

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

**MURILO DARCE BORGES SILVA
RODRIGO SIMÕES RUY**

**IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS DE DESEMPENHO ENTRE SISTEMAS
ROBÓTICOS SIMULADOS COM E SEM SOFTWARE CONTEINERIZADO,
UTILIZANDO SIMULADOR GAZEBO, ROS 2 E DOCKER.**

São Bernardo do Campo
2025

MURILO DARCE BORGES SILVA

RODRIGO SIMÕES RUY

**IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS DE DESEMPENHO ENTRE SISTEMAS
ROBÓTICOS SIMULADOS COM E SEM SOFTWARE CONTEINERIZADO,
UTILIZANDO SIMULADOR GAZEBO, ROS 2 E DOCKER.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Bacharel em
Ciência da Computação. Orientado pelo Prof. Dr.
Leonardo Anjoletto Ferreira.

São Bernardo do Campo

2025

MURILO DARCE BORGES SILVA
RODRIGO SIMÕES RUY

**IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS DE DESEMPENHO ENTRE SISTEMAS
ROBÓTICOS SIMULADOS COM E SEM SOFTWARE CONTEINERIZADO,
UTILIZANDO SIMULADOR GAZEBO, ROS 2 E DOCKER.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Bacharel em
Ciência da Computação.

Comissão julgadora

Prof. Dr. Leonardo Anjoletto Ferreira

Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior

Prof. Dr. Fagner de Assis Moura Pimentel

São Bernardo do Campo

06/06/2025

RESUMO

Conteinerização é uma ferramenta muito útil quando se lida com projetos que precisam de diferentes dependências ou programas que podem ter conflitos entre si, que precisam de uma grande quantidade de configuração inicial, ou que precisam de portabilidade. Este projeto visa identificar e mostrar a diferença de desempenho entre robôs, que utilizam o Robot Operating System 2 (ROS 2), simulados com e sem conteinerização. Para verificar esta diferença, os testes serão realizados no ambiente simulado do software Gazebo Classic. Os resultados mostram que o desempenho da simulação não é impactado pelo uso do Docker, que ocorre um pequeno aumento do uso de memória, porém sem variações significativas no uso do processador, indicando que a simulação usando containers é viável durante o processo de desenvolvimento.

Palavras-chave: Robô, Robot Operating System 2 (ROS 2), Gazebo Classic, Docker, Conteinerização.

ABSTRACT

Containerization is a very useful tool when dealing with projects that require different dependencies or programs that may conflict with each other, that need a large amount of initial configuration, or that need portability. This project aims to identify and show the performance difference between robots, using Robot Operating System 2 (ROS 2), simulated with and without containerization. To verify this difference, tests will be performed in the simulated environment of the Gazebo Classic software. The results show that the simulation performance is not impacted by the use of Docker, that there is a small increase in memory usage, but without significant variations in processor usage, indicating that simulation using containers is viable during the development process.

Keywords: Robot, Robot Operating System 2 (ROS 2), Gazebo Classic, Docker, Containerization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	OBJETIVO	5
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	6
2.1	FERRAMENTAS	6
3	TRABALHOS RELACIONADOS	9
4	METODOLOGIA	10
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS[EXPLICAR FIGURAS]	11
5.1	DESENVOLVIMENTO DAS ARENAS	11
5.2	TESTES	11
6	TRABALHOS FUTUROS	17
7	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	18
	REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

A conteinerização é uma ferramenta poderosa no campo de desenvolvimento e implementação, disponibilizando certa camada de isolamento entre componentes de um projeto, assegurando que estes não irão conflitar, seja por funções internas ou dependências de versões diferentes sendo utilizadas. No campo da robótica, conteinerização é vista como uma técnica para facilitar o desenvolvimento, portabilidade e consistência em projetos de robótica, mas não foram feitas pesquisas detalhando a integração destes projetos com Docker e seus efeitos no desempenho de um robô físico. A proposta do projeto é justamente esta: integrar ROS 2 e Docker, explicando os passos utilizados e comparando o desempenho com e sem conteinerização, sendo dividido em 2 partes: em um simulador Gazebo, e em um robô Turtlebot real.

1.1 OBJETIVO

Documentar e avaliar o desempenho do robô simulado e do robô real quando comparados à sua implementação com e sem conteinerização.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Conteinerização: Uma forma de virtualização feita para ser mais rápida e flexível que a emulação, é um processo de implantação que consegue ser executado em diversos dispositivos e sistemas operacionais, isso ocorre pelo fato de que um contêiner consegue armazenar os arquivos e bibliotecas para ser executado, permitindo um usuário executar uma aplicação de outro sistema operacional no sistema operacional que o mesmo possua, além disso, o contêiner permite que falhas ocorram sem afetar outros processos que não estão agrupados no mesmo. (WEN et al., 2023)

Meta-sistema operacional: Um meta-sistema operacional se trata de um sistema operacional para robôs, o mesmo realiza todas as funções que um sistema operacional faz. O mesmo possui bibliotecas e ferramentas que executam códigos em múltiplos computadores. Este sistema operacional é utilizado em robôs...

Middleware: Uma camada de software que conecta as aplicações a um sistema operacional, permitindo uma comunicação e compartilhamento de dados mais simples entre os componentes de um sistema, esta facilidade permite que os desenvolvedores foquem no desenvolvimento das principais funções de uma aplicação, pois a comunicação entre a aplicação e o sistema operacional está sendo feita pelo middleware.

DDS: Um protocolo middleware e uma API para conexão centrada em dados, este protocolo integra os componentes de um sistema que muitas aplicações precisam, como arquitetura escalar, confiabilidade e prover conectividade de dados de baixa latência. Este protocolo foi criado pela OMG.

2.1 FERRAMENTAS

Para o desenvolvimento do projeto, serão utilizados softwares e ferramentas para que os testes possam ser realizados e analisados. As ferramentas utilizadas serão:

Docker: É uma plataforma utilizada para desenvolvimento, envio e funcionamento de aplicações de maneira separada da infraestrutura por conta da conteinerização, por conta deste fator o usuário consegue gerir as aplicações da mesma maneira que gera sua infraestrutura, outro fator importante é que o Docker permite que as aplicações desenvolvidas sejam testadas e executadas com menos atraso do que a maneira convencional. Contêineres são bons para fluxos de integrações e entregas de trabalho contínuas.(INC., 2025)

ROS2(Robot Operating System 2): É um meta-sistema operacional de código aberto utilizado para auxiliar a desenvolver aplicações para robôs, o mesmo possui serviços que outros sistemas operacionais normalmente possuem, mas com o foco maior para a área da robótica, facilitando comunicação entre processos, funções que se comunicam com as demais e entre muitos outros. Para o desenvolvimento do projeto, será utilizado o ROS 2 que mantém o conceito modular e distribuído, mas possui melhorias e mais funcionalidades que o ROS original (Figura 1) (FOUNDATION, 2018)

Gazebo Simulator: É um software usado para desenvolver simulações, possui diversos projetos de código aberto para que os interessados possam utilizar e desenvolver suas próprias simulações. Neste software estão presentes também diversos modelos, tanto como objetos como também robôs.(Figura 2) (FOUNDATION, 2022)

TurtleBot3 Burger: É um robô customizável de preço acessível ao público baseado no modelo ROS para ser utilizado como um material educativo, de pesquisas, entretenimento pessoal e etc, é um robô que foi desenvolvido com o intuito de ser barato, por conta disto, o mesmo não possui uma grande funcionalidade ou qualidade, mas o mesmo compensa na relação da quantidade de aplicações que o mesmo consegue realizar.(Figura 3) (ROBOTIS, 2025)

Fast DDS: Implementação de DDS feita em c++, possui uma biblioteca que oferece uma API e protocolo de comunicação que disponibiliza um modelo Publisher-Subscriber centrado em dados (DCPS). Este modelo visa ser eficiente e confiável para distribuir as informações para o sistema em tempo real.

Cyclone DDS: Implementação de DDS com alto desempenho, permite que os desenvolvedores que o utilizam possam criar "gêmeos" digitais das entidades de seus sistemas permitindo compartilhar estados, eventos, fluxos de dados e mensagens pela rede em tempo real, visa ser rápido, consistente e seguro.

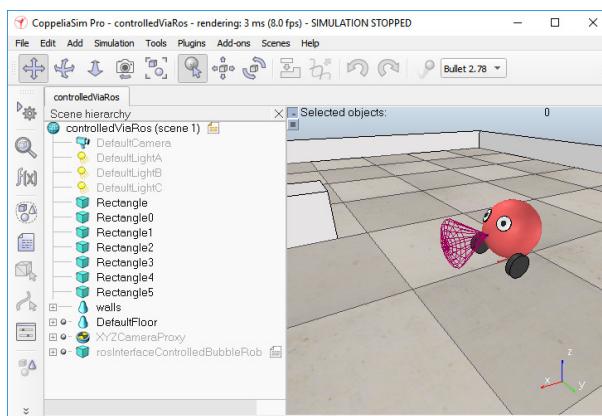


Figura 1 – TROCAR ESSA IMAGEM (COPPELIASIM, 2020)

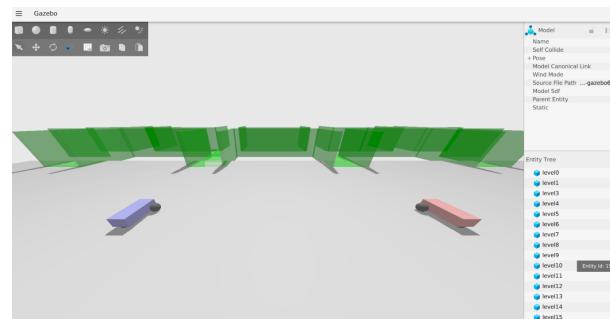


Figura 2 – Exemplo utilizando o Gazebo Simulator (FOUNDATION, 2022)

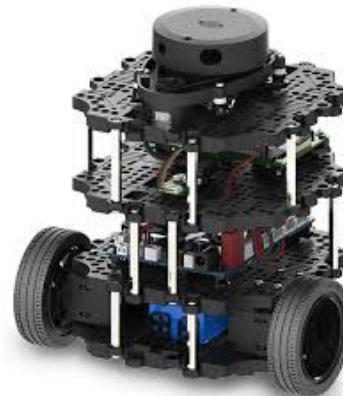


Figura 3 – TurtleBot3 Burger (FOUNDATION, 2025)

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Para o desenvolvimento do projeto, foram relacionados alguns artigos que auxiliam no desenvolvimento do mesmo, O artigo "Bare-Metal vs. Hypervisors and Containers: Performance Evaluation of Virtualization Technologies for Software-Defined Vehicles"(WEN et al., 2023) auxilia com relação ao entendimento da conteinerização em sistemas embarcados e também com relação ao seu desempenho. No artigo, é detalhada a utilização de diferentes formas de conteinerização e seu efeito no desempenho em diferentes tipos de hardware.

O artigo "Docker Performance Evaluation across Operating Systems"(SOBIERAJ; KOTYŃSKI, 2024) auxilia no entendimento dos conceitos de avaliação do Docker com relação a outros sistemas operacionais, para verificar a diferença entre os sistemas operacionais o mesmo utilizou os recém instalados Sistemas Operacionais que eram MacOS ventura, Ubuntu 22.04 e Windows 10 rodando em um MacBook Pro 13, os testes consistiam em "estressar" o Docker com relação à CPU, Rede e na resiliência do mesmo, este artigo auxilia no entendimento com relação aos tipos de testes que podem ser realizados para analisar o desempenho dos robôs nas simulações e nos testes físicos.

Para a parte física, o artigo "Design and Ground Performance Evaluation of a Multi-Joint Wheel-Track Composite Mobile Robot for Enhanced Terrain Adaptability"(GAO et al., 2023) tem o intuito de propor um robô multi-junta que consiga circular em vários tipos de terrenos, o artigo se diferencia por ser um robô com pernas, mas demonstra maneiras de se analisar o desempenho do robô auxiliando com relação à análise e entendimento de desempenho de um robô físico e sobre as suas causas.

4 METODOLOGIA

A metodologia (Observada na 4) é dividida em 2 partes. Na primeira parte, será utilizada uma simulação no gazebo simulator. A simulação possuirá um ambiente para testar o desempenho de um robô turtlebot. Ocorrerão dois testes, no primeiro teste o robô utilizará apenas ROS 2 enquanto no segundo teste o robô utilizará ROS 2 e Docker. Após a análise[EXPLICAR COMO É FEITA A ANÁLISE] do desempenho nos testes, os dados serão armazenados, analisados e finalmente comparados. Na segunda parte, ao invés de uma simulação, será utilizado um robô turtlebot real. Os testes são semelhantes aos aplicados na primeira parte, onde o primeiro teste será realizado apenas com ROS 2 enquanto o segundo será realizado com ROS 2 e Docker juntos, para que assim os dados de desempenho possam ser coletados, analisados e então comparados. As arenas que serão utilizadas na simulação serão baseadas em possíveis arenas que serão montadas na FEI na sala k404. A mesma possui uma arena que pode ser montada e um robô TurtleBot 3 Burger para a realização dos testes, assim será desenvolvida uma simulação com uma arena baseada na arena existente na instituição. A arena possui um caminho, mas o mesmo pode [COLOCAR UMA IMAGEM DA ARENA DA K404] ser alterado com algumas placas que funcionam como paredes, essas paredes permitem a criação de um caminho diferente para o robô podendo ser feito um labirinto, assim seria desenvolvida uma simulação com a mesma ideia para que se pudesse obter dados com uma relação maior. Com relação à parte física, seriam utilizados tanto o robô quanto a arena física para que pudessem ser executados os testes necessários para se adquirir os dados para então analisá-los e compararmos.

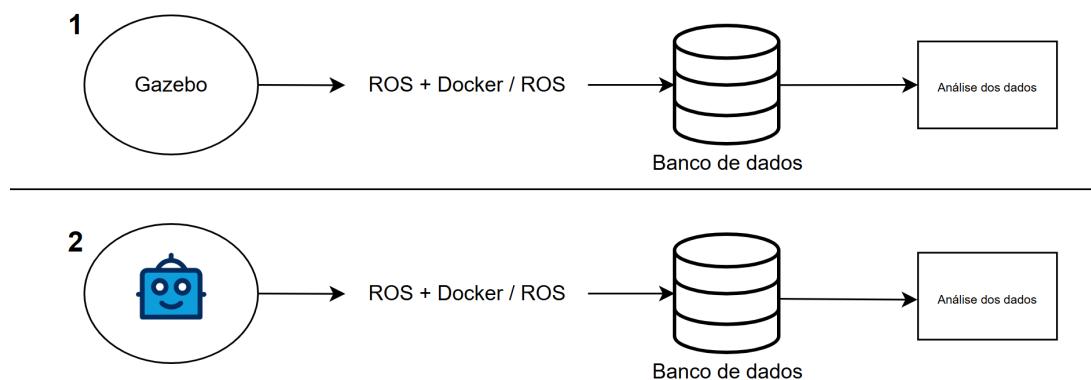


Figura 4 – Fluxograma do projeto[NECESSITA SER REFERENCIADO]

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS[EXPLICAR FIGURAS]

5.1 DESENVOLVIMENTO DAS ARENAS

Para serem realizados os testes de conteinerização, foram desenvolvidas arenas simuladas no software Gazebo Classic. As arenas foram desenvolvidas com base na arena presente na instituição, na sala K4-04 (COLOCAR IMAGEM DA ARENA REAL E DA ARENA SIMULADA SEM NADA). O motivo de esta arena ter sido utilizada se deu por conta da comparação que poderia ser realizada entre os testes virtuais e reais. Foram desenvolvidas quatro arenas, duas principais e duas alternativas, que são iguais às arenas principais, mas com a possibilidade de adicionar robôs patrulheiros que seriam obstáculos para o robô principal. O modelo da arena foi fornecido pelo professor da instituição, Fagner Pimentel, que forneceu um arquivo ".sdf" para ser utilizado, para então serem adicionadas placas como obstáculos (as placas seriam o principal obstáculo por conta do respeito para com as regras da arena real), gerando as arenas de teste.

5.2 TESTES

Foram feitos testes para implementar a parte simulada proposta, sendo utilizado o manual (ROBOTIS, 2025) e pacotes (ROBOTIS-GIT, 2025) disponíveis pelo grupo ROBOTIS, tornando o desenvolvimento desta parte rápido. A utilização e desenvolvimento dos projetos ROS2 dentro do Docker foi facilitada pela utilização de workflows no GitHub, onde as imagens de teste foram automaticamente construídas e publicadas como pacotes no repositório, o que reduziu o tempo do processo de construir as imagens localmente, que demorava de 20+ minutos para no máximo 5 minutos, além de também as disponibilizar para outros usarem.

Houve certas dificuldades para integrar o ROS2 dentro do contêiner Docker com o ROS2 nativo, que lidaria com a simulação Gazebo. Foi descoberto que o middleware utilizado por padrão pelo ROS2 Humble, FastDDS, não interage de forma consistente com Docker. Ele era capaz de compartilhar os tópicos entre os ambientes, mas causava falha na publicação e recebimento de mensagens, não mostrando nenhuma.

Para solucionar isso, o FastDDS foi substituído por outro middleware disponível para ROS2 Humble, CycloneDDS, o qual foi utilizado especificamente no contêiner Docker.

```

root@BattleStation25:/home/rodrigo/...          rodrigo@BattleStation25:~
root@BattleStation25:~$ echo $RMW_IMPLEMENTATION
rodrigo@BattleStation25:~$ ros2 topic list
/parameter_events
/rosout
rodrigo@BattleStation25:~$ ros2 run demo_nodes_cpp talker
[INFO] [1748231727.656969225] [talker]: Publishing: 'Hello World: 1'
[INFO] [1748231728.656933660] [talker]: Publishing: 'Hello World: 2'
[INFO] [1748231729.656980784] [talker]: Publishing: 'Hello World: 3'
[INFO] [1748231730.657285389] [talker]: Publishing: 'Hello World: 4'
[INFO] [1748231731.657301086] [talker]: Publishing: 'Hello World: 5'
[INFO] [1748231732.657292011] [talker]: Publishing: 'Hello World: 6'
[INFO] [1748231733.657285603] [talker]: Publishing: 'Hello World: 7'
[INFO] [1748231734.657286758] [talker]: Publishing: 'Hello World: 8'
[INFO] [1748231735.657267963] [talker]: Publishing: 'Hello World: 9'
[INFO] [1748231736.657290746] [talker]: Publishing: 'Hello World: 10'
[INFO] [1748231737.656933981] [talker]: Publishing: 'Hello World: 11'
[INFO] [1748231738.656962986] [talker]: Publishing: 'Hello World: 12'
[INFO] [1748231739.656961720] [talker]: Publishing: 'Hello World: 13'
[INFO] [1748231740.657492615] [talker]: Publishing: 'Hello World: 14'
[INFO] [1748231741.657030920] [talker]: Publishing: 'Hello World: 15'
[INFO] [1748231742.656963833] [talker]: Publishing: 'Hello World: 16'
[INFO] [1748231743.657117598] [talker]: Publishing: 'Hello World: 17'
[INFO] [1748231744.657020486] [talker]: Publishing: 'Hello World: 18'

root@BattleStation25:~/dockerteste          root@BattleStation25:~/dockerteste
root@BattleStation25:~/dockerteste# sudo su
[sudo] password for rodrigo:
root@BattleStation25:~/home/rodrigo# docker exec -it tcc-ros2-1 bash
root@BattleStation25:~/dockerteste# ls
src
root@BattleStation25:~/dockerteste# echo $RMW_IMPLEMENTATION
root@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic list
/parameter_events
/rosout
root@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic list
/chatter
/parameter_events
/rosout
root@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic echo /chatter

```

Figura 5 – Falha utilizando RMW padrão (FastDDS)

```

root@BattleStation25:/home/rodrigo/...          root@BattleStation25:~/dockerteste
root@BattleStation25:~$ echo $RMW_IMPLEMENTATION
rodrigo@BattleStation25:~$ ros2 topic list
/chatter
/parameter_events
/rosout
root@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic echo /chatter
^Croot@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic list
/parameter_events
/rosout
root@BattleStation25:~/dockerteste# export RMW_IMPLEMENTATION=rmw_cyclonedds_cpp
root@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic list
/chatter
/parameter_events
/rosout
root@BattleStation25:~/dockerteste# ros2 topic echo /chatter
data: 'Hello World: 18'
...
data: 'Hello World: 19'
...
data: 'Hello World: 20'
...
data: 'Hello World: 21'
...
data: 'Hello World: 22'
...
data: 'Hello World: 23'
...
data: 'Hello World: 24'

root@BattleStation25:~$ ros2 run demo_nodes_cpp talker
[INFO] [1748231966.319745640] [talker]: Publishing: 'Hello World: 1'
[INFO] [1748231967.319316139] [talker]: Publishing: 'Hello World: 2'
[INFO] [1748231968.319311374] [talker]: Publishing: 'Hello World: 3'
[INFO] [1748231969.319424912] [talker]: Publishing: 'Hello World: 4'
[INFO] [1748231970.319424912] [talker]: Publishing: 'Hello World: 5'
[INFO] [1748231971.310770725] [talker]: Publishing: 'Hello World: 6'
[INFO] [1748231972.319873304] [talker]: Publishing: 'Hello World: 7'
[INFO] [1748231973.319813429] [talker]: Publishing: 'Hello World: 8'

```

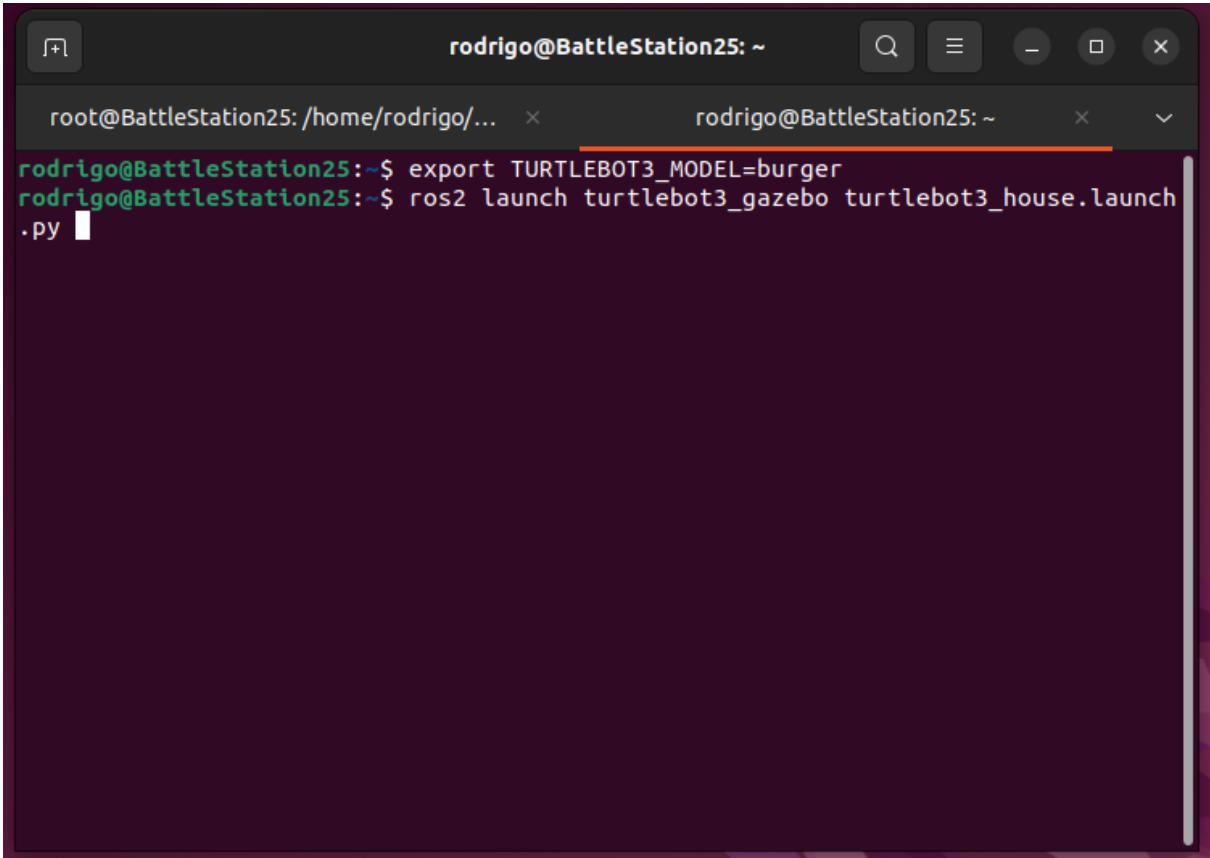
Figura 6 – Sucesso utilizando RMW CycloneDDS

```

services:
  ros2:
    image: ghcr.io/joca2511/tcc_docker:main
    network_mode: host
    privileged: true
    environment:
      - ROS_DOMAIN_ID=10
      - TURTLEBOT3_MODEL=burger
      - RMW_IMPLEMENTATION=rmw_cyclonedds_cpp
    stdin_open: true
    tty: true

```

Figura 7 – Compose proposto para testes



```
root@BattleStation25:/home/rodrigo/... x rodrigo@BattleStation25:~ x
rodrigo@BattleStation25:~$ export TURTLEBOT3_MODEL=burger
rodrigo@BattleStation25:~$ ros2 launch turtlebot3_gazebo turtlebot3_house.launch
.py
```

Figura 8 – Simulação Gazebo é lançada pelo host

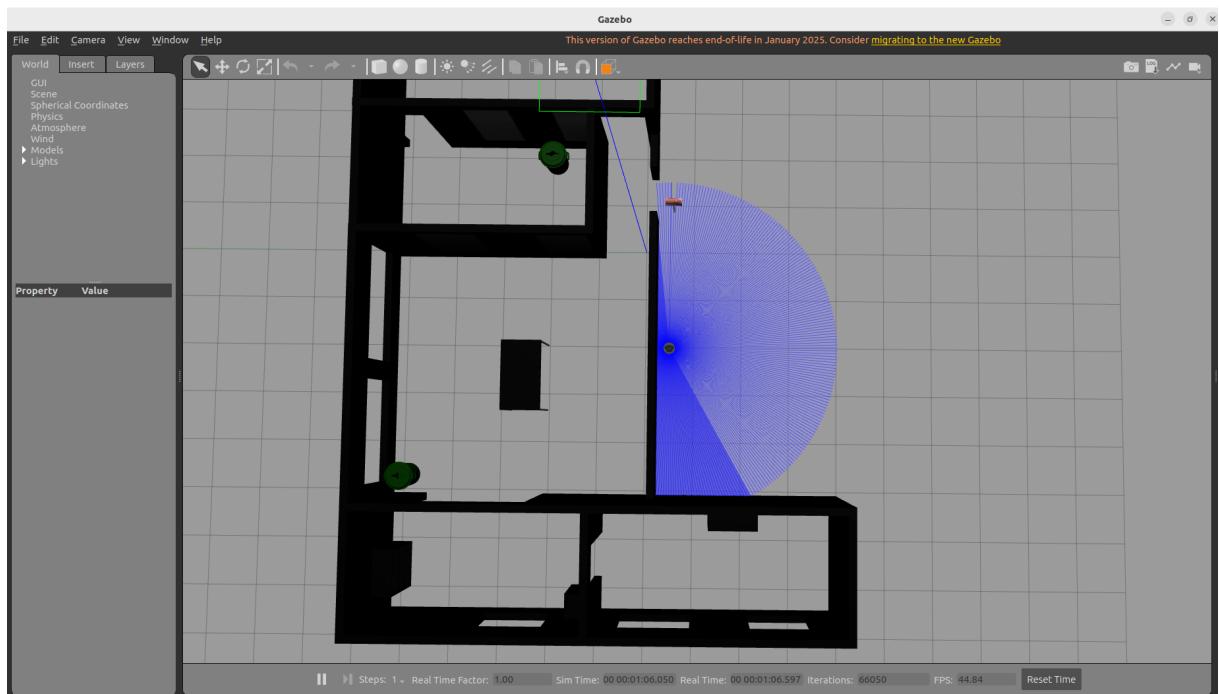


Figura 9 – Aparência inicial da simulação Gazebo

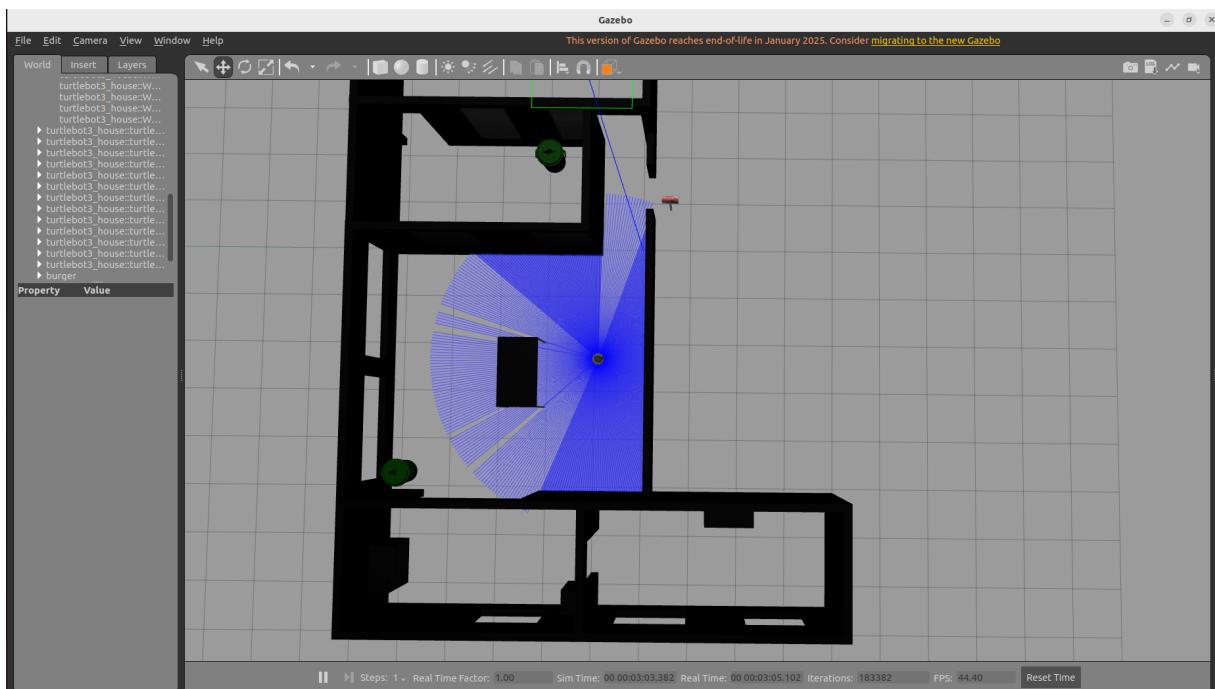


Figura 10 – Turtlebot3 Burger é movido para dentro da casa

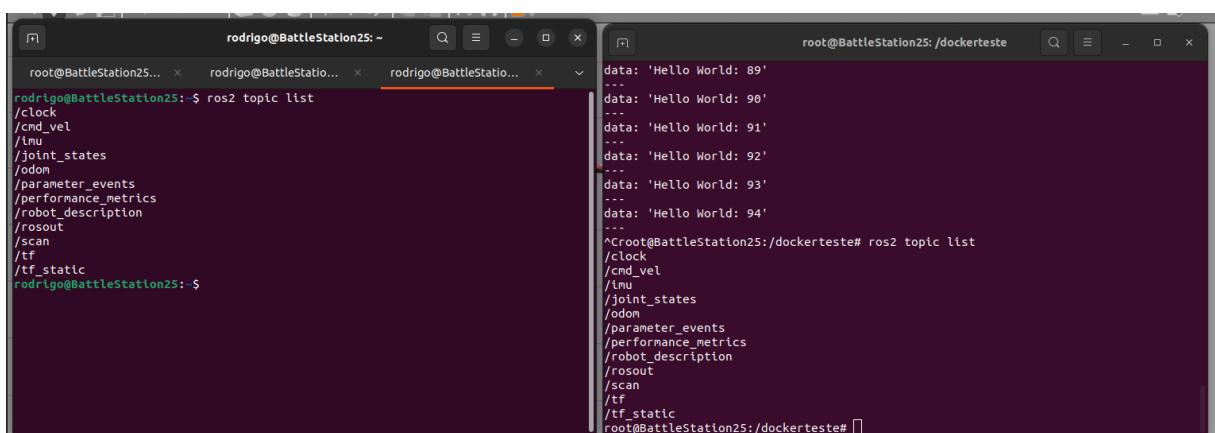
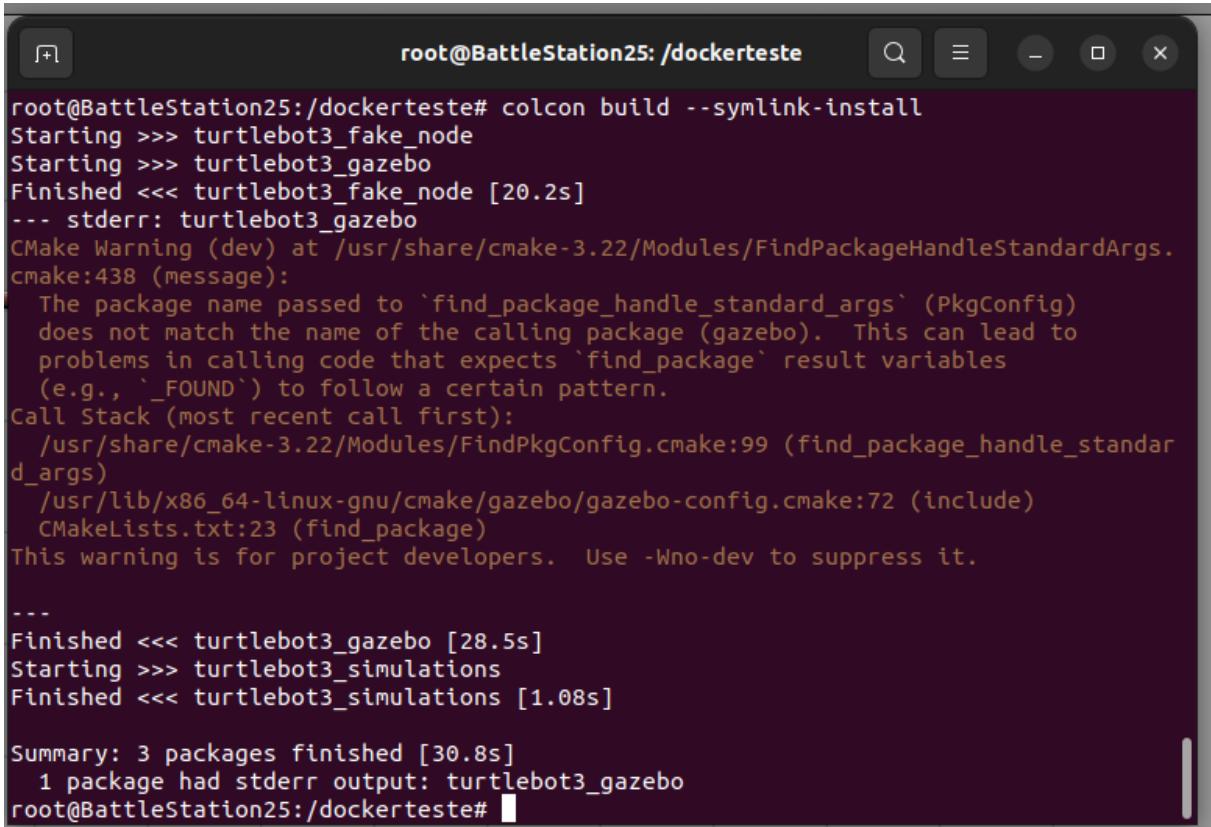


Figura 11 – ROS2 Humble dentro do Docker adquire os novos tópicos



```

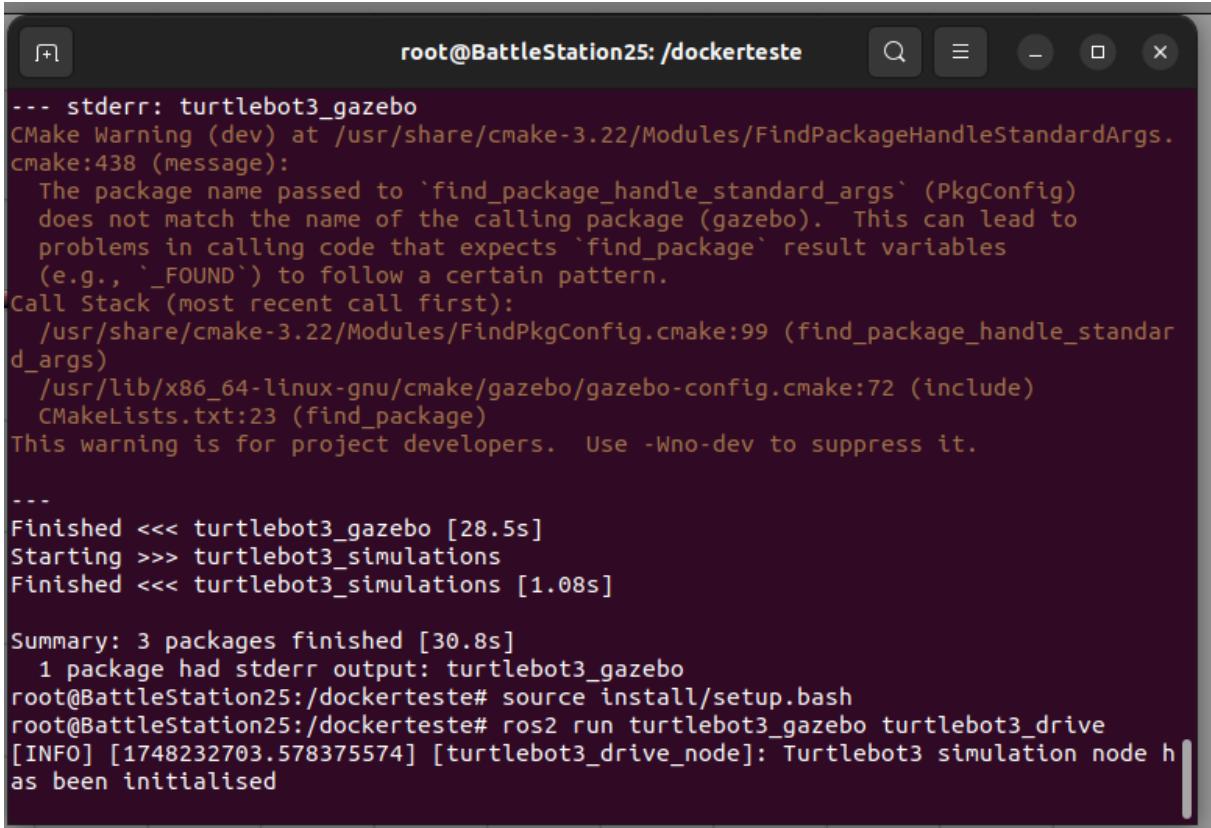
root@BattleStation25:/dockerteste# colcon build --symlink-install
Starting >>> turtlebot3_fake_node
Starting >>> turtlebot3_gazebo
Finished <<< turtlebot3_fake_node [20.2s]
--- stderr: turtlebot3_gazebo
CMake Warning (dev) at /usr/share/cmake-3.22/Modules/FindPackageHandleStandardArgs.cmake:438 (message):
  The package name passed to `find_package_handle_standard_args` (PkgConfig)
  does not match the name of the calling package (gazebo). This can lead to
  problems in calling code that expects `find_package` result variables
  (e.g., `_FOUND`) to follow a certain pattern.
Call Stack (most recent call first):
  /usr/share/cmake-3.22/Modules/FindPkgConfig.cmake:99 (find_package_handle_standard_args)
  /usr/lib/x86_64-linux-gnu/cmake/gazebo/gazebo-config.cmake:72 (include)
  CMakeLists.txt:23 (find_package)
This warning is for project developers. Use -Wno-dev to suppress it.

---
Finished <<< turtlebot3_gazebo [28.5s]
Starting >>> turtlebot3_simulations
Finished <<< turtlebot3_simulations [1.08s]

Summary: 3 packages finished [30.8s]
  1 package had stderr output: turtlebot3_gazebo
root@BattleStation25:/dockerteste#

```

Figura 12 – ROS2 Humble dentro do Docker builda projetos



```

--- stderr: turtlebot3_gazebo
CMake Warning (dev) at /usr/share/cmake-3.22/Modules/FindPackageHandleStandardArgs.cmake:438 (message):
  The package name passed to `find_package_handle_standard_args` (PkgConfig)
  does not match the name of the calling package (gazebo). This can lead to
  problems in calling code that expects `find_package` result variables
  (e.g., `_FOUND`) to follow a certain pattern.
Call Stack (most recent call first):
  /usr/share/cmake-3.22/Modules/FindPkgConfig.cmake:99 (find_package_handle_standard_args)
  /usr/lib/x86_64-linux-gnu/cmake/gazebo/gazebo-config.cmake:72 (include)
  CMakeLists.txt:23 (find_package)
This warning is for project developers. Use -Wno-dev to suppress it.

---
Finished <<< turtlebot3_gazebo [28.5s]
Starting >>> turtlebot3_simulations
Finished <<< turtlebot3_simulations [1.08s]

Summary: 3 packages finished [30.8s]
  1 package had stderr output: turtlebot3_gazebo
root@BattleStation25:/dockerteste# source install/setup.bash
root@BattleStation25:/dockerteste# ros2 run turtlebot3_gazebo turtlebot3_drive
[INFO] [1748232703.578375574] [turtlebot3_drive_node]: Turtlebot3 simulation node has been initialised

```

Figura 13 – ROS2 Humble dentro do Docker roda projetos para movimentação do robô dentro da simulação Gazebo presente no host

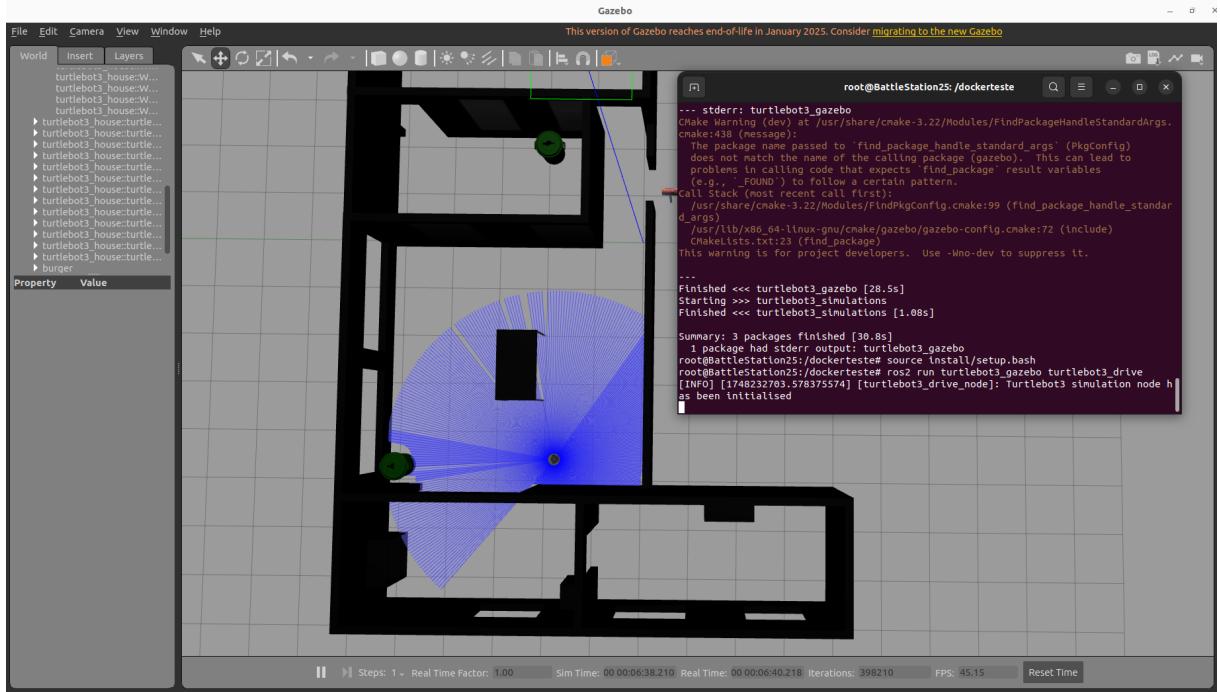


Figura 14 – Turtlebot3 Burger é movimentado pelo ROS2 Humble presente dentro do conteiner Docker

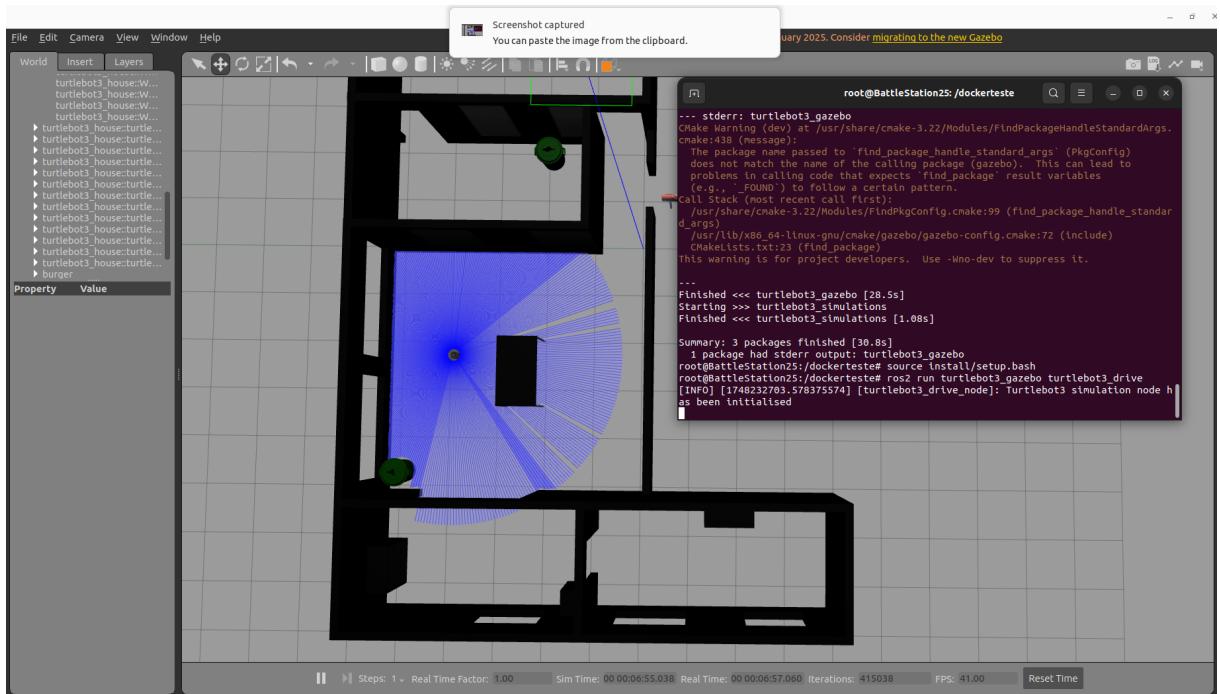


Figura 15 – Turtlebot3 Burger é movimentado pelo ROS2 Humble presente dentro do conteiner Docker

6 TRABALHOS FUTUROS

Devido a problemas envolvendo a burocracia da FEI com relação ao uso da sala K4-04 e seus equipamentos e à falta de tempo, os testes físicos não foram realizados, isso acabou por alterar o tema do projeto que envolvia a comparação do desempenho do robô simulado com e sem contêiner, com o robô físico com e sem contêiner. O professor orientador conversou com a equipe e então foi decidido que os testes não seriam realizados mas que estariam disponíveis para serem usados como um trabalho futuro para algum próximo aluno que possa se interessar pelo tema e decidir continuar o desenvolvimento dos testes.

7 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Questão a ser respondida pela Conclusão/Discussões Finais: O que tudo isso significa?

Esta seção mostra como o trabalho avançou o estado atual do conhecimento dentro da área de pesquisa.

Você deve fornecer uma justificativa clara para o seu trabalho na conclusão. Além disso, você pode sugerir experimentos futuros e apontar os que estão em andamento. teste leasl

REFERÊNCIAS

- COPPELIASIM. **ROS2 tutorial**. 2020. Accessed: 2025-05-25. Disponível em: <<https://manual.coppeliarobotics.com/en/ros2Tutorial.htm>>.
- FOUNDATION, I. O. S. R. **ROS**. 2018. Accessed: 2025-05-24. Disponível em: <<https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>>.
- _____. **Gazebo Simulator**. 2022. Accessed: 2025-05-24. Disponível em: <<https://gazebosim.org/home>>.
- _____. **TurtleBot**. 2025. Accessed: 2025-05-24. Disponível em: <<https://www.turtlebot.com/>>.
- GAO, X. et al. Design and ground performance evaluation of a multi-joint wheel-track composite mobile robot for enhanced terrain adaptability. **Applied Sciences**, v. 13, n. 12, 2023. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/12/7270>>.
- INC., D. **Docker**. 2025. Accessed: 2025-05-25. Disponível em: <<https://docs.docker.com/get-started/docker-overview/>>.
- ROBOTIS. **TurtleBot3 e-Manual: Overview**. 2025. Accessed: 2025-05-24. Disponível em: <<https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/overview/>>.
- ROBOTIS-GIT. **TurtleBot3 GitHub Repository**. 2025. Accessed: 2025-05-24. Disponível em: <<https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3>>.
- SOBIERAJ, M.; KOTYŃSKI, D. Docker performance evaluation across operating systems. **Applied Sciences**, v. 14, n. 15, 2024. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/15/6672>>.
- WEN, L. et al. Bare-metal vs. hypervisors and containers: Performance evaluation of virtualization technologies for software-defined vehicles. In: . [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372496789_Bare-Metal_vs_Hypervisors_and_Containers_Performance_Evaluation_of_Virtualization_Technologies_for_Software-Defined_Vehicles>.