparada com processos dependentes da cinemática inversa, em virtude da elevada complexidade associada à sua derivação e computação.

No seguimento do projeto desenvolvido e considerando as dificuldades detetadas no cenário de assistência a um humano com mobilidade reduzida, propõe-se também como trabalho futuro a alteração dos processos de modelação da cabeça da plataforma robótica e dos obstáculos existentes no espaço de trabalho. Neste contexto, sugere-se: (i) o desenvolvimento de um algoritmo para determinar a localização da cabeça em relação ao corpo do robô e (ii) a representação das obstruções existentes no ambiente através de superfícies superquádricas (como as utilizadas na modelação do corpo do robô - na secção

5.4.1). Tal como referido anteriormente, o robô colaborativo Sawyer apresenta uma das tipologias mais complexas (com 7-DOF's), sendo difícil o planeamento de trajetórias em espaços de trabalho com áreas reduzidas. Nos cenários de interação validados, verificou-se que as distâncias mínimas de segurança implementadas nos problemas de otimização (nas secções 5.5.1 e 5.5.2), não podem ser aplicadas nesta plataforma robótica. Fisicamente, a cabeça do robô encontra-se próxima de alguns pontos do seu braço, sendo inviável a utilização desta funcionalidade para o planeamento dos seus movimentos.

Adicionalmente, como trabalho futuro propõe-se também: (i) a comparação do método proposto com os algoritmos mais utilizados para o planeamento de movimentos, em contextos industriais e (ii) a validação das tarefas de interação em ambiente real, sendo este processo dependente da adaptação do sistema de visão desenvolvido por Cunhal (2014) e da integração do modelo cognitivo apresentado por Bicho et al. (2011).

---

## Bibliografia

---

- Aboelnasr, E. A., Hegazy, F. A., & Altalway, H. A. (2017). Kinematic characteristics of reaching in children with hemiplegic cerebral palsy: A comparative study. *Brain Injury*, 31(1), 83–89.
- Andani, M. E. & Bahrami, F. (2012). Comap: A new computational interpretation of human movement planning level based on coordinated minimum angle jerk policies and six universal movement elements. *Human Movement Science*, 31(5), 1037 – 1055.
- Barraquand, J., Kavraki, L., Latombe, J. C., Motwani, R., Li, T. Y., & Raghavan, P. (1997). A Random Sampling Scheme for Path Planning. *The International Journal of Robotics Research*, 16(6), 759–774.
- Bazaz, S. A. & Tondu, B. (1999). Minimum time on-line joint trajectory generator based on low order spline method for industrial manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 29(4), 257 – 268.
- Bianco, C. & Piazzzi, A. (2002). Minimum-time trajectory planning of mechanical manipulators under dynamic constraints. *International Journal of Control*, 75(13), 967–980.
- Bicho, E., Erlhagen, W., Louro, L., & Costa e Silva, E. (2011). Neuro-cognitive mechanisms of decision making in joint action: A human-robot interaction study. *Human Movement Science*, 30(5), 846–868.
- Bicho, E. & Schöner, G. (1997). The dynamic approach to autonomous robotics demonstrated on a low-level vehicle platform. *Robotics and Autonomous Systems*, 21(1), 23 – 35.
- Bloss, R. (2016). Collaborative robots are rapidly providing major improvements in productivity, safety, programing ease, portability and cost while addressing many new appli-

- cations. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 43(5), 463–468.
- Bluethmann, W., Ambrose, R., Diftler, M., Askew, S., Huber, E., Goza, M., Rehnmark, F., Lovchik, C., & Magruder, D. (2003). Robonaut: A robot designed to work with humans in space. *Autonomous Robots*, 14(2), 179–197.
- Bobrow, J. E. (1988). Optimal robot plant planning using the minimum-time criterion. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 4(4), 443–450.
- Bogue, R. (2017). Robots that interact with humans: a review of safety technologies and standards. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 44(4), 395–400.
- Bohlin, R. & Kavraki, L. E. (2000). Path planning using lazy prm. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*, volume 1 (pp. 521–528).
- Breteler, M. D. K. & Meulenbroek, R. G. J. (2006). Modeling 3d object manipulation: synchronous single-axis joint rotations? *Experimental Brain Research*, 168(3), 395–409.
- Burdet, E., Franklin, D. W., & Milner, T. E. (2013). *Human Robotics: Neuromechanics and Motor Control*. MIT Press.
- Burdet, E. & Milner, T. E. (1998). Quantization of human motions and learning of accurate movements. *Biological Cybernetics*, 78(4), 307–318.
- Chaminade, T., Franklin, D. W., Oztop, E., & Cheng, G. (2005). Motor interference between humans and humanoid robots: Effect of biological and artificial motion. In *Proceedings. The 4th International Conference on Development and Learning* (pp. 96–101).
- Chang, J. J., Tung, W. L., Wu, W. L., Huang, M. H., & Su, F. C. (2007). Effects of robot-aided bilateral force-induced isokinetic arm training combined with conventional rehabilitation on arm motor function in patients with chronic stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88(10), 1332–1338.
- Chang, J. J., Wu, T. I., Wu, W. L., & Su, F. C. (2005). Kinematical measure for spastic reaching in children with cerebral palsy. *Clinical Biomechanics*, 20(4), 381 – 388.

- Chang, J. J., Yang, Y. S., Guo, L. Y., Wu, W. L., & Su, F. C. (2008). Differences in reaching performance between normal adults and patients post stroke—a kinematic analysis. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 28(1), 53–58.
- Chettibi, T., Lehtihet, H., Haddad, M., & Hanchi, S. (2004). Minimum cost trajectory planning for industrial robots. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 23(4), 703 – 715.
- Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G. A., Burgard, W., Kavraki, L. E., & Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. MIT Press.
- Costa e Silva, E. (2011). Reaching, grasping and manipulation in anthropomorphic robot systems. *PhD Thesis, Universidade do Minho*.
- Costa e Silva, E., Costa, F., Bicho, E., & Erlhagen, W. (2011a). Human-like movement of an anthropomorphic robot: Problem revisited. *AIP Conference Proceedings*, 1389(1), 779–782.
- Costa e Silva, E., Costa, F., Bicho, E., & Erlhagen, W. (2011b). Nonlinear optimization for human-like movements of a high degree of freedom robotics arm-hand system. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2011* (pp. 327–342): Springer Berlin Heidelberg.
- Craig, J. J. (1989). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2nd edition.
- Cunhal, M. (2014). Sistema de Visão para a Interação e Colaboração Humano-Robô: Reconhecimento de Objetos, Gestos e Expressões Faciais. *Master Thesis, Universidade do Minho*.
- Cutkosky, M. R. & Howe, R. D. (1990). Human grasp choice and robotic grasp analysis. In *Dextrous Robot Hands* (pp. 5–31): Springer-Verlag New York.
- Desmurget, M., Gréa, H., & Prablanc, C. (1998). Final posture of the upper limb depends on the initial position of the hand during prehension movements. *Experimental Brain Research*, 119(4), 511–516.

- Desmurget, M. & Prablanc, C. (1997). Postural control of three-dimensional prehension movements. *Journal of neurophysiology*, 77(1), 452–64.
- Diftler, M. A., Mehling, J. S., Abdallah, M. E., Radford, N. A., Bridgwater, L. B., Sanders, A. M., Askew, R. S., Linn, D. M., Yamokoski, J. D., Permenter, F. A., Hargrave, B. K., Platt, R., Savelly, R. T., & Ambrose, R. O. (2011). Robonaut 2 - the first humanoid robot in space. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2178–2183).
- Elbanhawi, M. & Simic, M. (2014). Sampling-based robot motion planning: A review. *IEEE Access*, 2(1), 56–77.
- Elsinger, C. L. & Rosenbaum, D. A. (2003). End posture selection in manual positioning: evidence for feedforward modeling based on a movement choice method. *Experimental Brain Research*, 152(4), 499–509.
- Fankhauser, H., Glauser, D., Flury, P., Piguet, Y., Epitoux, M., Favre, J., & Meuli, R. (1994). Robot for ct-guided stereotactic neurosurgery. In *Stereotactic and functional neurosurgery*, volume 63 (pp. 93–98).
- Ferguson, D., Kalra, N., & Stentz, A. (2006). Replanning with rrts. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1243–1248).
- Field, G. & Stepanenko, Y. (1996). Iterative dynamic programming: an approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3 (pp. 2755–2760).
- Fiorini, P. & Shiller, Z. (1996). Time optimal trajectory planning in dynamic environments. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2 (pp. 1553–1558).
- Fischer, M. H., Rosenbaum, D. A., & Vaughan, J. (1997). Speed and sequential effects in reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 404–428.
- Flanagan, J. R. & Ostry, D. J. (1990). Trajectories of human multi-joint arm movements: Evidence of joint level planning. In *Experimental Robotics I: The First International Symposium Montreal* (pp. 594–613): Springer Berlin Heidelberg.

- Flash, T. & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, 5(7), 1688–1703.
- Fong, T., Nourbakhsh, I., & Dautenhahn, K. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(3), 143 – 166.
- Forlizzi, J. & DiSalvo, C. (2006). Service robots in the domestic environment: A study of the roomba vacuum in the home. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-robot Interaction, HRI '06* (pp. 258–265).
- Fourer, R., Gay, D. M., & Kernighan, B. (1989). Ampl: A mathematical programming language. In *Algorithms and Model Formulations in Mathematical Programming* (pp. 150–151).: Springer Berlin Heidelberg.
- Fryman, J. & Matthias, B. (2012). Safety of industrial robots: From conventional to collaborative applications. In *ROBOTIK 2012, 7th German Conference on Robotics* (pp. 1–5).
- Gambao, E., Balaguer, C., Barrientos, A., Saltaren, R., & Puente, E. A. (1997). Robot assembly system for the construction process automation. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, volume 1 (pp. 46–51).
- Garcia, E., Jimenez, M. A., Santos, P. G. D., & Armada, M. (2007). The evolution of robotics research. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 14(1), 90–103.
- Gasparetto, A. & Zanotto, V. (2008). A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), 415 – 426.
- Gasparetto, A. & Zanotto, V. (2010). Optimal trajectory planning for industrial robots. *Advances in Engineering Software*, 41(4), 548 – 556.
- Geraerts, R. & Overmars, M. H. (2004). A comparative study of probabilistic roadmap planners. In J.-D. Boissonnat, J. Burdick, K. Goldberg, & S. Hutchinson (Eds.), *Algorithmic Foundations of Robotics V* (pp. 43–57). Springer Berlin Heidelberg.
- Gockley, R. & Mataric, M. J. (2006). Encouraging physical therapy compliance with a hands-off mobile robot. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-robot Interaction, HRI '06* (pp. 150–155).: ACM.

- Graf, B., Hans, A., Kubacki, J., & Schraft, R. D. (2002). Robotic home assistant care-robot ii. In *Proceedings of the Second Joint 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society* [Engineering in Medicine and Biology, volume 3 (pp. 2343–2344)].
- Graziano, M. S. A., Taylor, C. S. R., Moore, T., & Cooke, D. F. (2002). The cortical control of movement revisited. *Neuron*, 36(3), 349 – 362.
- Gréa, H., Desmurget, M., & Prablanc, C. (2000). Postural invariance in three-dimensional reaching and grasping movements. *Experimental Brain Research*, 134(2), 155–162.
- Gulletta, G., Araújo, S. M., Costa e Silva, E., Costa, M. F., Erlhagen, W., & Bicho, E. (2015). Nonlinear optimization for human-like synchronous movements of a dual arm-hand robotic system. *AIP Conference Proceedings 1648*, 1648(1).
- Harris, C. M. & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780–784.
- Hwang, Y. K. & Ahuja, N. (1992). Gross motion planning - a survey. *ACM Comput. Surv.*, 24(3), 219–291.
- Iossifidis, I. & Schoner, G. (2004). Autonomous reaching and obstacle avoidance with the anthropomorphic arm of a robotic assistant using the attractor dynamics approach. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 5 (pp. 4295–4300).
- Iossifidis, I. & Schoner, G. (2006). Dynamical systems approach for the autonomous avoidance of obstacles and joint-limits for an redundant robot arm. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 580–585).
- Kamper, D., McKenna-Cole, A. N., Kahn, L. E., & Reinkensmeyer, D. J. (2002). Alterations in reaching after stroke and their relation to movement direction and impairment severity. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 83, 702–7.
- Kang, S. B. & Ikeuchi, K. (1994). Determination of motion breakpoints in a task sequence from human hand motion. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1 (pp. 551–556).

- Karaman, S. & Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *CoRR*, 30(7), 846–894.
- Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J. C., & Overmars, M. H. (1996). Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(4), 566–580.
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Int. J. Rob. Res.*, 5(1), 90–98.
- Kim, J. O. & Khosla, P. K. (1992). Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(3), 338–349.
- Krüger, J., Lien, T., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals*, 58(2), 628 – 646.
- Kuffner, J. J. & LaValle, S. M. (2000). Rrt-connect: An efficient approach to single-query path planning. In *Proceedings 2000 ICRA, Millennium Conference, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Symposia Proceedings*, volume 2 (pp. 995–1001).
- Kupferberg, A., Glasauer, S., Huber, M., Rickert, M., Knoll, A., & Brandt, T. (2011). Biological movement increases acceptance of humanoid robots as human partners in motor interaction. *AI Soc.*, 26(4), 339–345.
- Latombe, J. C. (1991). *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers.
- Latombe, J. C. (1999). Motion planning: A journey of robots, molecules, digital actors, and other artifacts. *I. J. Robotics Res.*, 18(11), 1119–1128.
- LaValle, S. M. (1998). Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning. *Techreport*, 11.
- LaValle, S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.
- LaValle, S. M. & Kuffner, J. J. (2000). Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. In *Algorithmic and Computational Robotics: New Directions* (pp. 293–308).

- Leven, P. & Hutchinson, S. A. (2002). Toward Real-Time Path Planning in Changing Environments. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 21(12), 999–1030.
- Lin, C., Chang, P., & Luh, J. (1983). Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 28(12), 1066–1074.
- Meulenbroek, R. G. J., Rosenbaum, D. A., Jansen, C., Vaughan, J., & Vogt, S. (2001). Multijoint grasping movements: Simulated and observed effects of object location, object size, and initial aperture. *Experimental Brain Research*, 138(2), 219–234.
- Milner, T. E. (1992). A model for the generation of movements requiring endpoint precision. *Neuroscience*, 49(2), 487 – 496.
- Monteiro, S., Vaz, M., & Bicho, E. (2004). Attractor dynamics generates robot formation: from theory to implementation. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 3 (pp. 2582–2586).
- Movellan, J. R., Tanaka, F., Fortenberry, B., & Aisaka, K. (2005). The rubi/qrio project: Origins, principles, and first steps. In *Proceedings The 4th International Conference on Development and Learning* (pp. 80–86).
- Napier, J. R. (1956). The prehensile movements of the human hand. *Bone and Joint Journal*, 38-B(4), 902–913.
- Osherson, D. N., Kosslyn, S. M., & Hollerbach, J. M. (1990). *An Invitation to Cognitive Science: Visual cognition and action*, volume 2 of *An Invitation to Cognitive Science*. MIT Press.
- Park, W., Chaffin, D. B., & Martin, B. J. (2004). Toward memory-based human motion simulation: development and validation of a motion modification algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 34(3), 376–386.
- Piazzi, A. & Visioli, A. (2000). Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(1), 140–149.

- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B. P., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., & Ng, A. Y. (2009). Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA Workshop on Open Source Software*, volume 3.
- Reimann, H., Iossifidis, I., & Schöner, G. (2010). Generating collision free reaching movements for redundant manipulators using dynamical systems. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5372–5379).
- Robins, B., Dautenhahn, K., Boekhorst, R., & Billard, A. (2005). Robotic assistants in therapy and education of children with autism: Can a small humanoid robot help encourage social interaction skills? In *Universal Access in the Information Society*, volume 4 (pp. 105–120).: Springer-Verlag.
- Rohmer, E., Singh, S. P. N., & Freese, M. (2013). V-rep: A versatile and scalable robot simulation framework. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 1321–1326).
- Rosenbaum, D. A. (1991). Reaching and grasping. In *Human Motor Control* (pp. 1997–228). Academic Press, 2 edition.
- Rosenbaum, D. A., Loukopoulos, L. D., Meulenbroek, R. G., Vaughan, J., & Engelbrecht, S. E. (1995). Planning reaches by evaluating stored postures. *Psychological review*, 102(1), 28–67.
- Rosenbaum, D. A., Meulenbroek, R., Vaughan, J., & Jansen, C. (2001). Posture-based motion planning: applications to grasping. *Psychological review*, 108(4), 709–734.
- Rosenbaum, D. A., Meulenbroek, R. G. J., Vaughan, J., & Jansen, C. (1999). Coordination of reaching and grasping by capitalizing on obstacle avoidance and other constraints. *Experimental Brain Research*, 128(1-2), 92–100.
- Santos, R. R., Steffen, V., & Saramago, S. F. P. (2008). Robot path planning in a constrained workspace by using optimal control techniques. *Multibody System Dynamics*, 19(1), 159–177.
- Saramago, S. & Steffen, V. (1998). Optimization of the trajectory planning of robot manipulators taking into account the dynamics of the system. *Mechanism and Machine Theory*, 33(7), 883 – 894.

- Sato, K. (1992). Deadlock-free motion planning using the laplace potential field. *Advanced Robotics*, 7(5), 449–461.
- Schaal, S. (2007). The new roboticstowards humancentered machines. *HFSP Journal*, 1(2), 115–126.
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 70 – 76.
- Shin, K. & McKay, N. (1985). Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 30(6), 531–541.
- Short, A., Pan, Z., Larkin, N., & Duin, S. V. (2016). Recent progress on sampling based dynamic motion planning algorithms. In *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (pp. 1305–1311).
- Siciliano, B. & Khatib, O., Eds. (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Soechting, J. F., Buneo, C. A., Herrmann, U., & Flanders, M. (1995). Moving effortlessly in three dimensions: Does donders' law apply to arm movement? *Journal of Neuroscience*, 15(9), 6271–6280.
- Steinhage, A. & Schöner, G. (1997). Self-calibration based on invariant view recognition: Dynamic approach to navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 20(2), 133 – 156.
- Thomas, C., Matthias, B., & Kuhlenkötter, B. (2016). Humanrobot collaboration new applications in industrial robotics. *International Conference on Competitive Manufacturing*, (pp. 293–301).
- Tsuji, T., Morasso, P. G., & Kaneko, M. (1996). Trajectory generation for manipulators based on artificial potential field approach with adjustable temporal behavior. In *Intelligent Robots and Systems '96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2 (pp. 438–443 vol.2).
- Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. *Biological Cybernetics*, 61(2), 89–101.

- Vaughan, J., Rosenbaum, D. A., & Meulenbroek, R. G. J. (2001). Planning reaching and grasping movements: The problem of obstacle avoidance. *Motor Control*, 5(2), 116–135.
- Vaughan, J., Rosenbaum, D. A., & Meulenbroek, R. G. J. (2006). Modeling Reaching and Manipulating in 2- and 3-D Workspaces: The Posture-Based Model. *International Conference on Development and Learning*, 1, 3–8.
- Wächter, A. & Biegler, L. T. (2006). On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical Programming*, 106(1), 25–57.
- Wada, Y. & Kawato, M. (2004). A via-point time optimization algorithm for complex sequential trajectory formation. *Neural Networks*, 17(3), 353 – 364.
- Warren, C. W. (1989). Global path planning using artificial potential fields. In *Proceedings 1989 International Conference on Robotics and Automation*, volume 1 (pp. 316–321).
- Wolf, A., Brown, H. B., Casciola, R., Costa, A., Schwerin, M., Shamas, E., & Choset, H. (2003). A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks. In *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3 (pp. 2889–2895 vol.3).
- Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends in Cognitive Sciences*, 1(6), 209 – 216.
- Yershova, A., Jaillet, L., Simeon, T., & LaValle, S. M. (2005). Dynamic-domain rrts: Efficient exploration by controlling the sampling domain. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3856–3861).
- Zhang, L., Kim, Y. J., & Manocha, D. (2007). A hybrid approach for complete motion planning. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 7–14).