

TDP Robocup Brasil 2024 - Equipe Atena - EESC/USP

Amanda Tanaka EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil amanda_tanaka@usp.br	Ana Luiza Mineiro EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil analuzamineiro@usp.br	Arthur Costa EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil arthur_costa@usp.br	João Henrique Aléssio EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil joao.h02@usp.br	João Vitor de Oliveira EESC - USP EUSP - São Carlos São Carlos, Brasil jv0usp@usp.br
Marcos Bidoli EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil marcos.v.bidoli@usp.br	Matheus Angarola ICMC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil matheuzu@usp.br	Pedro Diniz EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil pedrocoelho.coelho@usp.br	Vinicius Gustierrez ICMC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil viniciusgustierrez@usp.br	Vítor Magalhães EESC - USP USP - São Carlos São Carlos, Brasil vitormagalhaes@usp.br

Resumo—Este documento apresenta os principais aspectos da solução desenvolvida pela Equipe Atena para a automação de tarefas no setor industrial. A solução abrange operações de carregamento e descarregamento de objetos, manipulação, transporte e organização dos mesmos. Além disso, inclui a navegação autônoma por ambientes que simulam uma fábrica.

I. VISÃO GERAL

A globalização impulsiona uma busca incessante por maior eficiência de custos, flexibilidade e autonomia em sistemas logísticos de larga escala. Empresas como Amazon e Alibaba são exemplos de companhias que dedicam grande foco e esforços nesse paradigma de armazenamento. A utilização responsável dos recursos humanos é uma preocupação central, e, por isso, tarefas que envolvem alta repetibilidade, grande demanda de tempo e ambientes altamente estruturados se tornam candidatas ideais para a aplicação de sistemas robóticos autônomos. Essa abordagem permite uma melhor alocação de pessoas em tarefas essenciais, aprimorando a eficácia dos processos em sua totalidade.

Sob essa perspectiva, habilidades essenciais para sistemas robóticos autônomos incluem a coleta, ordenação, transporte e armazenamento de objetos. A competição RoboCup@Work Brazil 2024 simula esses desafios, explorando diferentes técnicas, ideias e conceitos que podem elevar a qualidade da automação, crucial para a economia contemporânea.

Este Team Description Paper (TDP) descreve as soluções propostas pela equipe Atena, do grupo de robótica SE-MEAR (Soluções em Engenharia Mecatrônica e Aplicação na Robótica), da Universidade de São Paulo (USP) - campus São Carlos. A equipe é composta por estudantes de graduação de diversos cursos oferecidos no campus, abrangendo áreas de engenharia e computação.

II. SISTEMA MECÂNICO E ELÉTRICO

A seguir, serão apresentados os módulos da estrutura do robô. Esta seção permitirá uma compreensão detalhada

de todas as funcionalidades implementadas, viabilizando a execução das estratégias de navegação e planejamento, que serão descritas posteriormente.

A. Estrutura Geral do Robô

O robô possui uma cinemática omnidirecional, possibilitada por um conjunto de quatro rodas (Figura 1) tracionadas independentemente, cada uma acionada por um motor (Figura 2).

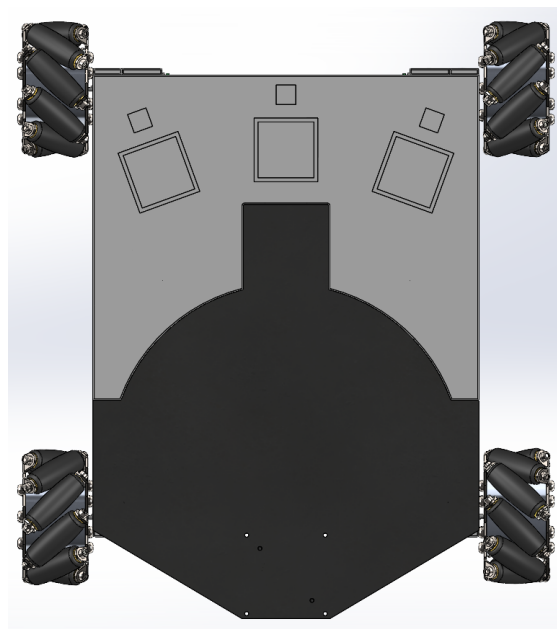


Figura 1. Disposição das rodas

Os motores que proporcionam a tração são do tipo DC, com uma rotação de 1030 RPM, tensão nominal de 12 V e torque em *stall* de 3,2 kgf.cm. Além disso, cada motor é equipado com um encoder de 48 CPR para medição precisa de rotação (modelo *Pololu 9.7:1 HP 12V with encoder*).



Figura 2. Motor DC com encoder [1].

As rodas utilizadas são do tipo *Mecanum* (Figura 3), que possuem rolamentos ao longo de todo o seu perímetro, com eixos de rotação formando ângulos de 45° em relação ao eixo de rotação da roda. Essa configuração permite a navegação no sentido perpendicular ao habitual, conferindo ao robô a capacidade de se deslocar sem a necessidade de realizar rotações sobre seu próprio eixo. Portanto, é um robô do tipo holonômico.



Figura 3. Mecanum Wheels [2].

Os dados de deslocamento, coletados pelos *encoders*, são enviados para o componente de *software* responsável pela tomada de decisões inteligentes. Isso é realizado por meio do uso de microcontroladores ESP32 – modelos *DevKit* – (Figura 4) utilizando o protocolo de comunicação I2C. O recebimento de valores de comando de velocidade, fornecidos pelo *software* que implementa a estratégia, resulta em ações de controle a serem executadas pelo programa em cada microcontrolador.

Para o tratamento dos dados recebidos pela ESP32, foi idealizada uma metodologia de controle PID (Figura 5). A



Figura 4. Microcontrolador ESP32 DevKit [3].

identificação dos valores apropriados para o direcionamento do sistema foi realizada por meio de diversos testes, sob condições variadas de velocidade, visando garantir maior segurança e robustez. Após todo o processo, foi efetuada a modelagem de uma planta completa (em termos do jargão comumente utilizado no campo de controle), utilizando as informações conhecidas de entrada e a resposta obtida pela leitura dos *encoders*, a fim de determinar os melhores parâmetros (Proporcional, Integral e Derivativo) para a execução do controle em baixo nível.

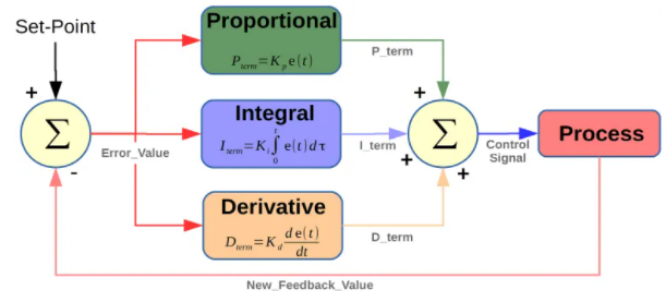


Figura 5. Controlador PID [4].

B. Sistema de atuação

A fim de realizar a manipulação dos objetos tanto nas áreas de trabalho quanto no armazenamento interno, o robô está equipado com um sistema de atuação (Figura 6) desenvolvido pela equipe, composto por uma garra, um elevador e uma plataforma giratória:

O princípio básico da garra (Figura 7), construída por meio de impressão 3D utilizando TPU para as pontas e PETG para os demais componentes, envolve um pinhão diretamente conectado a um servo motor. Este pinhão está acoplado a duas cremalheiras que se movem para fechar e abrir, capturando e liberando objetos, respectivamente. A garra inclui ainda uma caixa que suporta tanto a webcam quanto o servo motor, e se conecta ao braço do robô, que é composto por peças impressas em 3D e um perfil estrutural de alumínio.

Para a elevação da garra e do braço, utilizou-se um mecanismo de transferência vertical (Figura 8) construído com um fuso de esferas recirculantes, diretamente acoplado a outro

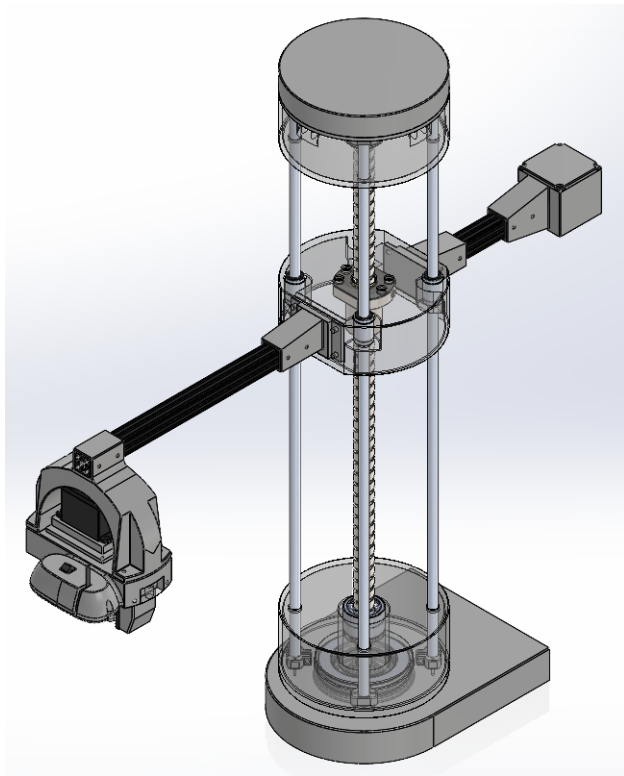


Figura 6. Atuador do robô

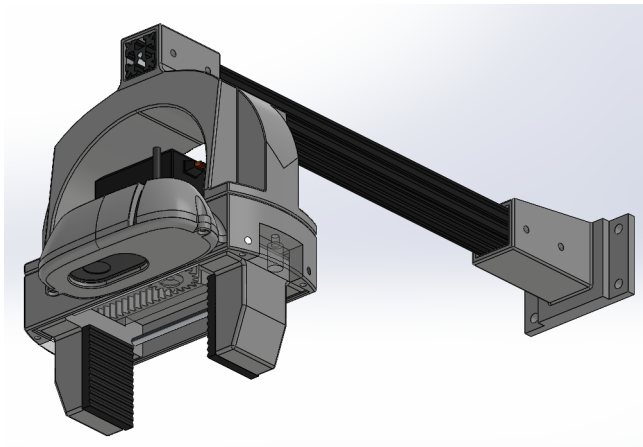


Figura 7. Garra e braço do Robô

servo motor. A castanha deste motor está acoplada a uma plataforma de elevação, que possui dois pontos de fixação para o subconjunto garra-braço e para um contrapeso, se necessário. Adicionalmente, para restringir os graus de liberdade do elevador e assegurar um movimento suave, foram empregados rolamentos rígidos de esferas, rolamentos de esferas de contato angular, rolamentos lineares e quatro guias de alumínio.

Para facilitar a gestão do armazenamento do robô, seja para inserção ou remoção de objetos, o sistema de elevação foi instalado sobre uma plataforma giratória. Esta plataforma está acoplada a um servo motor fixo ao chassi, permitindo que

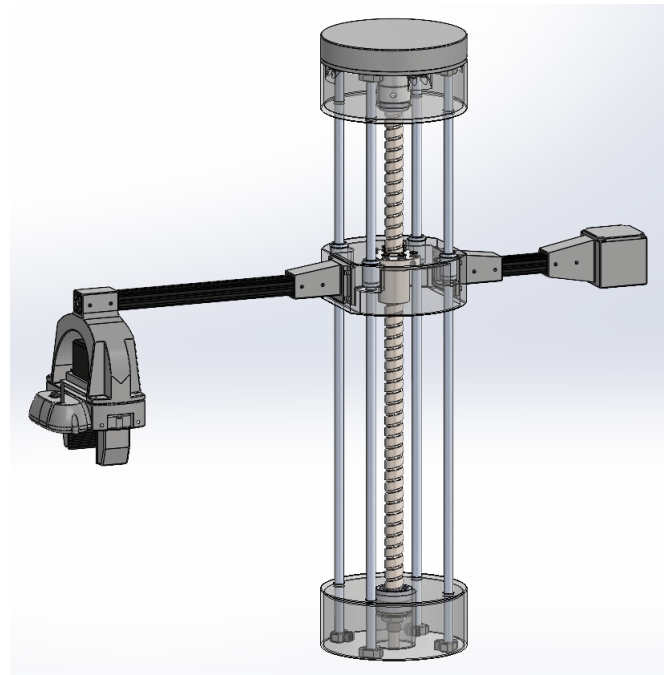


Figura 8. Sistema de elevação do Robô

o sistema de atuação rotacione em torno do fuso de esferas. Com isso, os três suportes de objetos (Figura 9) localizados na parte traseira do robô são dispostos radialmente, tornando necessário apenas o ajuste angular da plataforma para acessar os diferentes suportes.

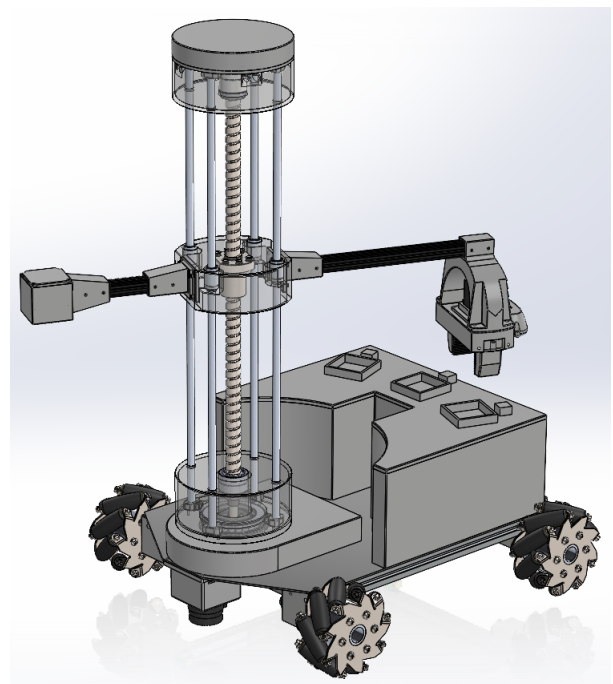


Figura 9. Sistema de armazenamento, possibilitado pela plataforma giratória

O projeto em questão propõe a integração da câmera Web-

cam HD Logitech C270 (Figura 10) ao mecanismo de atuação do robô. Posicionada de modo a apontar para baixo, a câmera desempenha um papel vital na identificação do tipo de bloco presente e de sua localização na área de trabalho, uma capacidade imprescindível para o aprimoramento do desempenho geral do robô, possibilitando uma locomoção mais eficaz e precisa.



Figura 10. Câmera acoplada à garra [7].

Por meio da análise de imagens capturadas pela câmera, o robô emprega técnicas de visão computacional para distinguir os diferentes tipos de blocos, baseando-se em suas características distintas.

Com os dados obtidos pela câmera, o robô é capaz de posicionar a garra com precisão em relação aos blocos, por meio de um sistema de controle de malha fechada, assegurando a captura eficiente e precisa dos objetos. Essa configuração também otimiza a movimentação do robô.

É importante destacar que a montagem da câmera no mecanismo de elevação foi cuidadosamente projetada para assegurar um posicionamento ideal, permitindo a captura de imagens claras e livres de obstruções.

C. Módulo de Alimentação

Para o funcionamento adequado do robô, todo o seu circuito eletrônico será alimentado por duas baterias, uma de 4 células de polímero de lítio (Li-Po) e outra de 2 células, com tensões respectivamente de 14,8 V e 7,4 V.

A primeira bateria escolhida, de 14,8 V, será destinada para a alimentação dos circuitos dos quatro motores DC e do microcomputador embarcado Jetson Orin Nano (Figura 11). Essa bateria possui capacidade de 5200 mAh e corrente de descarga de 16,67 mAh e foi escolhida para fornecer uma tensão de 12 V. Para isso, será utilizado um conversor DC-DC, responsável pela regulação da tensão, de forma a promover o uso adequado e seguro dessa bateria.

Já a outra bateria escolhida, de 7,4 V, será destinada para a alimentação dos três servomotores e dos microcontroladores ESP32. Essa bateria possui capacidade de 6000 mAh e corrente de descarga de 8,33 mAh e foi escolhida para suprir a necessidade de uma alimentação de 5 V. Logo, será utilizado mais um conversor DC-DC para fazer a regulação da tensão.

Vale destacar que o sensor LiDAR e as câmeras Logitech e Realsense (Figura 13) serão alimentadas via USB pelo microcomputador Jetson Orin Nano. Além disso, os encoders acoplados aos motores DC e o circuito lógico dos drivers ponte



Figura 11. Microcomputador Jetson Orin Nano Developer Kit [9].

H (Figura 12) serão alimentados com 3.3 V fornecido pelo microcontrolador ESP32.

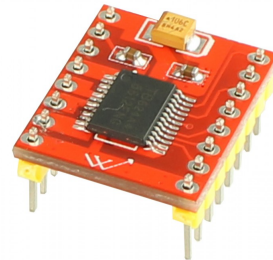


Figura 12. Driver Duplo Ponte H [10].

D. Sistema de Sensoriamento Global

Como será apontado na seção de estratégia e planejamento, a forma de modelagem do problema envolve o amplo uso de *features* marcantes do ambiente de trabalho, que servem de guia para obter-se um robusto senso de localização global. Dado isso, toda a projeção do sistema de sensoriamento fora centrada no aproveitamento de tais *features*.

Utilizando uma câmera RealSense (Câmera Intel RealSense D435i, figura 13) posicionada na parte frontal do robô, é possível visualizar o ambiente externo para então, através de visão computacional, extrair aspectos-chave do ambiente (como a prateleira, linhas no chão, blocos e seus tipos, etc.) e com isso não somente fornecer informações essenciais à resolução do problema, como também auxiliar na estimativa da localização global do robô.

III. NAVEGAÇÃO E PLANEJAMENTO

A. Estratégia Empregada

A estratégia proposta para o desafio é dividida em três fases principais: mapeamento inicial, detecção e classificação das áreas de serviço, e planejamento de ações.

Na fase de mapeamento inicial, utilizamos um sistema de mapeamento robusto para construir um mapa detalhado



Figura 13. Câmera Intel RealSense D435i [8].

do ambiente, empregando sensores como LiDAR e câmeras. Com o mapa gerado, um sistema de planejamento de rotas é utilizado para definir caminhos eficientes, permitindo que o robô navegue de forma autônoma, evitando obstáculos e otimizando seu percurso.

Na fase de detecção e classificação, uma câmera de profundidade, como a Realsense, captura imagens detalhadas das áreas de serviço. Esses dados são processados por algoritmos de visão computacional e aprendizado de máquina, permitindo a identificação e classificação rápidas dos locais onde o robô deve atuar. Após a classificação da área de serviço, o robô toma decisões de forma autônoma sobre qual tarefa realizar em cada local, garantindo uma execução eficiente e precisa das missões.

B. ROS (Robotic Operating System)

Neste projeto, será utilizado a *framework Robot Operating System* (ROS, traduzido para “Sistema Operacional Robótico”, Fonte: [5]), que auxilia o desenvolvimento de sistemas robóticos.

Uma das características mais notáveis dessa ferramenta é sua capacidade de concretizar a modularização de um sistema. ROS possui um sistema de “nós”, arquivos executáveis que podem estar desenvolvidos em linguagens distintas. Cada nó é responsável por uma função diferente do robô, facilitando a execução de tarefas de forma paralela. Uma estrutura de programas chamada de *roscore* é responsável por gerenciar os diferentes nós de um mesmo sistema, além de armazenar parâmetros globais, que podem ser consultados por qualquer parte da organização.

Para trocar dados, os nós utilizam uma estrutura chamada de Tópico ROS. Ele é um canal de comunicação entre diferentes partes do robô. Exemplificando, um nó responsável por fazer a leitura de sensores se inscreve no papel de publicador de um tópico, enquanto que outro, responsável pelo tratamento desses dados, se torna assinante do tópico, recebendo os dados. A inscrição ou subscrição a um tópico é informada e gerenciada pelo *roscore*. Vale ressaltar que as informações são estruturadas em Mensagens ROS. Assim, uma mensagem pode conter informações como translação e rotação do robô em vários eixos, enviadas de uma só vez. Esse processo pode ser visualizado na Figura 14.

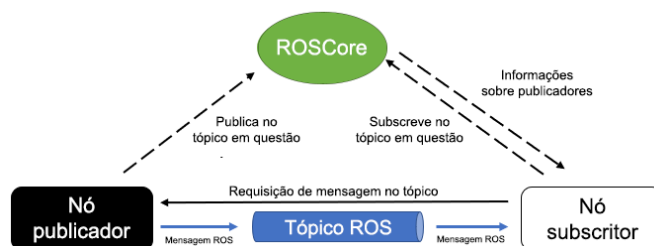


Figura 14. Esquema de comunicação entre nós utilizando [6].

C. Mapeamento

Para o mapeamento do ambiente, utilizamos o Cartographer, uma biblioteca de SLAM desenvolvida pelo Google. Equipado com sensores LiDAR e câmeras, o robô coleta dados em tempo real, que são processados pelo Cartographer para construir um mapa 2D ou 3D detalhado e preciso do espaço. A correção de discrepâncias e o alinhamento dos dados garantem um mapeamento altamente preciso, essencial para as fases subsequentes.

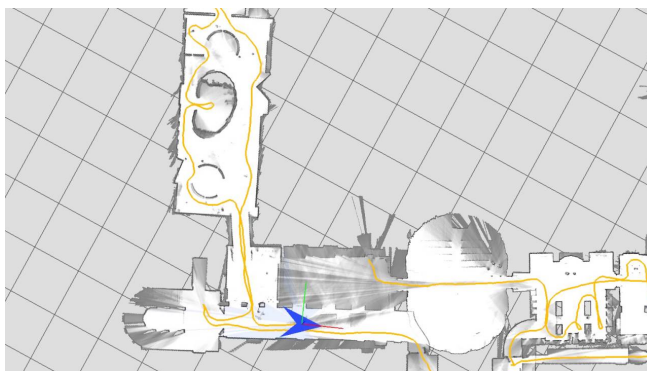


Figura 15. Mapeamento gerado pelo Cartographer.

D. Navegação

Na navegação, empregamos o move base da pilha de navegação ROS. Utilizando o mapa de ocupação gerado pelo Cartographer, o move base define rotas eficientes com planejadores de caminho global e local. O método de Janela Dinâmica (DWA) permite movimentos omnidirecionais, melhorando a manobrabilidade do robô em ambientes estreitos. A configuração do move base foi refinada através de testes em diversos ambientes simulados, assegurando uma navegação eficaz e segura.

E. Visão Computacional

É fundamental destacar o uso da câmera RealSense, posicionada na parte frontal do robô, para a detecção de ambientes e paredes virtuais, essenciais para o cumprimento dos objetivos de cada teste. Essa detecção é realizada por meio da biblioteca de visão computacional OpenCV, utilizando uma rede neural YOLOv8 pré-treinada em um dataset personalizado para essa tarefa. Dessa forma, é possível determinar a posição de cada

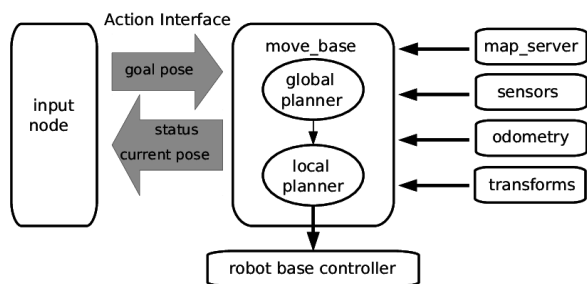


Figura 16. Diagrama de navegação do move base.

área de serviço dentro da arena, facilitando as etapas subseqüentes de exploração e reconhecimento.

Para a detecção dos April Tag Tagged Cubes (ATTC) do cenário foi desenvolvido um algoritmo, com duas etapas distintas, utilizando a mesma biblioteca de visão computacional citada anteriormente e o pacote AprilTag do ROS.

A primeira etapa recebe como entrada as imagens capturadas pela câmera frontal do robô de uma das regiões que contêm os cubos. Estas imagens são essenciais para o mapeamento do espaço e para identificar a posição e o tipo de cada bloco disperso nas áreas de captura, distinguindo entre cubos vermelhos e azuis. Esse reconhecimento prévio das características de posição e coloração dos blocos permite que o algoritmo de decisão determine quais são os melhores alvos para a coleta em cada teste.

A segunda etapa envolve o processamento das imagens capturadas pela câmera superior, que está posicionada no manipulador do robô. Esta perspectiva adicional permite a detecção e classificação das tags de cada bloco na área de captura. Utilizando o pacote AprilTag ROS, também realizamos o rastreamento dos cubos que são alvos para a coleta. Esse processo assegura a identificação precisa dos IDs necessários para as tarefas que requerem essa informação, além de aumentar a precisão durante a coleta dos objetos.

F. Planejamento de tarefas

IV. CONCLUSÃO

O encadeamento das soluções propostas pelo grupo está segundo as regras impostas pela Robocup Brasil 2024 e está alinhado com o problema apresentado. Toda a estrutura robótica foi proposta para a maior rapidez e eficácia da operação de carregamento dos objetos. Tudo isso levando em conta as respectivas pontuações de cada tipo de objeto.

O uso de visão computacional para determinar a posição inicial dos blocos e do robô em relação ao ambiente, aliado ao algoritmo de procura da melhor ordem de ações, garante uma operação estratégica e eficiente. Além disso, os dados obtidos pelos *encoders* e sistema de sensoriamento global, associados ao movimento omnidirecional das rodas escolhidas, permitem um ótimo controle da posição do robô.

Em relação ao mecanismo de captura, o sistema de "pinça" fará com que a deposição dos objetos nas prateleiras não encontre problemas de colisão com a estrutura. Além

disso, com o motor de passo para controlar o deslocamento vertical, não haverá problemas em determinar a altura correta.

Em suma, a equipe desenvolveu um projeto pensando não apenas na competição e em suas regras, mas também no problema real de engenharia proposto. Todos os módulos e tecnologias usadas foram pensados para ampliar a eficiência e diminuir o tempo das operações de manejo de pacotes em um contexto de armazém automatizado.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio da EESC-USP com a sua infraestrutura e o suporte dos orientadores da equipe SEMEAR, Prof. Dr. Marcelo Becker, Profa. Dra. Maíra Martins da Silva e Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino.

REFERÊNCIAS

- [1] POLOLU, Motor das rodas. Disponível em: Pololu. Acesso em: 27 de junho de 2022.
- [2] ALIEXPRESS, Rodas Mecanum. Disponível em: <https://encurtador.com.br/ciyB8>. Acesso em: 21 de julho de 2024.
- [3] MERCADOLIVRE, Esp32 Doit Devkit Com Esp32-wroom-32. Disponível em : https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2200163889-esp32-doit-devkit-com-esp32-wroom-32-_JM#position=2&search_layout=grid&type=item&tracking_id=29694c7d-924c-4b7e-ac25-9f650fbef430. Acesso em: 28 de julho de 2023.
- [4] LOOP TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Disponível em : <https://www.ltiengenharia.com.br/2021/05/11/sistemas-de-controle-controlador-pid-parte-02/>. Acesso em: 29 de julho de 2023.
- [5] ROBOTICS, O.ROS. 2021. Acessado em 5 jul. 2022. Disponível em: <https://www.ros.org/>
- [6] ROBERT, J.Hands-On Introduction to Robot Operating System (ROS). 2020. Disponível em: [https://trojrobert.github.io/hands-on-introduction-to-robot-operating-system\(ros\)](https://trojrobert.github.io/hands-on-introduction-to-robot-operating-system(ros)). Acesso em 05 de julho de 2022.
- [7] MERCADOLIVRE, Câmera web Logitech C270 HD 30FPS , Disponível em: <https://encurtador.com.br/lotB4>. Acesso em: 26 de julho de 2023.
- [8] INTEL, Intel RealSense Depth Camera D435i. Disponível em: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>. Acesso em: 22 de julho de 2024.
- [9] NVIDIA, Jetson Orin Nano Developer Kit. Disponível em: <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/get-started-jetson-orin-nano-devkit>. Acesso em: 22 de julho de 2024.
- [10] USINAINFO, Driver TB6612FNG Duplo Ponte H de Motor DC ou Passo. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/driver-para-motor/driver-tb6612fng-duplo-ponte-h-de-motor-dc-ou-passo-4697.html>. Acesso em: 22 de julho de 2024.