

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

INDRA RANI ARAUJO

**ATMOSBOT: PROPOSTA DE
MODELAGEM SIMULADA PARA ROBÔ
AUTÔNOMO MÓVEL DOMÉSTICO**

**Bagé
2023**

INDRA RANI ARAUJO

**ATMOSBOT: PROPOSTA DE
MODELAGEM SIMULADA PARA ROBÔ
AUTÔNOMO MÓVEL DOMÉSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Milton Roberto Heinen

**Bagé
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

-- Araujo, Indra Rani
AtmosBot: Proposta de Modelagem Simulada para Robô Autônomo Móvel Doméstico / Indra Rani Araujo.
122 f.: il.
Orientador: Milton Roberto Heinen
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pampa, Engenharia de Computação, 2023.
1. Navegação. 2. Simulação. 3. Exploração.
I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

INDRA RANI ARAUJO

**ATMOSBOT: PROPOSTA DE
MODELAGEM SIMULADA PARA ROBÔ
AUTÔNOMO MÓVEL DOMÉSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 07, de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Milton Roberto Heinen
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Fabio Ramos
UNIPAMPA

Prof^ª. Dr^ª. Sandra Piovesan
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **FABIO LUIS LIVI RAMOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2023, às 22:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SANDRA DUTRA PIOVESAN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MILTON ROBERTO HEINEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1332685** e o código CRC **B42DD461**.

Referência: Processo nº 23100.025565/2023-71 SEI nº 1332685

Dedico este trabalho a minha mãe Olívia, por ser, em todos os âmbitos de sua vida, a mulher mais guerreira, inteligente e esforçada que conheço. Por ela ser uma pesquisadora renomada em sua área e por ser uma pessoa justa que sempre visa o melhor para todos. Me inspiro por completo nela e almejo me tornar um pouco mais como ela diariamente.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, a minha mãe que me possibilitou ter oportunidades incríveis e me ensinou conhecimentos e valores incomparáveis, tais quais me permitiram chegar aonde me encontro atualmente.

Além disso, agradeço a meu orientador, Milton Heinen, por sempre me acalmar nos momentos difíceis durante a execução deste trabalho e brilhar meus olhos ao conversarmos sobre robótica inteligente.

Agradeço a meus professores, Sandra Piovesan e Fábio Ramos, que fazem parte da minha banca examinadora, por aceitarem avaliar este trabalho e dedicarem seu tempo para analisá-lo.

Também agradeço a todos os meus colegas e familiares por aguentarem os meus surtos neste último ano de graduação.

Por último, agradeço a todos os meus professores do curso que me mostraram, mesmo que indiretamente, o caminho a ser trilhado e a capacidade que possuo de pertencer à área de Computação, apesar de todos os pesares.

RESUMO

Os robôs de serviço doméstico estão cada vez mais presentes, podendo desempenhar um papel relevante no auxílio da execução das tarefas diárias domiciliares, em diversas ocasiões. Eles são benéficos para as pessoas com algum grau de limitação motora, sobrecarga laboral, famílias monoparentais ou até mesmo como regalia. Entretanto, o processo completo de elaborar, desenvolver e validar um robô de serviço doméstico, consome recursos e tempo em excesso. Esses gastos contrapõem-se às teorias de *time-to-market* e do triângulo de ferro que definem a atual dinâmica do mercado e de inovações. Dito isso, para contornar essa problemática, neste trabalho é proposto a modularização do desenvolvimento de um robô de serviço doméstico, implementando funcionalidades independentes com as tecnologias mais relevantes e adequadas. Assim, no intuito de iniciar essa modularização e analisar as suas consequências, foi modelado um robô simulado com a capacidade de executar independentemente a funcionalidade essencial do robô de serviço doméstico: a navegação autônoma. Foi utilizada a abordagem SLAM em combinação com sensor LiDaR para mapear, localizar e, conseqüentemente, navegar em um ambiente domiciliar desconhecido simulado. No intuito de validar o modelo desenvolvido, uma série de testes foi efetuada conforme os cenários estabelecidos em um conjunto de casos de teste, elaborados para este trabalho. Ademais, foi realizada uma análise comparativa entre trabalhos correlatos e os resultados obtidos com o AtmosBot. Por fim, com tal validação foi identificado que o modelo proposto apresenta o comportamento esperado para um robô autônomo móvel doméstico, utilizando tecnologias relevantes ao contexto inserido, além de adequadas para redução de recursos e tempo dispendidos no seu desenvolvimento.

Palavras-chave: Navegação. Simulação. Exploração.

ABSTRACT

Domestic service robots are increasingly present and can play a relevant role in helping people carry out daily household tasks on a number of occasions. They are beneficial for people with some degree of motor limitation, work overload, single-parent families, or even as a perk. However, the entire process of designing, developing and validating a domestic service robot consumes excessive resources and time. These costs are contrary to the theories of time-to-market and the iron triangle that define the current market and innovation dynamic. In order to overcome this problem, this work proposes modularizing the development of a domestic service robot, implementing independent functionalities with the most relevant and appropriate technologies. Thus, in order to initiate this modularization and analyze its consequences, a simulated robot was modeled with the ability to independently perform the essential functionality of a domestic service robot: the autonomous navigation. The SLAM approach was used in combination with the LiDaR sensor to map, locate and, consequently, navigate in an unknown simulated home environment. In order to validate the model developed, a series of tests were carried out according to the scenarios established in a set of test cases prepared for this work. In addition, a comparative analysis was carried out between related work and the results obtained with AtmosBot. Finally, this validation identified that the proposed model presents the expected behavior for an autonomous mobile domestic robot, using technologies that are relevant to the context in which it is inserted, as well as being suitable for reducing resources and time spent on its development.

Keywords: Navigation, Exploration, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma das etapas da metodologia.....	19
Figura 2	Diferença entre roda padrão e roda Mecanum.....	28
Figura 3	IA clássica.....	29
Figura 4	Arquitetura de subsunção	30
Figura 5	Estrutura física do Robô Herbert	35
Figura 6	Estrutura física do Robô Justina	38
Figura 7	Estrutura física do TurtleBot3.....	39
Figura 8	Estrutura física do DPoom.....	41
Figura 9	Estrutura física do robô autônomo móvel com LiDaR e RGB-D.....	41
Figura 10	Resultado completo da pesquisa bibliográfica de abordagens para localização de robôs autônomos móveis.....	46
Figura 11	Resultado da pesquisa bibliográfica de abordagens para localização de robôs autônomos móveis.....	47
Figura 12	Resultado completo da pesquisa bibliográfica de instrumentos de percepção do ambiente.....	48
Figura 13	Resultado da pesquisa bibliográfica de instrumentos de percepção do ambiente.....	49
Figura 14	Estados principais do AtmosBot.....	51
Figura 15	Diagrama de blocos do modelo	52
Figura 16	Fluxograma do algoritmo de vagar sem colidir	54
Figura 17	Fluxograma da interação entre Slam Toolbox e Nav2.....	56
Figura 18	Diagrama da integração dos componentes do AtmosBot	58
Figura 19	Estrutura física do AtmosBot	60
Figura 20	Diagrama de articulações do AtmosBot	60
Figura 21	Capturas do sensor LiDaR.....	61
Figura 22	Mapa em criação pelo Slam Toolbox	63
Figura 23	Mapa de custos temporário.....	64
Figura 24	Imagem do mapa criado pela exploração	65
Figura 25	Trajectoria elaborada pelo Nav2.....	66
Figura 26	Ambiente elaborado pela plataforma AWS	67
Figura 27	Captura da primeira repetição CT01	70
Figura 28	Captura da primeira repetição CT02	71
Figura 29	Captura da primeira repetição CT03	71
Figura 30	Captura da primeira repetição CT04	72
Figura 31	Captura da primeira repetição CT05	72
Figura 32	Resultados dos testes com repetições	73
Figura 33	Captura da repetição do CT01 mal-sucedida	74
Figura 34	Captura da repetição CT02 mal-sucedida.....	75
Figura 35	Captura da primeira repetição CT01	94
Figura 36	Captura da segunda repetição CT01	95
Figura 37	Captura da terceira repetição CT01	96
Figura 38	Captura da quarta repetição CT01	97
Figura 39	Captura da quinta repetição CT01	98
Figura 40	Captura da primeira repetição CT02	100
Figura 41	Captura da segunda repetição CT02.....	101
Figura 42	Captura da terceira repetição CT02.....	102
Figura 43	Captura da quarta repetição CT02.....	103

Figura 44	Captura da quinta repetição CT02	104
Figura 45	Captura da primeira repetição CT03	106
Figura 46	Captura da segunda repetição CT03	107
Figura 47	Captura da terceira repetição CT03	108
Figura 48	Captura da quarta repetição CT03	109
Figura 49	Captura da quinta repetição CT03	110
Figura 50	Captura da primeira repetição CT04	111
Figura 51	Captura da segunda repetição CT04	112
Figura 52	Captura da terceira repetição CT04	112
Figura 53	Captura da quarta repetição CT04	113
Figura 54	Captura da quinta repetição CT04	113
Figura 55	Captura da primeira repetição CT05	115
Figura 56	Captura da segunda repetição CT04	116
Figura 57	Captura da terceira repetição CT04	117
Figura 58	Captura da quarta repetição CT04	118
Figura 59	Captura da quinta repetição CT04	119
Figura 60	Captura do teste CT06	120
Figura 61	Captura do teste CT07	121
Figura 62	Captura do teste CT08	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Critérios de inclusão e exclusão	22
Tabela 2	Principais características dos trabalhos correlatos comparados com AtmosBot	43
Tabela 3	Comparação dos resultados do AtmosBot com trabalhos correlatos	76
Tabela 4	Modelo dos requisitos.....	86
Tabela 5	RFS01	87
Tabela 6	RFS02	87
Tabela 7	RNFS01	87
Tabela 8	RNFS02	87
Tabela 9	RNFA01	88
Tabela 10	RNFA02.....	88
Tabela 11	RNFA03.....	88
Tabela 12	RNFA04.....	88
Tabela 13	Modelo dos casos de teste	89
Tabela 14	Caso de teste CT01 referente a RFS01	90
Tabela 15	Caso de teste CT02 referente a RFS02	90
Tabela 16	Caso de teste CT03 referente a RNFS01	90
Tabela 17	Caso de teste CT04 referente a RNFS02	91
Tabela 18	Caso de teste CT05 referente a RNFA01	91
Tabela 19	Caso de teste CT06 referente a RNFA03	91
Tabela 20	Caso de teste CT07 referente a RNFA04	92
Tabela 21	Caso de teste CT08 referente a RNFA05	92
Tabela 22	Resultados das repetições CT01	93
Tabela 23	Resultados das repetições CT02.....	99
Tabela 24	Resultados das Repetições CT03.....	105
Tabela 25	Resultados das repetições CT04.....	111
Tabela 26	Resultados das repetições CT05.....	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACM	Association for Computing Machinery
AMCL	Adaptive Monte Carlo Localization
AVC	Acidente Vascular Cerebral
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DSR	Design Science Research
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPU	Graphic Processing Unit
IA	Inteligência Artificial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LiDaR	Light Detection and Range
ODE	Open Dynamics Engine
RAM	Random Access Memory
RGB	Red, Green and Blue
RGB-D	Red, Green and Blue - Depth
ROS	Robot Operating System
RVIZ	ROS Visualization
SDF	Standard Description Format
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
URDF	Universal Robotic Description Format
XML	eXtensible Markup Language
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 Organização do trabalho	18
2 METODOLOGIA	19
2.1 Etapa de Pesquisa Bibliográfica.....	20
2.2 Etapa de Modelagem da Solução.....	23
2.3 Etapa de Validação Final.....	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 Robô Autônomo Móvel	25
3.1.1 Navegação Autônoma do Robô	26
3.1.2 Abordagens de Arquitetura de Controle	28
3.1.3 Estrutura Física do Robô	31
3.2 Simulação.....	32
3.3 Considerações Adicionais da Fundamentação Teórica	34
4 TRABALHOS CORRELATOS	35
4.1 Robô de Serviço Doméstico Herbert	35
4.2 Robô de Serviço Doméstico Justina.....	37
4.3 TurtleBot3 com SLAM	39
4.4 Robô Autônomo Móvel DPoom	40
4.5 Robô Autônomo Móvel com LiDaR e RGB-D.....	40
4.6 Análise dos Trabalhos Correlatos.....	42
5 DESENVOLVIMENTO DO ATMOSBOT	45
5.1 Proposta de Solução do AtmosBot.....	45
5.2 Especificação de Requisitos	49
5.3 Modelagem do Sistema	50
5.4 Implementação da Proposta.....	53
5.4.1 Simulação.....	53
5.4.2 Navegação Autônoma.....	54
5.4.3 Sistema Operacional de Robô	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
6.1 Modelo Proposto	59
6.2 Ambiente Simulado.....	67
6.3 Resultados dos Testes.....	68
6.4 Destaques do AtmosBot	75
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A – DOCUMENTO DE ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SISTEMA	84
A.1 Introdução.....	84
A.1.1 Propósito	84
A.1.2 Escopo	84
A.1.3 Definições	84
A.1.4 Organização.....	85
A.2 Descrição geral	85
A.2.1 Perspectiva do sistema	85
A.2.2 Funções do sistema.....	85

A.2.3	Características do usuário.....	86
A.3	Requisitos específicos	86
A.3.1	Requisitos Funcionais do Sistema.....	87
A.3.2	Requisitos Não Funcionais do Ambiente Simulado	88
APÊNDICE B – DETALHAMENTO DOS CASOS DE TESTE		89
B.1	Introdução.....	89
B.2	Casos de teste.....	89
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES.....		93
C.1	Caso de Teste CT01 Referente a RFS01.....	93
C.2	Caso de Teste CT02 Referente a RFS02.....	99
C.3	Caso de Teste CT03 Referente a RNFS01	104
C.4	Caso de Teste CT04 Referente a RNFS02.....	110
C.5	Caso de Teste CT05 Referente a RNFA01.....	114
C.6	Caso de Teste CT06 Referente a RNFA03.....	119
C.7	Caso de Teste CT07 Referente a RNFA04.....	120
C.8	Caso de Teste CT08 Referente a RNFA05.....	122

1 INTRODUÇÃO

As razões são inúmeras para obter algum impacto negativo na execução de tarefas consideradas básicas do cotidiano, como preparar uma mesa de jantar; apanhar uma caneca no armário; colocar roupas na máquina de lavar. As atividades do dia a dia podem ser afetadas diretamente por conta de uma limitação motora, seja por um grau leve ou grave, considerando o âmbito da saúde. Isso estende-se ao contexto socio-econômico, atingindo pessoas sobrecarregadas pelo seu trabalho e figuras maternas em famílias monoparentais.

Ter algum tipo de deficiência motora, temporária ou permanente, é algo que afeta (ou afetará) praticamente todos os seres humanos, independente da nacionalidade, etnia ou outra característica (WHO, 2023). Segundo WHO (2023), cerca de 16% da população mundial tem uma deficiência significativa, tal estimativa corresponde a 13 milhões de pessoas no mundo atualmente.

Em um século constituído pelo aumento dos empregos informais e sobrecarga laboral, se encontra uma população precarizada e com a qualidade de vida impactada negativamente (STEHLING, 2019). O conjunto desses fatores culmina em um desequilíbrio perigoso entre o trabalho e a vida pessoal, afetando as necessidades básicas dentro do lar (SINGH; AGGARWAL; SAHNI, 2023; STEHLING, 2019). Tal situação pode alcançar o extremo caracterizado pelo *burnout*, apresentado em cerca de 30% dos brasileiros (EM, 2023).

Famílias monoparentais encontram grande dificuldade nas tarefas cotidianas domiciliares e atualmente consistem em mais de 11 milhões de famílias brasileiras (G1, 2023). A responsabilidade de manter a organização do lar é carregada fardamente pelas mães solas (BALIANA, 2014; GALVÃO, 2020). Elas se encontram em um equilíbrio pesado entre as atividades da casa, cuidado dos filhos, possível cuidado de idosos e o seu trabalho, sendo esse em sua maioria um conjunto de subempregos, visto o preconceito do mercado contra mães solas (GALVÃO, 2020).

Apesar das dificuldades recorrentes apresentadas anteriormente, o amparo a elas não é potencializado na sociedade. As residências atuais possuem impedimentos para aqueles com limitações motoras por conta das suas arquiteturas inacessíveis (WHO et al., 2018), assim como, frequentemente não é possível ter o amparo social, da família e dos amigos (RESENDE; TELES; ALVARADO, 2018). O mesmo sucede para pessoas sobrecarregadas e em famílias monoparentais que não têm uma rede de apoio

(STEHLING, 2019; GALVÃO, 2020).

Entretanto, uma alternativa que cresce e fortalece com o avanço da tecnologia nas últimas décadas são os robôs autônomos móveis, capazes de executar tarefas cotidianas em uma casa de acordo com comandos de um ser humano. Um exemplo comumente encontrado e amplamente utilizado na atualidade são os aspiradores de pó autônomos, que desempenham um papel importante ao facilitar as atividades diárias, como a higienização básica do ambiente de convívio (IROBOT, 2022).

O protótipo *Handy* da Samsung, demonstrado em 2021 por uma coletiva de imprensa, é uma alternativa adequada para auxiliar nas tarefas cotidianas (SAMSUNG, 2021). Ele desempenha um papel semelhante ao de um empregado, movendo objetos de um ponto a outro conforme um comando, arrumando a mesa de jantar ou até mesmo colocando as louças para lavar.

Os robôs autônomos móveis são dispositivos que conseguem navegar em um espaço sem monitoramento a fim de executarem uma atividade determinada. Regularmente, são utilizados no contexto de robôs de serviço doméstico, os quais conseguem interagir com seres humanos, receber comandos e a partir deles, atuar no ambiente. A base desses robôs é composta por funcionalidades essenciais, cada qual com seus desafios específicos, sendo elas: i) navegação autônoma; ii) reconhecimento de objetos; iii) manipulação de objetos e iv) interação robô-humano.

Como supracitado, os robôs autônomos móveis, em específico os de serviço doméstico, são dispositivos complexos com sub-tarefas cruciais para o seu funcionamento. Modelar, construir e testar estes sistemas são trabalhos excessivamente extensos e complicados, necessitando recursos, tempo e uma equipe de profissionais. Cada funcionalidade necessita ser testada exaustivamente, individual e integralmente com o sistema, a fim de captar falhas e possibilitar aprimoramento.

Ao desenvolver uma nova aplicação, se torna desvantajosa a presença dos fatores mencionados (alta complexidade e extensão). Visto que, no âmbito empresarial da tecnologia, há uma discussão em relação ao *time-to-market*, tornando esses elementos uma preocupação para o projeto. Isso é resultado da exigência criada pelo mercado para que o lançamento de um novo produto ocorra no momento certo (YASSINE; SOUWEID, 2021; COHEN; ELIASBERG; HO, 1996; BELAY; KEKÄLE; HELO, 2011). Portanto, o desenvolvimento de um novo artefato pode ser favorecido pela redução do tempo da sua elaboração, tanto para os aspectos de relevância no mercado quanto de custos (COHEN; ELIASBERG; HO, 1996; BELAY; KEKÄLE; HELO, 2011).

Ademais, a produção de um novo artefato, como um robô, é o fruto da execução de um projeto. Sendo assim, ao desenvolver um projeto, é essencial manter o equilíbrio entre o escopo, tempo e os recursos utilizados, para que a sua qualidade seja assegurada (PMI, 2021). Esses fatores são pilares interdependentes, identificados como o triângulo de ferro de um projeto, que norteiam o resultado do produto final (PMI, 2021). Ao utilizar meios para desenvolver um robô de serviço doméstico, por exemplo, em um tempo adequado e consumindo apenas os recursos necessários, asseguramos que os seus objetivos e requisitos (o escopo) sejam alcançados de forma satisfatória (PMI, 2021).

A partir da problemática apresentada pelas teorias de *time-to-market* e do triângulo de ferro, seria possível desenvolver um robô de serviço doméstico com as tecnologias adequadas e relevantes?

Diante desse problema, um caminho satisfatório para contornar tais dificuldades é a modelagem simulada das tarefas do robô. Inicialmente, as funcionalidades mais essenciais do sistema devem ser moduladas, a fim de obter uma base íntegra e estável para futuros incrementos e aprimoramentos. Portanto, em suma, este projeto propõe um modelo incrementável simulado de um robô capaz de realizar a atividade primordial de um robô de serviço doméstico: a navegação autônoma.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa propor um modelo simulado de um robô autônomo móvel doméstico. O robô da presente proposta tem o objetivo de atuar simuladamente em um ambiente interno dinâmico desconhecido e realizar a tarefa primordial de um robô de serviço doméstico: a navegação autônoma.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Analisar tecnologias variadas relevantes de robôs móveis autônomos com propostas semelhantes por meio de uma revisão bibliográfica narrativa;
2. Dentre as tecnologias encontradas, selecionar as que apresentam maior relevância conforme análise efetuada, a fim de implementá-las para realizarem a navegação

- autônoma do robô em um ambiente interno dinâmico desconhecido;
3. Validar o modelo proposto do robô autônomo móvel simulado.

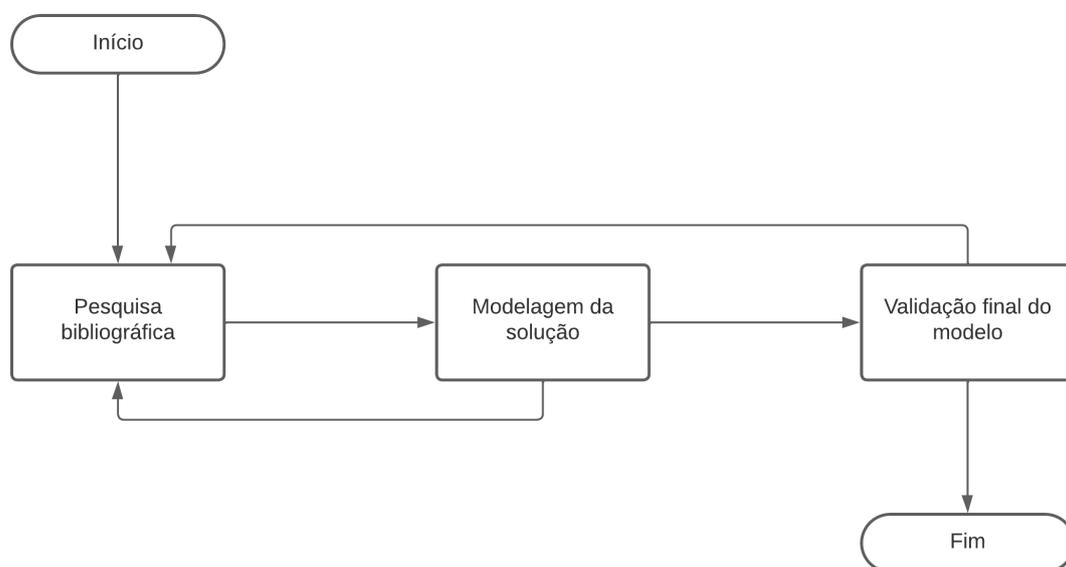
1.2 Organização do trabalho

A fim de expor o conhecimento necessário deste trabalho, o mesmo foi organizado com o Capítulo 2, no qual foram explicadas as etapas da metodologia utilizada. Em seguida, há os capítulos Capítulo 3 e Capítulo 4 que fundamentam as teorias de robôs autônomos móveis e simulação robótica, além de exporem as pesquisas mais recentes e relevantes correlatas ao AtmosBot. Posteriormente, se encontra o Capítulo 5 com a proposta, a modelagem do protótipo e os detalhes do desenvolvimento da solução. Por fim, há o Capítulo 6, onde são expostos e discutidos os resultados obtidos, além do Capítulo 7 com as considerações finais. Ademais, o trabalho possui o Apêndice A que constitui a especificação dos requisitos do sistema e do ambiente simulados, além do Apêndice B com os casos de teste utilizados para a validação final do modelo e o Apêndice C, expondo os resultados obtidos nos testes executados.

2 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada para realizar o presente trabalho. Para isso, foram definidas três grandes etapas (Figura 1): i) pesquisa bibliográfica na qual são analisadas tecnologias variadas relevantes ao contexto do trabalho, ii) modelagem da solução na qual o robô simulado é desenvolvido, iii) validação final do modelo completamente integrado com análise do resultado.

Figura 1 – Fluxograma das etapas da metodologia



Fonte: Autora (2023).

O fluxograma apresentado na Figura 1 apresenta a aplicação da metodologia deste trabalho. O fluxo exposto mostra que a partir da primeira etapa, definida pela pesquisa bibliográfica, todas as próximas etapas retornam ao início. Isso ocorre pela necessidade da consulta à literatura em todos os momentos de elaboração e validação do artefato final, a fim de obter os conhecimentos para implementar as tecnologias adequadas e analisar os resultados obtidos.

A metodologia desempenhada no referente trabalho foi baseada na abordagem de *Design Science Research* (DSR). Essa, por sua vez, é aplicada em pesquisas que almejam produzir um artefato (como um modelo ou uma aplicação) para solucionar um problema relevante (DRESCH et al., 2015). A pesquisa deste trabalho cumpre as orientações para uma pesquisa de *Design Science*, dispostas por Hevner et al. (2004), reforçando como esta metodologia é apropriada para este trabalho.

Assim, conforme os critérios da DSR, este trabalho visa produzir um artefato viável a partir do modelo a ser proposto para resolver o problema de desenvolvimento de robôs de serviço doméstico disposto anteriormente. Além de contribuir para a pesquisa de implementação de tecnologias para: a navegação autônoma e simulação robótica. Também, possui métodos específicos para a construção do modelo (seguindo a abordagem incremental de desenvolvimento de *software*) e sua validação (utilizando casos de teste).

Para Dresch et al. (2015), a metodologia DSR propõe uma pesquisa com 12 etapas, nas quais o problema a ser resolvido é identificado, as suas teorias e conceitos são estudados a partir de uma pesquisa bibliográfica e os artefatos semelhantes, para a solução do problema em questão, são constatados. Com isso, o artefato é desenvolvido e validado. Por fim, o resultado obtido é analisado e as conclusões são divulgadas para contribuir na área de pesquisa. Portanto, as três grandes etapas (Figura 1) a serem conduzidas neste trabalho se baseiam nesse fluxo de atividades proposto pelo DSR.

2.1 Etapa de Pesquisa Bibliográfica

A fim de desenvolver um robô autônomo móvel com as tecnologias mais adequadas e relevantes atualmente, foram realizadas duas pesquisas bibliográficas específicas. Essas pesquisas buscam identificar quais são as tecnologias mais utilizadas ao implementar a localização de um robô autônomo móvel, principalmente as abordagens utilizadas e os instrumentos de percepção do ambiente integrados.

Essas pesquisas bibliográficas específicas foram realizadas através do método de revisão da literatura narrativa com o uso de algumas características chaves da revisão sistemática. A fim de obter resultados mais imparciais e replicáveis, foram utilizados aspectos importantes da revisão sistemática dispostos em Ravindran e Shankar (2015), sendo eles: i) uma declaração explícita das perguntas a serem respondidas; ii) uma sequência de palavras-chave para cada pesquisa específica; iii) critérios de inclusão e exclusão para a filtragem dos artigos obtidos pelas buscas.

Optou-se por realizar uma revisão narrativa por permitir uma compreensão do contexto de forma maleável (DURAI, 2021). Visto que o objetivo das pesquisas bibliográficas mencionadas é compreender esse contexto geral dos temas supracitados para a tomada de decisão do uso das tecnologias mais relevantes e adequadas, foi identificado que a revisão sistemática não se encaixa. Isso se dá principalmente porque esse formato de revisão implica em uma análise detalhada de todos os dados obtidos em

cada publicação acadêmica selecionada pela busca, além de requisitar uma sintetização dessas publicações, ou seja, informações desnecessárias para o alvo das pesquisas (RAVINDRAN; SHANKAR, 2015; SNYDER, 2019). Outro fator que impossibilita o uso da revisão sistemática é a exigência de pelo menos mais de um autor para tentar garantir o maior nível de imparcialidade possível (RAVINDRAN; SHANKAR, 2015; SNYDER, 2019).

Para encontrar os materiais acadêmicos relevantes foram utilizados os repositórios IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Xplore e ACM (*Association for Computing Machinery*) Digital Library, por serem específicos das áreas das Engenharias e da Computação. Além disso, foram definidas sequências de palavras-chave em inglês para buscar nos repositórios. Para focar a análise dos materiais, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão para cada busca, filtrando os materiais com maior relevância para o assunto.

Foi realizada uma sequência de pesquisas para identificar as tecnologias mais relevantes para localização do robô e percepção do ambiente. Primeiramente, foi efetuada a pesquisa para responder a pergunta: qual a abordagem mais utilizada para a localização de robôs autônomos móveis domésticos? Para isso, a busca foi realizada com a seguinte sequência de palavras-chave: 'autonomous mobile robot localization algorithms'.

Com a resposta da pergunta inicial anterior, foi realizada a segunda pesquisa bibliográfica específica para responder outra pergunta: qual o instrumento mais utilizado para a percepção de um ambiente interno para um robô autônomo móvel que se localiza pela abordagem SLAM? Para essa segunda pesquisa, foi utilizada outra sequência de palavras-chave: 'slam sensing mobile robot'. Para ambas as buscas, foi utilizado o operador lógico AND entre cada palavra-chave, a fim de obter resultados mais específicos para os temas.

Em ambas as pesquisas bibliográficas específicas, foi realizada uma análise nos títulos e resumos dos artigos encontrados, para filtrar as publicações que não se encaixavam no escopo, seguindo as delimitações dos critérios de inclusão e exclusão, expostos na Tabela 1. Os materiais foram filtrados com o apoio da plataforma Rayyan que disponibiliza uma estrutura para analisar artigos de uma forma mais eficiente (OUZZANI et al., 2016).

Tabela 1 – Critérios de inclusão e exclusão

Inclusão	Exclusão
<ul style="list-style-type: none"> ● Aplicado em robótica móvel; ● Aplicado para ambiente interno doméstico; ● Escrito em inglês, espanhol ou português. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aplicado em navegação externa, água, aérea, indústria ou ambiente externo; ● Relacionado à realidade aumentada; ● Aplicado para veículos, drones, enxames de drones, múltiplo-robôs; ● Com necessidade de rede local, internet, wi-fi; ● Fora do escopo de robôs; ● Escrito em outro idioma que não seja inglês, espanhol ou português.

Fonte: Autora (2023).

Dito isso, ambas pesquisas bibliográficas passaram por quatro momentos específicos, sendo eles:

- Momento 1: Busca dos materiais acadêmicos nos repositórios com as palavras-chave definidas;
- Momento 2: Descarte dos materiais, resultantes da busca, que não pertencem ao período de 2018 a 2023;
- Momento 3: Descarte dos materiais, resultantes do momento anterior, que não são artigos publicados em periódicos;
- Momento 4: Descarte dos artigos, resultantes do momento anterior, que não cumprem os critérios de inclusão e/ou contém os critérios de exclusão.

Após a filtragem dos materiais encontrados na busca, foram identificados as tecnologias utilizadas em cada pesquisa, no intuito de encontrar qual delas é a predominante, e conseqüentemente, a mais relevante para os temas levantados.

2.2 Etapa de Modelagem da Solução

A modelagem foi realizada conforme os princípios da metodologia incremental de desenvolvimento de software. A abordagem incremental, de acordo com Sommerville (2011), permite a implementação de funcionalidades essenciais em uma primeira versão e integrar outras funcionalidades a cada nova versão até que o sistema adequado seja desenvolvido conforme os requisitos levantados.

Seguindo a metodologia incremental, em cada versão foram realizados o desenvolvimento e validação das novas funcionalidades. Esse ciclo de implementação tem o intuito de analisar se os requisitos levantados estão sendo alcançados corretamente, identificar falhas com antecedência e ajustar as funcionalidades antes de tornar o sistema mais complexo.

2.3 Etapa de Validação Final

Com o modelo proposto completamente integrado, o mesmo foi conduzido por um processo de validação final de modo a analisar a adequação da proposta perante as especificações identificadas. Para isso, foram realizados testes de caixa preta conforme uma série de casos de testes definidos.

Os casos de teste são cenários que especificam uma entrada ou uma ação para os teste, além de um resultado esperado (JAMIL et al., 2016). Para a validação do modelo proposto foram elaborados casos de teste baseados nos requisitos funcionais e não funcionais do robô e do ambiente simulados. O intuito dessa validação pelos casos de teste é identificar o comportamento do modelo proposto conforme as circunstâncias definidas previamente. Além disso, possibilita quantificar a adequação da solução proposta perante os requisitos identificados para o problema norteante da pesquisa.

Os testes efetuados conforme os cenários especificados, utilizaram a técnica de testes de caixa preta, os quais visam verificar as funcionalidades específicas do sistema em alto nível (JAMIL et al., 2016). Ademais, para os requisitos funcionais do robô, foi optado por realizar cinco repetições para cada caso de teste. Essas repetições têm o intuito de obter uma média de acertos perante os resultados esperados, visto que a execução do sistema pode encontrar instabilidades, mesmo sendo por simulação. Por fim, os resultados dos casos de teste foram classificados em 1) bem sucedidos, no qual o comportamento desejado foi obtido segundo a ação detalhada, e 2) não sucedido, caso

o contrário. Os casos de teste com repetições foram considerados bem sucedidos se, e somente se, obtivessem uma porcentagem de sucesso maior que 50%.

A fim de discernir as diferenças e similaridades entre o presente trabalho e as pesquisas correlatas que aplicam abordagens semelhantes para o desenvolvimento de um robô autônomo móvel, foi realizada uma análise comparativa. Essa análise consistiu em comparar os resultados, expostos em trabalhos correlatos, sobre a implementação da navegação autônoma do robô móvel e do desenvolvimento em perspectiva geral.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um robô autônomo móvel capaz de executar tarefas rotineiras domésticas pode ser dividido em diversas funcionalidades individuais que contêm suas próprias dificuldades e desafios. Dentre elas, uma pode ser considerada elementar e é o foco deste trabalho: a navegação do robô. Ademais, na área da robótica móvel, se encontram diversas abordagens para o controle lógico do robô, a sua estrutura física e até a forma de locomoção dele. Com isso, este capítulo expõe os conhecimentos básicos sobre estes tópicos e a simulação do modelo do robô a ser proposto.

3.1 Robô Autônomo Móvel

Os robôs autônomos móveis são sistemas mecânicos com certo grau de inteligência, capazes de transitarem em um meio com liberdade, lidarem com as possíveis mudanças na sua trajetória e executarem tarefas determinadas (NEHMZOW, 2012).

Os robôs autônomos móveis são constituídos por uma estrutura física, seu corpo, composta por elementos que possibilitam a sua percepção do meio que estão inseridos (sendo estes os sensores) e que executam ações diante do mesmo (denominados como atuadores) (JAULIN, 2019). Para controlarem seu corpo, é implementado um sistema de controle inteligente que toma decisões a partir da interpretação dos dados coletados pelos sensores e essas decisões são enviadas aos atuadores para que a atividade em execução prossiga (JAULIN, 2019).

Esses equipamentos são utilizados em diversas áreas, como medicina, agricultura e militarismo (JAULIN, 2019). Através deles, é possível executar tarefas comumente realizadas por algum ser vivo (como seres humanos ou animais) ou veículos, tais quais podem ser perigosas ou não desejáveis por uma determinada razão (KELLY, 2013). Por poderem ser estruturas robustas, permitem chegar a localizações que os seres humanos não conseguem acessar (JAULIN, 2019). Isso permite a execução de funcionalidades como: transporte, inspeção e segurança (JAULIN, 2019).

Assim, os robôs móveis autônomos são vantajosos principalmente por definirem, praticarem e adaptarem um planejamento da execução de uma tarefa conforme o seu aprendizado do ambiente (NEHMZOW, 2012). O diferencial entre os robôs móveis autônomos e outros robôs dependentes, é a sua adaptabilidade perante mudanças no ambiente e não conterem ações pré-definidas (NEHMZOW, 2012).

Sendo assim, um dos maiores desafios encontrados na área é o tratamento e tomada de decisões do robô perante mudanças constantes em um ambiente interno com um alto grau de incerteza, como pessoas (sejam elas adultas, crianças ou idosos) e animais transitando, ademais do próprio posicionamento de móveis e objetos (NEHMZOW, 2012).

Dito isso, esta seção apresenta os conceitos básicos de navegação, da estrutura física de um robô móvel autônomo e a discussão sobre as abordagens de arquiteturas mais relevantes para o seu controle lógico.

3.1.1 Navegação Autônoma do Robô

A navegação de um robô de forma independente não constitui apenas do dispositivo vagar pelo local aonde se encontra. Em primeiro lugar, é necessário que ele entenda onde está e com isso possa identificar o seu ponto geográfico no espaço em que atua. Em conjunto com a tarefa que deseja executar e as informações do ambiente, o robô inicia o processo de planejamento da trajetória que precisa percorrer até o seu destino. Por fim, a partir das decisões tomadas para seguir uma rota, ele se moverá inteligentemente até o destino, evitando os obstáculos e lidando com possíveis mudanças no meio. Assim, podemos afirmar que a navegação autônoma do robô é composta por quatro tarefas primordiais: i) percepção do ambiente, ii) localização, iii) planejamento, iv) locomoção (SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011).

É necessário que o papel do robô e o seu ambiente de atuação sejam bem definidos. Desse modo, as funcionalidades essenciais afirmadas conseguem ser integradas, a fim de atender melhor os requisitos e manter a confiabilidade no dispositivo (SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011). Isso é notório ao comparar o funcionamento de um robô com um braço robótico que empilha paletes em uma fábrica em detrimento a um robô aspirador de pó — apesar de ambos serem robôs autônomos móveis.

Como explicitado, a primeira ação que um robô autônomo móvel deve executar antes de se mover por um ambiente, é a percepção do mesmo. Entender qual a situação atual do meio e as suas características, pode ser realizado por um conjunto de sensores que coletam dados ao redor do robô, como luminosidade, amplitude do som e medida da distância (SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011). Com o conhecimento adquirido através das informações processadas com os dados reunidos pelos sensores, é possível identificar o ponto geográfico onde o robô se encontra no espaço (SIEGWART;

NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011).

Com a percepção completa do ambiente, as informações registradas são utilizadas para localizar o robô no espaço. Jaulin (2019) reconhece a localização como a identificação da posição do robô no ambiente e seu grau de liberdade para movimentação. Essa etapa é considerada um dos principais desafios da navegação, existindo diversas abordagens.

Entre as abordagens existentes para a localização, é mais comum o uso de modelos reais (como mapas topográficos), podendo ser criados dinamicamente enquanto o robô navega pelo ambiente ou ser uma entrada pré-definida do sistema (SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011). Por outro lado, esse método é questionado, pois, muitas vezes, o modelo não é verossímil à realidade. Para isso, são utilizadas técnicas alternativas como equações de matemática com ângulos e características cinemáticas de marcos ao redor do robô (JAULIN, 2019).

A localização do robô em um meio e o mapeamento desse ambiente é um problema bem conhecido na área da robótica móvel (LEONARD; DURRANT-WHYTE, 1991). Uma das alternativas encontradas para ultrapassar essa questão são os algoritmos que implementam a abordagem SLAM (em inglês *Simultaneous Localization and Mapping*). A abordagem de Mapeamento e Localização Simultânea tem o intuito de produzir um mapa consistente do ambiente, a partir de leituras de sensores ou câmeras, e obter a localização estimada do robô conforme os pontos reais encontrados no meio e os seus correspondentes no mapa criado (TAHERI; XIA, 2021; BAILEY; DURRANT-WHYTE, 2006; KHAIRUDDIN; TALIB; HARON, 2015). Uma das maiores vantagens encontradas na utilização do SLAM é a irrelevância da localização do robô e das informações do ambiente antes da sua execução (KHAIRUDDIN; TALIB; HARON, 2015).

Após compreender o ambiente e onde o robô se encontra, esse elabora um plano para seguir sua trajetória a fim de terminar a tarefa em execução. Nesse contexto, surge outro problema significativo da navegação: a capacidade de chegar ao seu destino de forma eficiente e confiável (SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011).

Como apontam Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), um ponto crítico da tarefa de planejamento é a própria movimentação do robô. A cada “passo” que ele avança, as características do ambiente mudam, como, por exemplo, o robô pode estar chegando cada vez mais perto de uma parede que deve desviar em um futuro próximo. Dessa forma, o robô também atua no meio, intervindo nas suas características.

Especificamente, ao tratar de um robô autônomo móvel que atua em um ambiente interno como um domicílio, a dificuldade aumenta, por ser um espaço dinâmico e vivenciado por seres humanos que são menos previsíveis do que objetos ou móveis parados. Portanto, é fundamental que a arquitetura do robô tenha um nível de inteligência suficiente para elaborar um caminho, evitando colisões, e o seu redirecionamento para longe dos obstáculos e mais próximo do destino.

Embora um planejamento sólido para navegação, considerando os aspectos de percepção e localização, seja de fundamental importância, a estratégia de locomoção adequada não pode ser deixada de lado. Segundo Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), existem duas principais maneiras de um robô se mover pelo espaço: uma forma veicular (por rodas) ou assemelhando-se a biologia (por pernas).

O uso de rodas é comumente optado para robôs que atuam em terrenos mais regulares e lisos, visando um melhor desempenho. Neste contexto, a escolha da roda usada impacta a direcionalidade do robô. De um lado, há a roda comum (Figura 2(a)) que traz a necessidade de mudar o eixo do corpo para se locomover em outra direção e de outro, há rodas como a roda Mecanum (Figura 2(b)) que permite a mudança de direção sem a mudança no eixo. Além do seu design, a quantidade de rodas e a disposição delas impactam na estabilidade, controle e manobras do robô.

Figura 2 – Diferença entre roda padrão e roda Mecanum



Fonte: Shabalina, Sagitov e Magid (2018).

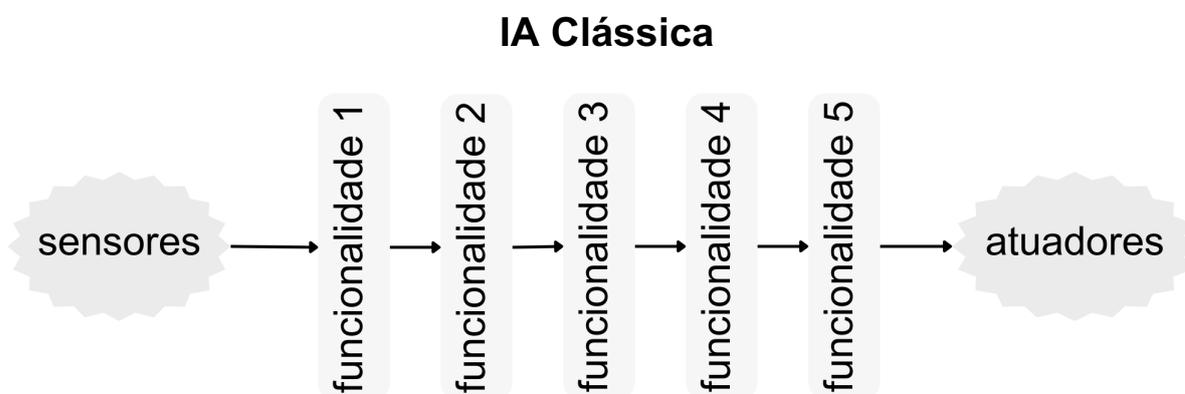
3.1.2 Abordagens de Arquitetura de Controle

A navegação consegue ser bem sucedida apenas quando os seus quatro aspectos fundamentais (percepção, localização, planejamento e locomoção) são controlados

corretamente de forma uníssona por uma arquitetura inteligente (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). Para isso, existem duas abordagens principais que possam ser utilizadas: hierárquica e comportamental. A principal diferença encontrada nessas abordagens é a sua organização interna para atingir o objetivo necessário.

As abordagens hierárquicas, como a inteligência artificial (IA) clássica, controlam o robô de forma sequencial. A estrutura dessa abordagem é constituída pelo processamento das informações do ambiente sequencialmente conforme o modelo do mundo real utilizado em cada camada da estrutura (NEHMZOW, 2012; BETTOSINI et al., 2022). Como pode ser visto na Figura 3, os dados captados pelos sensores alimentam a primeira funcionalidade da estrutura. Com isso, essa camada inicial executa seu próprio processamento e repassa os seus resultados para a próxima funcionalidade. Por fim, o resultado da última camada é inferida nos atuadores do robô para que este complete a sua atuação desejada.

Figura 3 – IA clássica



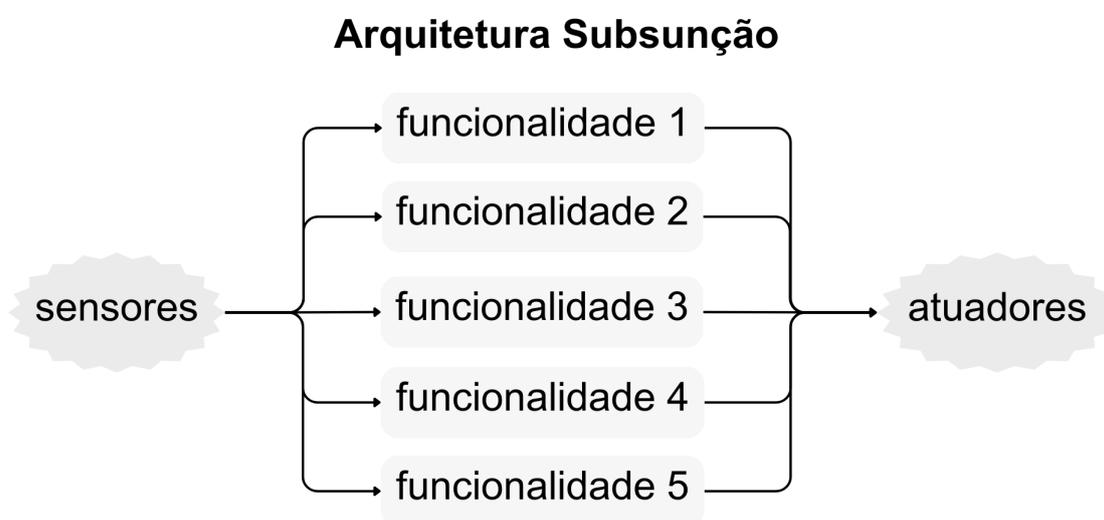
Fonte: Adaptação de Brooks (1986) pela autora.

Como visto, a abordagem hierárquica cria uma dependência entre suas funcionalidades. Essa característica permite a diminuição da robustez do sistema, já que o erro em uma das suas funcionalidades resulta em uma falha generalizada (NEHMZOW, 2012). Além disso, as camadas mais centrais se baseiam unicamente em modelos do mundo real e dos resultados de processamento antecessores, causando uma menor confiabilidade no sistema e reflexos mais lentos à dinamicidade do ambiente (NEHMZOW, 2012).

As abordagens comportamentais, introduzidas pela arquitetura de subsunção, têm

o intuito de controlar o robô por comportamentos independentes e assíncronos, ativados conforme os acontecimentos do ambiente, sendo sistemas reativos (OTHMAN; RAD, 2020; BETTOSINI et al., 2022). Como exposto na Figura 4, o controle lógico do robô é dividido em funcionalidades que representam comportamentos distintos e são executadas paralelamente. Todas as funcionalidades são alimentadas com os dados captados dos sensores e inferem comandos nos atuadores (OTHMAN; RAD, 2020; BROOKS, 1986). Logo, o conjunto da execução de todas as funcionalidades resulta na atuação do objetivo final do robô.

Figura 4 – Arquitetura de subsunção



Fonte: Adaptação de Brooks (1986) pela autora.

As características das abordagens comportamentais permitem algumas vantagens em comparação com as abordagens hierárquicas. Entre essas vantagens, se destacam i) a redução do custo computacional; ii) a maior confiabilidade por conta do acesso direto às informações do ambiente por cada camada; iii) a maior robustez causada pela independência das camadas (OTHMAN; RAD, 2020; BROOKS, 1986; BETTOSINI et al., 2022).

As camadas da arquitetura de subsunção foram projetadas por Brooks (1986) como níveis de competência que especificam, informalmente, uma classe de comportamentos desejáveis. Neste trabalho, Brooks utilizou cinco níveis que contemplam navegação, com e sem rumo, evitando colisões, exploração e mapeamento do ambiente, planejamento de rotas e tratamento de mudanças no espaço. Entretanto, a independência entre cada camada da arquitetura permite o incremento, ou remoção, de funcionalidades

conforme o cenário de atuação do robô.

Brooks (1986) expõe nove paradigmas para os sistemas baseados na arquitetura proposta. Entre eles, salienta-se a importância da simplicidade em diversos aspectos, como o próprio sistema de controle a ser implementado e a comunicação entre as camadas.

Outra questão levantada na arquitetura de subsunção é o uso de modelos do mundo (tais quais não são usados unicamente durante o processamento, pois todos os módulos têm acesso às informações coletadas pelos sensores). Eles visam uma melhor verossimilidade a realidade a partir do uso de mapas não relacionais de três dimensões e não artificiais. Por fim, também é ressaltado a necessidade da durabilidade e robustez do sistema sem a interferência de humanos.

3.1.3 Estrutura Física do Robô

A estrutura física do robô precisa refletir e acomodar o ambiente em que atua para as suas tarefas serem executadas correta e eficientemente. O corpo, que engloba o sistema implementado, pode consistir em sensores que irão coletar dados do ambiente e da condição do próprio dispositivo, atuadores para terem ações sobre o meio, partes mecânicas como braços robóticos para manipulações e elementos para o processamento geral e individual dos outros componentes.

A percepção do ambiente e a execução das tarefas pelo robô dependem significativamente dos transdutores para tais fins, disponibilizados no seu corpo. Como Aguirre (2013) explica, os transdutores são dispositivos utilizados para captarem dados (grandezas físicas) do ambiente e transformarem em informações (sinais elétricos) para o sistema processar ou transformarem decisões tomadas (sinais elétricos) pelo processamento do sistema em ações (grandezas físicas) executadas no ambiente. Assim, existem dois tipos de transdutores: os sensores e os atuadores.

Os sensores são responsáveis em permitir que o robô compreenda o ambiente que está inserido através das grandezas físicas coletadas (entradas) e transformadas em sinais elétricos que então são processados em uma informação útil (saída). Apesar de comumente os sensores obterem entradas que não são as em foco (entradas espúrias), são utilizados diversos mecanismos de filtrar entradas e calibrar estes instrumentos para seu melhor desempenho.

O mundo dos sensores é versátil e variado, dentre os existentes para a percepção

de objetos se tem o sensor LiDaR (*Light Detection and Ranging*), o qual emite uma onda ótica e captura o tempo para que o reflexo desse feixe de luz retorne (KHAN et al., 2021; LI et al., 2022). Seu objetivo principal é descobrir a distância entre o corpo que está embutido e os objetos à sua frente (LI et al., 2022; KHAN et al., 2021). Esse sensor é utilizado em diversas situações, como veículos autônomos, equipamentos médicos precisos e monitoramento, podendo ser mais preciso do que sensores que utilizam ondas sonoras (LI et al., 2022; ZHAO et al., 2019).

Os atuadores, por sua vez, possibilitam que as tarefas planejadas pelo sistema se concretizem a partir do inferimento de grandezas físicas em elementos mecânicos presentes no corpo do robô. Este comportamento pode ser visualizado quando o controle lógico de um robô móvel autônomo decide se virar para direita e pelos atuadores, os motores necessários são acionados para realizar a rotação das rodas.

A arquitetura de subsunção apresentada por Brooks (1986) também trata sobre questões do corpo físico do robô. Em primeiro lugar é retratado que o dispositivo deve possuir uma estrutura que o permite trafegar em espaços de convivência de humanos, isso implica que ele deve ter uma certa altura para conseguir enxergar objetos em cima de móveis, por exemplo, e uma largura máxima para conseguir passar por portas e corredores.

Em Brooks (1986), também é reforçada a importância da independência dos sensores e outros instrumentos de percepção, trazendo maior robustez ao sistema e confiabilidade, mesmo se alguns de seus sensores apresentarem erro.

3.2 Simulação

A construção de um robô e o teste da sua estrutura em conjunto com o software de controle requerem um leque grande de recursos e bastante tempo disponível. Por isso, quando há uma escassez, limitações ou nenhuma disponibilidade de algum desses requisitos, podem ser usados simuladores que representam e interpretam o mundo real virtualmente. Tais ferramentas são utilizadas em diversos campos das engenharias, inclusive a robótica, sendo muito prático para pesquisa e educação (CARPIN et al., 2007).

Como o intuito dos experimentos virtuais consiste em simular eventos reais que poderiam existir em testes no mundo tangível, é preciso ter cautela e incluir a maior veracidade possível ao ambiente e robô simulados (HEINEN; ENGEL, 2010). Assim, se faz necessário a modelagem de leis da física presentes no universo real e a interação

com ambiente por sensores e atuadores, para o robô sofrer quedas e colisões segundo a situação, conforme a realidade (CARPIN et al., 2007; HEINEN; OSÓRIO, 2006).

A maior preocupação acerca do uso da simulação é a sua capacidade de conter detalhes verídicos e ser o menos limitante possível, visto que o mundo real é muito mais complexo (MIGLINO; NAFASI; TAYLOR, 1994). Com um experimento por Miglino, Nafasi e Taylor (1994) para o teste de algoritmos que propõem a evolução de robôs vagantes, foi demonstrado que a simulação e a execução real desses robôs conseguem ser bem similares, obtendo melhor desempenho em robôs tangíveis para alguns casos.

Os simuladores permitem interpretar situações reais de forma virtual. Entretanto, é necessário intermediar os elementos (sensores e atuadores) do robô com seu controle lógico. Isso é possível ao implementar ROS (Sistema Operacional de Robô), o kit de desenvolvimento para aplicações robóticas (Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al., 2018) Uma das maiores vantagens do ROS é a sua coleção de bibliotecas e módulos para utilizar em diversas ocasiões robóticas, sem a necessidade de desenvolver algoritmos do início (Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al., 2018). Além disso, ROS é multi-plataforma, possibilitando o desenvolvimento único para a simulação e a realidade (Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al., 2018).

Para reconstruir virtualmente os elementos reais, é necessário descrever, em XML (*eXtensible Markup Language*), as suas características físicas, dinâmicas, cinemáticas e o comportamento das suas ações (KANG; KIM; KIM, 2019; FEDER; GIUSTI; VIDONI, 2022; MUNAWAR et al., 2019). Esta descrição pode ser realizada de diversas maneiras, como no formato universal (URDF - *Universal Robotic Description Format*), permitindo amplo reconhecimento pela maioria dos simuladores com integração do ROS, ou no formato padrão de descrição (SDF - *Standard Description Format*), com o intuito de caracterizar o conjunto do meio de atuação do robô além de seus próprios atributos (KANG; KIM; KIM, 2019; FEDER; GIUSTI; VIDONI, 2022; MUNAWAR et al., 2019).

Nesse contexto de programas de simulação robótica, é possível encontrar desde ambientes gratuitos mais rústicos para pesquisa e educação, como USARSim, até os mais profissionais oferecidos por empresas especializadas em desenvolvimento de eletrônicos, como a Nvidia que oferece o Nvidia Omniverse e a biblioteca IsaacSim para simulação de robótica.

Também é possível encontrar soluções no meio-termo que são muito utilizadas como WeBot da Cyberbotics, Gazebo e CoppeliaSim, tais quais são *open source* e utilizam a biblioteca Open Dynamics Engine (ODE) para trazer aspectos da física na

simulação. A ODE também pode ser integrada em plataformas de criação de jogos, como a Unity, transformando-as em ambientes simuladores de robótica.

Dentre os supracitados, pode ser destacado o simulador *open-source* Gazebo (KOENIG; HOWARD, 2004). Algumas de suas características que o faz ser ressaltado em meio aos diversos outros simuladores são: i) modelos de robôs e ambientes prontos; ii) comunidade ativa que visa incrementar novos modelos de robôs e ambientes; iii) integração com ROS (KOENIG; HOWARD, 2004; FARLEY; WANG; MARSHALL, 2022).

3.3 Considerações Adicionais da Fundamentação Teórica

Este capítulo permitiu uma fundamentação teórica nos principais tópicos dos robôs autônomos móveis e a simulação robótica. Foram discutidos os quatro aspectos da navegação autônoma de um robô que consiste na percepção do ambiente, sua localização, o planejamento de uma rota a ser seguida e a sua locomoção.

Além disso, foi compreendida a arquitetura de subsunção para o controle do robô e a sua vantagem com relação à abordagem tradicional da inteligência artificial. Ainda no contexto dos robôs, foram introduzidas as necessidades para a sua estrutura física. Por fim, foi explorado o tema de simulação robótica, alguns programas simuladores reconhecidos e o sistema operacional de robô.

Com essa compreensão do funcionamento de robôs autônomos móveis e da simulação robótica, se torna possível analisar mais vigorosamente trabalhos que almejam desenvolver um robô com a capacidade de navegar de forma autônoma em um ambiente interno desconhecido. Assim, o próximo capítulo expõe variados trabalhos correlatos, além das suas diferenças e similaridades com o AtmosBot.

4 TRABALHOS CORRELATOS

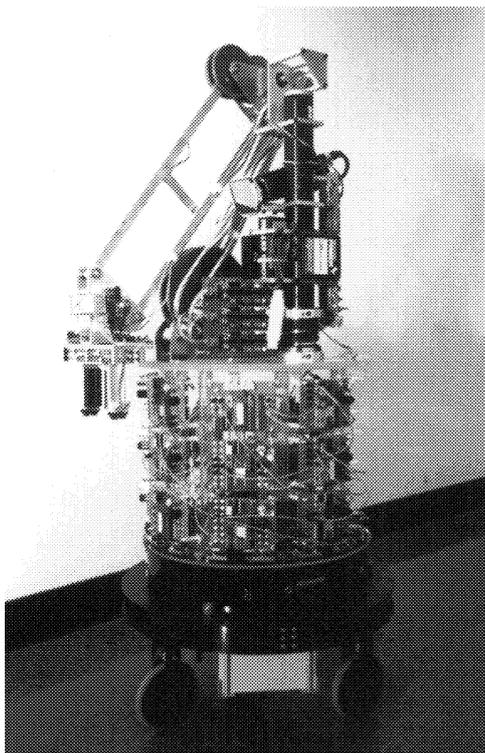
Este capítulo expõe variadas pesquisas realizadas anteriormente que se assemelham ao presente trabalho e seus principais aspectos.

4.1 Robô de Serviço Doméstico Herbert

Em primeiro lugar, a partir da definição da arquitetura de subsunção e com a orientação do seu criador, Rodney Brooks, Brooks, Connell e Ning (1988) realizou um experimento para amostrar os princípios dessa arquitetura através da implementação do robô autônomo móvel Herbert.

O projeto Brooks, Connell e Ning (1988) expõe um robô completamente autônomo utilizado em ambientes internos como uma casa, capaz de realizar tarefas de navegação, reconhecimento e manipulação. A sua estrutura física (Figura 5) é composta por uma base pronta adquirida com o foco na direção do robô, bem como uma parte superior que contém equipamentos de processamento e um braço robótico.

Figura 5 – Estrutura física do Robô Herbert



Fonte: Brooks, Connell e Ning (1988).

A base do robô Herbert contém a alimentação de energia própria e um computador servo para realizar o mecanismo de direção, o qual atua em um único motor e três rodas. A parte superior do robô é composta por um braço robótico leve e com grau de liberdade suficiente para pegar e soltar objetos no nível do chão e de uma mesa. Essa parte também contém um sensor infravermelho para o robô conseguir se esquivar de obstáculos próximos, fixos ou em movimento, e um sensor scanner de alcance a laser para reconhecimento de objetos.

Para o controle lógico do robô através da arquitetura de subsunção, foram utilizadas placas com microprocessadores CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) de 8 bits que compartilham entre si apenas energia. Para integrar o reconhecimento lógico de objetos com o scanner, foi combinado com o sensor uma árvore de processadores de visão orientada por linha.

O robô Herbert conseguiu ter um consumo energético baixo para a sua época por ser estruturado por componentes CMOS, além de ter uma resposta mais rápida aos obstáculos por conta do sensor infravermelho que possibilita uma varredura do ambiente em 360 graus. Ademais, sua estrutura foi arranjada de uma maneira que todos seus subsistemas - como as placas de circuitos - conseguem ser removidas, ajustadas e devolvidas ao corpo do robô com fácil acesso.

Por ser um projeto realizado no fim dos anos 80, os equipamentos utilizados e as capacidades do robô são limitantes. Apesar de utilizarem processadores com menor custo energético, o dispositivo consegue transitar e realizar suas tarefas pelo ambiente por apenas uma hora.

Outra desvantagem reconhecida no trabalho é a capacidade do sensor infravermelho em reconhecer a distância de certos objetos conforme o seu tamanho, localização no plano e cor, ou seja, objetos escuros são mais difíceis de serem compreendidos pelo sensor e o mesmo pode se confundir com a profundidade de um objeto pequeno mais próximo e um grande mais longe. Por fim, para realizar todas as tarefas, ao navegar pelo ambiente, o agente armazena as informações de distância e ângulos viajados para conseguir retornar a sua origem depois de cada objeto apanhado para descartá-lo.

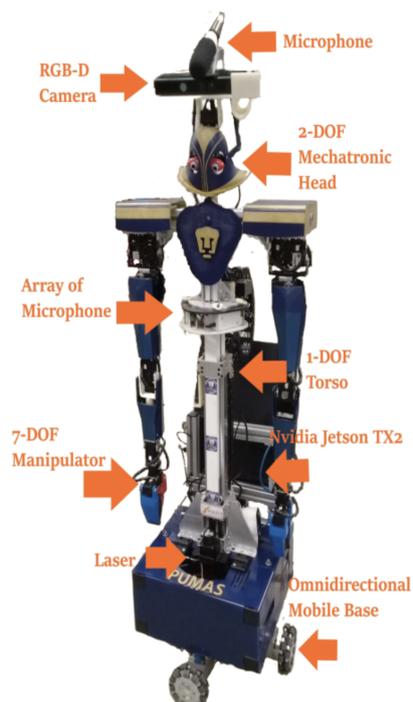
4.2 Robô de Serviço Doméstico Justina

Os robôs autônomos de serviço continuaram a ser pesquisados e projetados durante os anos, obtendo avanços notáveis. Similarmente ao robô Herbert, em 2019, foi criado o robô Justina, por Savage et al. (2019). Este robô emergiu por meio das competições robóticas, conquistando o primeiro lugar no RoboCup@Home de 2019, mostrando o quão crucial essas competições são para o desenvolvimento das tecnologias e motivação da pesquisa na área de robótica, inclusive no tema de robôs de serviço doméstico.

O equipamento foi produzido pela equipe Pumas, composta por pesquisadores da Universidade de Autonomia Nacional do México. Apesar do time participar constantemente das competições há mais de uma década, sempre buscou aprimorar as tecnologias e conceitos implementados nos seus robôs. Para o RoboCup@Home, mostrou como diferencial um sistema com maior capacidade de compreender a linguagem natural dos comandos de voz dados pelos seres humanos e de manipular objetos com superfícies com menos texturas e geometria mais plana.

O robô Justina (Figura 6) compõe em sua estrutura física uma base com duas rodas onidirecionais, seguida por um torso móvel metálico capaz de se elevar, dois braços robóticos para a manipulação dos objetos e uma parte superior com suporte do tipo *pan and tilt*. Neste suporte, foi fixado um Kinect da Microsoft e logo acima, um microfone direcional (utilizado para receber os comandos de voz).

Figura 6 – Estrutura física do Robô Justina



Fonte: Savage et al. (2019).

Além da câmera RGB-D (*Red, Green and Blue - Depth*) do Kinect, são utilizados uma segunda câmera RGB (*Red, Green and Blue*), um laser e quatro microfones para perceber o ambiente onde o robô está inserido. Além disso, como retorno para os seres humanos, foram instaladas caixas de som que emitem uma voz sintetizada informando dados da tarefa em execução. Por fim, para realizar o processamento de imagem obtida a partir das câmeras, foi utilizado um sistema embarcado da NVidia.

O robô da equipe Pumas baseia-se na arquitetura VIRBOT, própria para robôs de serviço domésticos, implementada mediante um conjunto de módulos independentes que executam tarefas próprias e se comunicam entre si. Essa comunicação entre os componentes é realizada pelo sistema operacional de robô (ROS).

O sistema VIRBOT é composto por quatro camadas nas quais ocorre o processamento das informações externas e internas do robô, planejamento de objetivos ativados a partir dessas informações, localização do corpo no ambiente por mapas criados pela técnica SLAM e, por fim, a execução das ações e movimentos planejados. De acordo com Savage et al. (2019), a próxima funcionalidade a ser aprimorada seria deslocamento em todas as direções para melhorar o desempenho da navegação.

4.3 TurtleBot3 com SLAM

No contexto apenas da navegação autônoma, muitas abordagens podem ser utilizadas para resolver o mesmo problema: fazer com que o robô planeje e percorra uma trajetória em um ambiente sem a interferência de humanos. Em Khnissi, Jabeur e Seddik (2022) é exposto o uso de SLAM como método eficaz para uma navegação autônoma pelo seu robô Turtlebot3 Burger (Figura 7).

Figura 7 – Estrutura física do TurtleBot3



Fonte:Bluetronics (2021).

As informações do ambiente foram capturadas por um sensor LiDaR e utilizadas, em conjunto com a odometria (informação de deslocamento a partir das revoluções das rodas) do robô, no processo SLAM. A fim de melhorar a experiência com a abordagem SLAM, foi utilizado o algoritmo AMCL (*Adaptive Monte Carlo Localization*), sendo uma a versão aprimorada do algoritmo original Localização Monte Carlo. Além disso, o ROS é utilizado como o intermediador entre o sistema, os sensores e o controle lógico (no qual é executado o SLAM adaptado) do Turtlebot3 Burger.

Visando testar facilmente a solução proposta em comparação com o mapeamento e navegação comum, foi usado o simulador Gazebo. Entretanto, os dois métodos foram testados no mundo real também para assegurar resultados condizentes com a realidade. Com esses experimentos foi apontado que o uso do SLAM aperfeiçoado com o algoritmo de Localização Adaptativa de Monte Carlo tornou a navegação mais resiliente e com maior acurácia.

4.4 Robô Autônomo Móvel DPoom

O desenvolvimento de um robô autônomo móvel, em muitos casos, pode incluir a implementação de recursos que tornam o robô mais custoso, em questão de processamento e preço. Em Kim et al. (2022), seu principal objetivo é diminuir o custo computacional e monetário dos robôs autônomos móveis. Para reduzir o valor da estrutura física do robô, foi utilizada uma câmera RGB-D (capaz de capturar a profundidade dos itens, além da imagem comum colorida) para a percepção do ambiente, ao invés do sensor LiDaR, comumente utilizado e com maior custo.

Além disso, foi adicionada uma adaptação, menos custosa computacionalmente, do algoritmo clássico de aprendizado por reforço profundo, para evitar obstáculos ao longo da locomoção do seu robô DPoom. Em conjunto, Kim et al. (2022) implementou a criação de mapas e posicionamento em tempo real com algoritmo de SLAM integrado a câmera RGB-D. Com isso, foi possível retirar a necessidade da utilização de uma GPU (*Graphic Processing Unit*) e manter o desempenho ideal em tempo real, usufruindo apenas de uma placa-mãe de baixo custo.

A fim de validar seu sistema desenvolvido, Kim et al. (2022) integrou todas as funcionalidades com ROS e testou, primeiramente, no simulador Gazebo com uma variação de dez ambientes domésticos estáticos e dinâmicos. O DPoom (Figura 8) também foi testado em ambientes internos reais, com humanos se movimentando ao longo do meio, permitindo validar a interação do robô com as pessoas.

Os principais resultados encontrados em Kim et al. (2022) são i) a taxa de operação reduzida, de apenas 18Hz, para o algoritmo de navegação sem colisão com obstáculos; ii) a taxa baixa de 15% de colisão; iii) a navegação bem sucedida em ambientes lotados.

4.5 Robô Autônomo Móvel com LiDaR e RGB-D

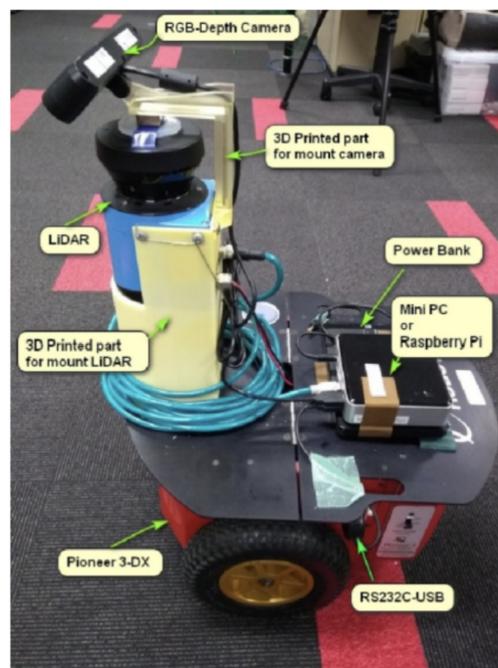
Em Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019), é proposto um robô autônomo móvel (Figura 9) com maior percepção do ambiente, a fim de obter uma navegação mais eficiente ao evitar obstáculos dinâmicos e ser mais seguro a humanos e seus pertences. Para isso, foram implementados, em conjunto, um sensor LiDaR e uma câmera RGB-D para a percepção do ambiente.

Figura 8 – Estrutura física do DPoom



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2022).

Figura 9 – Estrutura física do robô autônomo móvel com LiDaR e RGB-D



Fonte: Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019).

Os instrumentos de percepção acima foram integrados para serem utilizados com o módulo de navegação do sistema ROS. Além disso, Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019) implementou uma biblioteca de mapeamento com SLAM do ROS

para criar um mapa estático de duas dimensões do ambiente, utilizado em conjunto com o algoritmo AMCL para a localização do robô no ambiente.

Para analisar o comportamento do robô desenvolvido, Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019) testou as suas integrações no simulador Gazebo com diferentes cenários que constituíam de obstáculos em posições e alturas variadas. Com isso, foi possível identificar que a câmera RGB-D permite capturar obstáculos mais altos, mas adiciona um custo de processamento para as informações de profundidade capturadas.

4.6 Análise dos Trabalhos Correlatos

A análise acima de alguns projetos correlatos ao presente trabalho proporcionou um conhecimento mais amplo sobre as possibilidades de implementação de soluções no contexto de robôs de serviço doméstico e navegação autônoma. Com isso, foi possível levantar uma tabela (Tabela 2) com as principais diferenças entre esses projetos conforme as tecnologias implementadas, estrutura física utilizada e considerações finais relevantes ao trabalho em questão.

Tabela 2 – Principais características dos trabalhos correlatos comparados com AtmosBot

Trabalho	Principais Tecnologias	Estrutura Física	Considerações Finais
Robô Herbert de Brooks, Connell e Ning (1988)	Arquitetura de Subsunção.	3 rodas padrão, componentes altamente modularizados, sensor infravermelho e scanner de alcance a laser.	Uso de sensor infravermelho impacta negativamente o desempenho.
Robô Justina de Savage et al. (2019)	Arquitetura VIRBOT em conjunto com ROS e técnica SLAM para navegação.	2 rodas omnidirecionais, câmera Kinect Microsoft, câmera RGB e sensor laser.	A locomoção por rodas onidirecionais precisa ser melhorada.
Robô Turtlebot3 Burger de Khnissi, Jabeur e Seddik (2022)	SLAM aprimorado com Localização Adaptativa de Monte Carlo, em conjunto com ROS.	Sensor laser LIDAR.	A navegação é resiliente.
Robô DPoom de Kim et al. (2022)	Sistema ROS e navegação combinada com SLAM e aprendizado profundo reforçado.	Câmera RGB-D.	Menos custoso em processamento e recursos.
Robô com LiDaR e RGB-D de Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019)	SLAM e algoritmo AMCL, integrados com ROS.	Sensor LiDaR, câmera RGB-D.	Mais obstáculos capturados, mas maior custo de processamento.
AtmosBot	SLAM com mapeamento simultâneo a exploração e biblioteca de navegação, integrado com ROS e arquitetura de subsunção.	Sensor LiDaR e 4 rodas padrão.	Menor custo de processamento e mapeamento menos divergente.

Fonte: Autora (2023).

Diante das informações supracitadas, é possível identificar certas similaridades entre os trabalhos expostos e suas principais diferenças. Assim como no AtmosBot, a abordagem de localização e mapeamento mais utilizado é o SLAM, conforme implantado nos robôs de Savage et al. (2019), Khnissi, Jabeur e Seddik (2022), Kim et al. (2022), Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019). Para a percepção do ambiente, os instrumentos mais recorrentes são a câmera RGB e o sensor LiDaR, sendo o último mais utilizado, assim como no AtmosBot. Por fim, a simulação foi utilizada na maioria das pesquisas para a validação parcial ou completa do sistema desenvolvido e os elementos do robô foram integrados pela arquitetura ROS, ambos aspectos presentes no AtmosBot.

As diferenças mais destacáveis entre os trabalhos são os algoritmos mais específicos de localização e de evitar obstáculos, existindo entre eles o AMCL e o aprendizado profundo reforçado. No AtmosBot, nenhum desses algoritmos são utilizados visto que foram implementadas as bibliotecas de navegação do ROS que dispõe o processo de localização sem a necessidade de maiores complementos.

Portanto, a maior contribuição dos trabalhos correlatos analisados é gama de possibilidades existentes para o desenvolvimento de um robô autônomo móvel. Além disso, esses trabalhos expõem as vantagens do uso do ROS, para integrar todos os componentes de navegação, e do programa Gazebo, para realizar as validações necessárias. Essas contribuições são consideradas ao elaborar a proposta da solução, conforme explicado no próximo capítulo que trata sobre o desenvolvimento do modelo proposto.

5 DESENVOLVIMENTO DO ATMOSBOT

Neste capítulo são apresentados a proposta do presente trabalho, as especificações e modelagem levantadas para a solução, além dos detalhes de desenvolvimento do modelo para o robô AtmosBot.

5.1 Proposta de Solução do AtmosBot

A partir do que foi explicado anteriormente, se conclui que um robô de serviço doméstico é um sistema complexo que, para ser desenvolvido, demanda uma abundância de recursos, tempo e profissionais. Assim, surge a necessidade de elaborá-lo de forma modular, se beneficiando de testes simulados para minimizar os recursos financeiros e o tempo despendido. Logo, este trabalho propõe um modelo simulado para a funcionalidade primordial do robô de serviço doméstico: a navegação autônoma. Com isso, foi elaborado um modelo simulado de robô autônomo móvel capaz de navegar, sem interferência humana, por um ambiente interno dinâmico, similar a um domicílio.

Foram identificadas as tecnologias relevantes e vantajosas para desenvolver o robô autônomo móvel. Essas tecnologias tratam sobre as funcionalidades: i) simulação do modelo; ii) a localização, percepção e locomoção do robô; iii) abordagem do controle lógico. Assim, a seguir são apresentadas as tecnologias escolhidas para o desenvolvimento do modelo proposto.

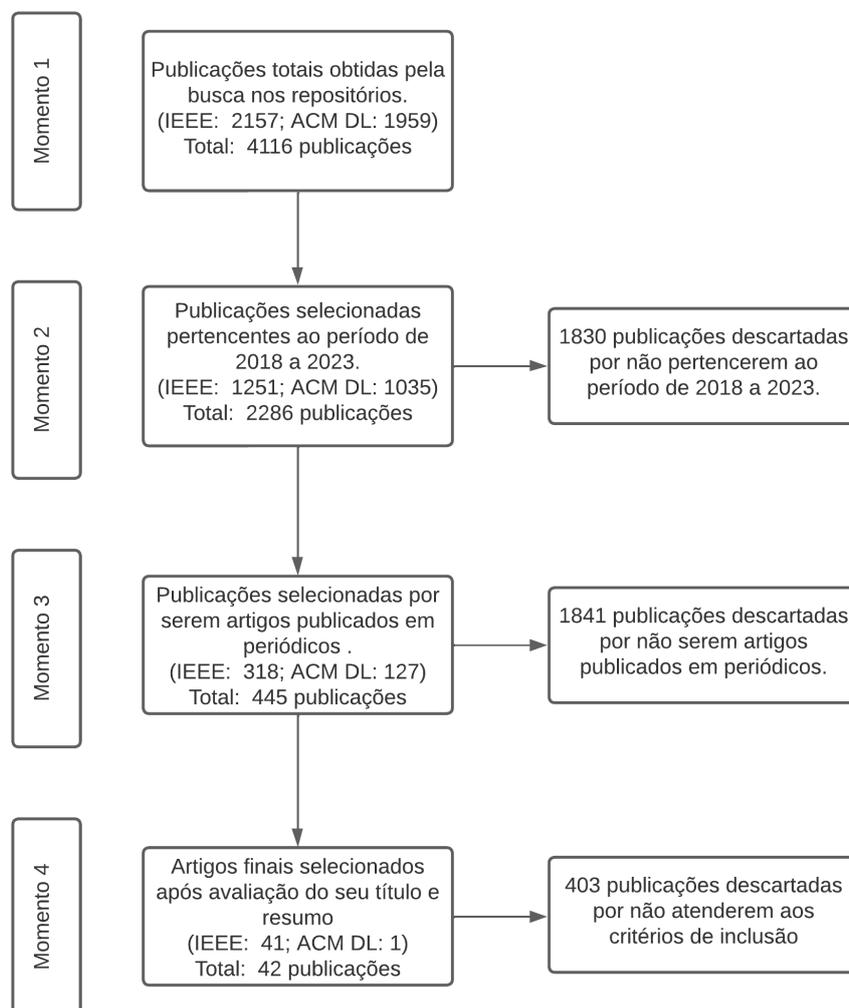
A simulação do modelo proposto foi realizada a partir da plataforma Gazebo. Dentre os simuladores mais utilizados atualmente, sendo eles o WeBot, Gazebo e CoppeliaSim, o Gazebo apresenta a melhor adequação para o presente trabalho, conforme os resultados obtidos pelo experimento comparativo dos simuladores realizado por Farley, Wang e Marshall (2022). As principais vantagens do Gazebo são a utilização ampla perante os desenvolvedores e designers de robótica, a gratuidade do programa e a comunidade ativa que possibilita uma maior facilidade na resolução de possíveis problemas para sua instalação e o seu uso (KOENIG; HOWARD, 2004; FARLEY; WANG; MARSHALL, 2022).

No âmbito da navegação autônoma, diferentes abordagens podem ser utilizadas em conjunto para implementar cada sub-tarefa que constitui a navegação de um robô autônomo móvel. Ao todo, foram necessárias lógicas que possibilitem que o robô vague, explore e se localize pelo ambiente de forma inteligente, com menor quantidade de

colisões e sem a interferência de humanos.

A pesquisa bibliográfica para identificar as abordagens mais relevantes para a localização do robô resultou em 4116 publicações totais do tema, obtendo 42 artigos finais coerentes com os critérios de inclusão. A quantidade de publicações encontradas nos repositórios e de materiais descartados em cada momento pré-estabelecido, pode ser encontrada na Figura 10.

Figura 10 – Resultado completo da pesquisa bibliográfica de abordagens para localização de robôs autônomos móveis

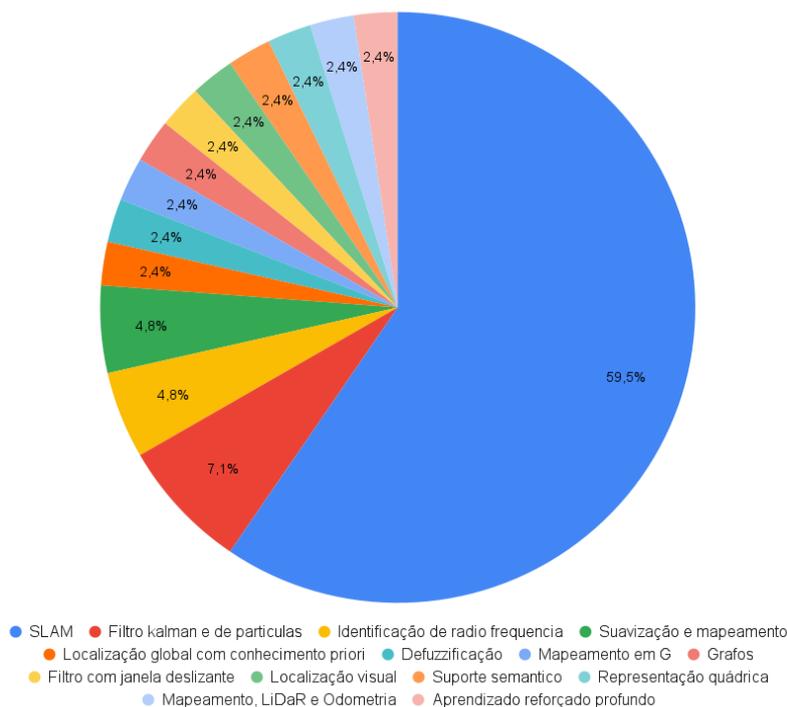


Fonte: Autora (2023).

Dentre as abordagens encontradas para localização de robôs autônomos móveis, 25 deles utilizavam a abordagem SLAM, pura ou com incrementos para melhorar o seu desempenho. No gráfico abaixo (Figura 11) é possível observar todas as abordagens implementadas para a localização do robô em um ambiente interno, obtidas pela pesquisa realizada. Portanto, foi utilizado o algoritmo de localização e mapeamento simultâneo

(SLAM) para auxiliar o robô a navegar de forma inteligente.

Figura 11 – Resultado da pesquisa bibliográfica de abordagens para localização de robôs autônomos móveis



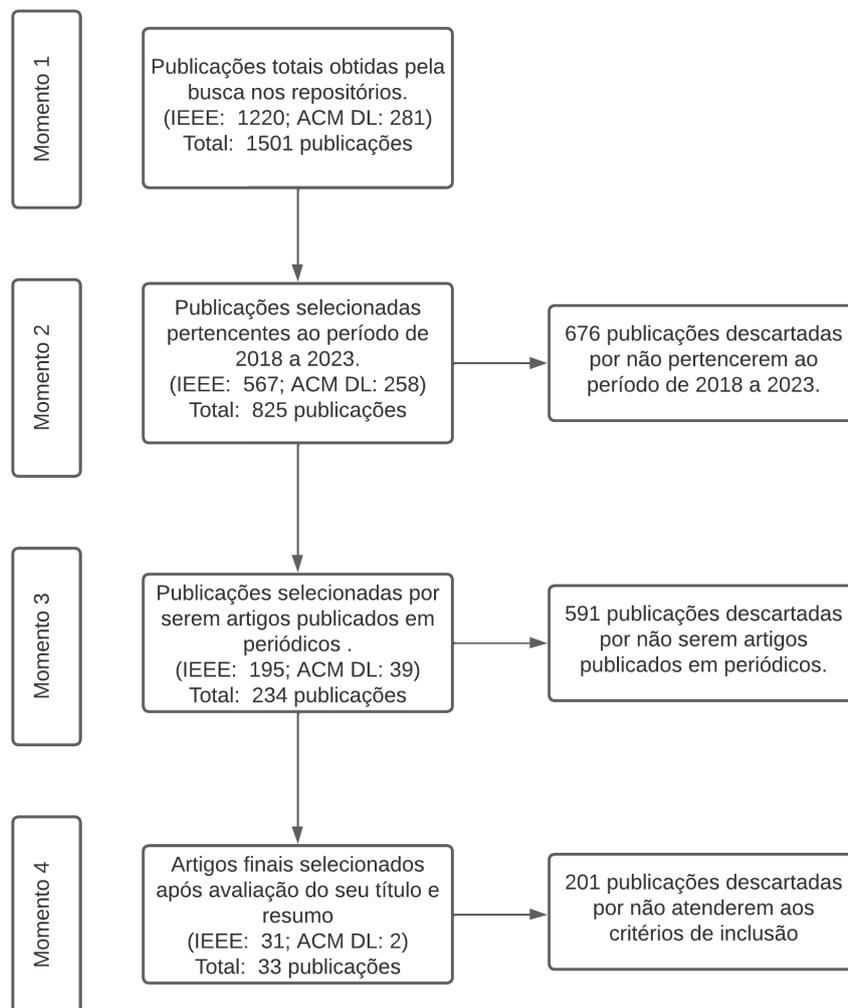
Fonte: Autora (2023).

De forma similar, a pesquisa bibliográfica que visava responder qual o instrumento mais utilizado para a percepção do ambiente pelo robô autônomo móvel, resultou em 1501 publicações totais, obtendo 33 artigos finais coerentes com os critérios de inclusão e exclusão definidos. A quantidade de publicações encontradas nos repositórios e de materiais descartados em cada momento pré-estabelecido, podem ser encontrado na Figura 12.

Dentre as 33 publicações encontradas por essa pesquisa bibliográfica, 14 delas utilizam o sensor LiDaR e 5 utilizam a câmera, para o robô compreender o ambiente ao redor (Figura 13). Logo, foi optado a integração do sensor LiDaR para que o robô colete informações precisas do meio em que se encontra.

Como explicado anteriormente, a locomoção dos robôs autônomos móveis pode ser realizada com rodas ou pernas, similarmente a animais. Para o presente trabalho, foi optado utilizar rodas, ao apresentar uma melhor eficiência energética e não requerer técnicas para garantir equilíbrio do corpo do robô durante a movimentação, apresentando ser uma alternativa mais minimalista e intuitiva em sua concepção e implementação. Com

Figura 12 – Resultado completo da pesquisa bibliográfica de instrumentos de percepção do ambiente



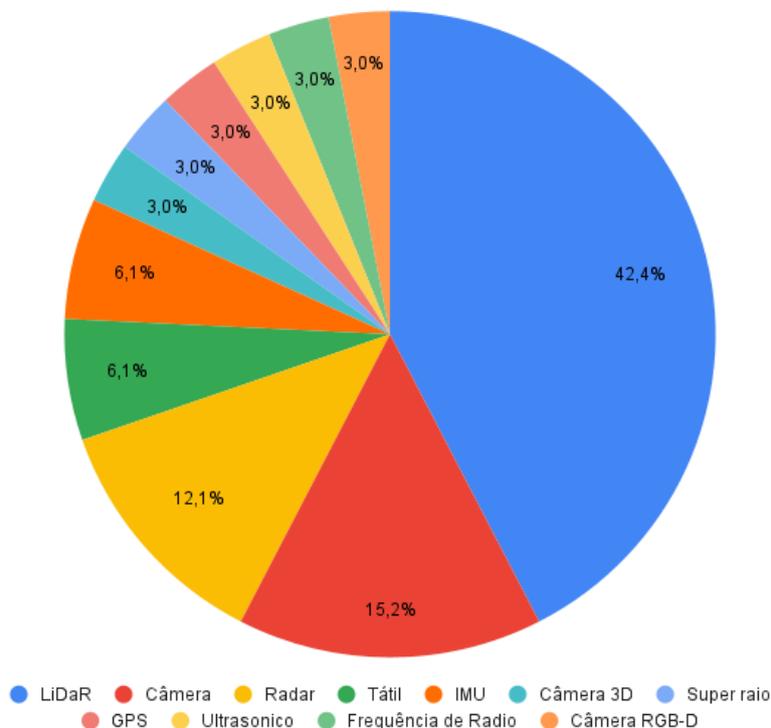
Fonte: Autora (2023).

isso, o AtmosBot possui de 4 rodas de design padrão, dispostas a formar um quadrado na base do robô.

Como exposto no Capítulo 3, o controle lógico do robô pode ser implementado com duas abordagens antagônicas: a inteligência artificial clássica sequencial e a arquitetura de subsunção com paralelismo. A fim de obter um robô com contato direto com as informações do ambiente em todos os seus módulos independentes, maior robustez, com capacidade de futuras incrementações, além de maior resiliência e menor tempo de resposta a mudanças no ambiente, foi optado o uso da arquitetura de subsunção, com um grau de liberdade para possíveis adaptações necessárias caso demonstre ser mais adequado para a proposta.

Por fim, o ambiente também deve ser definido para que o modelo do robô seja

Figura 13 – Resultado da pesquisa bibliográfica de instrumentos de percepção do ambiente



Fonte: Autora (2023).

correto. Esse robô deve atuar em um ambiente interno e dinâmico, semelhante a um domicílio acessível. Ou seja, o robô consegue atuar apenas em ambientes com uma iluminação controlada, com obstáculos (parede, portas fechadas, móveis e outros objetos), com mudanças na disposição dos artefatos presentes, além de não possuir degraus com altura acima de 1 centímetro.

5.2 Especificação de Requisitos

Os requisitos de um sistema são características que esse sistema necessita para o seu funcionamento. Os requisitos básicos devem ser identificados previamente ao desenvolvimento, no intuito de compreender ao máximo os limites do sistema e as funcionalidades que devem ser alcançadas (PRESSMAN; MAXIM, 2021).

Dito isso, foi levantada uma série de requisitos do sistema completo, incluindo a simulação do ambiente e do robô proposto. Esse conjunto de requisitos levantados detalham as possíveis ações do robô e suas características mais intrínsecas, além de

conformidades do ambiente.

Em específico, foram levantados requisitos funcionais e não funcionais para o robô autônomo móvel proposto. Essas especificações abordam a movimentação do robô ao longo da sua trajetória no ambiente, como sua capacidade de evitar os obstáculos e conter uma velocidade segura para os humanos e a propriedade presente no meio inserido.

Ademais, foram levantados requisitos não funcionais para o ambiente, explicitando as necessidades do local de atuação do robô proposto. Dentre elas, foram destacadas a verossimilhança com domicílios comuns e sua dinamicidade como um meio convívio por seres.

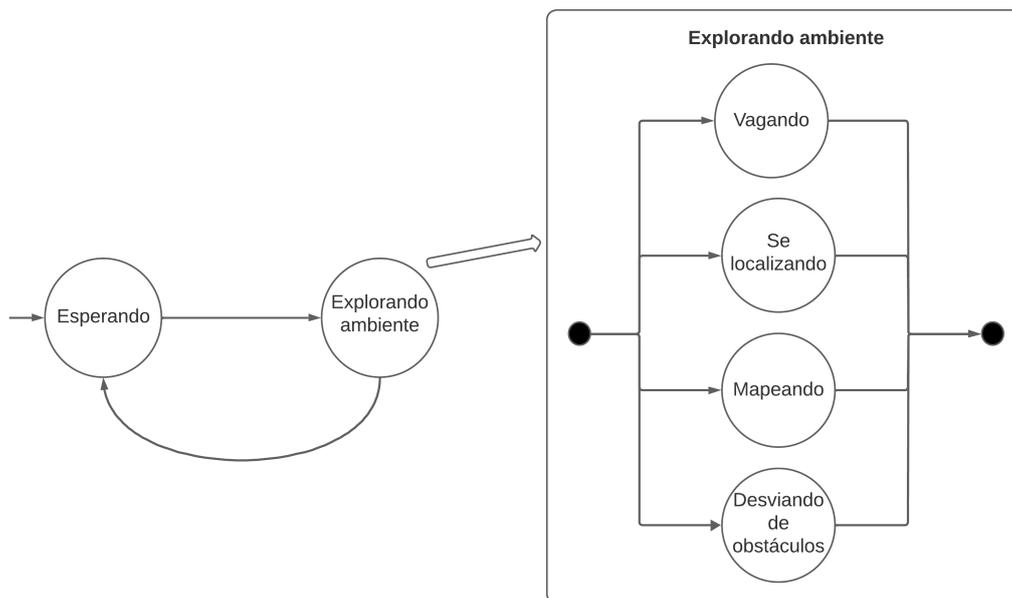
A fim de expor todos os requisitos, foi elaborado um documento de Especificação de Requisitos do Sistema com base nas práticas recomendadas pela norma IEEE Std 830-1998, Práticas Recomendadas para Especificações de Requisitos de Software da IEEE, que pode ser encontrado na íntegra no Apêndice A.

5.3 Modelagem do Sistema

O AtmosBot como navegador autônomo cumpre seu objetivo de navegação eficiente a partir de duas grandes etapas: espera no ponto de partida e exploração do ambiente

A exploração do ambiente pode ser subdividida em quatro tarefas importantes executadas paralelamente: 1) a locomoção pelo espaço, 2) a coleta de informações do meio para se localizar, 3) o mapeamento do ambiente, 4) o desvio dos obstáculos fixos e dinâmicos. Todas essas funcionalidades podem ser caracterizadas por estados conforme demonstrados na Figura 14.

Figura 14 – Estados principais do AtmosBot



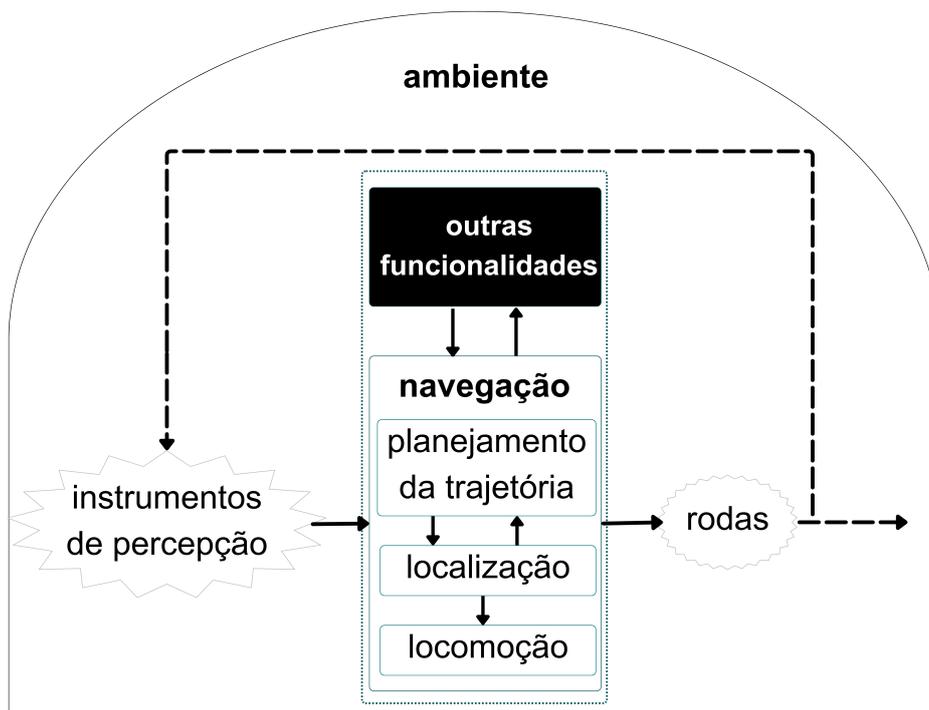
Fonte: Autora (2023).

Na Figura 14 é apresentada uma máquina de estados com dois principais estados sequenciais, em um laço fechado, sendo eles: esperando e explorando ambiente. O segundo estado é subdividido em quatro estados executados em paralelo, incluindo os sub-estados: vagando, se localizando, mapeando e desviando de obstáculos.

Inicialmente, o sistema deve estar em modo de espera para começar sua tarefa. Passado o tempo padrão de espera para que todos os seus processamentos estejam preparados, o robô inicia sua tarefa de explorar o ambiente, vagando pelo meio sem colidir com os obstáculos e coletando informações sobre a sua posição.

Este modelo permite a adição de outras funcionalidades em paralelo com o módulo de navegação, conforme a aplicação da abordagem de subsunção, que torna as unidades independentes. Apesar de serem unidades independentes, o módulo de navegação autônoma e outros possíveis módulos devem ser interligados com transmissão de informações cruciais entre si, além de se comunicarem com o próprio ambiente onde o robô se encontra. Essa interação entre os subsistemas, o sistema geral e o ambiente, pode ser analisada visualmente através da Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de blocos do modelo



Fonte: Autora (2023).

O diagrama de blocos apresentado na Figura 15 é constituído por quatro principais blocos: i) o ambiente que o robô atua, englobando os blocos restantes; ii) os instrumentos de percepção do robô; iii) o sistema lógico do robô; iv) as rodas do robô. Além disso, o fluxo das informações entre os blocos é representado pelas flechas. A conexão entre o bloco dos instrumentos de percepção e das rodas representa uma atualização constante das informações captadas pelos instrumentos conforme a atuação do robô no ambiente. Ademais, o bloco do sistema lógico do robô é constituído por blocos menores que se comunicam moderadamente, a fim de implementar independentemente a navegação autônoma do robô.

Em paralelo com a execução de outras possíveis funcionalidades que poderão ser incrementadas, o módulo de navegação recebe as informações que os instrumentos de percepção coletam do ambiente e as suas sub-camadas utilizam esse conhecimento para definir a atividade dos atuadores (os motores e consequentemente as rodas). Uma vez que o robô atua no ambiente, as informações dele mudam, pois o robô se encontra em outra posição, tornando um ciclo fechado entre atuação e percepção do meio.

5.4 Implementação da Proposta

A implementação da proposta pode ser separada em três elementos: i) a simulação; ii) o controle do robô; iii) integração de todos os componentes. O desenvolvimento de cada elemento é explicado detalhadamente a seguir.

5.4.1 Simulação

A simulação é responsável por permitir a recriação da realidade de forma mais verossímil possível. Para isso, cada aspecto dos elementos reais deve ser descrito com alta riqueza de detalhes, para serem representados na simulação com maior semelhança. Para o simulador Gazebo, essa descrição é realizada mediante arquivos SDF que compõe todas as características necessárias para a definição de elementos do ambiente e do robô. Entre essas características, são descritas o comportamento dos componentes perante as leis da física, além de tamanho, cor, articulações e movimento.

Visto que uma das maiores vantagens do simulador Gazebo é a sua comunidade ativa de desenvolvedores usuários que continuamente disponibiliza novos modelos de robôs e ambientes, foi possível criar o robô AtmosBot baseado no modelo disponibilizado por Sears-Collins (2021). A fim de obter uma melhor resolução na simulação, em conjunto com os arquivos SDF, cada parte do robô (rodas, base e estrutura vertical) foi renderizada por dados de malha tridimensional (MESH) elaborados e modificados no programa de design 3D Blender.

Assim como o uso de um modelo de robô disponibilizado pela comunidade do Gazebo, foi possível montar o domicílio simulado com modelos publicados pela plataforma "AWS Robot Maker" da Amazon, destinada a executar e automatizar simulações sem necessitar lidar com a infraestrutura (AWS, 2023; AWS, 2021).

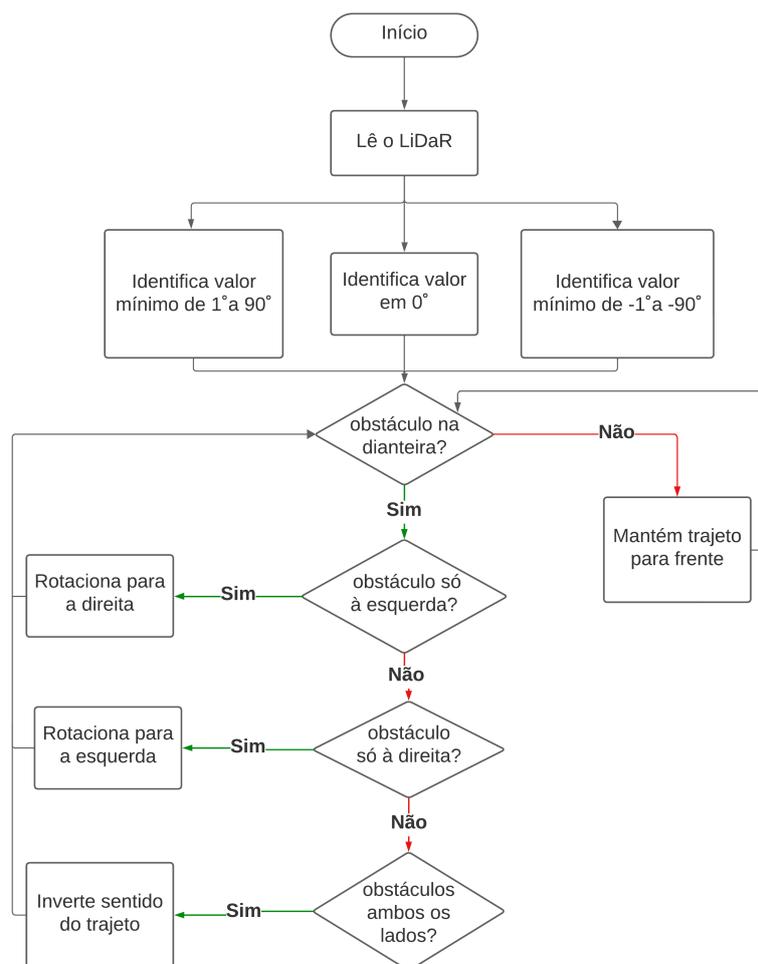
A simulação se torna completa ao combinar o ambiente montado com o robô elaborado. Para compreender a visão do robô ao longo da simulação, foi utilizado o programa RVIZ (*ROS Vizualisation*) que permite visualizar os processos ocorrendo com o robô, como a sua odometria, velocidade e capturas de sensores.

5.4.2 Navegação Autônoma

A navegação autônoma do AtmosBot foi subdividida em duas principais partes: i) vagar pelo ambiente sem colisões e ii) mapeamento e localização durante exploração do ambiente.

A fim de fazer o robô se locomover pelo ambiente simulado de forma livre sem colidir com os móveis e paredes ao longo do caminho, foi desenvolvido um algoritmo, na linguagem C++, capaz de compreender obstáculos à sua frente. Para isso, são capturadas as leituras do sensor LiDaR, posicionado na dianteira do robô, com intuito de validar se existe um obstáculo à sua frente e os possíveis cenários para rotação do robô (Figura 16). Uma vez que foi identificado uma nova rota, são definidas as velocidades linear (para seguir em frente ou dar ré) e angular (para rotacionar), conforme necessário.

Figura 16 – Fluxograma do algoritmo de vagar sem colidir



Fonte: Autora (2023).

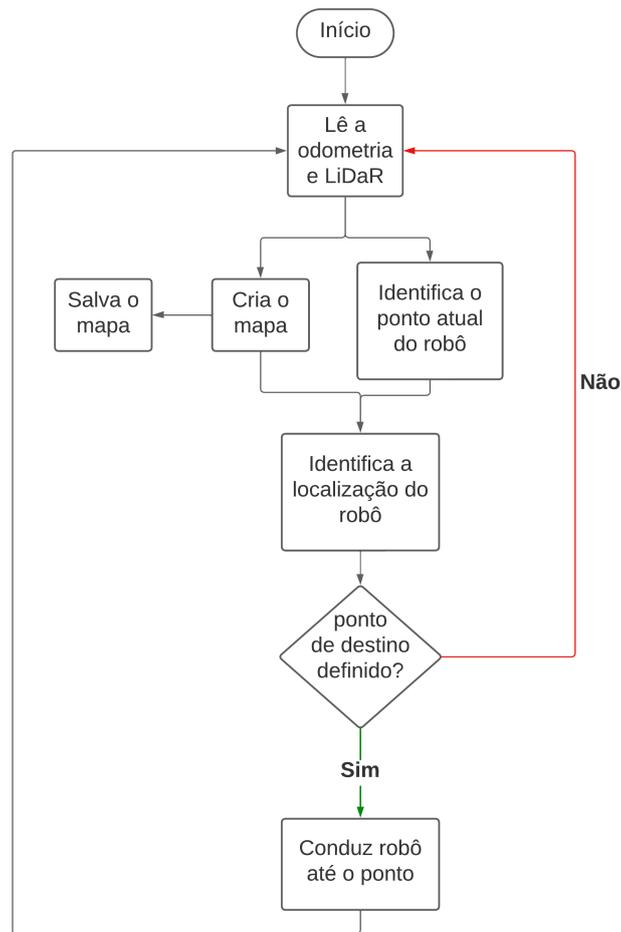
O fluxograma apresentado na Figura 16 expõe a sequência de funcionamento do algoritmo para evitar obstáculos. Ao iniciar a sua execução, as informações captadas pelo LiDaR são utilizadas para identificar a medida, em metros, até um possível obstáculo logo a frente do sensor (ângulo 0) e em um raio de 90 graus para cada extremidade do instrumento. Assim, é possível descobrir o obstáculos mais próximo do robô, identificando o valor mínimo das capturas pelos feixes de luz do centro (ângulo 1 grau para a direita e ângulo 359 graus, também enumerado como -1 grau, para a esquerda) até cada extremidade de alcance do sensor (ângulo 90 graus para a direita e ângulo 270, também enumerado como -90 graus, para a esquerda).

Para o mapeamento do ambiente e a localização do robô, foi possível usufruir de uma das maiores vantagens do Sistema Operacional de Robô (ROS): as variadas bibliotecas disponíveis que executam diversas funcionalidades. As bibliotecas utilizadas para realizar o comportamento compatível com a abordagem SLAM, foram a Slam Toolbox e Nav2 (MACENSKI et al., 2020; MACENSKI; JAMBRECIC, 2021).

A biblioteca Slam Toolbox foi criada no intuito de disponibilizar um conjunto de ferramentas para aplicar o SLAM em duas dimensões (MACENSKI; JAMBRECIC, 2021). Para o referente trabalho, a biblioteca é executada com o perfil de mapeamento em modo assíncrono, utilizando as informações do sensor LiDaR e odometria. O modo assíncrono permite que o mapa a ser criado e atualizado utilize apenas informações confiáveis dos sensores, tornando a navegação mais robusta. A partir dessa execução, é obtido o mapa do ambiente e o posicionando do robô neste mapa conforme as novas leituras dos sensores.

O mapa disponibilizado pela execução biblioteca Slam Toolbox é acessado pela biblioteca Nav2. Essa por sua vez, é uma coleção de utensílios facilitadores para a navegação autônoma de um robô (MACENSKI et al., 2020). Com o mapa criado pela biblioteca Slam Toolbox, o Nav2 consegue reconhecer a posição do robô. A partir disso, é possível definir um ponto de destino, permitindo que o Nav2 envie comando de velocidade para o robô, a fim de conduzi-lo até o destino selecionado (Figura 17).

Figura 17 – Fluxograma da interação entre Slam Toolbox e Nav2



Fonte: Autora (2023).

5.4.3 Sistema Operacional de Robô

Visto a quantidade de singularidades, foi utilizado o ROS para integrar todos os componentes e conectá-los entre o robô e a simulação. Para isso, foram definidas as características do robô em termos que o ROS reconheça, por URDFs traduzidos dos SDFs para a simulação. Essas descrições foram integradas com informações específicas dos sensores e odometria do robô, para serem acessadas pelas demais bibliotecas e o algoritmo de vagar.

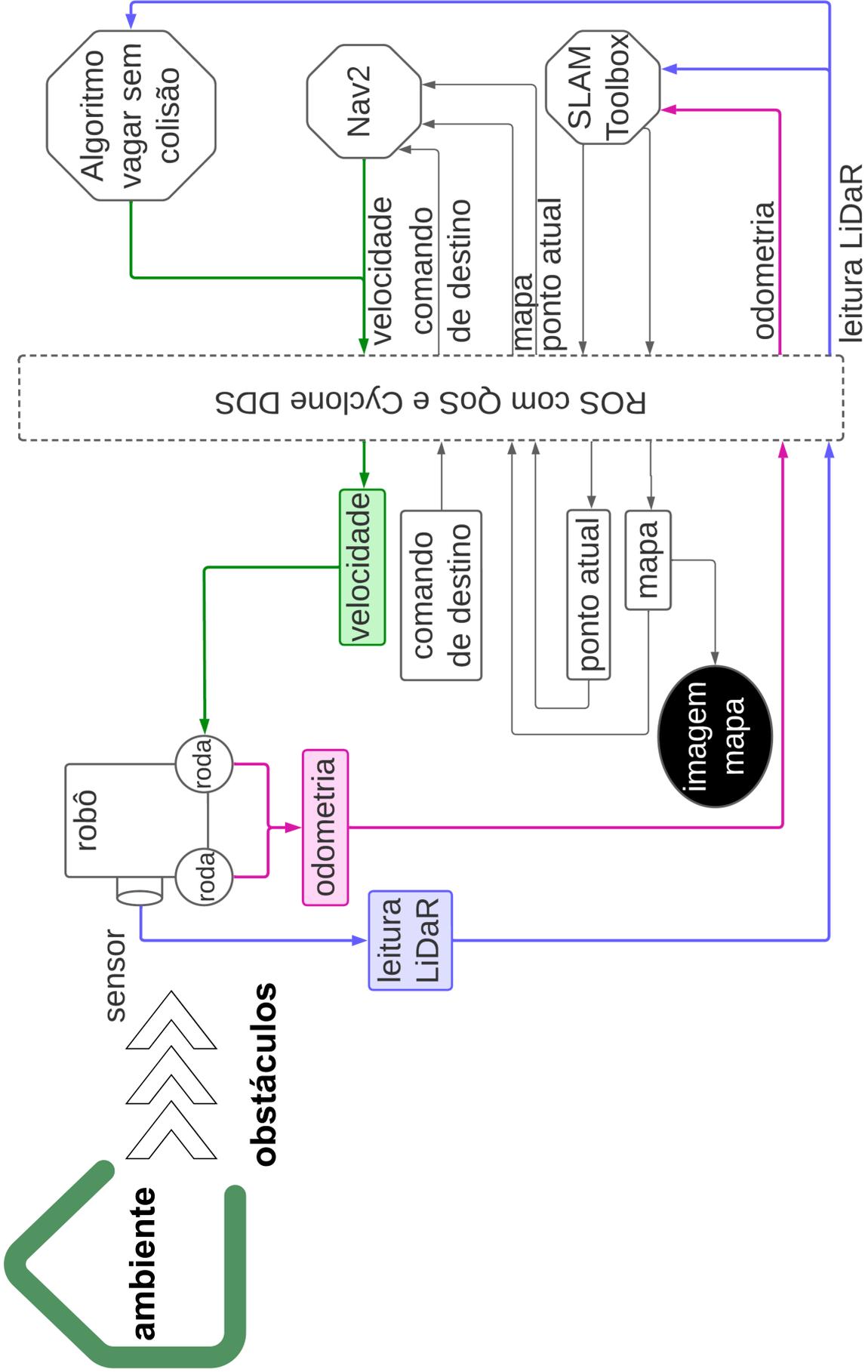
O ROS é constituído por componentes (nomeados como nós) que se comunicam entre si por linhas de comunicação (tópicos) que podem ser acessadas para enviar novas informações (publicar) ou captar informações publicadas (inscrever) por outros nós. Para que essas comunicações entre os nós se tornem mais confiáveis e robustas, foram utilizadas as configurações de qualidade de serviço a partir do *middleware* Cyclone (Open

Robotics, 2023b; Open Robotics, 2023a).

Por fim, a estrutura do modelo proposto é composta pelo robô e o ambiente configurados por arquivos que descrevem todas as suas características importantes. Através do ROS e seu *middleware*, as informações do ambiente simulado são capturadas pelos sensores e são comunicados para as bibliotecas de SLAM e navegação, além do algoritmo de vagar sem colisão. Assim como, os comandos necessários para o robô se mover são repassados pelo intermédio do sistema operacional de robô.

Na Figura 18, é encontrada a integração entre todos os componentes supracitados. Em azul, estão as leituras realizadas pelo sensor LiDaR para percepção do ambiente e identificação de obstáculos. Também é representada a odometria, em rosa, coletada pelas informações das rodas. Ambos dados são utilizados pela biblioteca Slam Toolbox e o algoritmo de vagar sem colisões, pelo intermédio do ROS. Assim como, em verde, a velocidade nas rodas é inferida através da definição de seu valor pelo algoritmo de vagar sem colisão ou pela biblioteca Nav2.

Figura 18 – Diagrama da integração dos componentes do AtmosBot



6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização da metodologia detalhada no Capítulo 2 em conjunto com a implementação da proposta definida no Capítulo 5, permitiu o desenvolvimento de um robô simulado capaz de explorar um ambiente desconhecido. Neste capítulo, é exposto e discutido os resultados obtidos com a implementação da solução para o problema norteante deste trabalho.

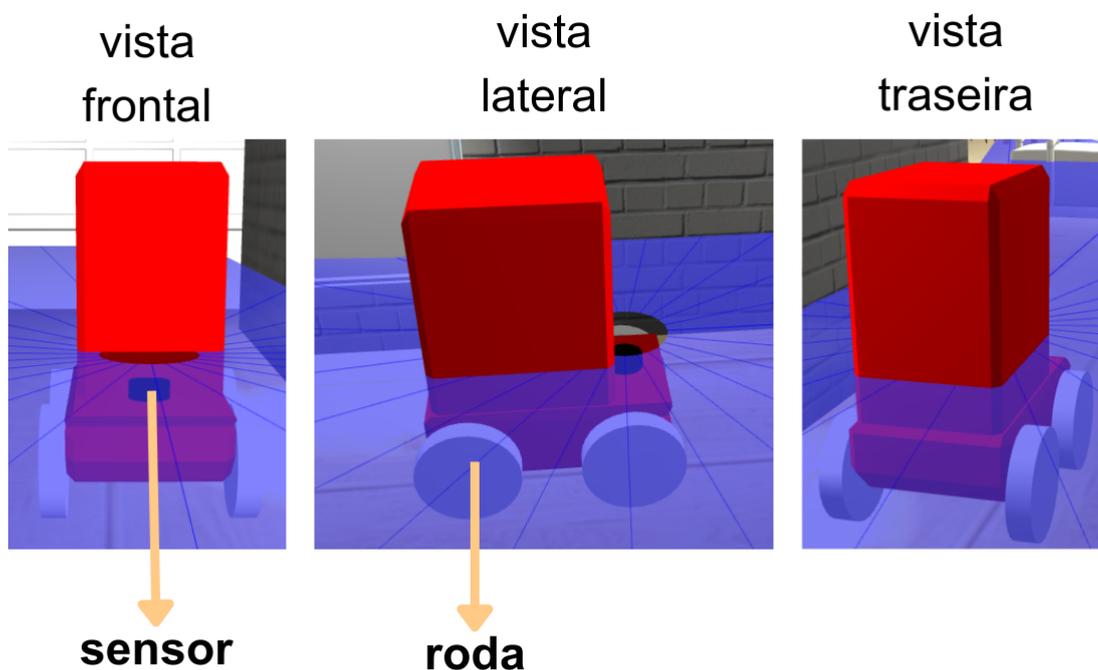
6.1 Modelo Proposto

O modelo proposto é constituído por três segmentos: i) a simulação; ii) controle lógico e iii) integração dos componentes. Em seguida, são expostos os resultados obtidos no desenvolvimento de cada segmento.

A estrutura física simulada do robô do presente trabalho foi baseado no modelo disponibilizado por Sears-Collins (2021). O AtmosBot (Figura 19) apresenta uma base tridimensional com quatro rodas comuns e um sensor LiDaR acoplados a ela. Ademais, foi incrementado uma estrutura horizontal tridimensional com bordas arredondadas e altura de 0,6 metros, no intuito de ser utilizada futuramente como suporte para os instrumentos de localização e manipulação de objetos.

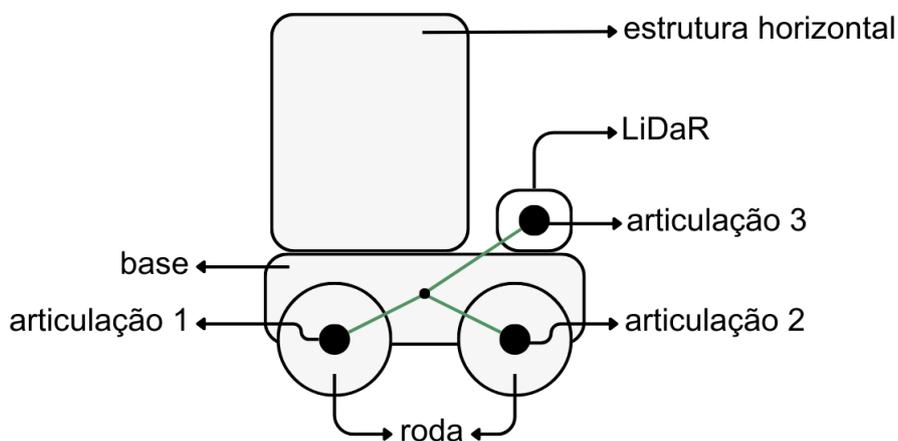
As rodas e o sensor são elementos separados que se integram com a estrutura base do robô a partir das articulações demonstradas na Figura 20. Para as rodas, nos arquivos de descrição de robôs, foi especificado que suas articulações são móveis com o movimento de revolução. Entretanto, para a articulação do sensor, foi definida para se manter estática, a fim de evitar qualquer movimentação indesejada.

Figura 19 – Estrutura física do AtmosBot



Fonte: Autora (2023).

Figura 20 – Diagrama de articulações do AtmosBot

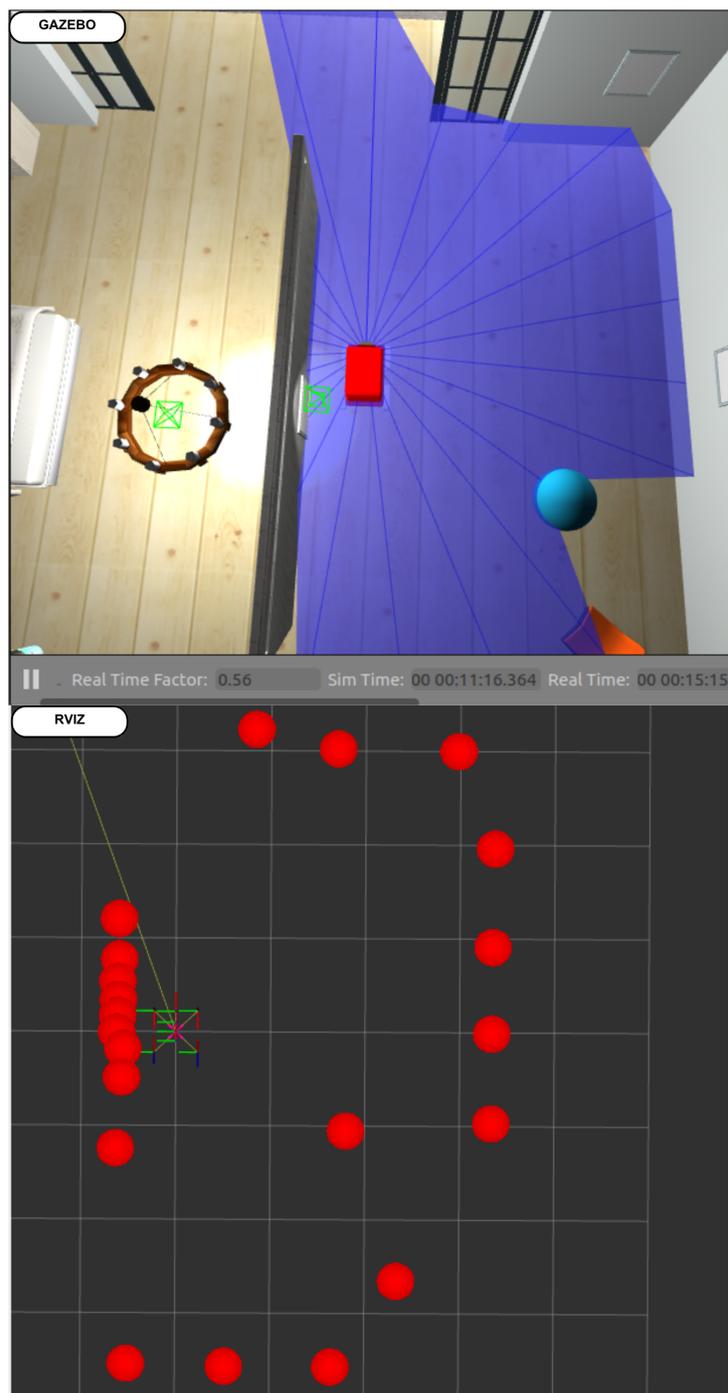


Fonte: Autora (2023).

O controle lógico do robô está diretamente conectada com a sua navegação autônoma. Os módulos que controlam o robô, para ele se movimentar autonomamente sem colidir com os obstáculos, utilizam as informações do ambiente captadas pelo sensor LiDaR. Na parte superior da Figura 21, é possível visualizar os feixes de luz do sensor, representados pelas linhas azuis, no simulador Gazebo. Esse sensor atua na horizontal, contendo 24 raios com uma distância de 15 graus entre eles e um alcance de 3,5 metros.

Cada feixe capta a distância, em metros, do seu ponto de origem até o obstáculo à sua frente que reflete as ondas óticas. Foi utilizado o valor mínimo entre as distâncias captadas no intervalo de 90 graus em cada extremidade, para identificar os pontos com obstáculos mais próximos nas laterais. Pelo programa RVIZ, na parte inferior da Figura 21, as capturas do LiDaR são expostas em esferas vermelhas.

Figura 21 – Capturas do sensor LiDaR

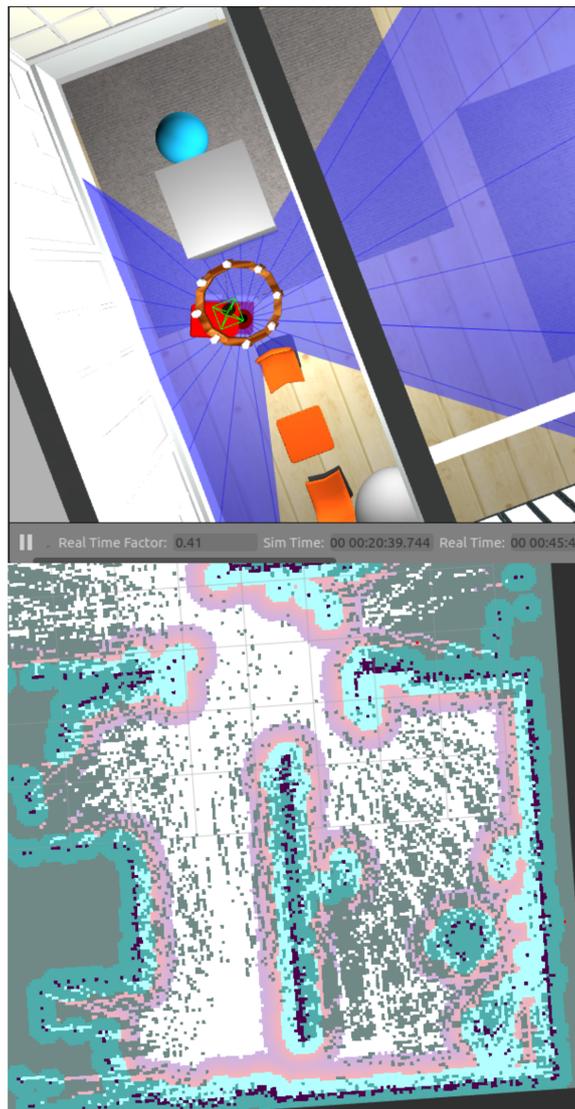


Fonte: Autora (2023).

Neste trabalho, o sensor LiDaR permitiu a detecção de obstáculos para que o AtmosBot conseguisse navegar com o mínimo de colisões. Segundo Kim et al. (2022), a câmera RGB com profundidade também é um instrumento muito utilizado para a detecção de obstáculos, podendo ser considerada um recurso mais barato. Entretanto, Khnissi, Jabeur e Seddik (2022) identifica que existe um custo maior no processamento das informações de profundidade disponibilizadas por tais câmeras. Por outro lado, como comprovado por Khnissi, Jabeur e Seddik (2022), o sensor LiDaR alcança o mesmo objetivo de detectar obstáculos durante a navegação do robô de forma satisfatória, com menor custo computacional. Além disso, os resultados obtidos da pesquisa bibliográfica para instrumentos de percepção do ambiente (Figura 13) revelam uma maior porcentagem de utilização do sensor LiDaR em trabalhos correlatos. Portanto, visto seu menor custo de processamento, capacidade similar de detecção de obstáculos e alta relevância, é mais coerente e vantajoso utilizar o LiDaR no cenário da problemática deste trabalho.

Ao longo da exploração do ambiente pelo AtmosBot, o módulo Slam Toolbox cria (e atualiza) um mapa com as informações capturadas pelo LiDaR e pela odometria. Esse mapa é constituído por *pixels* brancos, que correspondem a áreas livres, e pretos, equivalentes aos obstáculos. Pelo programa RVIZ é possível visualizar o mapa sendo criado, como disposto na parte inferior da Figura 22, conforme os obstáculos presentes na simulação, representada na parte superior da Figura 22.

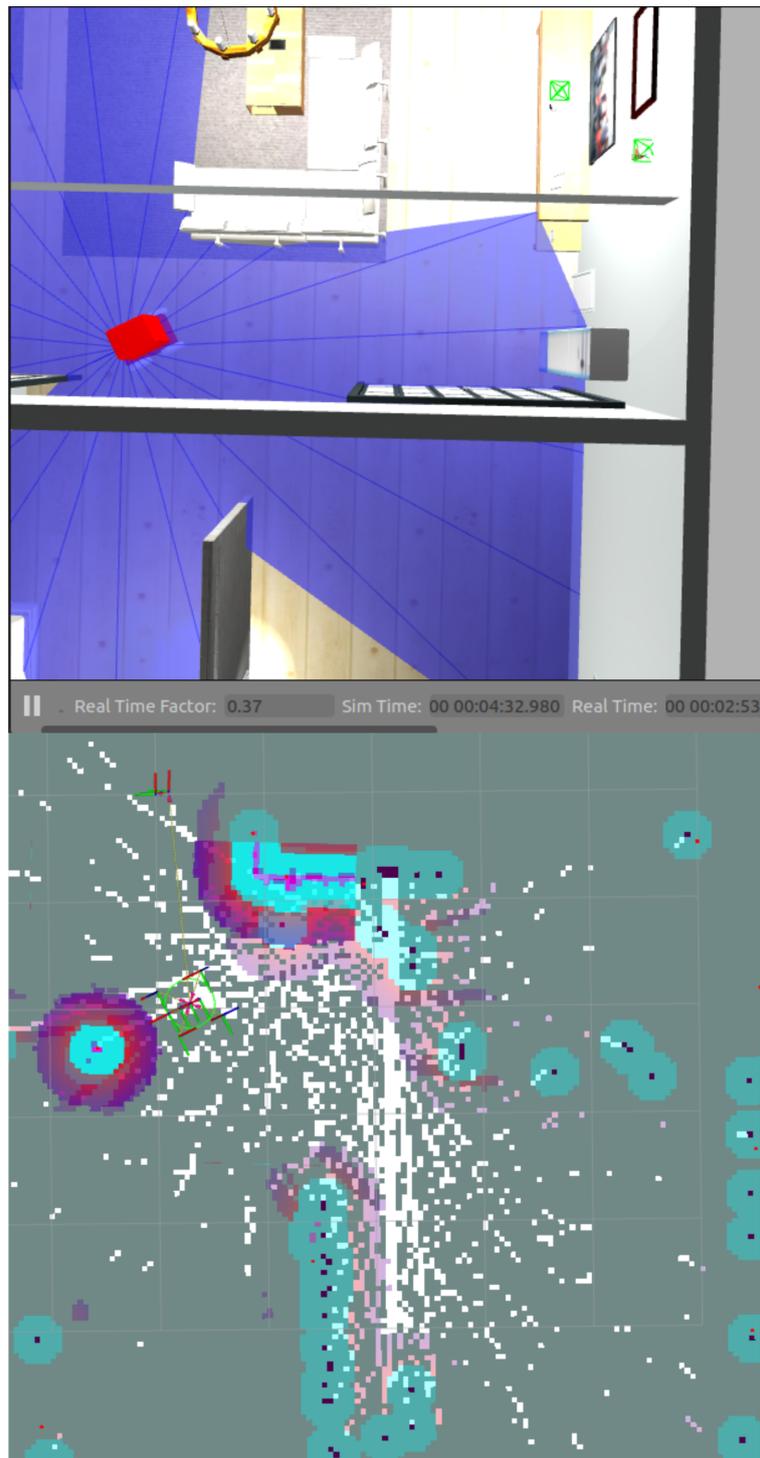
Figura 22 – Mapa em criação pelo Slam Toolbox



Fonte: Autora (2023).

No momento de execução, além do mapa de obstáculos e áreas livres, é criado em tempo real um mapa temporário com as áreas de colisão, nomeado como mapa de custos. Nesse formato de mapa, são definidos pesos (custos) para cada área do ambiente, definindo valores maiores para áreas ocupadas por obstáculos e valores intermediários para um raio ao redor dos elementos a serem evitados. Na parte inferior da Figura 23. estão expostos os obstáculos presentes na simulação (na parte superior da figura). A cor roxa representa uma área perigosa, próxima a um obstáculo. O vermelho indica uma área de colisão com algum elemento do ambiente. Por fim, em azul são representados o centro de massa dos obstáculos.

Figura 23 – Mapa de custos temporário

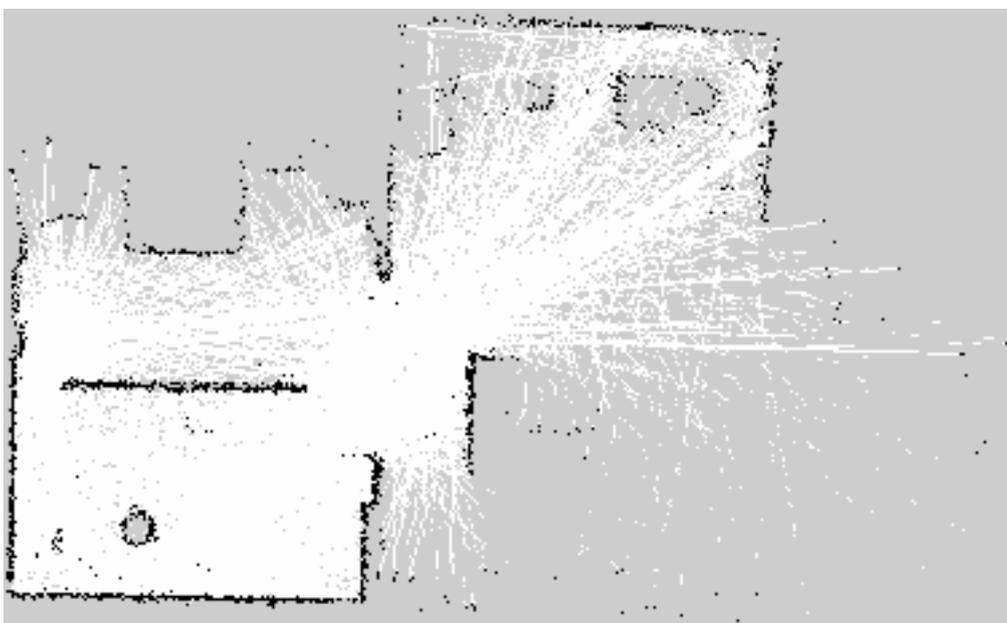


Fonte: Autora (2023).

Com o ambiente completamente, ou parcialmente, explorado, a biblioteca Slam Toolbox permite salvar o mapa de obstáculos, criado com a navegação autônoma, em formato de imagem (Figura 24) ou serializado. Como o ambiente em que o AtmosBot atua é desconhecido, o seu mapeamento é realizado durante a sua exploração conforme

as informações do sensor LiDaR. Em Khnissi, Jabeur e Seddik (2022) o ambiente foi mapeado pelo robô controlado remotamente para, em seguida, iniciar sua navegação autônoma com o mapa criado. Essa abordagem resultou em uma divergência de 0,2 metros entre o modelo produzido e a realidade. Assim, para não encontrar essas diferenças, é mais vantajoso mapear o ambiente autonomamente enquanto o robô explora o meio e evitar colisões a partir das capturas do LiDaR. Além disso, como visto, o Slam Toolbox fornece a possibilidade de atualizar o mapa que será utilizado para a localização do robô por outros módulos.

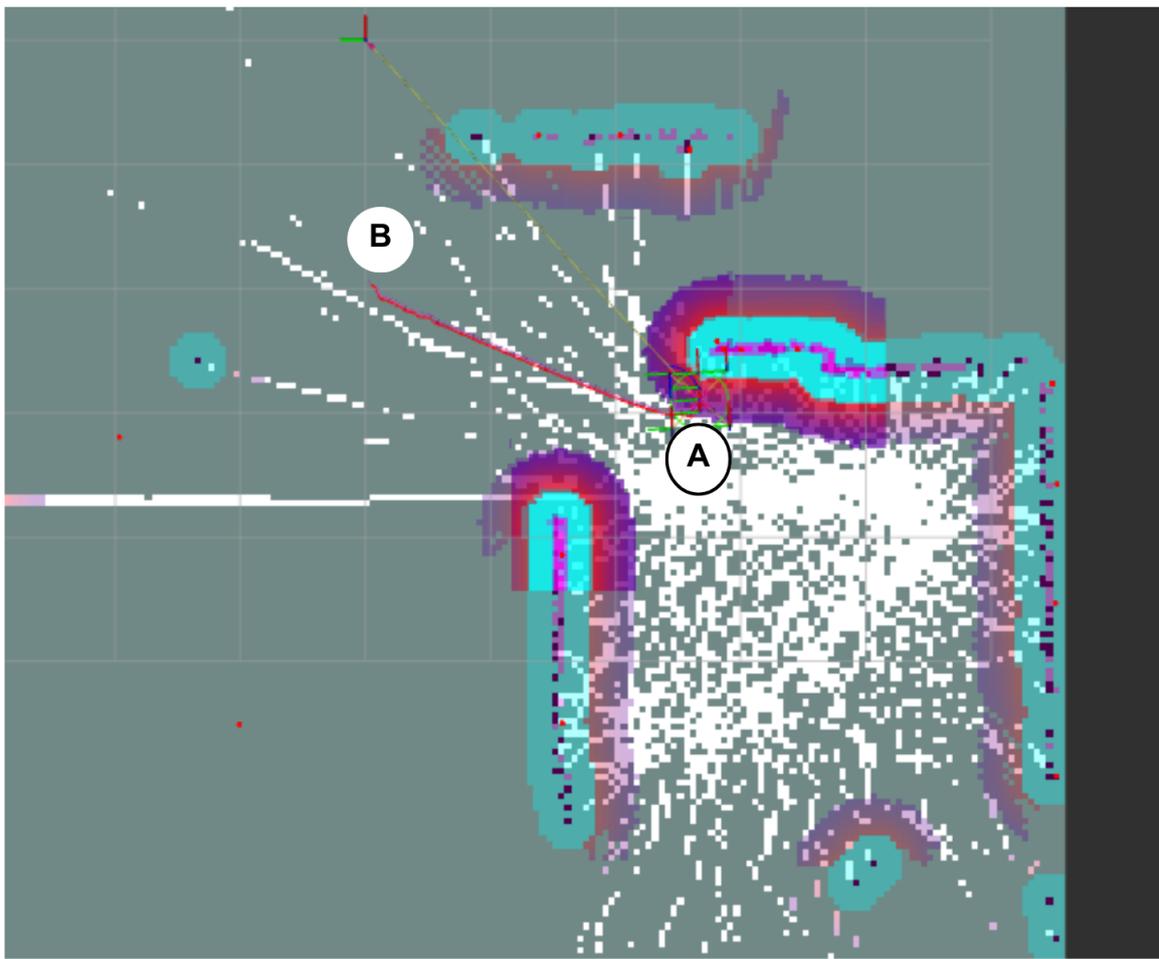
Figura 24 – Imagem do mapa criado pela exploração



Fonte: Autora (2023).

O mapa de áreas livres disponibilizado pelo módulo Slam Toolbox é acessado pela biblioteca Nav2. Com o mapa e a posição atual do robô, é possível identificar a sua localização no ambiente. Pelo programa RVIZ é possível emitir uma instrução para o robô, definindo um ponto de destino. O módulo Nav2 oferece o suporte para realizar a navegação até o objetivo definido de forma autônoma sem colidir com os obstáculos identificados ao longo do caminho. Na Figura 25, está destacada a trajetória definida para o ponto de destino, representada como uma linha vermelha, conforme o comando inserido no RVIZ.

Figura 25 – Trajetória elaborada pelo Nav2



Fonte: Autora (2023).

As sub-tarefas do robô se complementam para que ele seja capaz de navegar autonomamente por um ambiente desconhecido. Foi desnecessária a implementação de um algoritmo específico para a localização do robô, como feito por Khnissi, Jabeur e Seddik (2022) com o algoritmo AMCL e por Kim et al. (2022) com o aprendizado profundo reforçado. Pois, com a integração das bibliotecas Nav2 e Salm Toolbox, foi obtida essa funcionalidade de localização do robô com a dispensa de maiores incrementos.

Por fim, a implementação do Sistema Operacional de Robô (ROS) permitiu a integração entre todos os módulos e a simulação. O ROS realizou o papel crucial de intermédio entre todos os elementos do robô, permitindo que a mesma proposta possa ser utilizada além da simulação sem mudanças drásticas, como demonstrado por Khnissi, Jabeur e Seddik (2022), Kim et al. (2022), Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019).

6.2 Ambiente Simulado

O robô autônomo móvel modelado tem o objetivo de navegar de forma autônoma em um domicílio. Dito isso, o ambiente simulado foi montado para ter grande semelhança com uma residência. Para o presente trabalho é considerado como uma casa qualquer ambiente interno que contenha espaços definidos de convivência, com no mínimo um dormitório e uma cozinha. Com a ferramenta da AWS, foi possível simular um domicílio com três espaços diferentes: um dormitório, uma sala de estar e uma cozinha. Esses espaços não são divididos por paredes ou portas, possibilitando o acesso completo à casa. Cada espaço comporta elementos típicos, como cama, sofá, mesa, geladeiras e balcões. Além disso, também foram disponibilizados outros componentes para enriquecer o cenário, como produtos de academia, quadros e cabeceiras. Na Figura 26, é possível visualizar o ambiente elaborado através do simulador Gazebo.

Figura 26 – Ambiente elaborado pela plataforma AWS



Fonte: Autora (2023).

6.3 Resultados dos Testes

Com o modelo proposto finalizado, foi possível validá-lo integralmente com os casos de teste elaborados e definidos no Apêndice B. A partir dessa validação, tornou viável analisar quais os requisitos do robô, e do ambiente, foram alcançados pela implementação da solução proposta neste trabalho.

Em cada teste, foi executada a ação detalhada no caso de teste correspondente e o resultado obtido foi registrado no Apêndice C. Os resultados dos casos de teste permitiram analisar quais requisitos definidos anteriormente foram alcançados com sucesso e validar o modelo completo. Os casos de teste foram elaborados conforme os requisitos levantados no início da especificação do sistema. Esses requisitos foram categorizados por prioridade no desempenho do sistema, sendo essas prioridades: i) essencial; ii) importante; iii) desejável. Com essa categorização, é possível compreender o patamar de funcionamento que o robô se encontra após desenvolvido e validado.

Os requisitos com prioridade essencial fazem parte de um conjunto de especificações que determinam os elementos fundamentais para o modelo ser funcional, sem eles o modelo não pode ser considerado um produto minimamente viável. Esses elementos tratam sobre: i) a movimentação do robô pelo ambiente sem colidir com os obstáculos presentes; ii) as mudanças frequentes que o ambiente precisa ter para representar um domicílio real com morador; iii) a verossimilhança do ambiente simulado com uma residência comum e iv) a inexistência de portas fechadas entre espaços que o robô deveria acessar, além de degraus e escadas. Diante os quatro requisitos citados, com os testes realizados, foi observado que todos eles foram alcançados.

Os requisitos com prioridade importante, são requisitos necessários para um funcionamento adequado do modelo proposto. Entretanto, a sua inexistência não limita esse funcionamento, diferente dos requisitos essenciais. Os requisitos importantes abordam a movimentação e identificação do robô. Os correspondentes testes realizados apontam que foram alcançados os dois requisitos importantes definidos previamente.

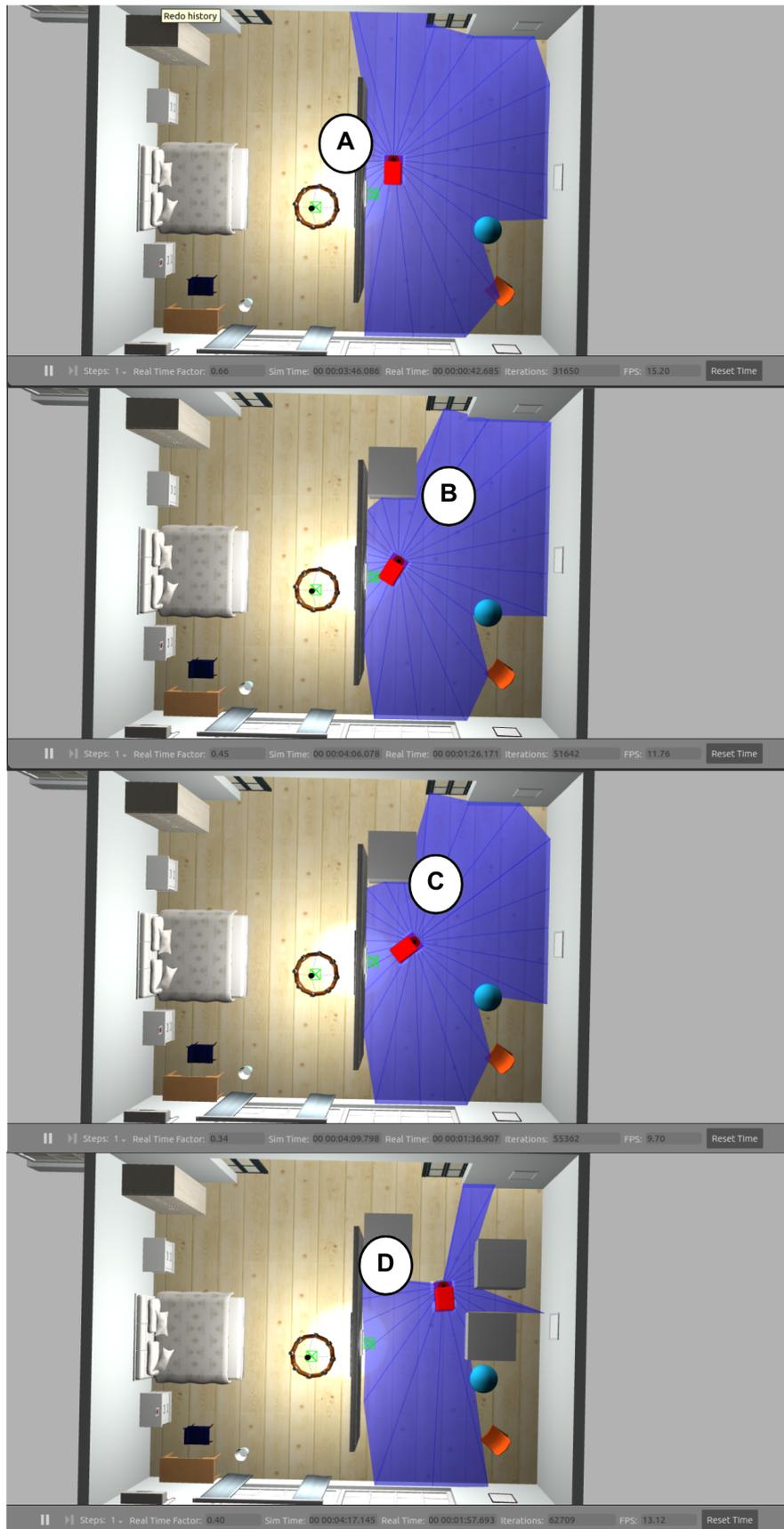
Por fim, os requisitos com prioridade desejável representam especificações que tornam ótimo o funcionamento do modelo. Caso esses requisitos não sejam atendidos, o desempenho do modelo não é afetado negativamente. Com isso, é possível serem incrementados apenas em próximas versões. Com os testes realizados, foi identificado todos os requisitos desejáveis foram alcançados.

Os casos de teste sobre a movimentação do robô e a dinamicidade do ambiente

(CT01, CT02, CT03, CT04 e CT05) tiveram testes com repetições para obter o sucesso médio dos casos de teste. Os casos de teste referentes são:

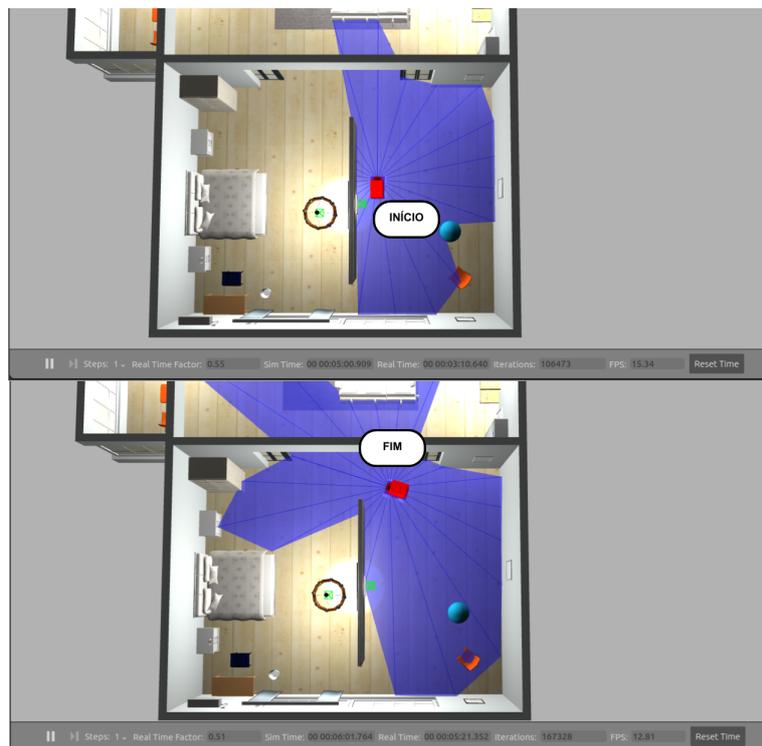
1. CT01 - detalha às direções possíveis que o robô é capaz de se movimentar, como demonstrado na Figura 27 com a amostra da execução de uma das repetições dos seus testes;
2. CT02 - capacidade do robô se esquivar dos obstáculos no ambiente, como demonstrado na Figura 28 com a amostra da execução de uma das repetições dos seus testes;
3. CT03 - locomoção do robô em diferentes superfícies (como tapete e piso liso), como demonstrado na Figura 29 com a amostra da execução de uma das repetições dos seus testes;
4. CT04 - velocidade segura do robô para os seres e propriedade ao seu redor, como demonstrado na Figura 30 com a amostra da execução de uma das repetições dos seus testes;
5. CT05 - capacidade de alterar a posição dos elementos da simulação, como demonstrado na Figura 31 com a amostra da execução de uma das repetições dos seus testes.

Figura 27 – Captura da primeira repetição CT01



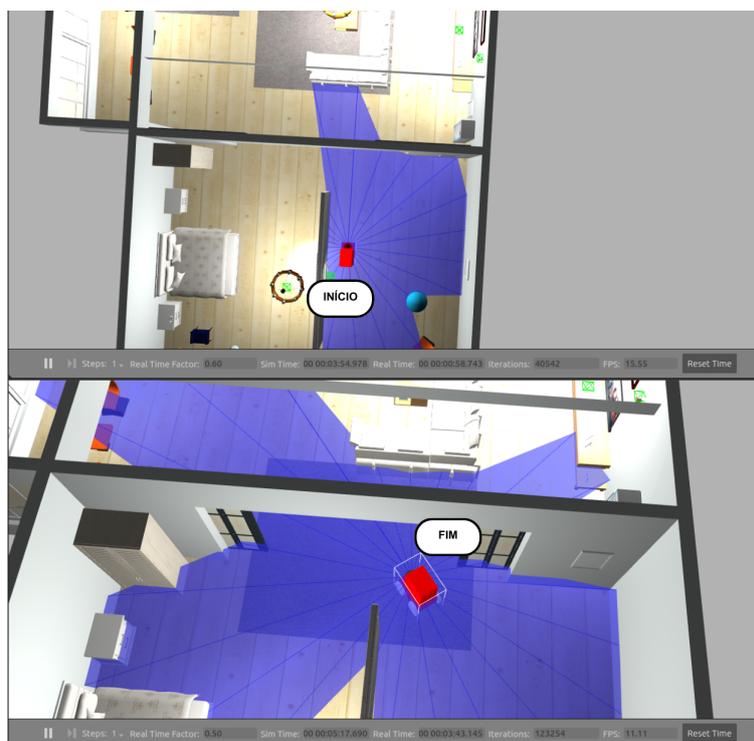
Fonte: Autora (2023).

Figura 28 – Captura da primeira repetição CT02



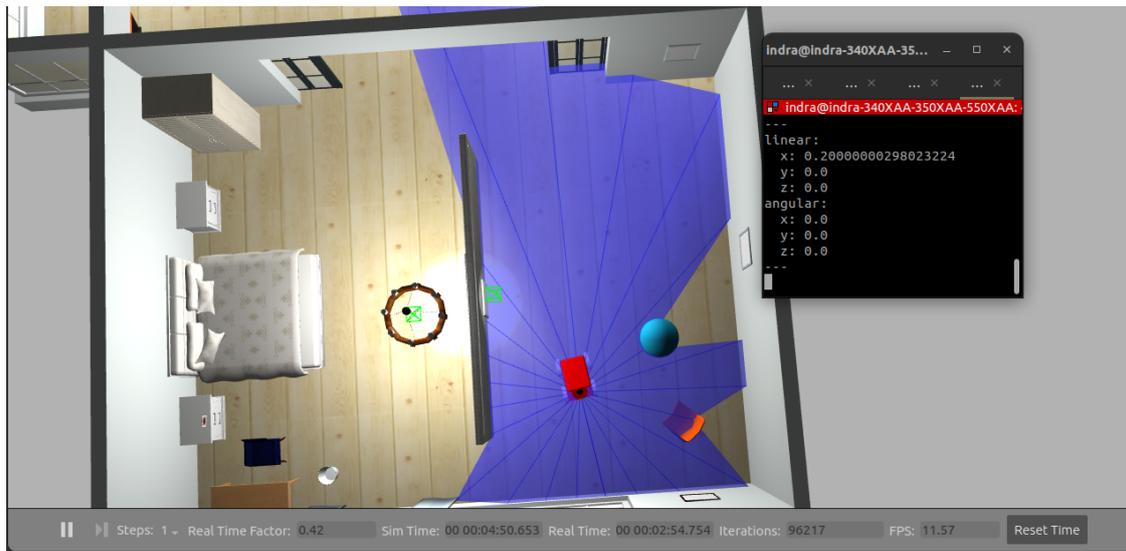
Fonte: Autora (2023).

Figura 29 – Captura da primeira repetição CT03



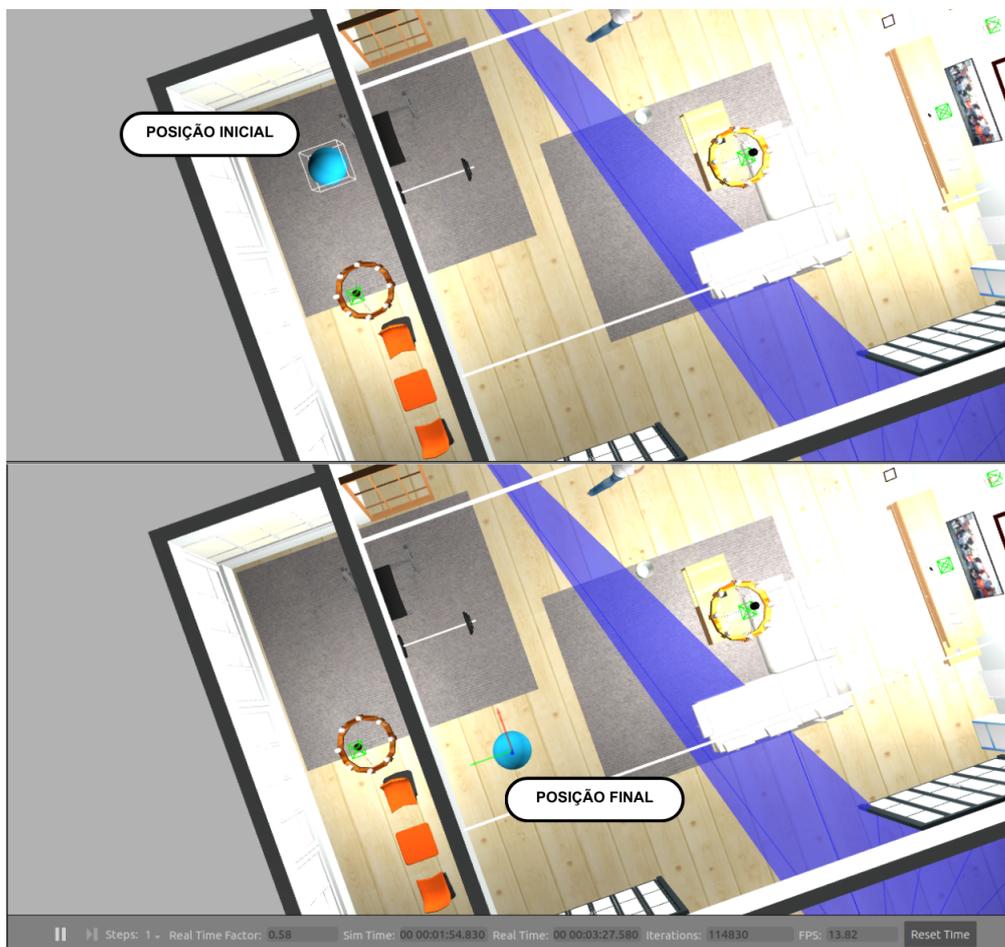
Fonte: Autora (2023).

Figura 30 – Captura da primeira repetição CT04



Fonte: Autora (2023).

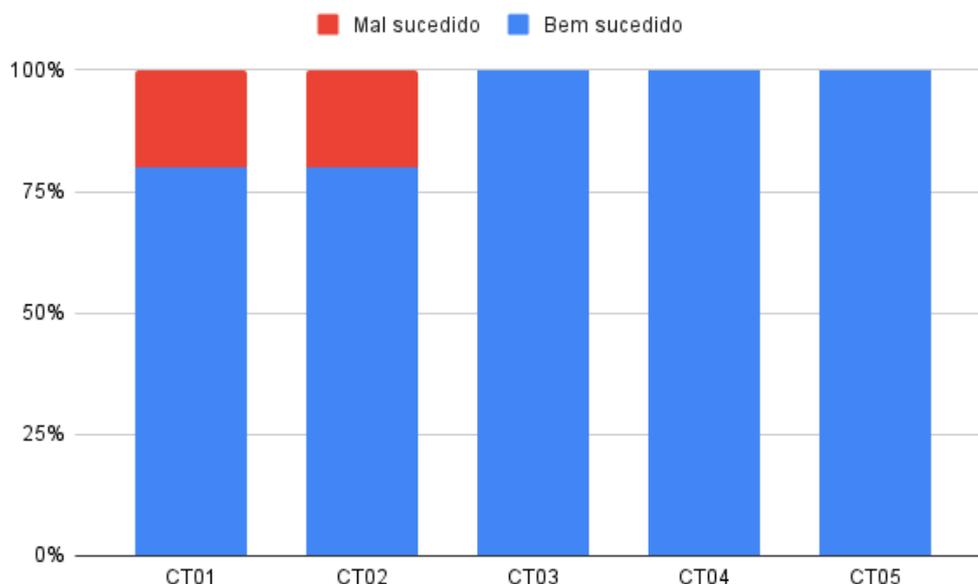
Figura 31 – Captura da primeira repetição CT05



Fonte: Autora (2023).

Dito isso, com as cinco repetições para os testes referentes aos casos de teste citados, foram obtidos apenas dois casos de teste com uma porcentagem de 80% de sucesso. Dentre as 25 repetições de cinco casos de teste diferentes, os cenários CT01 e CT02 apresentaram uma taxa de sucesso menor que 100% (Figura 32).

Figura 32 – Resultados dos testes com repetições

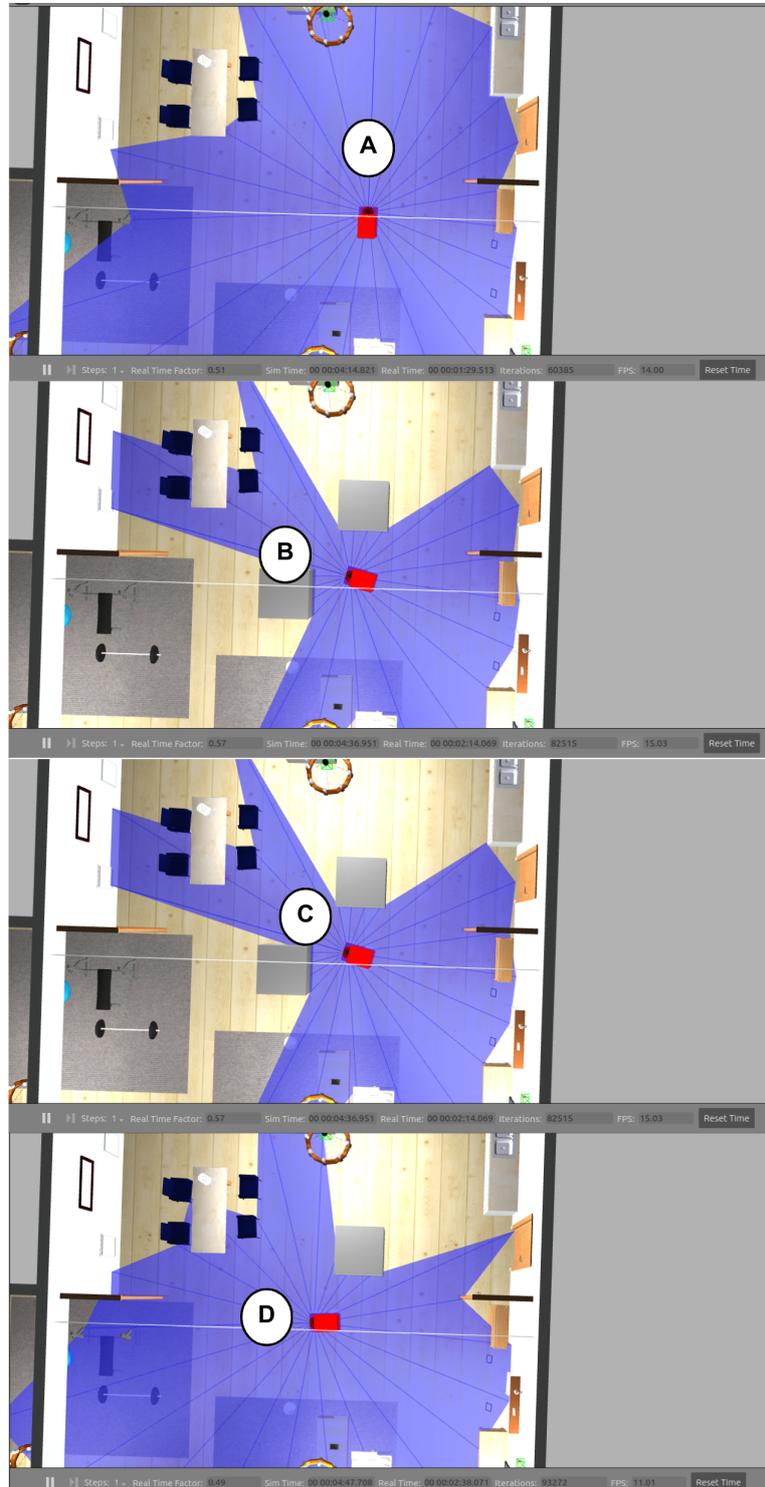


Fonte: Autora (2023).

Os casos de teste que obtiveram uma taxa de 80% de sucesso correspondiam a capacidade do movimento do robô em todos os eixos e na sua locomoção pelo ambiente sem colidir com obstáculos. Os testes para o primeiro caso de teste (CT01) apresentaram uma falha de 20%, ocasionada pelo mau posicionamento dos obstáculos (Figura 33).

O teste mal-sucedido para o segundo caso de teste (CT02), teve esse resultado devido ao local estreito na trajetória do robô (Figura 34). Para momentos no qual o robô se encontra sem opção, Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019) implementaram um estado de recuperação para que o robô possa retornar à sua navegação, podendo ser vantajoso em situações como a encontrada nesse teste com resultado negativo. Por ser uma porcentagem de falha mínima perante todos os sucessos, esses testes mal-sucedidos não impactam negativamente na navegação autônoma do robô.

Figura 33 – Captura da repetição do CT01 mal-sucedida



Fonte: Autora (2023).

Figura 34 – Captura da repetição CT02 mal-sucedida



Fonte: Autora (2023).

Por fim, a simulação no programa Gazebo proporcionou a verificação da implementação das funcionalidades. Com isso, ao longo do desenvolvimento, foi possível analisar as integrações e realizar as mudanças necessárias para a melhoria dos componentes. Tal facilidade na validação do comportamento do robô pela simulação também é aproveitada por Khnissi, Jabeur e Seddik (2022), Kim et al. (2022), Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019).

6.4 Destaques do AtmosBot

A implementação completa do modelo proposto permite uma comparação dos seus resultados obtidos e dos trabalhos correlatos. Na Tabela 3 estão expostos os resultados obtidos na navegação autônoma do AtmosBot e os trabalhos correlatos explicados no Capítulo 4. A tabela separa a navegação nas suas principais atividades, enfatizando as tecnologias implementadas e suas consequências.

Tabela 3 – Comparação dos resultados do AtmosBot com trabalhos correlatos

	Percepção	Localização	Mapeamento
AtmosBot	Sensor LiDaR: menor custo de processamento e tecnologia mais relevante	Biblioteca Nav2 + Slam Toolbox: implementação em mais alto nível	Slam + navegação: abordagem mais relevante e menor divergência no mapeamento
Robô TurtleBot3 Burger de Bluetronics (2021)	sensor LiDaR: integração mais relevante com SLAM e ROS	AMCL: implementação com pacotes do ROS e menos colisões	Slam com mapa criado antes da navegação: robô controlado remotamente e divergência com mundo real
Robô DPoom de Kim et al. (2022)	câmera RGB-D: menor custo financeiro	Mapas 3D + câmera RGB-D: sem implementação de outros pacotes	Slam 3D: criação de mapas mais detalhados
Robô com LiDaR e RGB-D Gatesichapakorn, Takamatsu e Ruchanurucks (2019)	sensor LiDaR e câmera RGB-D: percepção 3D do ambiente	AMCL: implementação extra com pacotes do ROS	Slam 2D e mapa estático: robô controlado remotamente

Fonte: Autora (2023).

Como pode ser observado na Tabela 3, um dos principais destaques do AtmosBot é a implementação de tecnologias relevantes para a percepção e mapeamento do ambiente, obtendo um menor custo de processamento e divergência do mundo real. Além disso, foi possível obter a localização do robô com bibliotecas integradas ao ROS, sem a necessidade de implementar um algoritmo específico em baixo nível.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho trouxe à tona o questionamento da possibilidade de desenvolver um robô de serviço doméstico com as tecnologias adequadas e relevantes, perante o atual momento caracterizado pelas teorias de *time-to-market* e do triângulo de ferro. Assim, foi identificado que, para esse desenvolvimento, é necessário modularizar o robô de serviço doméstico em funcionalidades independentes, se beneficiando de testes simulados para minimizar os recursos financeiros e o tempo despendido.

Dito isso, o presente trabalho conseguiu alcançar o seu objetivo geral definido com sucesso, sendo este elaborar um modelo de robô autônomo móvel simulado, capaz de realizar a funcionalidade fundamental de um robô de serviço doméstico: a navegação autônoma. O AtmosBot é formado por uma estrutura física com quatro rodas e um sensor LiDaR. Com as informações do sensor e da odometria das rodas, o robô tem a capacidade de mapear e se localizar no ambiente simulado desconhecido com abordagem SLAM ii) planejar e prosseguir por uma trajetória até um ponto de destino de forma autônoma sem colidir com obstáculos.

O desenvolvimento do modelo proposto foi possível a partir de uma revisão bibliográfica narrativa que fundamentou as teorias necessárias para a navegação autônoma e simulação robótica. Com as pesquisas bibliográficas constituídas por critérios pré-definidos, de inclusão e exclusão, foi possível analisar as tecnologias relevantes para a implementação de um robô autônomo móvel, alcançado o primeiro objetivo específico deste trabalho. Ademais, com os resultados dessas pesquisas bibliográficas específicas foi encontrado que a abordagem SLAM é a mais implementada para a localização de um robô e o sensor LiDaR é o instrumento mais utilizado para a percepção de ambientes. Com isso, foi implementado o SLAM e o sensor LiDaR para executar a navegação autônoma do robô, permitindo alcançar o segundo objetivo específico do presente trabalho. Por fim, o modelo integrado foi validado com sucesso por testes realizados conforme os casos de teste elaborados, expondo que todos os requisitos levantados foram atingidos. Além disso, foi realizada uma análise comparativa com os trabalhos correlatos encontrados, demonstrando que o modelo desenvolvido se comporta similarmente com propostas do mesmo âmbito, com uma redução de tempo e recursos despendidos. Portanto, destaca-se que todos os objetivos específicos definidos também foram alcançados com sucesso.

Confirmando a possibilidade de desenvolver moduladamente um robô de serviço doméstico com uma redução de recursos despendidos, conforme comprovado por este

trabalho, é possível extrapolar tal ideia e considerar a probabilidade de tornar esses robôs mais acessíveis economicamente. Com isso, pode-se vislumbrar que futuramente eles se tornem presentes até nas casas de pessoas de baixa renda com limitações motoras, auxiliando-as nas suas tarefas diárias e aumentando a sua qualidade de vida.

Inicialmente foi idealizado o desenvolvimento de um modelo de robô autônomo móvel com capacidade de navegar autonomamente em direção a um objeto detectado no ambiente. As tecnologias mais relevantes no tema do trabalho seriam comparadas, por uma sequência de testes, a fim de identificar as ferramentas mais adequadas para cada sub-tarefa presente no sistema. Para condizer com o trabalho de conclusão de curso, o escopo foi reduzido para um robô autônomo móvel doméstico implementado com tecnologias selecionadas por uma análise de trabalhos correlatos. Além disso, o modelo implementa suas atuais funcionalidades de forma independente, podendo suportar incrementos de outras tarefas importantes para um robô de serviço doméstico. Diante disso, os requisitos do sistema foram identificados novamente para melhor suportar a solução proposta.

Dessa forma, este trabalho propõe um robô autônomo móvel doméstico independente capaz de ser integrado em um sistema maior para compor um robô de serviço doméstico. Assim, se vê como futuros trabalhos, a implementação de um módulo de localização e manipulação de objetos. Além disso, se torna viável a integração de uma interface para interação com humanos, possibilitando receber ordens de uma pessoa e executar atividades específicas em um ambiente, com o intuito de auxiliar nas suas tarefas diárias.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. **Fundamentos De Instrumentação**. [S.l.]: PEARSON BRASIL, 2013. ISBN 9788581431833.
- AWS. **AWS RoboMaker Small House World ROS packager**. 2021. Disponível em: <<https://github.com/aws-robotics/aws-robomaker-small-house-world#aws-robomaker-small-house-world-ros-package>>.
- AWS. **AWS RoboMaker**. 2023. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/robomaker/>>.
- BAILEY, T.; DURRANT-WHYTE, H. Simultaneous localization and mapping (slam): Part ii. **IEEE robotics & automation magazine**, IEEE, v. 13, n. 3, p. 108–117, 2006.
- BALIANA, L. K. **Monoparentalidade feminina e seus desafios: um estudo exploratório**. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa (Portugal), 2014.
- BELAY, A. M.; KEKÄLE, T.; HELO, P. Time-to-market and concurrent engineering in product development processes. **International journal of innovation and learning**, Inderscience Publishers, v. 10, n. 1, p. 60–84, 2011.
- BETTOSINI, I. et al. Torocó: A subsumption architecture implementation. In: IEEE. **2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)**. [S.l.], 2022. p. 27–32.
- BLUETRONICS. **TurtleBot3 BURGER**. 2021. Disponível em: <<https://bluetronics.co.in/product/turtlebot3-burger/>>.
- BROOKS, R. A robust layered control system for a mobile robot. **IEEE journal on robotics and automation**, IEEE, v. 2, n. 1, p. 14–23, 1986.
- BROOKS, R. A.; CONNELL, J.; NING, P. Herbert: A second generation mobile robot. 1988.
- CARPIN, S. et al. Usarsim: a robot simulator for research and education. In: IEEE. **Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.], 2007. p. 1400–1405.
- COHEN, M. A.; ELIASBERG, J.; HO, T.-H. New product development: The performance and time-to-market tradeoff. **Management Science**, INFORMS, v. 42, n. 2, p. 173–186, 1996.
- DRESCH, A. et al. **Design science research**. [S.l.]: Springer, 2015.
- DURAI, S. Designing the literature review: Historical, narrative, theoretical, integrative, and scoping reviews. **Indian Journal of Continuing Nursing Education**, Medknow, v. 22, n. 1, p. 75–79, 2021.
- EM. **Síndrome de Burnout: Brasil é o segundo país com mais casos diagnosticados**. 2023. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/saude-e-bem-viver/2023/05/26/interna_bem_viver,1498977/sindrome-de-burnout-brasil-e-o-segundo-pais-com-mais-casos-diagnosticados.shtml>.

FARLEY, A.; WANG, J.; MARSHALL, J. A. How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, Morse and Webots with a focus on accuracy of motion. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Elsevier, v. 120, p. 102629, 2022.

FEDER, M.; GIUSTI, A.; VIDONI, R. An approach for automatic generation of the urdf file of modular robots from modules designed using SolidWorks. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 200, p. 858–864, 2022.

G1. **Brasil tem mais de 11 milhões de mães que criam os filhos sozinhas.** 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2023/05/12/brasil-tem-mais-de-11-milhoes-de-maes-que-criam-os-filhos-sozinhas.ghtml>>.

GALVÃO, L. B. Mãe solteira não. mãe solo! considerações sobre maternidade, conjugalidade e sobrecarga feminina. **Revista Direito e Sexualidade**, v. 1, n. 1, 2020.

GATESICHAPAKORN, S.; TAKAMATSU, J.; RUCHANURUCKS, M. Ros based autonomous mobile robot navigation using 2d lidar and rgb-d camera. In: IEEE. **2019 First international symposium on instrumentation, control, artificial intelligence, and robotics (ICA-SYMP)**. [S.l.], 2019. p. 151–154.

HEINEN, M. R.; ENGEL, P. M. Aprendizado e controle de robôs móveis autônomos utilizando atenção visual. **Revista de informática teórica e aplicada. Porto Alegre. Vol. 17, n. 3 (2010), p. 349-363**, 2010.

HEINEN, M. R.; OSÓRIO, F. S. Evolução do caminhar de robôs móveis simulados utilizando algoritmos genéticos. **Anais do XV Seminário de Computação (Seminfo)**, Blumenau, SC, Brazil, FURB Editora, v. 131, p. 142, 2006.

HEVNER, A. et al. Design science in information systems research. **Management Information Systems Quarterly**, v. 28, p. 75–, 03 2004.

IROBOT. **Histórico**. 2022. Disponível em: <<https://www.irobot.com.br/About-iRobot/Company-information/History>>.

JAMIL, M. A. et al. Software testing techniques: A literature review. In: IEEE. **2016 6th international conference on information and communication technology for the Muslim world (ICT4M)**. [S.l.], 2016. p. 177–182.

JAULIN, L. **Mobile robotics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.

KANG, Y.; KIM, D.; KIM, K. Urdf generator for manipulator robot. In: IEEE. **2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)**. [S.l.], 2019. p. 483–487.

KELLY, A. **Mobile robotics: mathematics, models, and methods**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.

KHAIRUDDIN, A. R.; TALIB, M. S.; HARON, H. Review on simultaneous localization and mapping (slam). In: IEEE. **2015 IEEE international conference on control system, computing and engineering (ICCSCE)**. [S.l.], 2015. p. 85–90.

KHAN, M. U. et al. A comparative survey of lidar-slam and lidar based sensor technologies. In: IEEE. **2021 Mohammad Ali Jinnah University International Conference on Computing (MAJICC)**. [S.l.], 2021. p. 1–8.

KHNISSI, K.; JABEUR, C. B.; SEDDIK, H. Implementation of a new-optimized ros-based slam for mobile robot. In: IEEE. **2022 IEEE Information Technologies & Smart Industrial Systems (ITSIS)**. [S.l.], 2022. p. 1–6.

KIM, T. et al. An open-source low-cost mobile robot system with an rgb-d camera and efficient real-time navigation algorithm. **IEEE Access**, IEEE, v. 10, p. 127871–127881, 2022.

KOENIG, N.; HOWARD, A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In: IEEE. **2004 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)**. [S.l.], 2004. v. 3, p. 2149–2154.

LEONARD, J. J.; DURRANT-WHYTE, H. F. Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. In: **IROS**. [S.l.: s.n.], 1991. v. 3, p. 1442–1447.

LI, N. et al. A progress review on solid-state lidar and nanophotonics-based lidar sensors. **Laser & Photonics Reviews**, Wiley Online Library, v. 16, n. 11, p. 2100511, 2022.

MACENSKI, S.; JAMBRECIC, I. Slam toolbox: Slam for the dynamic world. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 61, p. 2783, 2021.

MACENSKI, S. et al. The marathon 2: A navigation system. In: **2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://github.com/ros-planning/navigation2>>.

MIGLINO, O.; NAFASI, K.; TAYLOR, C. E. Selection for wandering behavior in a small robot. **Artificial Life**, MIT Press, v. 2, n. 1, p. 101–116, 1994.

MUNAWAR, A. et al. A real-time dynamic simulator and an associated front-end representation format for simulating complex robots and environments. In: IEEE. **2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. [S.l.], 2019. p. 1875–1882.

NEHMZOW, U. **Mobile robotics: a practical introduction**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

Open Robotics. **Eclipse Cyclone DDS**. 2023. Disponível em: <<https://docs.ros.org/en/humble/Installation/DDS-Implementations/Working-with-Eclipse-CycloneDDS.html>>.

Open Robotics. **Quality of Service settings**. 2023. Disponível em: <<https://docs.ros.org/en/humble/Concepts/Intermediate/About-Quality-of-Service-Settings.html>>.

OTHMAN, K. M.; RAD, A. B. Sequential localizing and mapping: A navigation strategy via enhanced subsumption architecture. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 17, p. 4815, 2020.

OUZZANI, M. et al. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 5, n. 1, p. 210, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>.

PMI. **Guia PMBOK: Um Guia para o Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos**. [S.l.]: Project Management Institute, 2021.

PRESSMAN, R. S.; MAXIM, B. R. **Engenharia de software-9**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2021.

RAVINDRAN, V.; SHANKAR, S. Systematic reviews and meta-analysis demystified. **Indian journal of rheumatology**, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 89–94, 2015.

RESENDE, C. A.; TELES, L. C. J. S.; ALVARADO, A. H. R. Logística de assistência domiciliar a saúde com base na experiência do crer-centro de reabilitação e readaptação dr. henrique santillo. **Caribeña de Ciencias Sociales**, n. agosto, 2018.

SAMSUNG. **Inteligência artificial, conectividade e personalização: as tendências da Samsung para os próximos anos**. 2021. Disponível em: <https://news.samsung.com/br/inteligencia-artificial-conectividade-e-personalizacao-as-tendencias-da-samsung-para-os-proximos-anos>.

SAVAGE, J. et al. Pumas@home 2019 team description paper. **RoboCup@ Home**, 2019.

SEARS-COLLINS, A. **How to Create a Simulated Mobile Robot in ROS 2 Using URDF**. 2021. Disponível em: <https://automaticaddison.com/how-to-create-a-simulated-mobile-robot-in-ros-2-using-urdf/>.

SHABALINA, K.; SAGITOV, A.; MAGID, E. Comparative analysis of mobile robot wheels design. In: IEEE. **2018 11th International Conference on Developments in systems Engineering (dese)**. [S.l.], 2018. p. 175–179.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**. [S.l.]: MIT press, 2011.

SINGH, R.; AGGARWAL, S.; SAHNI, S. A systematic literature review of work-life balance using ado model. **FIIB Business Review**, SAGE Publications Sage India: New Delhi, India, v. 12, n. 3, p. 243–258, 2023.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of business research**, Elsevier, v. 104, p. 333–339, 2019.

SOMMERVILLE, I. **Engenharia de Software**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011.

Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al. **ROS**. 2018. Disponível em: <https://www.ros.org>.

STEHLING, M. A. A precarização e a informalidade no mercado de trabalho brasileiro. 2019.

TAHERI, H.; XIA, Z. C. Slam; definition and evolution. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Elsevier, v. 97, p. 104032, 2021.

WHO. **Disability**. 2023. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/disability>.

WHO et al. Who housing and health guidelines. World Health Organization, 2018.

YASSINE, A.; SOUWEID, S. Time-to-market and product performance tradeoff revisited. **IEEE Transactions on Engineering Management**, IEEE, 2021.

ZHAO, J. et al. Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside lidar sensors. **Transportation research part C: emerging technologies**, Elsevier, v. 100, p. 68–87, 2019.

APÊNDICE A – DOCUMENTO DE ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SISTEMA

A.1 Introdução

Esta seção apresentará o propósito do documento de Especificação de Requisitos do Sistema, o escopo do sistema, as definições de termos, as abreviações e acrônimos, ademais da organização do documento.

A.1.1 Propósito

A Especificação de Requisitos do Sistema expõe as necessidades do robô autônomo móvel simulado que o trabalho propõe, assim como as exigências do ambiente simulado no qual o robô irá atuar. Com isso, será facilitada a implementação do modelo a ser proposto, além de permitir a realização de testes específicos e coerentes ao sistema.

A.1.2 Escopo

O sistema AtmosBot inicial modelado é um robô autônomo móvel que atua em um ambiente interno dinâmico desconhecido. O agente deve conseguir realizar a tarefa elementar de um robô de serviço doméstico completamente autônomo, sendo ela: a navegação autônoma. Com isso, o robô simulado modelado deve ser capaz de se locomover pelo ambiente de forma autônoma e sem colidir com possíveis obstáculos.

A.1.3 Definições

RFS - Requisitos Funcionais do Sistema

RNFS - Requisitos Não Funcionais do Sistema

RNFA - Requisitos Não Funcionais do Ambiente

A.1.4 Organização

Este documento contém a descrição geral do projeto, incluindo a perspectiva do sistema, suas funções e as características do usuário. Ademais, possui os requisitos específicos funcionais e não funcionais subdivididos entre o sistema e o ambiente simulados.

A.2 Descrição geral

Esta seção descreve os fatores gerais que afetam o sistema e seus requisitos, contendo a perspectiva do sistema, as suas funções e as características do usuário.

A.2.1 Perspectiva do sistema

O sistema em questão funciona de forma independente para ser um robô autônomo móvel simulado. Entretanto, em um futuro trabalho, ele deve ser inserido como funcionalidade de um sistema maior que é um robô de serviço doméstico.

Como boa prática, segundo os princípios da arquitetura de subsunção de Brooks (1986), cada funcionalidade de um robô de serviço doméstico deve ser independente e apenas realizar comunicações necessárias entre si. Então, o sistema a ser modelado deve funcionar de forma modular do projeto completo.

A.2.2 Funções do sistema

O dispositivo simulado deve conter duas funções essenciais ao seu funcionamento, sendo elas:

1. Navegação autônoma pelo ambiente sem colidir com obstáculos;
2. Exploração do ambiente.

Todas as sub-tarefas fundamentais das funções supracitadas devem ser cumpridas integralmente para o funcionamento correto do sistema.

A.2.3 Características do usuário

O sistema descrito é autônomo e não necessita da interação ou interferência de usuários humanos. Ele atua unicamente no ambiente inserido conforme as características do mesmo.

A.3 Requisitos específicos

Esta seção destaca com detalhe todos os requisitos funcionais e não funcionais do robô móvel autônomo simulado e do ambiente que será criado por simulação a fim de testar o sistema proposto. Os requisitos funcionais determinam as ações fundamentais que o sistema e o ambiente devem ter para que o dispositivo a ser modelado consiga aceitar e processar as suas entradas, além de gerar saídas para seus atuadores agirem no meio.

Os requisitos não funcionais englobam questões de desempenho, segurança, confiabilidade, entre outros aspectos que são características necessárias para um ótimo funcionamento geral, não conceituando ações do sistema.

Todos os requisitos são rotulados pela prioridade e urgência de aplicação, podendo ser definidos como:

- Essencial: o requisito não pode faltar no sistema ou ambiente;
- Importante: o requisito é necessário para um bom funcionamento, porém não o limita;
- Desejável: o requisito é necessário para um ótimo funcionamento, mas pode ser implementado em uma futura versão sem impactar o desempenho do sistema.

Além disso, os requisitos são expostos segundo a Tabela 4.

Tabela 4 – Modelo dos requisitos

Identificação do requisito	Título do requisito	Prioridade
Entrada	Especificação da entrada necessária para a funcionalidade	
Detalhamento	Detalhamento da funcionalidade	
Saída	Especificação da saída necessária após a execução da funcionalidade	

Fonte: Autora (2023).

A.3.1 Requisitos Funcionais do Sistema

Tabela 5 – RFS01

RFS01	Movimentação do robô	Importante
Entrada	Direção definida pelo eixo que o robô precisa se locomover.	
Detalhamento	O robô deve se mover para todas as direções no ambiente.	
Saída	Movimentação do instrumento de locomoção (rodas ou pernas) do robô conforme a direção explicitada.	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 6 – RFS02

RFS02	Evitação de obstáculos	Essencial
Entrada	Dados do ambiente ao redor do robô coletados a partir de sensores em seu corpo.	
Detalhamento	O robô deve processar os dados dos sensores de modo a saber se há um obstáculo (objeto, pessoa, animal, parede ou móvel) perto o suficiente que ele possa colidir. Com essa informação, caso haja um obstáculo próximo a sua frente, o robô deve se esquivar dele e continuar sua trajetória planejada. Caso não haja obstáculos a sua frente, o robô deve continuar a sua trajetória planejada.	
Saída	Comandos para os motores atuarem nas rodas alterando a direção conforme o obstáculo detectado.	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 7 – RNFS01

RNFS01	Locomoção em diferentes superfícies	Importante
Entrada	Não possui.	
Detalhamento	O robô deve ser capaz de se locomover de forma satisfatória, tanto em pisos lisos, quanto em pisos revestidos (com carpetes ou tapetes).	
Saída	Não possui.	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 8 – RNFS02

RNFS02	Locomoção com segurança aos seres transeuntes	Desejável
Entrada	Não possui.	
Detalhamento	A velocidade de locomoção do robô deve ser moderada, respeitando o ambiente interno e sua dinamicidade, a fim de não prejudicar as pessoas e/ou animais que transitam o espaço em conjunto com o próprio robô. Sendo assim, ela não deve ultrapassar de 0,2 m/s.	
Saída	Não possui.	

Fonte: Autora (2023).

A.3.2 Requisitos Não Funcionais do Ambiente Simulado

Tabela 9 – RNFA01

RNFA01	Dinamicidade	Essencial
Entrada	Não possui.	
Detalhamento	O ambiente deve conter mudanças frequentes na posição de objetos e móveis.	
Saída	Não possui.	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 10 – RNFA02

RNFA02	Semelhança a domicílios reais	Essencial
Entrada	Não possui.	
Detalhamento	O ambiente deve trazer aspectos de um domicílio comum, com móveis, paredes, portas, objetos, tapetes, entre outros itens que o tornam mais verossímil à realidade.	
Saída	Não possui.	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 11 – RNFA03

RNFA03	Tamanho de domicílio padrão	Desejável
Entrada	Não possui.	
Detalhamento	O ambiente deve conter, no mínimo, três cômodos internos que se conectam de alguma forma (por portas ou corredores).	
Saída	Não possui.	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12 – RNFA04

RNFA04	Minimização de Impedimentos	Essencial
Entrada	Não possui.	
Detalhamento	O ambiente não deve conter portas fechadas ou pouco abertas. Além disso o ambiente de acesso do robô não deve conter escadas ou degraus altos (devem conter no máximo 1 centímetro de altura).	
Saída	Não possui.	

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DOS CASOS DE TESTE

B.1 Introdução

Este apêndice tem o intuito de explicar e expor os casos de teste definidos para realizar a validação final do modelo proposto para um robô autônomo móvel perante os requisitos previamente definidos para o sistema completo (robô e ambiente simulados).

B.2 Casos de teste

Os casos de teste são procedimentos para realizar testes nos quais são dispostos as ações necessárias para realizar cada teste e o resultado ideal perante estas ações. Para melhor organização e padronização, os casos de teste aqui definidos seguem o modelo disposto na Tabela 13.

Tabela 13 – Modelo dos casos de teste

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Título do requisito que o caso de teste se refere.	Detalhamento da ação, ou entrada, necessária para validar o requisito.	Detalhamento do Resultado esperado da simulação perante a ação, ou entrada, definida.

Fonte: Autora (2023).

A seguir são dispostos os casos de teste elaborados conforme os requisitos (funcionais e não funcionais) definidos previamente para a simulação do ambiente e do robô, expostos no Apêndice A.

Tabela 14 – Caso de teste CT01 referente a RFS01

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Movimentação do robô	Em primeiro lugar, a simulação deve ser executada e o estado de vagar pelo ambiente deve ser iniciado. Com tudo executando devidamente, devem ser adicionados obstáculos há 0,5 metros da dianteira e lateral esquerda do robô. Após 5 segundos, devem ser adicionados obstáculos há 0,5 metros da dianteira e lateral direita do robô.	Ao adicionar os primeiros obstáculos, o robô deverá se rotacionar no sentido direito. Após adicionar os últimos obstáculos, o robô deverá se rotacionar no sentido esquerdo.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 15 – Caso de teste CT02 referente a RFS02

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Evitação de obstáculos	Em primeiro lugar, a simulação deve ser executada e o estado de exploração do ambiente deve ser iniciado. A exploração deve ocorrer por 120 segundos.	Com o ambiente propriamente elaborado, o robô deverá se locomover por ele e se esquivar de possíveis móveis que estão presentes no meio.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 16 – Caso de teste CT03 referente a RNFS01

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Locomoção em diferentes superfícies	Em primeiro lugar, a simulação deve ser executada e o estado de vagar pelo ambiente deve ser iniciado em um meio constituído parcialmente por piso liso e por tapete.	O robô deverá se movimentar igualmente em ambos as superfícies, sem que o robô apresente o comportamento de instabilidade nas rodas ou emperramento.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 17 – Caso de teste CT04 referente a RNFS02

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Locomoção com segurança aos seres transeuntes	Em primeiro lugar, a simulação deve ser executada e o estado de exploração do ambiente deve ser iniciado em um meio constituído por no mínimo um ser humano se locomovendo.	O robô deverá se locomover pelo ambiente em uma velocidade até 0,2 m/s.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 18 – Caso de teste CT05 referente a RNFA01

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Dinamicidade	Em primeiro lugar, a simulação deve ser executada e a posição dos objetos e móveis devem ser alteradas com constância.	Os objetos e móveis deverão ter sua posição alterada sem que a simulação pare ou corrompa.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 19 – Caso de teste CT06 referente a RNFA03

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Semelhança a domicílios reais	A simulação deve ser executada.	A simulação deverá apresentar uma planta residencial básica com elementos de sala, dormitório e cozinha.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 20 – Caso de teste CT07 referente a RNFA04

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Tamanho de domicílio padrão	A simulação deve ser executada.	O ambiente simulado deverá apresentar no mínimo um espaço de cozinha, sala e dormitório. Entre os espaços, não devem se apresentar portas de acesso fechadas.

Fonte: Autora (2023).

Tabela 21 – Caso de teste CT08 referente a RNFA05

Requisito referente	Ação/Entrada	Resultado esperado
Minimização de Impedimentos	A simulação deve ser executada.	O ambiente simulado não deverá apresentar portas de acesso, entre os espaços, que se apresentam fechadas.

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES

Este apêndice tem o intuito de expor os resultados obtidos por testes de validação do modelo proposto. Esses testes foram realizados conforme detalhado nos casos de teste, apresentados no Apêndice B.

C.1 Caso de Teste CT01 Referente a RFS01

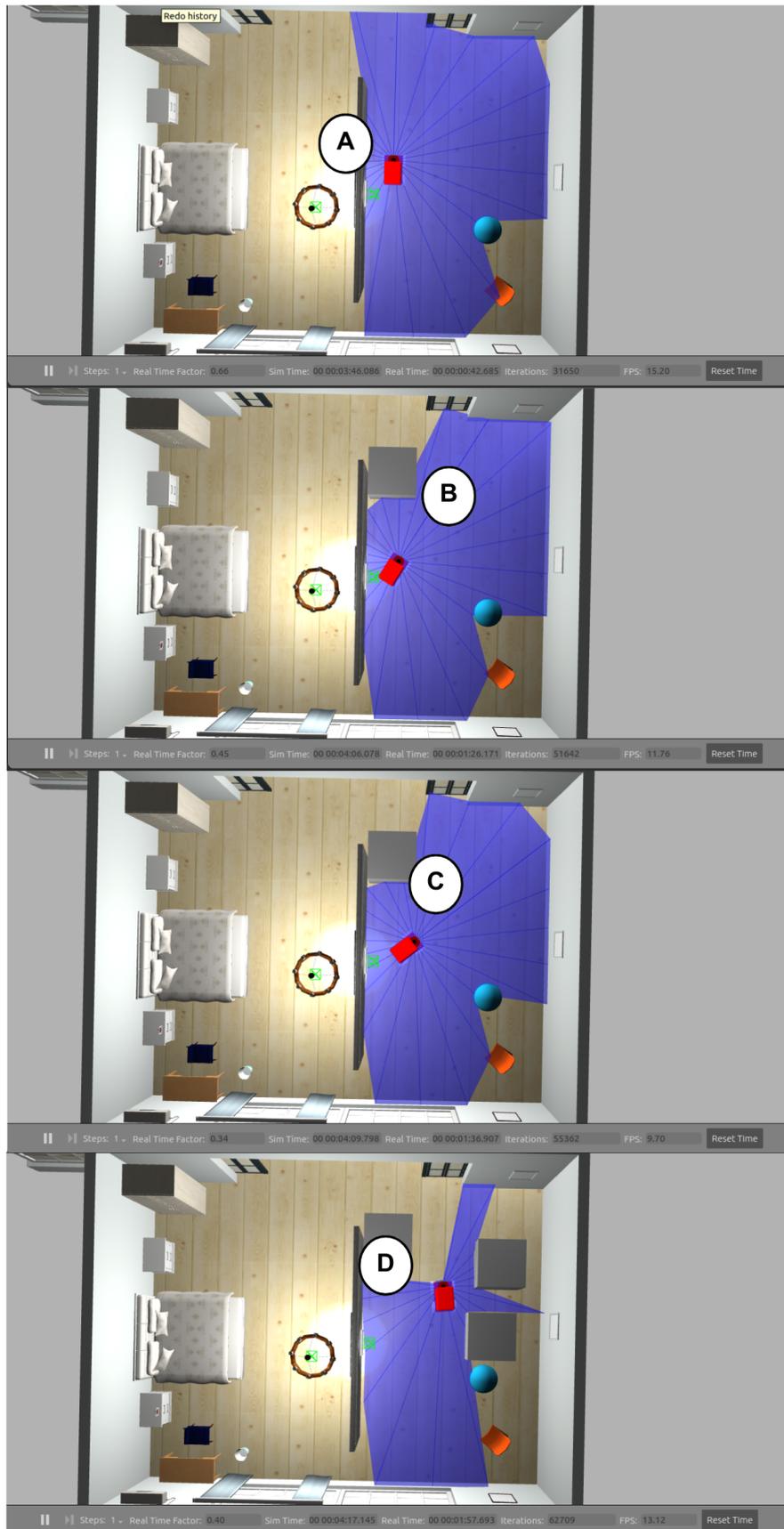
O caso de teste CT01 visou validar se o robô é capaz de se mover para todos os sentidos e direções pelo ambiente que está inserido. O caso de teste foi repetido cinco vezes com o robô em lugares distintos no ambiente. Entre os cinco testes, apenas um foi mal sucedido, visto que o robô rotacionou para o lado errado ao adicionar os obstáculos. Todos os resultados podem ser visualizados na Tabela 22. Além disso, a seguir podem ser encontradas as capturas para cada repetição (Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39).

Tabela 22 – Resultados das repetições CT01

	Resultados CT01
Teste 1	Bem-sucedido
Teste 2	Bem-sucedido
Teste 3	Bem-sucedido
Teste 4	Mal-sucedido
Teste 5	Bem-sucedido
Total de acertos (%)	80

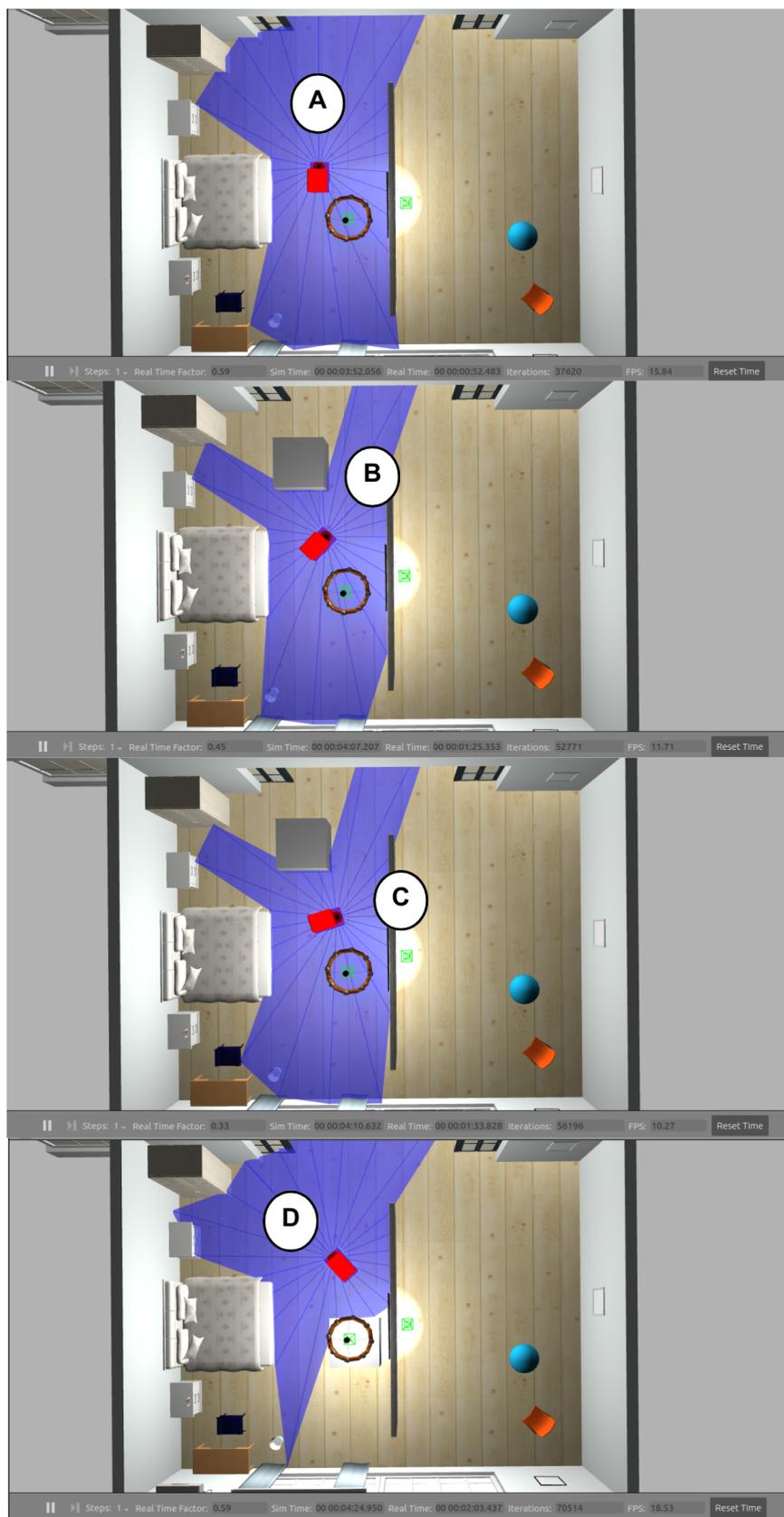
Fonte: Autora (2023).

Figura 35 – Captura da primeira repetição CT01



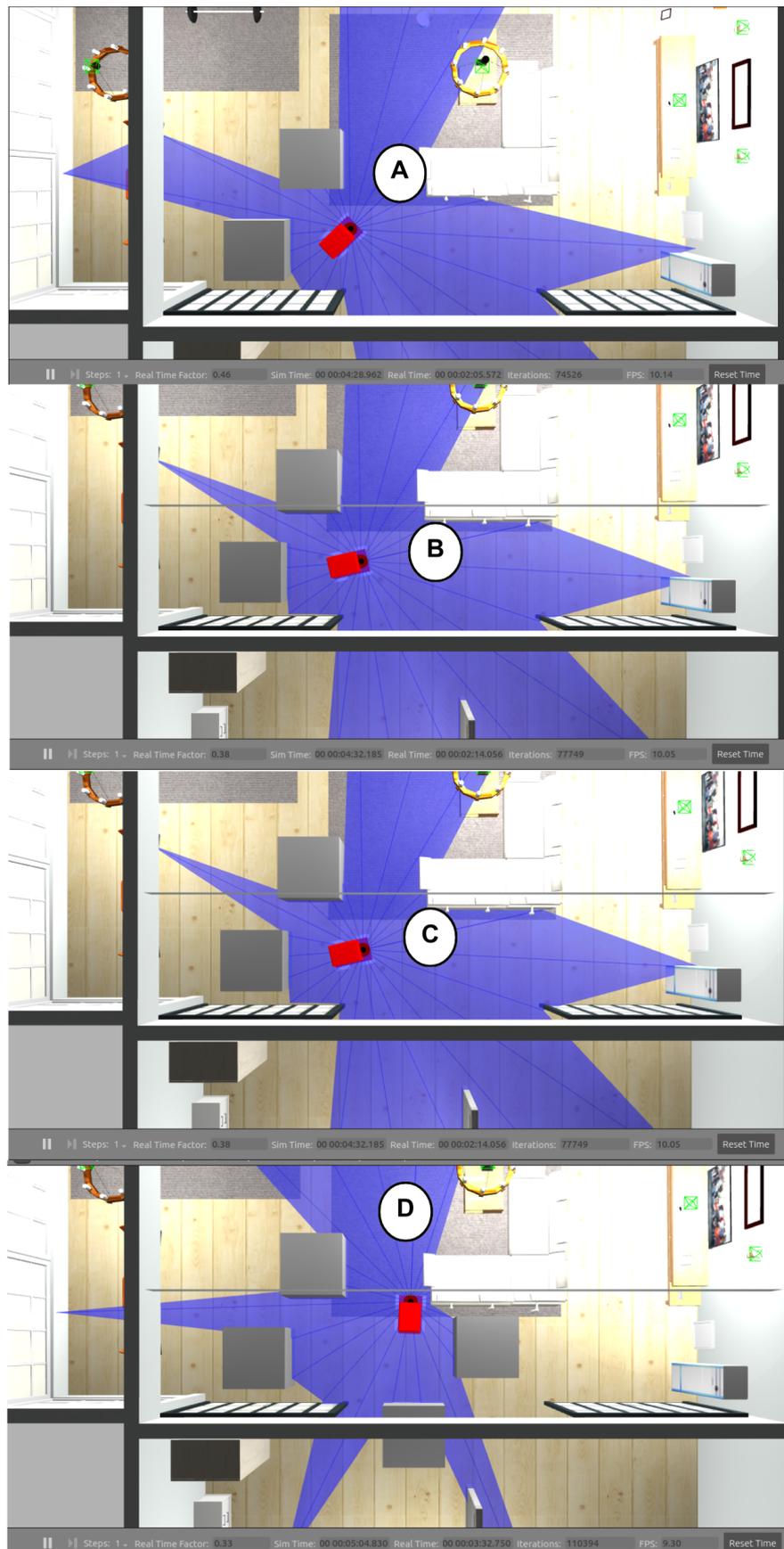
Fonte: Autora (2023).

Figura 36 – Captura da segunda repetição CT01



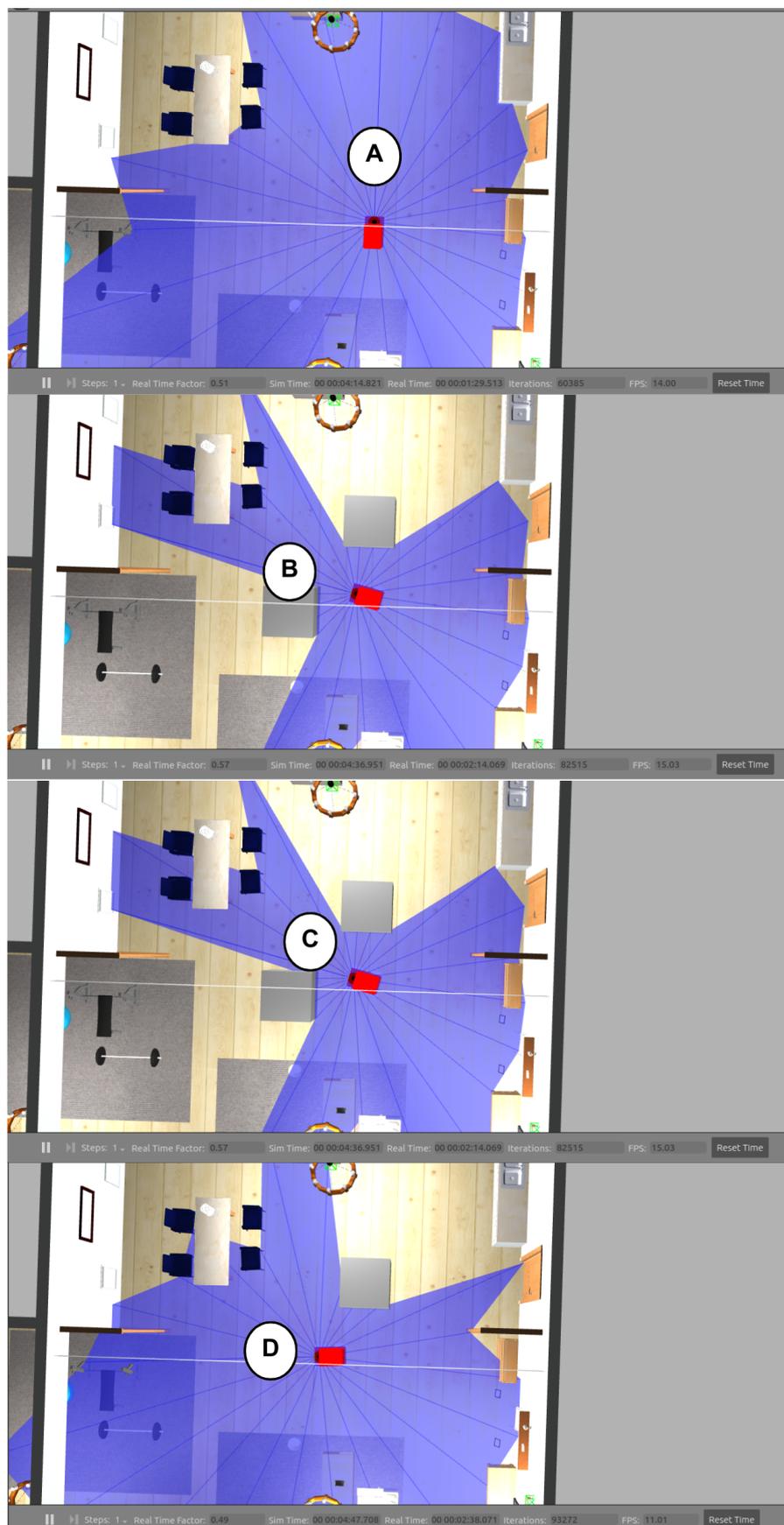
Fonte: Autora (2023).

Figura 37 – Captura da terceira repetição CT01



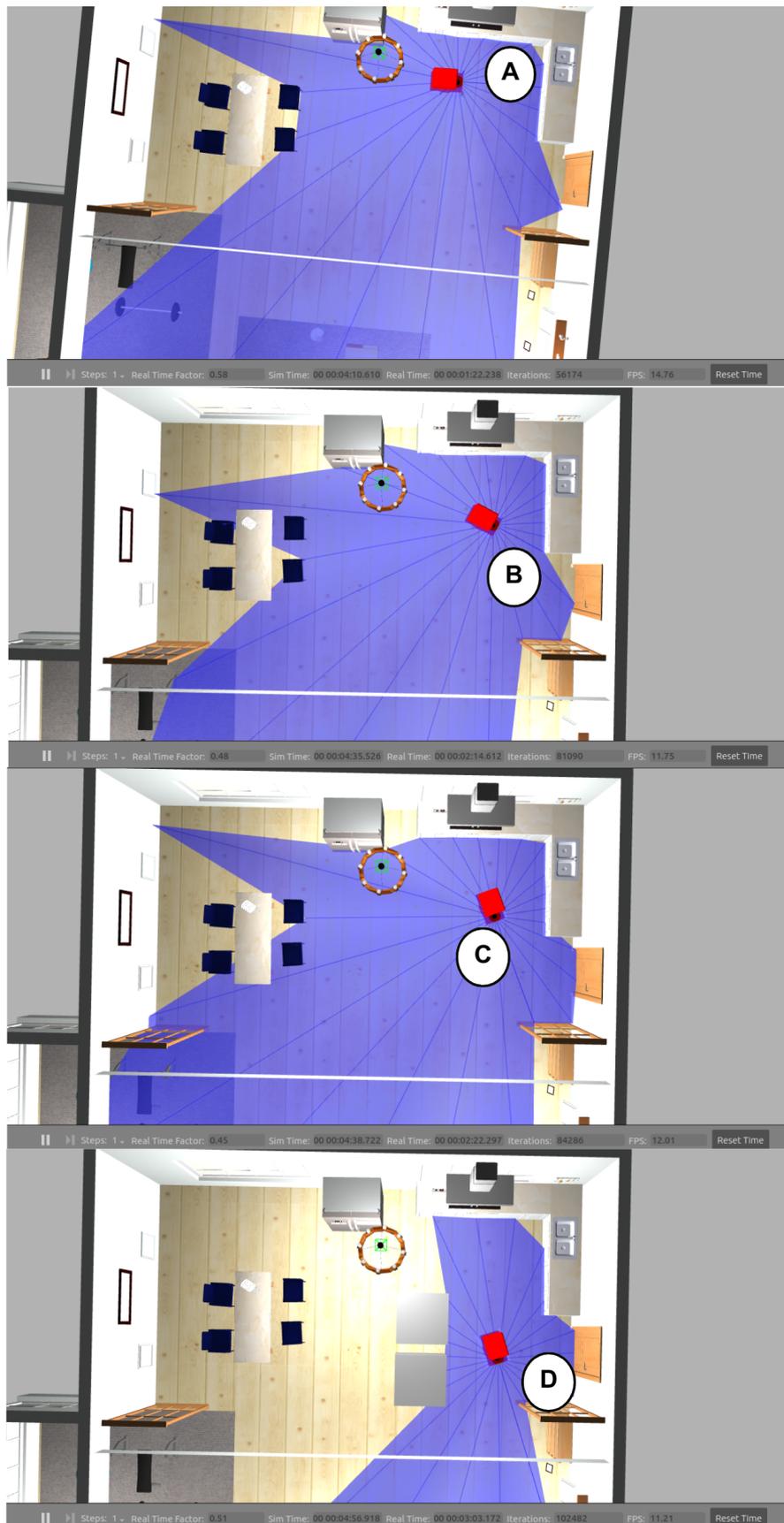
Fonte: Autora (2023).

Figura 38 – Captura da quarta repetição CT01



Fonte: Autora (2023).

Figura 39 – Captura da quinta repetição CT01



Fonte: Autora (2023).

C.2 Caso de Teste CT02 Referente a RFS02

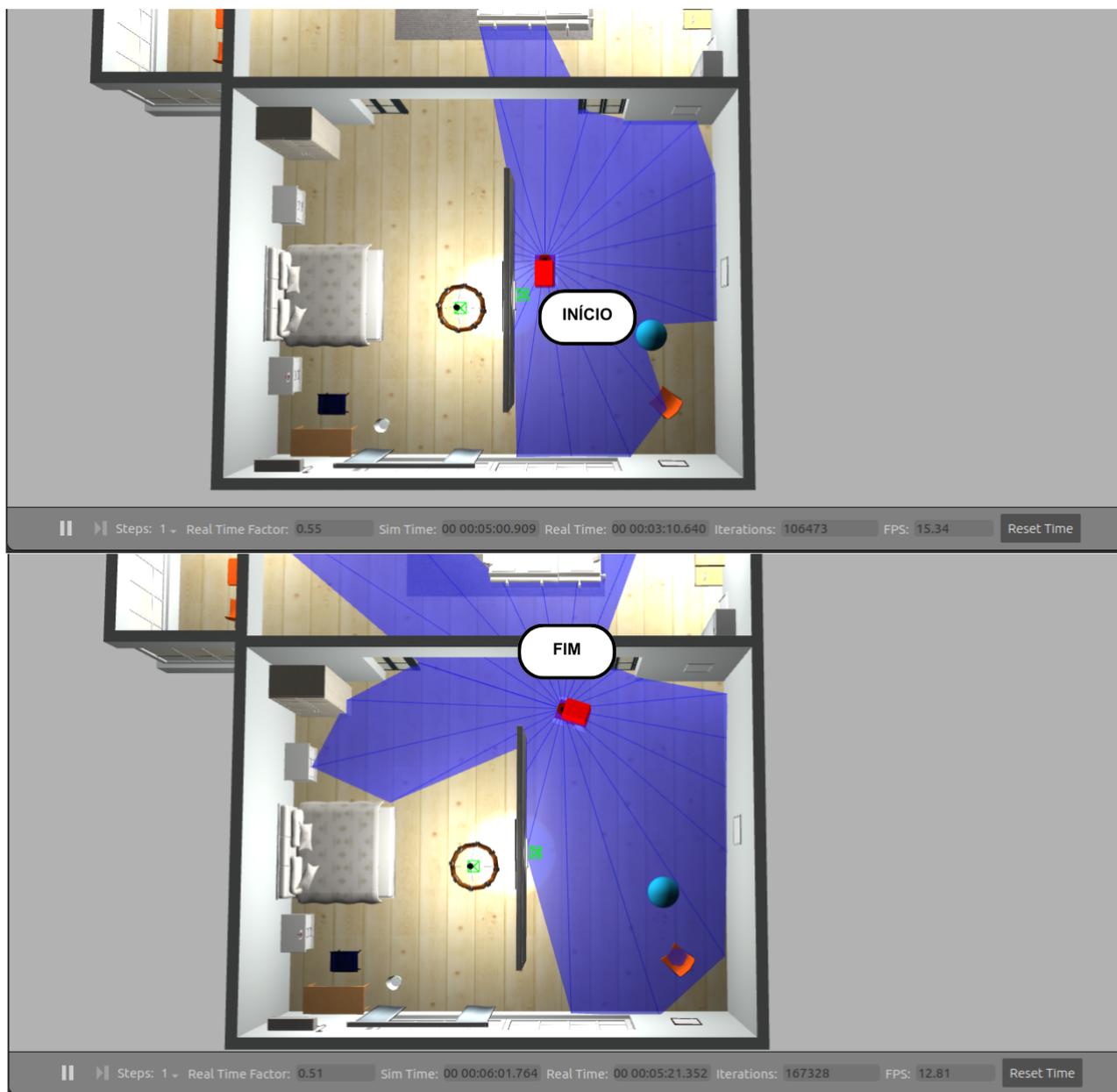
O caso de teste CT02 teve o objetivo de identificar se o robô consegue se movimentar pelo ambiente sem colidir com nenhum obstáculo existente no seu caminho. O caso de teste foi repetido cinco vezes com o robô em lugares distintos no ambiente. Entre os cinco testes, apenas um foi mal sucedido, visto que o robô se encontrava em um local estreito e não conseguiu continuar a trajetória. Todos os resultados podem ser visualizados na Tabela 23. Além disso, a seguir podem ser encontradas as capturas para cada repetição (Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44).

Tabela 23 – Resultados das repetições CT02

	Resultados CT02
Teste 1	Bem-sucedido
Teste 2	Bem-sucedido
Teste 3	Bem-sucedido
Teste 4	Mal-sucedido
Teste 5	Bem-sucedido
Total de acertos (%)	80

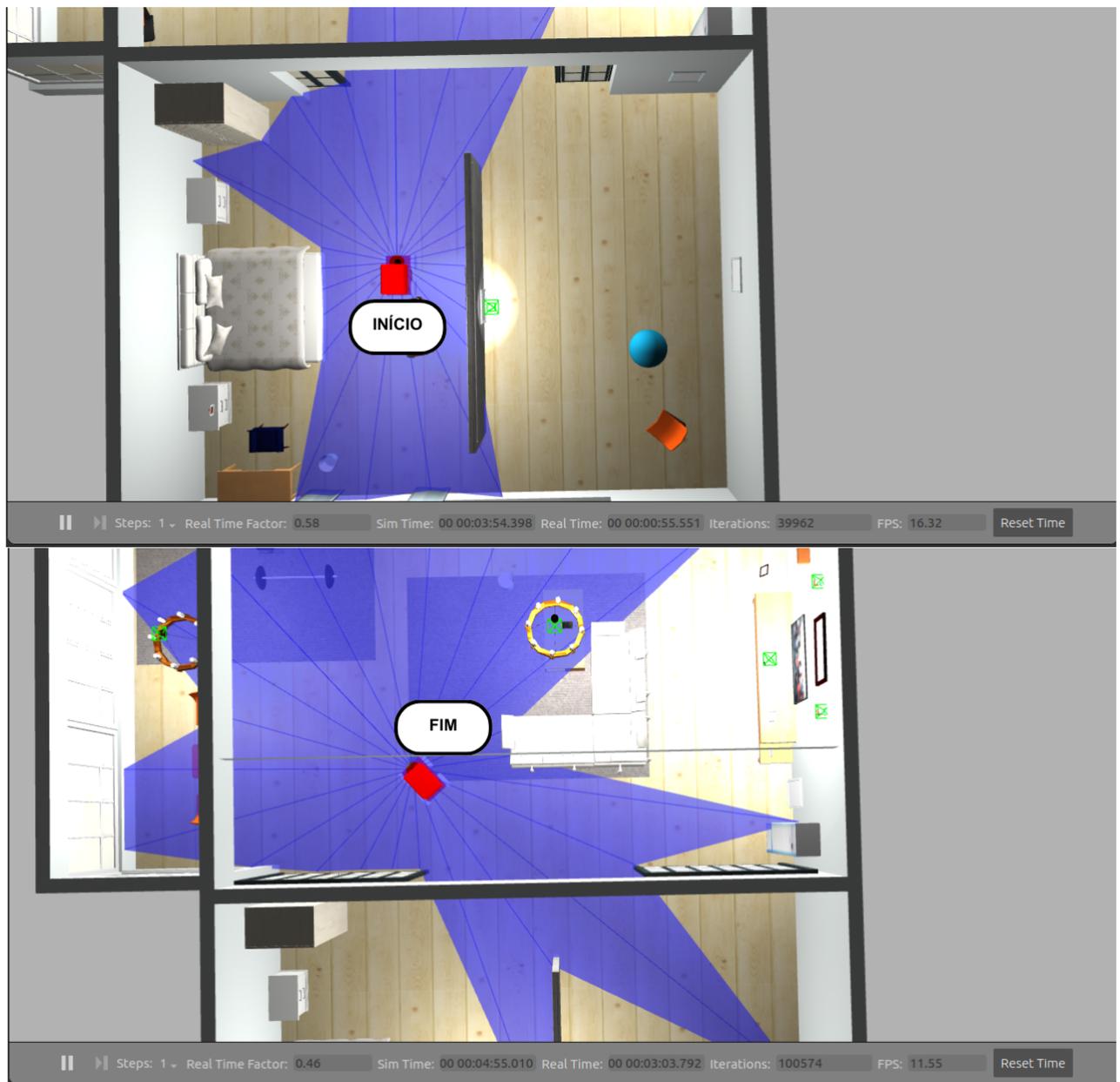
Fonte: Autora (2023).

Figura 40 – Captura da primeira repetição CT02



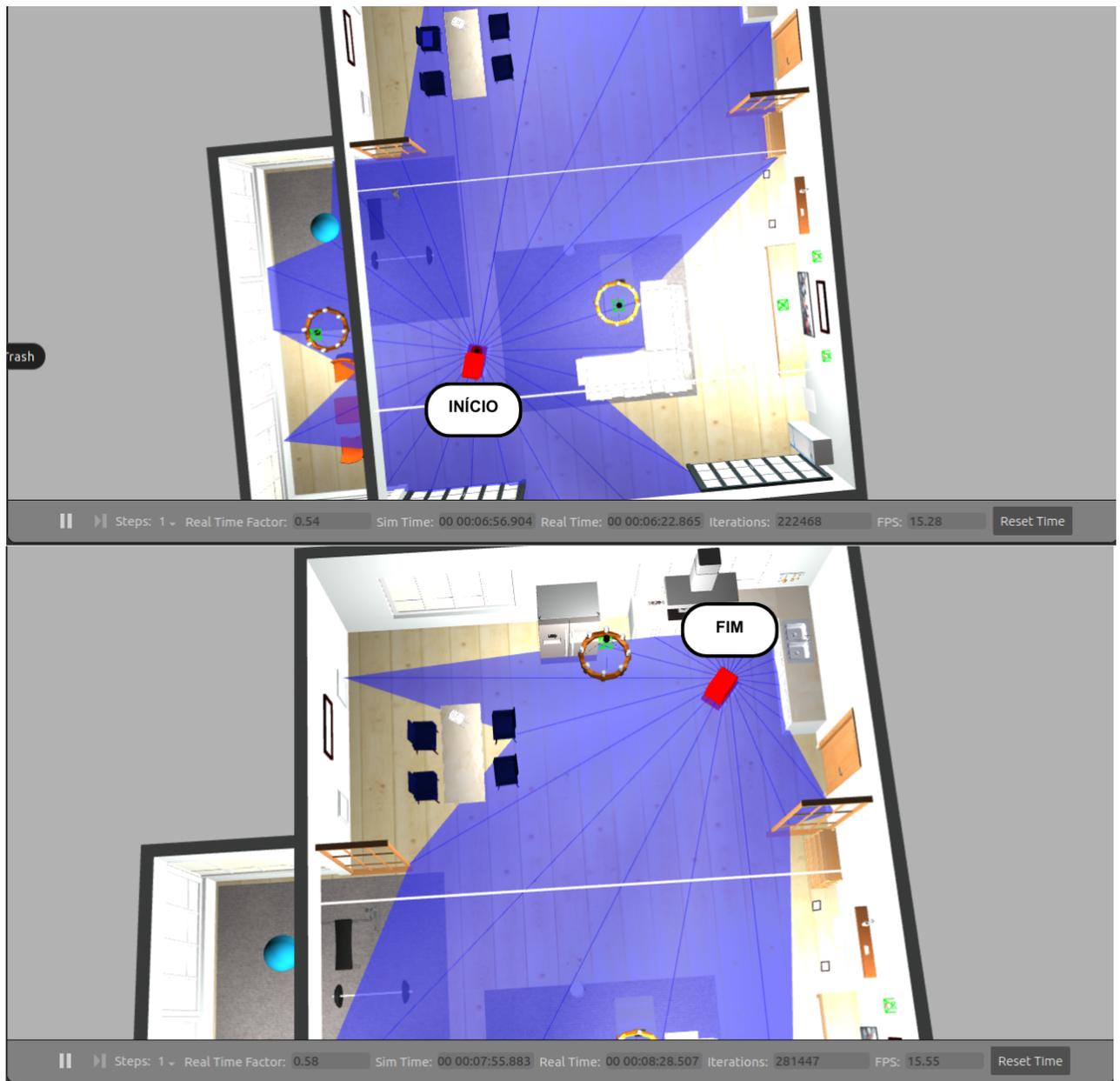
Fonte: Autora (2023).

Figura 41 – Captura da segunda repetição CT02



Fonte: Autora (2023).

Figura 42 – Captura da terceira repetição CT02



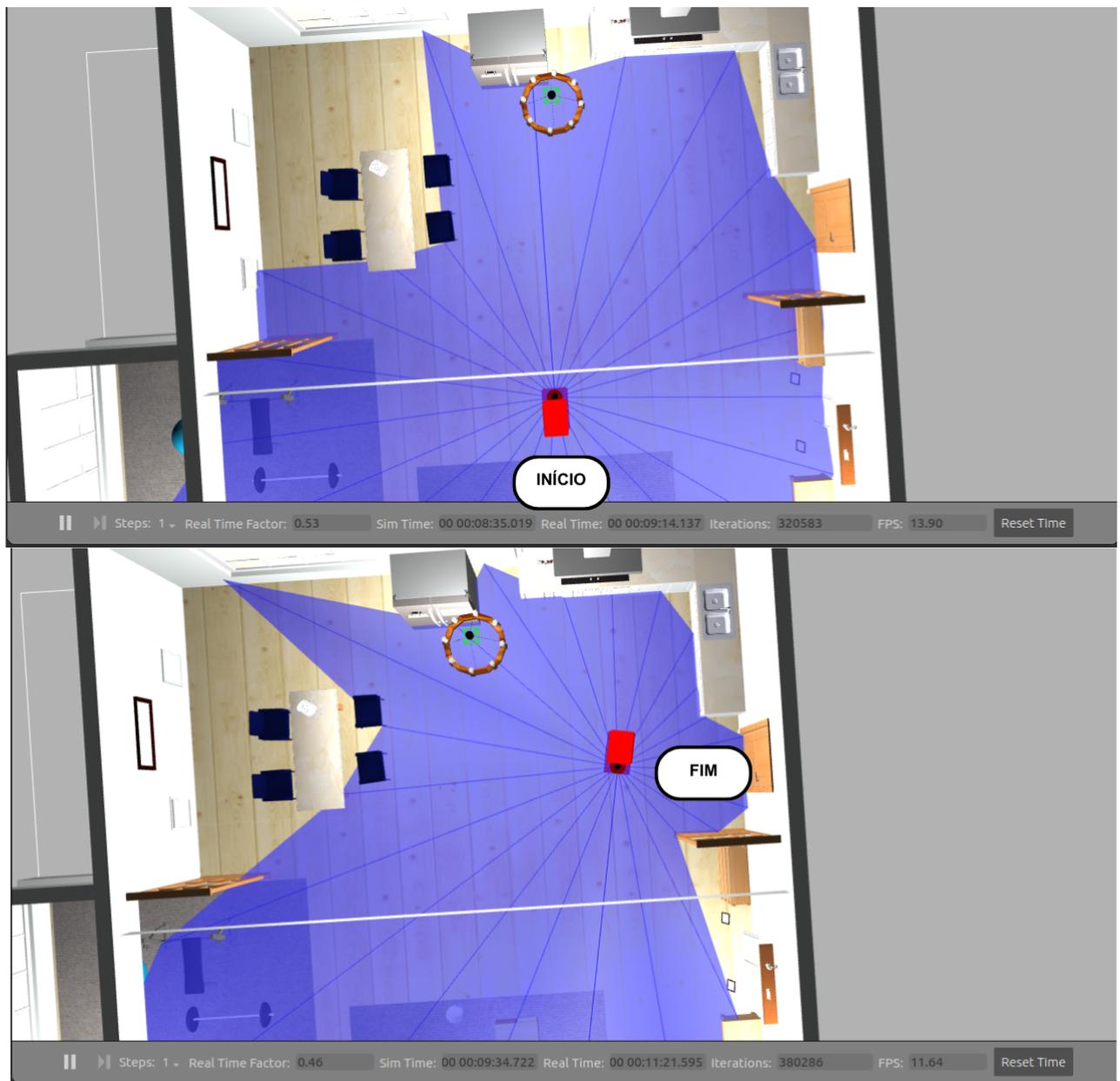
Fonte: Autora (2023).

Figura 43 – Captura da quarta repetição CT02



Fonte: Autora (2023).

Figura 44 – Captura da quinta repetição CT02



Fonte: Autora (2023).

C.3 Caso de Teste CT03 Referente a RNFS01

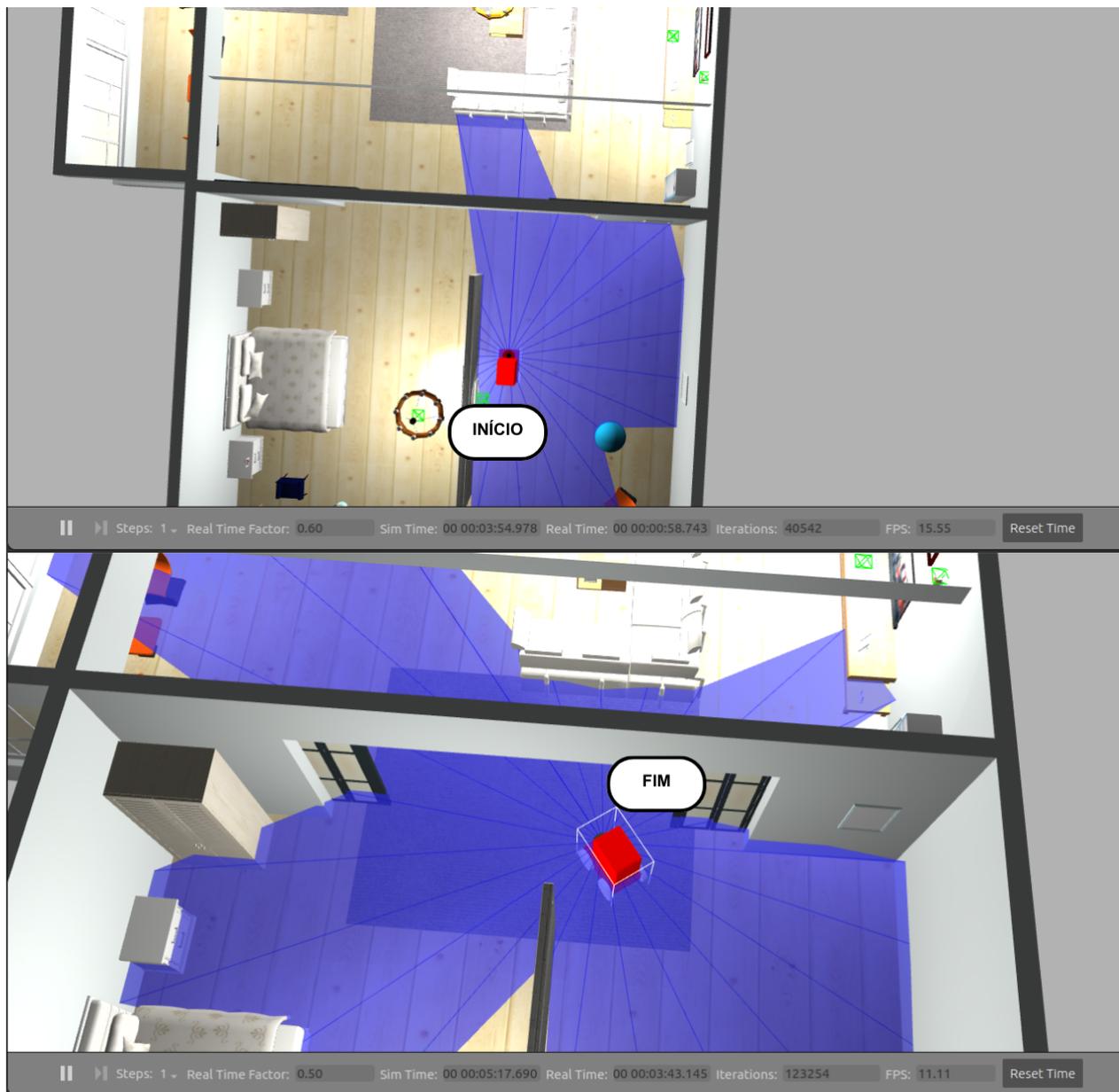
O caso de teste CT03 visou validar a locomoção do robô em superfície de piso liso e com tapete. O caso de teste foi repetido cinco vezes com o robô em lugares distintos no ambiente. Todos os cinco testes foram bem sucedidos. Todos os resultados podem ser visualizados na Tabela 24. Além disso, a seguir podem ser encontradas as capturas para cada repetição (Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49).

Tabela 24 – Resultados das Repetições CT03

	Resultados CT03
Teste 1	Bem-sucedido
Teste 2	Bem-sucedido
Teste 3	Bem-sucedido
Teste 4	Bem-sucedido
Teste 5	Bem-sucedido
Total de acertos (%)	100

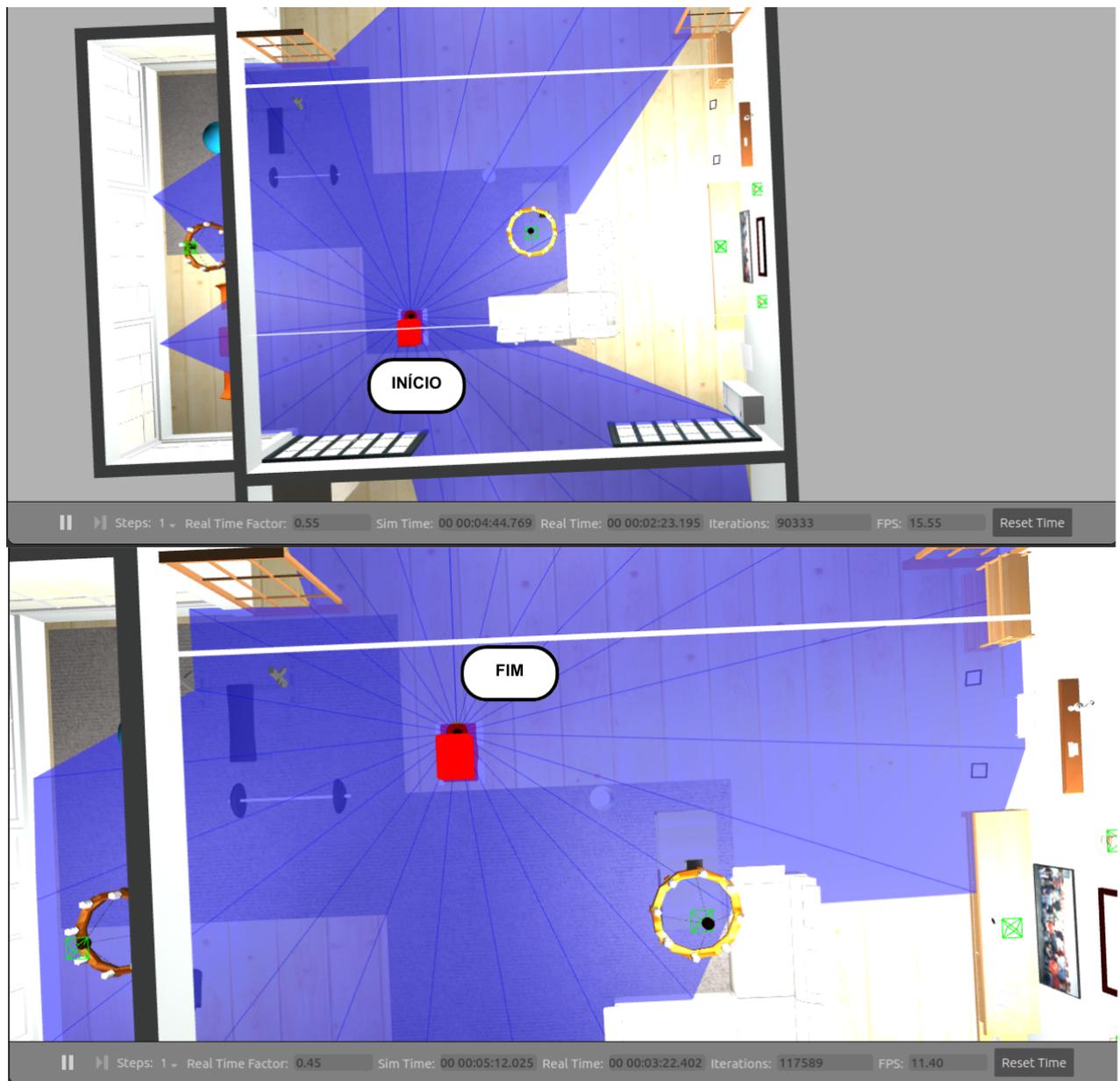
Fonte: Autora (2023).

Figura 45 – Captura da primeira repetição CT03



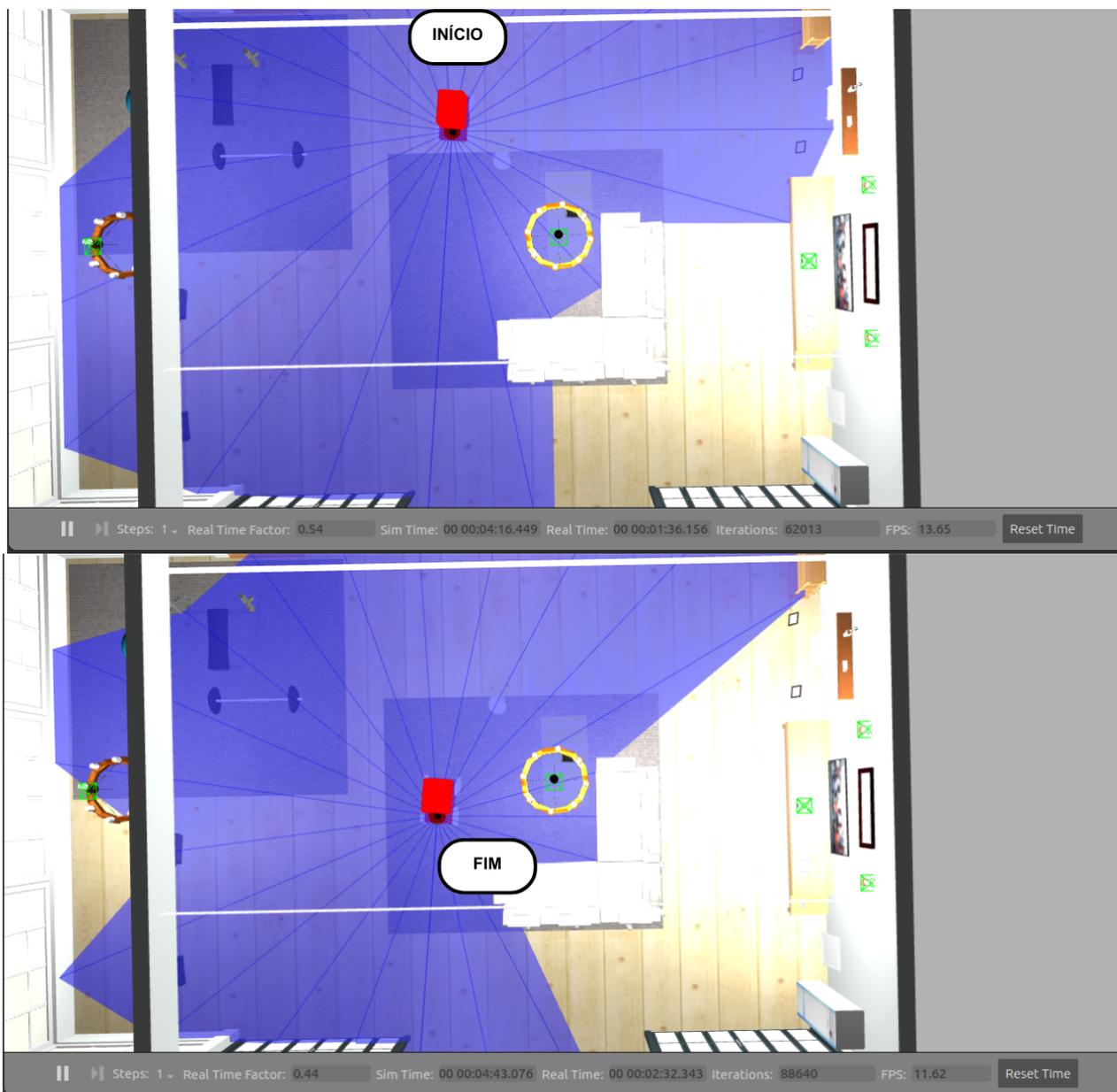
Fonte: Autora (2023).

Figura 46 – Captura da segunda repetição CT03



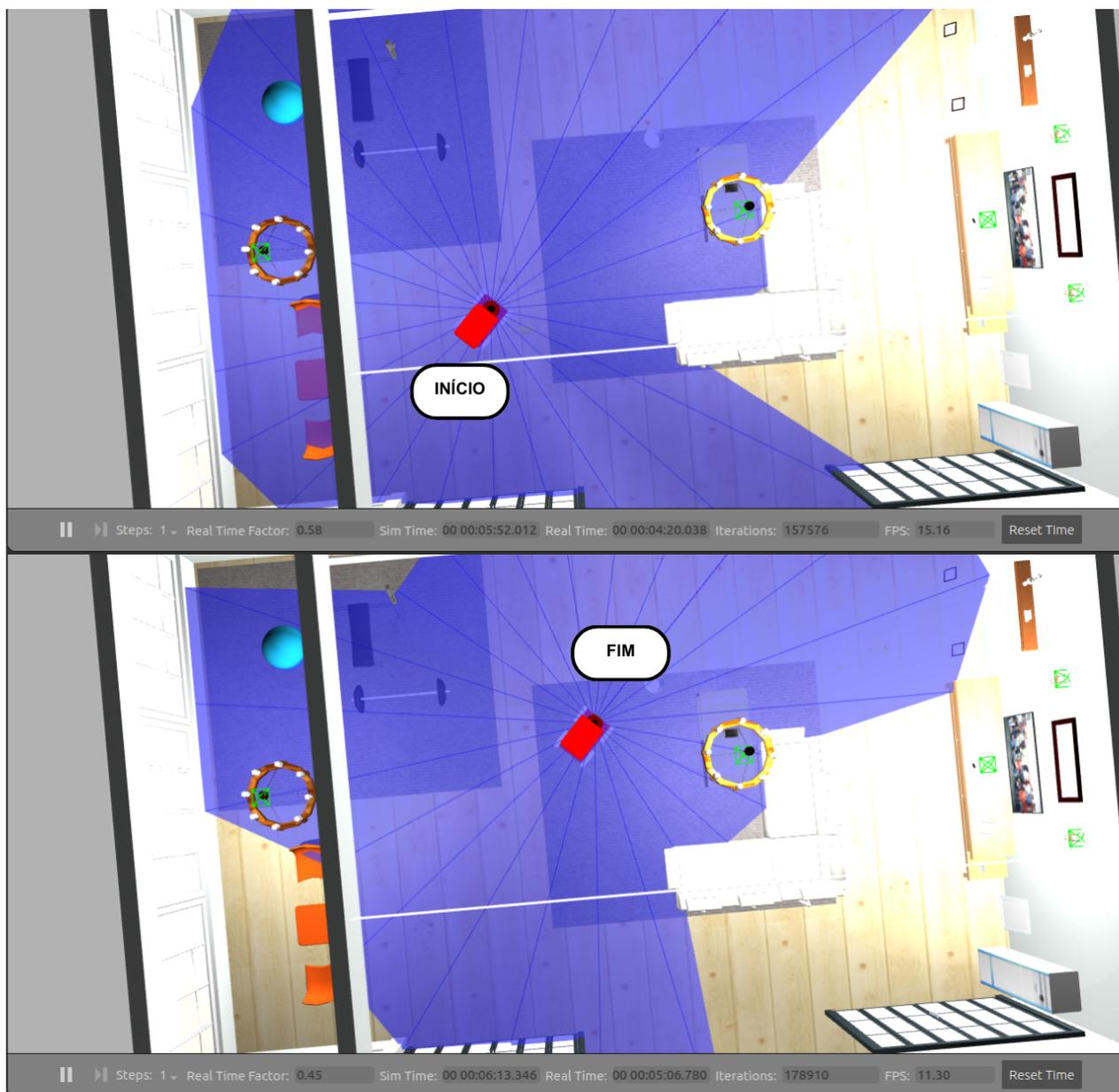
Fonte: Autora (2023).

Figura 47 – Captura da terceira repetição CT03



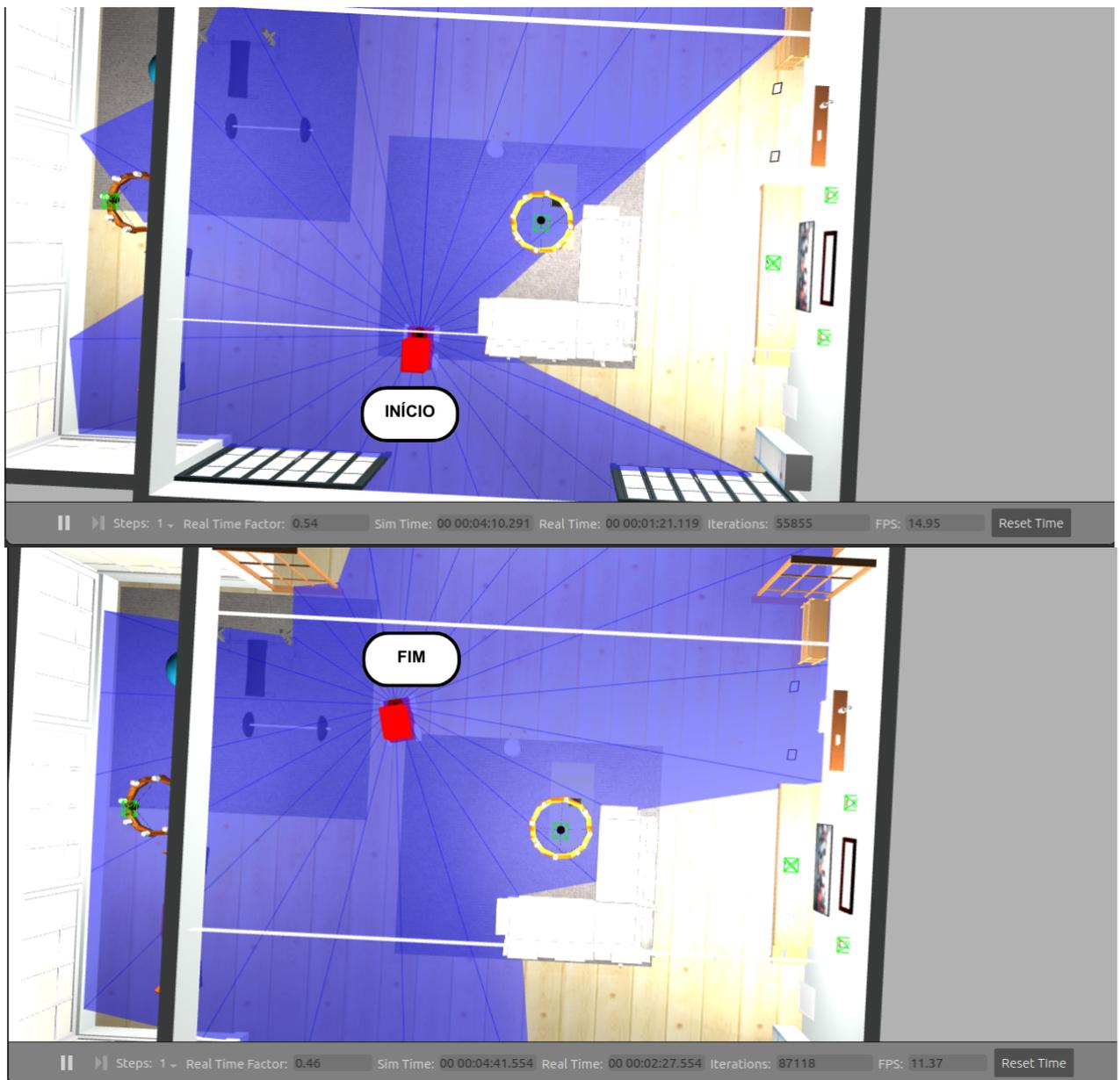
Fonte: Autora (2023).

Figura 48 – Captura da quarta repetição CT03



Fonte: Autora (2023).

Figura 49 – Captura da quinta repetição CT03



Fonte: Autora (2023).

C.4 Caso de Teste CT04 Referente a RNFS02

O caso de teste CT04 teve o objetivo de identificar se a velocidade do robô é segura para as pessoas e propriedades ao redor. O caso de teste foi repetido cinco vezes com o robô em lugares distintos no ambiente. Todos os cinco testes foram bem sucedidos. Todos os resultados podem ser visualizados na Tabela 25. Além disso, a seguir podem ser encontradas as capturas para cada repetição (Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53,

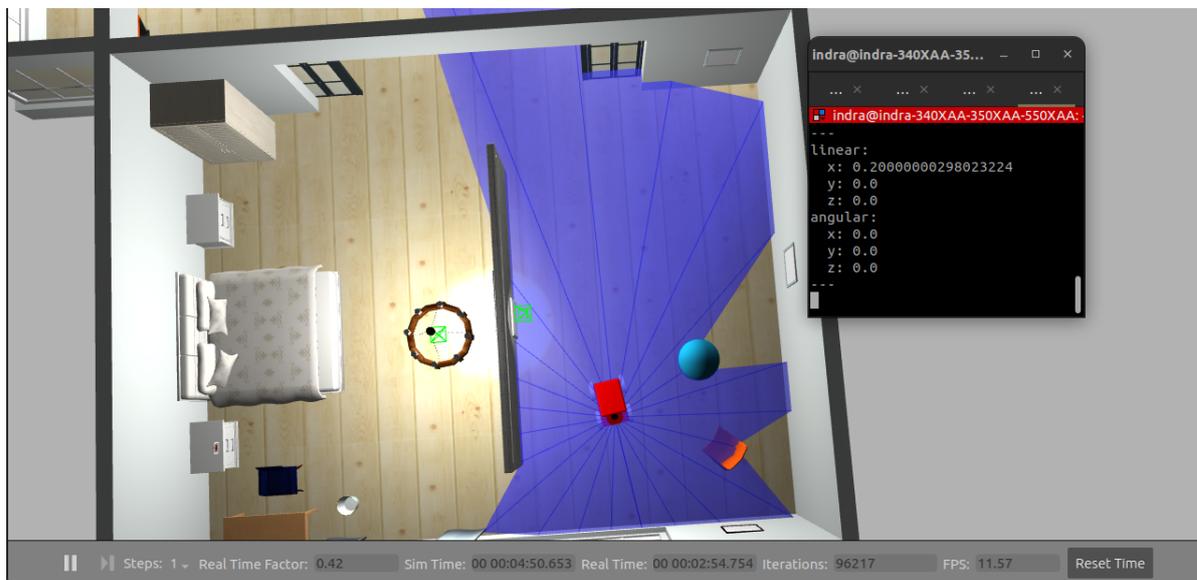
Figura 54).

Tabela 25 – Resultados das repetições CT04

	Resultados CT04
Teste 1	Bem-sucedido
Teste 2	Bem-sucedido
Teste 3	Bem-sucedido
Teste 4	Bem-sucedido
Teste 5	Bem-sucedido
Total de acertos (%)	100

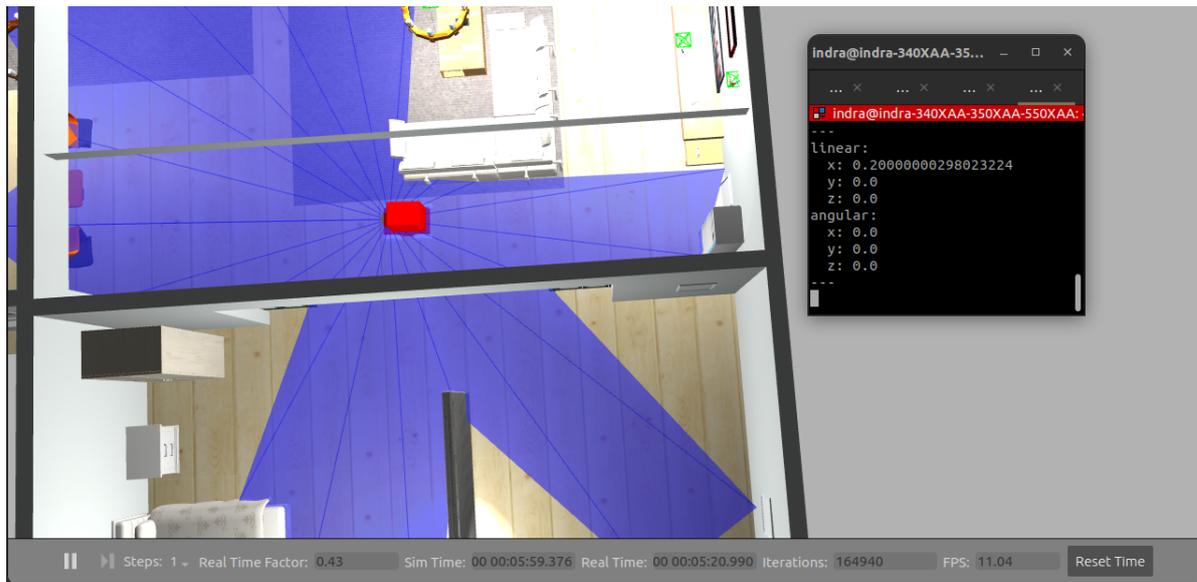
Fonte: Autora (2023).

Figura 50 – Captura da primeira repetição CT04



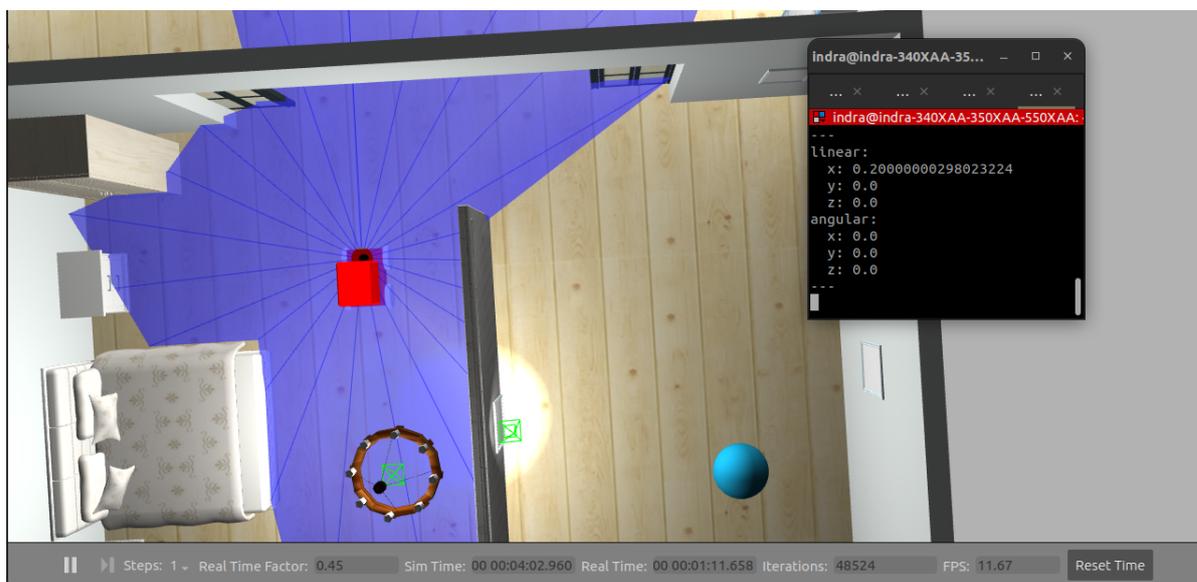
Fonte: Autora (2023).

Figura 51 – Captura da segunda repetição CT04



Fonte: Autora (2023).

Figura 52 – Captura da terceira repetição CT04



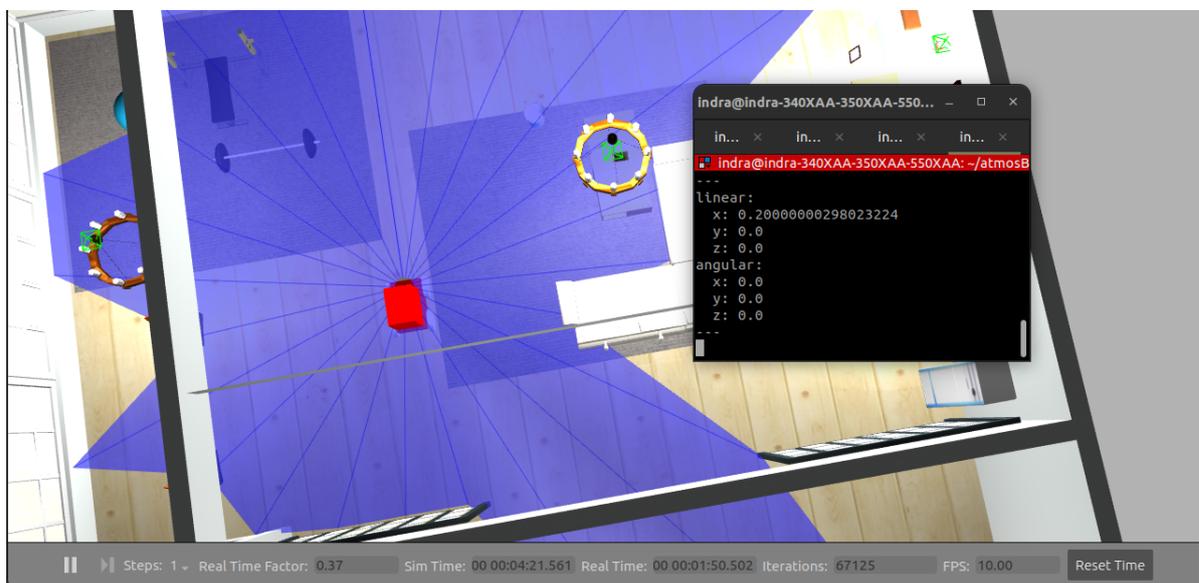
Fonte: Autora (2023).

Figura 53 – Captura da quarta repetição CT04



Fonte: Autora (2023).

Figura 54 – Captura da quinta repetição CT04



Fonte: Autora (2023).

C.5 Caso de Teste CT05 Referente a RNFA01

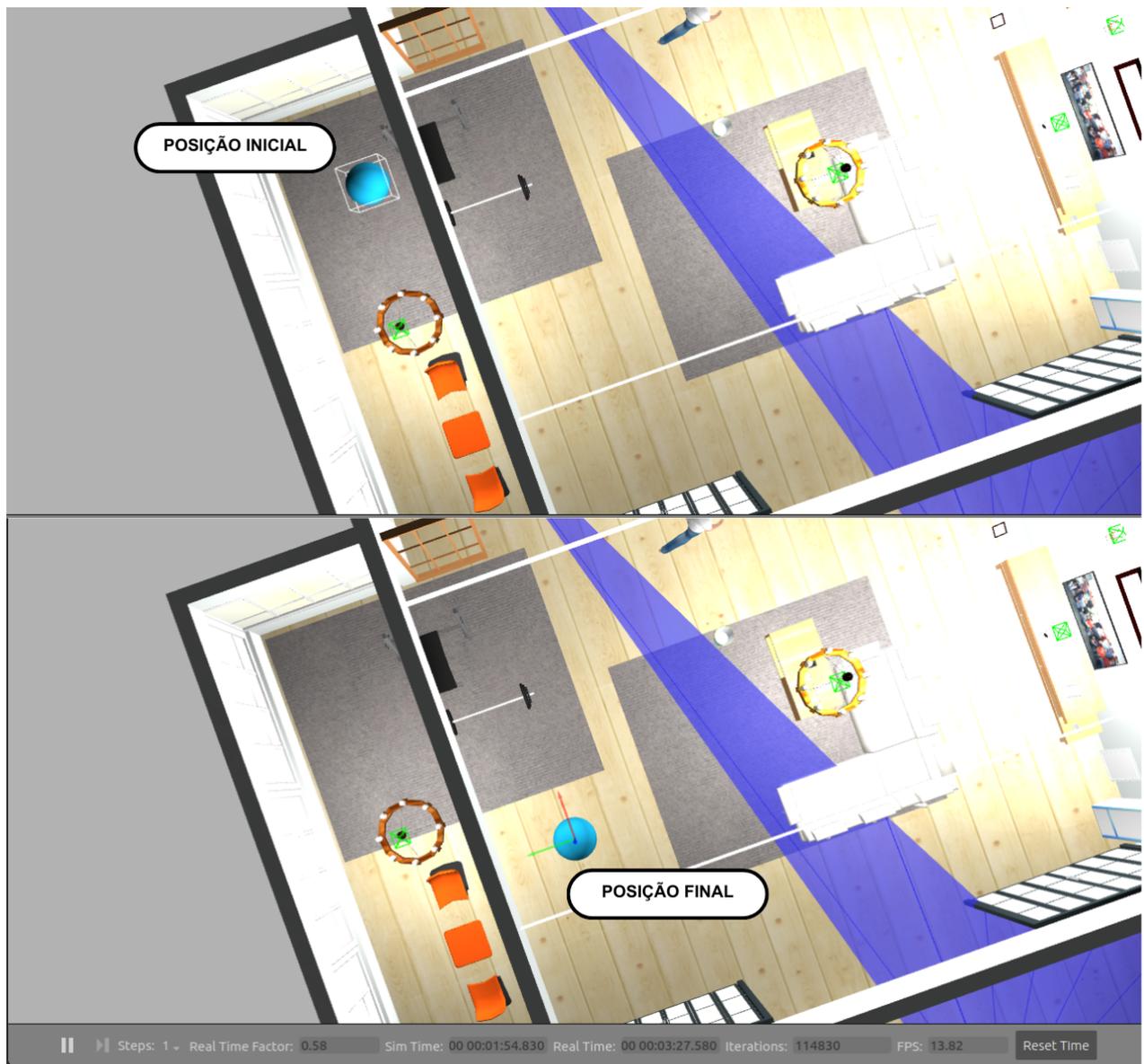
O caso de teste CT05 visou validar se o ambiente simulado comportava a mudança de posição dos objetos e móveis ao longo da simulação. O caso de teste foi repetido cinco vezes com o robô em lugares distintos no ambiente. Todos os cinco testes foram bem sucedidos. Todos os resultados podem ser visualizados na Tabela 26. Além disso, a seguir podem ser encontradas as capturas para cada repetição (Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59).

Tabela 26 – Resultados das repetições CT05

	Resultados CT05
Teste 1	Bem-sucedido
Teste 2	Bem-sucedido
Teste 3	Bem-sucedido
Teste 4	Bem-sucedido
Teste 5	Bem-sucedido
Total de acertos (%)	100

Fonte: Autora (2023).

Figura 55 – Captura da primeira repetição CT05



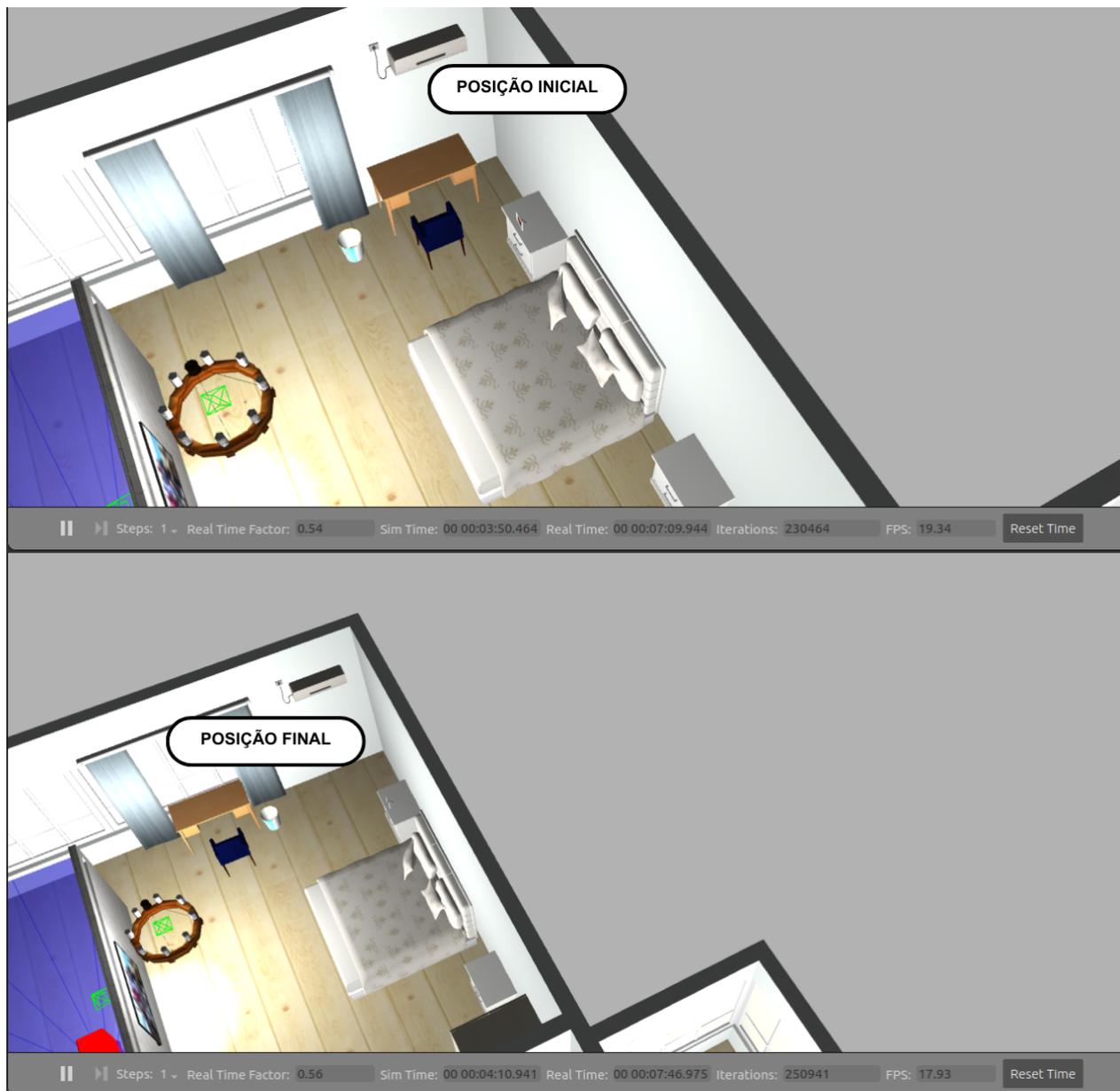
Fonte: Autora (2023).

Figura 56 – Captura da segunda repetição CT04



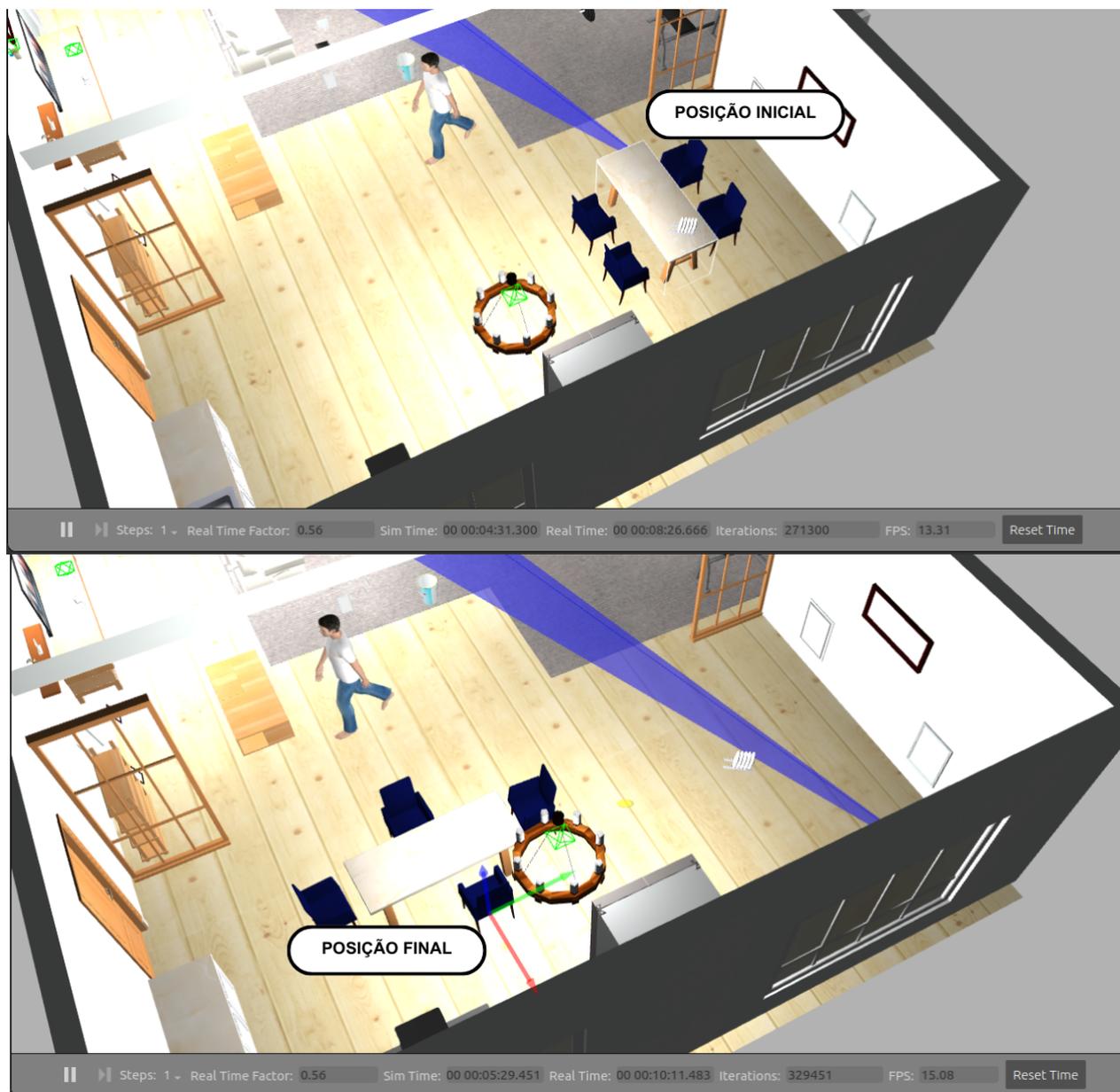
Fonte: Autora (2023).

Figura 57 – Captura da terceira repetição CT04



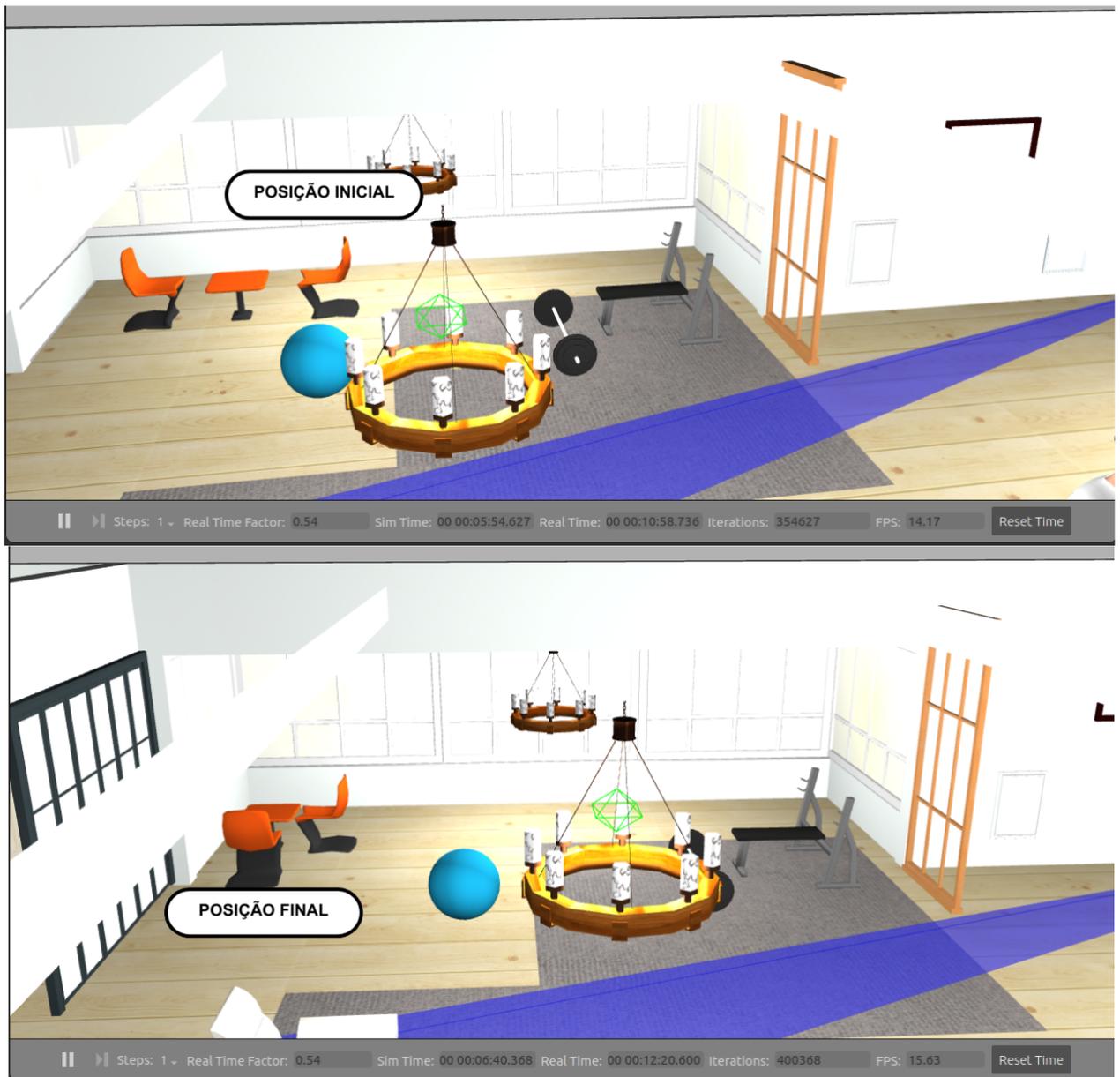
Fonte: Autora (2023).

Figura 58 – Captura da quarta repetição CT04



Fonte: Autora (2023).

Figura 59 – Captura da quinta repetição CT04



Fonte: Autora (2023).

C.6 Caso de Teste CT06 Referente a RNFA03

O caso de teste CT06 teve o objetivo de identificar se a simulação apresenta um ambiente semelhante a um domicílio comum. Na Figura 60, pode ser encontrada a captura do teste.

Figura 60 – Captura do teste CT06



Fonte: Autora (2023).

C.7 Caso de Teste CT07 Referente a RNFA04

O caso de teste CT07 teve o objetivo de identificar o tamanho do domicílio apresentado na simulação. Na Figura 61, pode ser encontrada a captura do teste.

Figura 61 – Captura do teste CT07



Fonte: Autora (2023).

C.8 Caso de Teste CT08 Referente a RNFA05

O caso de teste CT08 visou identificar o acesso entre os espaços do ambiente simulado. Na Figura 62, pode ser encontrada a captura do teste.

Figura 62 – Captura do teste CT08



Fonte: Autora (2023).