


HARDWARE DIDÁTICO PARA MAPEAMENTO DE AMBIENTES INDOOR

 <https://doi.org/10.56238/arev6n3-301>

Data de submissão: 22/10/2024

Data de publicação: 22/11/2024

Rafael Braga Guabiraba

Eng^o

Engenheiro de Controle e Automação; Acadêmico do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL
E-mail: rbraga87@gmail.com

Nelson Marinelli Filho

D. Sc.

Doutor em Engenharia Mecânica; Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL
E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4362-0132>

Gil Eduardo Guimarães

D. Sc.

Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais; Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL
E-mail: gil.guimaraes@itegam.org.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2800-4620>

Geraldo Nunes Correa

D. Sc.

Doutor em Engenharia Mecânica; Professor do Curso Sistemas de Informação da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - MG – BRASIL
E-mail: geraldo.correa@uemg.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5477-6953>

Janyel Trevisol

M. Sc.

Mestre em Engenharia de Produção; Professor do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Horizontina (FAHOR) – RS – BRASIL
E-mail: janyeltrevisol@yahoo.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1153-4046>

RESUMO

O avanço da Indústria 4.0 trouxe profundas mudanças nos processos produtivos, integrando tecnologias como robótica, sensores LiDAR e sistemas ciberfísicos. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de hardware didático baseado em LiDAR e robôs móveis autônomos (AMR), voltado para mapeamento indoor e capacitação profissional no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM). O sistema, composto por um sensor LiDAR RPLIDAR A1M8, Raspberry

Pi 4 e framework ROS2, foi testado em três cenários simulando ambientes industriais. Os resultados demonstraram alta precisão no mapeamento, com erros médios absolutos variando entre 2,5 cm e 4 cm, dependendo da complexidade do ambiente. A modularidade do sistema permitiu sua adaptação a diferentes níveis de dificuldade, mostrando-se uma ferramenta eficaz para a requalificação de trabalhadores em tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Além disso, a proposta se destacou como uma alternativa de baixo custo e alto impacto educacional, promovendo uma transição eficaz da teoria para a prática.

Palavras-chave: Indústria 4.0. LiDAR. Robótica Móvel Autônoma. Mapeamento Indoor. Requalificação Profissional. Polo Industrial de Manaus. Educação Tecnológica. ROS2. Capacitação Técnica. Automação Industrial.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, considerada a quarta revolução industrial, está transformando radicalmente o setor produtivo ao integrar tecnologias digitais avançadas e sistemas ciberfísicos em processos de manufatura e operações industriais. Essa revolução é marcada pela automação inteligente, análise de grandes volumes de dados (big data), conectividade via Internet das Coisas (IoT), e o uso extensivo de inteligência artificial (IA). Essas tecnologias proporcionam uma nova era de fábricas inteligentes, nas quais sistemas autônomos são capazes de se comunicar e tomar decisões em tempo real, sem a necessidade de intervenção humana direta. A automação avançada também possibilita a personalização em massa, ou seja, a produção em larga escala de produtos personalizados de acordo com as preferências do cliente, mantendo os custos de produção baixos.

Entretanto, a incorporação dessas tecnologias nas indústrias exige mudanças profundas, não apenas na infraestrutura tecnológica, mas também na qualificação dos trabalhadores. Profissionais precisam estar preparados para operar e manter esses sistemas complexos. No Brasil, o Polo Industrial de Manaus (PIM) desempenha um papel fundamental na economia da região Norte e no desenvolvimento tecnológico do país. Com indústrias que produzem desde eletrônicos até veículos, o PIM tem buscado acompanhar o ritmo acelerado da inovação global. No entanto, a transição para a Indústria 4.0 apresenta desafios significativos, particularmente no que diz respeito à formação e requalificação da força de trabalho.

A adoção das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 requer profissionais capacitados que compreendam tanto os sistemas automatizados quanto as ferramentas que os suportam. Isso inclui a robótica avançada, sistemas de análise preditiva, e o uso de sensores como o LiDAR (Light Detection and Ranging), que é essencial para o mapeamento e a navegação autônoma de robôs móveis. Tecnologias como o LiDAR, combinadas com robôs móveis autônomos (AMR), são fundamentais para a automação de processos em ambientes industriais complexos, como os encontrados no PIM.

Para que o Brasil se mantenha competitivo no cenário global, a formação de profissionais especializados em tecnologias da Indústria 4.0 é essencial. A implementação de ferramentas didáticas que simulem essas tecnologias em ambientes de ensino pode ser um passo importante para garantir que os trabalhadores adquiram as habilidades necessárias. Essas ferramentas podem proporcionar uma experiência prática, permitindo que os profissionais lidem diretamente com sistemas que encontrarão em suas atividades diárias, facilitando a transição da teoria para a prática.

2 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

Diante desse contexto, surge a questão central desta pesquisa: como uma plataforma de hardware didático, utilizando tecnologias como LiDAR e AMR, pode ser projetada para mapeamento indoor e usada como ferramenta educacional para a qualificação em tecnologias da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus? O objetivo é entender como essas tecnologias podem ser adaptadas para o ambiente educacional e usadas de forma prática para capacitar os trabalhadores do PIM.

Este estudo é particularmente relevante devido à crescente urgência de capacitar os trabalhadores do PIM para lidar com as tecnologias emergentes da Indústria 4.0. A criação de um sistema didático, acessível e robusto, utilizando LiDAR e robótica móvel, pode oferecer uma solução prática para suprir as demandas educacionais e profissionais. Além disso, este trabalho não se limita à implementação de uma solução tecnológica; ele visa explorar como uma plataforma educacional prática pode ser usada para formar profissionais com habilidades avançadas em um curto espaço de tempo. O impacto dessa pesquisa pode ser significativo para a indústria brasileira, aumentando a competitividade do PIM e preparando a força de trabalho para o futuro da automação industrial.

3 REVISÃO LITERATURA

3.1 VISÃO GERAL

O conceito de Indústria 4.0 foi originalmente delineado por Kagermann et al. (2013) como uma fusão entre o mundo físico, digital e biológico. Essa revolução é alimentada pelo uso de tecnologias emergentes, como inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), robótica avançada e análise de grandes volumes de dados (big data). O objetivo da Indústria 4.0 é transformar os sistemas produtivos em processos mais inteligentes, flexíveis e eficientes, permitindo a integração de máquinas, produtos e pessoas em redes digitais. Segundo Schwab (2016), essa transformação permite que os sistemas produtivos sejam adaptados em tempo real para responder às demandas de customização em massa e personalização de produtos, sem sacrificar a eficiência operacional.

A aplicação dessas tecnologias em ambientes produtivos tem o potencial de gerar ganhos significativos de produtividade, reduzir o consumo de energia e otimizar o uso de recursos em cadeias de suprimentos. Além disso, a integração de sensores, máquinas e redes de comunicação possibilita o monitoramento remoto, a automação de tarefas repetitivas e a tomada de decisões baseada em dados, proporcionando maior controle e visibilidade sobre os processos industriais (Hermann et al., 2016). Isso torna a Indústria 4.0 não apenas uma revolução tecnológica, mas também uma estratégia para melhorar a sustentabilidade e a competitividade das indústrias no cenário global.

Dentre as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, a robótica móvel autônoma (AMR) e o sensoriamento LiDAR (Light Detection and Ranging) desempenham papéis essenciais. Os AMRs são robôs capazes de navegar de forma autônoma em ambientes dinâmicos, sem a necessidade de pré-programação de rotas fixas. Isso os diferencia dos robôs tradicionais, que são limitados por trajetórias predeterminadas e não possuem flexibilidade para adaptar sua navegação em tempo real. Segundo Siciliano e Khatib (2016), os AMRs representam um avanço significativo, especialmente em ambientes industriais complexos, onde a capacidade de adaptação a obstáculos imprevistos e mudanças no layout é fundamental para manter a eficiência operacional.

O sensoriamento LiDAR, por sua vez, é uma tecnologia que utiliza feixes de laser para medir distâncias e criar mapas tridimensionais de ambientes. Essa tecnologia é amplamente utilizada em robôs móveis para permitir a navegação autônoma, uma vez que possibilita que os robôs "vejam" e interpretem o ambiente ao seu redor com precisão. Ao combinar AMRs com sensores LiDAR, é possível desenvolver sistemas de navegação autônoma que operam em ambientes industriais altamente complexos, mapeando e respondendo a mudanças no espaço em tempo real. Isso permite a automação de tarefas logísticas, como o transporte de materiais dentro de fábricas e armazéns, sem a necessidade de intervenção humana direta (Shan e Toth, 2018).

3.2 CONCEITOS CHAVES

O desenvolvimento de sistemas de hardware didático, que integram AMRs e LiDAR, baseia-se em teorias de aprendizagem ativa, com destaque para a Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL). Barrows e Tamblyn (1980) foram pioneiros na defesa dessa abordagem pedagógica, que promove a resolução de problemas práticos como uma forma eficaz de aprender conceitos teóricos. Ao permitir que os alunos trabalhem em projetos reais, essa metodologia aumenta a autonomia dos aprendizes e facilita a aplicação prática do conhecimento adquirido.

No contexto da Indústria 4.0, a PjBL (Project Based Learning) é particularmente relevante, pois oferece aos trabalhadores a oportunidade de aprender a operar e programar sistemas avançados, como robôs móveis autônomos, em ambientes simulados que replicam condições reais de trabalho. Ao utilizar hardware didático que permite simular sistemas industriais, os alunos podem experimentar em primeira mão como as tecnologias da Indústria 4.0 funcionam, o que facilita a transição da teoria para a prática.

Além da PjBL, o conceito de modularidade no processo de ensino é uma estratégia eficaz para garantir que os alunos aprendam de forma progressiva, conforme destacado por Pérez-Álvarez et al. (2018). A modularidade permite que o aprendizado seja dividido em blocos, onde cada módulo se

concentra em uma habilidade ou competência específica. Isso facilita o aprendizado de trabalhadores que já estão inseridos no mercado de trabalho e precisam se adaptar às novas exigências tecnológicas sem interromper completamente suas atividades profissionais.

A modularidade também permite que os alunos personalizem suas trajetórias de aprendizagem, adaptando o conteúdo de acordo com suas necessidades e experiências prévias. No contexto da Indústria 4.0, onde há uma diversidade de tecnologias a serem aprendidas, como IA, IoT e sistemas de automação, essa abordagem oferece uma forma estruturada e eficiente de adquirir novas competências técnicas. Assim, os trabalhadores podem aprender as habilidades mais relevantes para suas funções, o que aumenta a retenção do conhecimento e melhora a aplicabilidade dos conceitos no ambiente de trabalho.

3.3 ESPAÇOS E OPORTUNIDADES A SEREM EXPLORADOS

Embora a literatura sobre Indústria 4.0 seja extensa e bem desenvolvida, a maioria dos estudos foca na aplicação dessas tecnologias em sistemas produtivos e cadeias de suprimentos (Hermann et al., 2016). No entanto, há uma lacuna significativa quando se trata do uso dessas tecnologias no contexto educacional e de capacitação profissional. A transição para a Indústria 4.0 requer não apenas a adoção de novas tecnologias, mas também a requalificação de trabalhadores para lidar com essas inovações. Isso é particularmente importante em países emergentes, como o Brasil, onde a infraestrutura educacional e tecnológica ainda precisa de melhorias significativas para acompanhar as demandas da economia digital (Sousa et al., 2018).

A falta de estudos que explorem a aplicação prática de tecnologias como AMR e LiDAR no treinamento de trabalhadores representa uma oportunidade para a inovação no campo da educação técnica. O uso de plataformas de hardware didático que simulem as condições reais de trabalho pode ser uma solução viável para preencher essa lacuna. Além disso, há uma necessidade crescente de desenvolver métodos educacionais que preparem os trabalhadores para os desafios tecnológicos de uma maneira acessível e prática, o que torna este estudo particularmente relevante.

Ao explorar como as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser aplicadas em programas de capacitação, este estudo contribui para a literatura existente ao oferecer uma abordagem prática e acessível para a formação de trabalhadores. A implementação de sistemas de hardware didático, utilizando AMRs e sensores LiDAR, oferece uma alternativa viável para a requalificação de trabalhadores no Brasil, especialmente em polos industriais como o de Manaus, onde a necessidade de adaptação às novas tecnologias é urgente.

4 METODOLOGIA

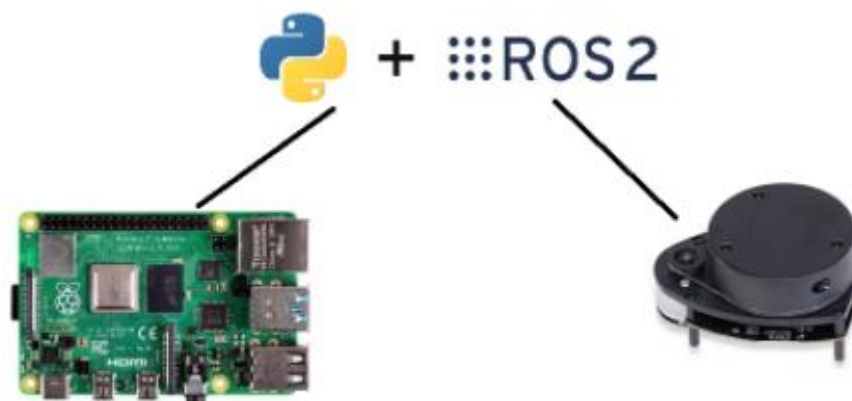
4.1 PROPOSTA DE PESQUISA

Este estudo adota um design experimental, com foco na aplicação educacional e industrial de um sistema de mapeamento indoor baseado em hardware didático. A escolha desse tipo de design foi motivada pela necessidade de testar um sistema prático e replicável em diferentes cenários que simulam ambientes industriais típicos. O hardware principal utilizado é o sensor LiDAR RPLIDAR A1M8, um sensor amplamente utilizado para mapeamento 3D e navegação autônoma. Este sensor foi integrado ao processador Raspberry Pi 4, um computador de baixo custo, mas com capacidade suficiente para processar os dados do LiDAR em tempo real.

A escolha do Raspberry Pi 4 é justificada pela sua acessibilidade, facilidade de uso e compatibilidade com o framework ROS2 (Robot Operating System), que foi utilizado para o controle do sistema de mapeamento. O ROS2 é um middleware amplamente adotado em robótica por sua modularidade e capacidade de suportar a integração de diferentes tipos de sensores e atuadores. Neste caso, o ROS2 foi essencial para permitir a coleta de dados do sensor LiDAR e a execução de algoritmos de mapeamento e navegação autônoma.

A plataforma experimental foi configurada para simular o ambiente real de uma planta industrial, onde o mapeamento e a navegação são críticos para a automação de processos logísticos. O sistema foi testado em três cenários distintos para avaliar sua precisão, robustez e adaptabilidade a diferentes configurações espaciais. A Figura 1 apresenta o diagrama do sistema, destacando os principais componentes e a integração entre o sensor LiDAR, o Raspberry Pi e o software ROS2.

Figura 1: Diagrama do sistema de hardware didático utilizado para mapeamento indoor, incluindo o sensor LiDAR, o Raspberry Pi 4, e a integração com o ROS2.



4.2 COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados por meio de experimentos realizados em três cenários de teste, que foram projetados para simular diferentes níveis de complexidade espacial e desafios encontrados em ambientes industriais reais. Os cenários foram:

Cenário 1 – Quarto vazio: Um ambiente simples, sem obstáculos, onde o objetivo era testar a capacidade do sistema de mapear espaços abertos de forma eficiente e rápida. Este cenário representa áreas industriais como depósitos ou áreas de carga e descarga. (Figura 2)

Cenário 2 – Intersecção de corredores e portas: Um ambiente mais complexo, com interseções e mudanças de direção, onde o sistema foi testado em sua habilidade de navegar em ambientes de corredores, que são típicos em fábricas e armazéns. A precisão do sistema ao lidar com interseções e rotas irregulares foi avaliada neste cenário. (Figura 3)

Cenário 3 – Ambiente com móveis e obstáculos: Um espaço ainda mais complexo, com obstáculos como móveis e outros objetos que simulam equipamentos e máquinas industriais. Este cenário foi projetado para testar a robustez do sistema na detecção de obstáculos e na navegação em ambientes dinâmicos. (Figura 4)

A coleta de dados foi realizada em tempo real, com o sistema de hardware capturando as leituras do sensor LiDAR e processando essas informações para gerar mapas do ambiente. Além disso, as trajetórias dos robôs móveis foram registradas para análise posterior. Os participantes do estudo, compostos por trabalhadores em fase de requalificação no Polo Industrial de Manaus (PIM), interagiram diretamente com o sistema em workshops práticos, onde puderam observar e manipular o mapeamento em tempo real.

Figura 2: Imagem representativa do cenário 1 (quarto vazio) com a trajetória de mapeamento realizada pelo sistema LiDAR.

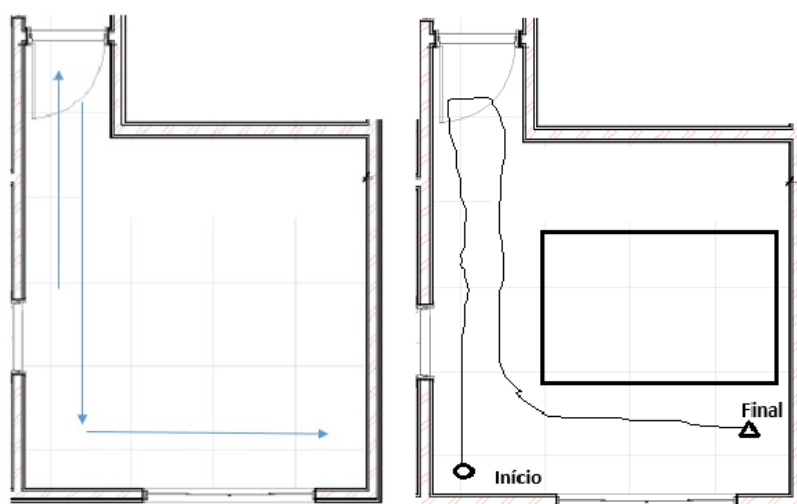


Figura 3: Imagem do cenário 2 (intersecção de corredores e portas), destacando as interseções e os desafios de navegação.

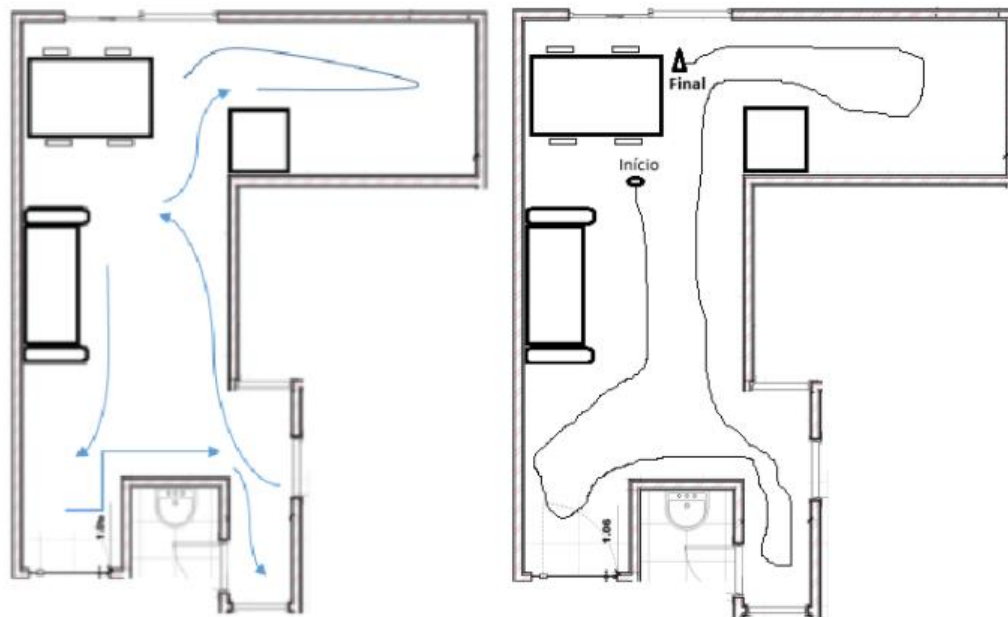
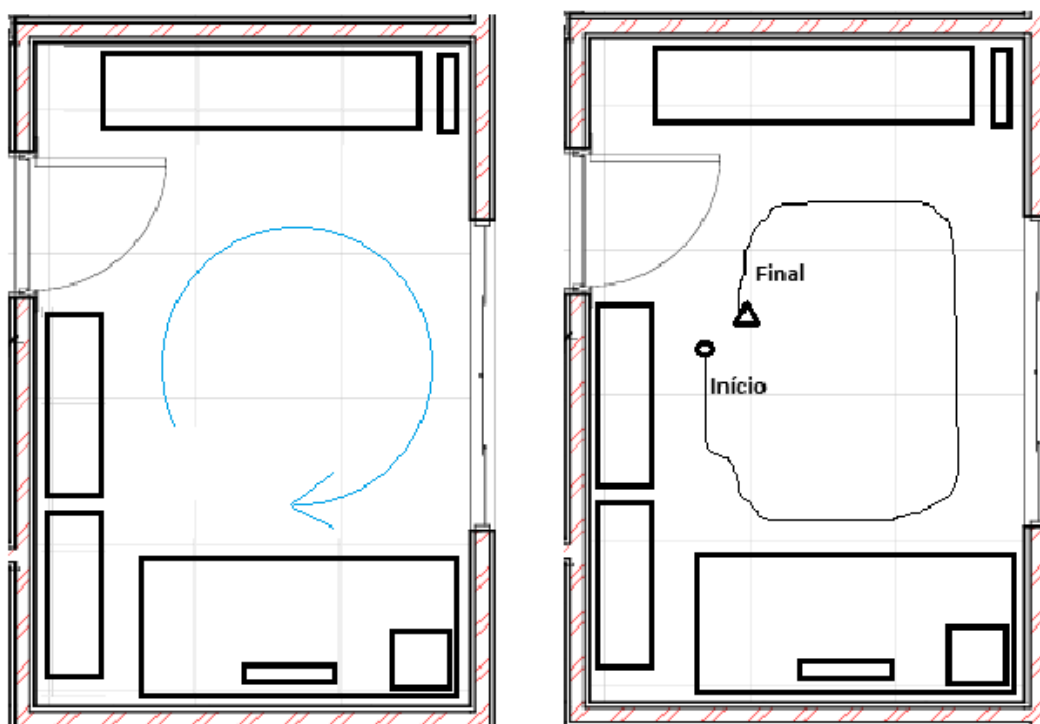


Figura 4: Imagem do cenário 3 (ambiente com móveis e obstáculos), mostrando os obstáculos e a trajetória percorrida pelo robô móvel.



4.3 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

A seleção dos cenários de teste foi feita com base em simulações de ambientes industriais típicos, como áreas de armazenamento, corredores de fábricas e oficinas mecânicas. Cada cenário foi desenhado para representar um nível de dificuldade crescente, de modo a avaliar como o sistema de

mapeamento se comportaria em diferentes contextos. A amostra de trabalhadores foi composta por profissionais de nível técnico que participavam de programas de requalificação no PIM. Esses trabalhadores foram escolhidos por representarem um público-alvo direto das tecnologias da Indústria 4.0, com necessidade de atualização de competências técnicas para lidar com sistemas autônomos e tecnologias habilitadoras.

A escolha desses participantes está em conformidade com o objetivo do estudo, que é testar o sistema de hardware como uma ferramenta educacional para requalificação profissional. Os trabalhadores envolvidos tinham familiaridade com ambientes industriais, mas pouca ou nenhuma experiência prévia com sistemas autônomos ou tecnologia LiDAR. Isso permitiu avaliar a eficácia do sistema de hardware como uma plataforma de ensino prático.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos dados coletados foi conduzida utilizando métricas de Erro Médio Absoluto (MAE) e Resolução Espacial para comparar os mapas gerados pelo sistema com as plantas baixas dos ambientes testados. O MAE foi utilizado para medir a precisão das distâncias estimadas pelo sistema em comparação com as distâncias reais, enquanto a Resolução Espacial foi empregada para avaliar a qualidade dos mapas gerados, com foco em sua capacidade de identificar detalhes do ambiente.

Além disso, os resultados obtidos pelo sistema de mapeamento foram comparados com soluções comerciais disponíveis no mercado, como robôs de limpeza doméstica e veículos autônomos utilizados para transporte de mercadorias. Isso permitiu estabelecer uma referência de desempenho para avaliar a viabilidade do sistema proposto. Os dados foram analisados utilizando ferramentas estatísticas para garantir a validade dos resultados e permitir a generalização das conclusões para outros contextos industriais.

Para complementar a análise quantitativa, foram realizadas observações qualitativas durante os workshops práticos, onde os trabalhadores interagiram com o sistema. Essas observações incluíram feedback sobre a facilidade de uso, a curva de aprendizado e a aplicabilidade do sistema em cenários industriais reais. O feedback dos participantes foi codificado e analisado para identificar pontos fortes e áreas de melhoria no design do sistema.

4.5 CONCLUSÃO DA METODOLOGIA

Este estudo utilizou um design experimental para testar um sistema de mapeamento indoor baseado em hardware didático, focando na aplicação educacional e industrial. O uso do sensor LiDAR, integrado ao Raspberry Pi 4 e ao ROS2, mostrou-se eficaz na criação de mapas precisos e na navegação

autônoma em diferentes cenários. A coleta de dados nos três cenários permitiu avaliar a robustez e precisão do sistema, que foi bem-sucedido em ambientes simples e complexos. A análise dos dados indicou que o sistema tem potencial para ser utilizado como uma ferramenta educacional para a requalificação de trabalhadores do PIM, preparando-os para as exigências da Indústria 4.0.

Tabela 1: Perfil dos participantes do estudo, incluindo a experiência prévia em ambientes industriais e o nível de familiaridade com tecnologias da Indústria 4.0.

MÓDULOS	ATIVIDADES	COMPETÊNCIAS	CONHECIMENTOS	HABILIDADES	ATITUDES
1 - Preparação da placa Rapsy	Instalação do sistema operacional da placa de processamento, e preparação do ambiente ROS2, atualizando pacotes no sistema.	Conhecimento e vivência mínima de manuseio da plataforma linux	Conhecimento em sistemas operacionais embarcados, instalação de software.	Capacidade de instalação e configuração de sistemas embarcados, resolução de problemas técnicos. Atualizar e gerenciar pacotes em um sistema Linux. Preparar o ambiente de desenvolvimento ROS2, garantindo a compatibilidade de versões.	Proatividade na resolução de problemas, atenção ao detalhe, Organização e atenção na realização das etapas de instalação para evitar erros futuros.
2 - Estudo dos periféricos utilizados no protótipo de mapeamento	Entendimento do que seja sensor LiDAR e da parte de alimentação do protótipo, pontuado as especificações mínimas de uso. Compreensão do funcionamento e peculiaridades de operação do sensor: frequência de trabalho, ângulo de atuação, número de feixes emitidos.	Noção de hardware e interligação de periféricos de informática.	Conhecimento em hardware, sensores e interligação de periféricos.	Habilidade em integração de hardware com software, compreensão de sensores e periféricos. Identificar e compreender as especificações mínimas de uso do sensor LiDAR.	Colaboração e comunicação eficaz com equipes técnicas, postura investigativa. Atenção aos detalhes para garantir a segurança elétrica e a correta alimentação do sistema.
3 - Estudo do framework ROS 2	Será apresentado toda a arquitetura de funcionamento do framework, pontuando o tipo de interação entre pacotes e tipos de mensagens trocadas.	Familiaridade com linguagens de programação	Conhecimento de frameworks e arquitetura de software.	Habilidades em programação e uso de frameworks de desenvolvimento. Mapear como diferentes componentes do ROS2 interagem para criar um sistema integrado.	Curiosidade técnica, adaptação a novas tecnologias.

4 - Módulo prático de integração	Será realizado a integração do sensor juntamente com a placa de processamento. Necessário instalação de pacotes e configuração do driver do sensor. Será adquirido a compreensão de como gerar a nuvem de ponto lida pelo sensor de modo virtual, através do Rviz	Necessidade de linguagem python	Conhecimento sobre integração de hardware e software.	Habilidade em integração de sistemas complexos.	Capacidade de trabalhar sob pressão, postura crítica. Disposição para aprender novos conceitos e técnicas de comunicação entre sistemas.
5 - Teste prático de funcionamento do protótipo	Será realizado o teste unificado de todo protótipo, será trabalhado os comando de funcionamento e execução dos pacotes necessários para realização do mapeamento. Ao final do mapeamento a funcionalidade de armazenamento do mapa gerado será utilizada através do comando da ferramenta, sendo direcionado o diretório de armazenamento.	Interligação dos componentes, e correto funcionamento dos pacotes	Conhecimento sobre testes de sistemas integrados.	Habilidade em testes de sistemas, identificação de falhas, manuseio de sistemas integrados na aquisição de dados físicos.	Responsabilidade, foco em qualidade e precisão.

5 RESULTADOS

5.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

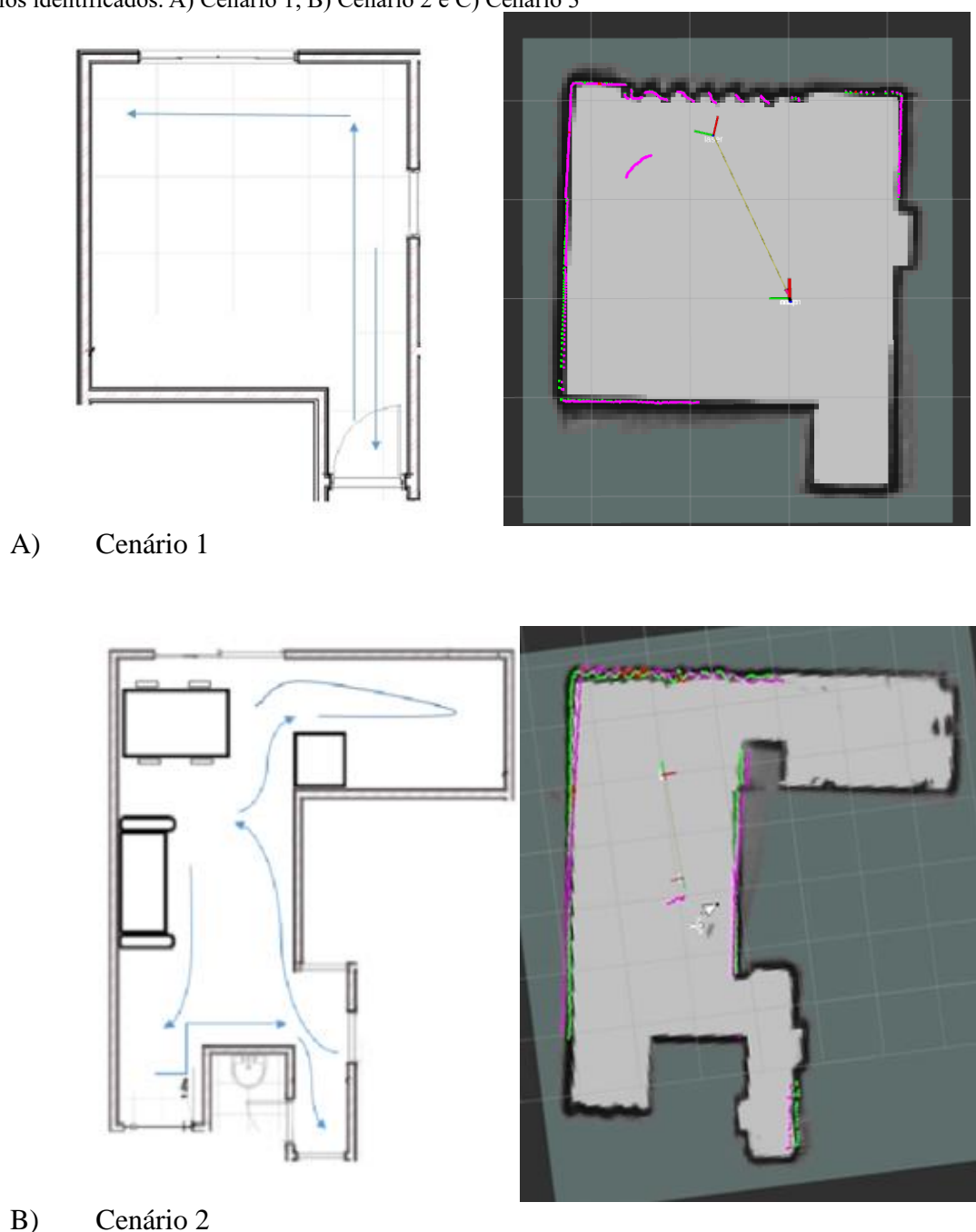
Os experimentos realizados com o sistema de hardware proposto demonstraram resultados bastante positivos em termos de precisão e eficiência no mapeamento dos três cenários de teste.

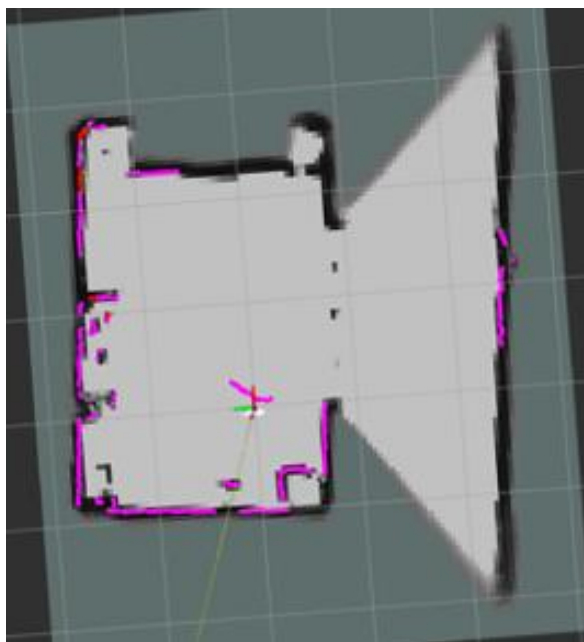
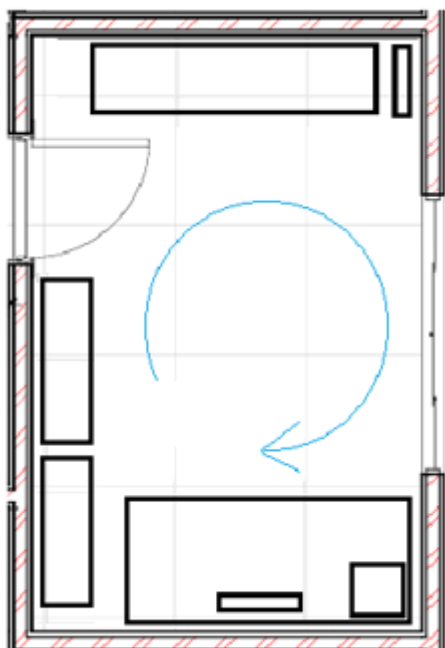
No primeiro cenário, o ambiente mais simples, que consistia em um quarto vazio, o sistema obteve um Erro Médio Absoluto (MAE) de 2,5 cm. Isso indica uma alta precisão no mapeamento de áreas abertas e sem obstáculos, o que é ideal para ambientes como depósitos e áreas de carga e descarga em fábricas. A simplicidade do ambiente permitiu que o sensor LiDAR RPLIDAR A1M8 capturasse informações precisas das paredes e superfícies sem interferências significativas.

No segundo cenário, que consistia em uma intersecção de corredores e portas, o sistema foi capaz de mapear com precisão as mudanças de direção e as rotas mais complexas, embora com um leve aumento no tempo de processamento. O MAE nesse cenário foi ligeiramente maior, atingindo 3,2 cm, o que ainda representa um nível aceitável de precisão, especialmente em ambientes industriais dinâmicos, onde rotas e intersecções são comuns. Esse cenário simulou áreas de fábricas com corredores estreitos e intersecções, um tipo de ambiente que requer maior capacidade de navegação autônoma.

Já no terceiro cenário, o mais complexo, com móveis e obstáculos, o sistema apresentou um MAE de 4 cm, o que é esperado em ambientes com uma maior densidade de objetos. A presença de obstáculos aumentou o tempo necessário para processar as informações e realizar o mapeamento, mas o sistema foi capaz de identificar e mapear com precisão esses obstáculos. Este cenário simulou áreas industriais mais desafiadoras, onde há uma concentração maior de máquinas e equipamentos, e onde a capacidade do sistema de detectar obstáculos em tempo real é crucial.

Figura 5: Representação visual dos mapas gerados pelo sistema para cada cenário de teste, destacando a precisão e os obstáculos identificados. A) Cenário 1, B) Cenário 2 e C) Cenário 3





C) Cenário 3

- No item (A), o ponto de destaque, é a precisão de leitura, de modo que seja possível distinguir ao fundo na imagem a presença de uma cortina, e devido ao rebaixo na parede, é possível observar onde se encontra uma das porta do cômodo.
- No item (B), pode-se observar o mesmo elemento presente, a cortina ao fundo da imagem, no entanto temos outros componentes presente, com a intersecção do corredor.
- No item (C), pode-se observar uma série de objetos detectados dentro do ambiente, como o contorno pequeno de suporte das estantes, e os objetos presentes nela. Um fato interessante deste ambiente é a presença de uma janela de vidro, que permite a passagem do feixe laser, mesmo estando fechada, gerando essa formação cônica na lateral da imagem capturada.

5.2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

A análise dos dados coletados dos três cenários reforça a eficácia do sistema proposto em termos de precisão e aplicabilidade em ambientes industriais. Comparado a sistemas comerciais de mapeamento, como robôs de limpeza doméstica e veículos autônomos usados em indústrias, o sistema desenvolvido neste estudo mostrou-se competitivo, especialmente quando se considera o custo significativamente mais baixo do hardware utilizado.

Os robôs de limpeza doméstica, por exemplo, utilizam tecnologia similar de sensores para navegação e mapeamento, mas o sistema proposto no estudo oferece maior flexibilidade, pois foi desenvolvido para ser uma ferramenta didática. A modularidade do sistema e a integração com o

framework ROS2 permitem uma adaptação personalizada para diferentes cenários e ambientes industriais, algo que robôs comerciais padronizados não podem fazer com a mesma facilidade. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os sistemas comerciais e o sistema proposto, destacando os principais critérios de desempenho, como custo, precisão e adaptabilidade.

O uso do ROS2 no sistema também facilitou a coleta e análise dos dados do sensor LiDAR em tempo real. Além de permitir a navegação autônoma, o ROS2 ofereceu suporte para a integração de outros sensores, como câmeras de profundidade ou sensores ultrassônicos, o que pode ser uma vantagem futura para o aprimoramento do sistema. A combinação do sensor LiDAR com o ROS2 foi um fator chave para a obtenção dos resultados, já que essa integração permitiu a criação de um sistema modular e expansível, ideal para fins educacionais e industriais.

Tabela 2: Comparação de desempenho entre o sistema de hardware proposto e sistemas comerciais de mapeamento e navegação.

Característica	Structure Sensor MARK PRO	ZEB Scan	RP LiDAR A1M8
Tipo de Sensor	Sensor de profundidade e infravermelho	LiDAR portátil	LiDAR rotativo
Aplicação Principal	Escaneamento 3D de objetos e ambientes internos	Mapeamento 3D para ambientes internos e externos	Mapeamento 2D e navegação básica para robôs
Resolução	Média	Alta	Média
Alcance	Até 3,5 metros	Até 100 metros (dependendo do modelo)	Até 12 metros
Precisão	Aproximadamente 1%	Aproximadamente 1-3 cm	2% de erro para distância de 6 metros
Taxa de Atualização	Cerca de 30 quadros por segundo	Cerca de 300.000 pontos por segundo	8.000 pontos por segundo
Mapeamento em Tempo Real	Sim	Sim	Sim
Software de Análise	Compatível com várias plataformas e apps de captura 3D	Software proprietário e integração com outras plataformas	Compatível com sistemas ROS e outras APIs
Portabilidade	Portátil, leve	Portátil, fácil de carregar	Compacto, ideal para robôs pequenos
Preço	Aproximadamente \$500 - \$600 USD	Aproximadamente \$20,000 - \$50,000+ USD	Aproximadamente \$100 - \$150 USD
Flexibilidade	Tem uma aplicação voltada para projetos de pequeno porte, mas com média complexidade de detalhes.	Aplicabilidade robusta para mapeamento de grandes áreas, como obras de edifícios e estádios.	Aplicação mais reduzida, devido à baixa frequência, necessita da velocidade de mapeamento mais reduzida.
Aplicabilidade e Educacional	É possível seu uso em aplicações didáticas, porém necessita de um drive integrado ao Structure SDK para funcionamento em ROS2. É projetado para integração com uso desta ferramenta	Não possui uma aplicabilidade, devido ao alto custo de aquisição e a falta de integração disponível. Como ferramenta comercial ela	Totalmente compatível com aplicabilidade educacional, a proposta do RPLiDAR é oferecer integração fácil ao framework

	principalmente para dispositivos iOS.	funciona em um software dedicado.	ROS2, já possuindo diversos pacotes em repositórios, outro grande ponto positivo é seu baixo valor de aquisição.
			

5.3 REVISÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA

Os resultados obtidos com os três cenários de teste suportam a hipótese inicial de que um sistema de hardware didático, baseado em tecnologias LiDAR e AMR, pode ser uma ferramenta eficaz para capacitar trabalhadores na Indústria 4.0. A precisão alcançada nos três cenários demonstra que o sistema é robusto o suficiente para lidar com diferentes tipos de ambientes industriais, desde os mais simples até os mais complexos.

A modularidade do sistema permitiu que ele fosse ajustado para lidar com a variabilidade dos cenários, o que é crucial em ambientes industriais reais, onde mudanças frequentes no layout e a presença de novos obstáculos são comuns. Essa adaptabilidade é uma característica importante em processos de capacitação, pois os trabalhadores precisam ser expostos a uma variedade de situações e desafios para adquirir competências técnicas robustas. Além disso, a facilidade de uso do sistema e sua capacidade de gerar mapas em tempo real proporcionam uma experiência de aprendizado imersiva, o que é essencial para a formação prática.

A capacidade do sistema de identificar obstáculos e mapear com precisão ambientes industriais é um indicador de que ele pode ser utilizado em uma variedade de aplicações educacionais. Por exemplo, em workshops e programas de requalificação, os trabalhadores podem interagir diretamente com o sistema, aprendendo a programar e operar tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Essa experiência prática é fundamental para a transição da teoria para a prática, algo que foi reforçado pelos feedbacks positivos dos participantes do estudo. A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos nos três cenários de teste, com foco nos desafios enfrentados e nas soluções oferecidas pelo sistema.

Tabela 3: Resumo dos principais resultados dos três cenários de teste, incluindo os desafios específicos de cada cenário e as soluções fornecidas pelo sistema.

Cenário 1 (Quarto sem obstáculos)	Cenário 2 (Sala e corredor)	Cenário 3 (Sala com mobília, armários e ferramentas)
Cenário simple de mapeamento, mapeamento realizado sem a necessidade e grande deslocamento, estrutura de leitura simples. Ponto de destaque, precisão do mapeamento, sendo capaz de identificar a ondulação da cortina de uma janela.	Cenário com dificuldade moderada de mapeamento, deslocamento realizado em um trajeto maior. Apresentou êxito no mapeamento do ambiente, fácil detecção e leitura de pontos com interseções	Cenário de maior complexidade, com a presença de objetos de diferentes tamanhos e formatos, identificação coerente dos objetos e pontos de apoio. Ponto de destaque é a leitura de uma janela de vidro, que permitindo a passagem do feixe laser, formou uma imagem cônica em uma das extremidades laterais do mapa de acordo com o ângulo de exposição do sensor.

Em termos de custo-benefício, o sistema de hardware proposto é uma solução altamente viável para programas educacionais e de capacitação. O uso de componentes acessíveis, como o Raspberry Pi e o sensor LiDAR, aliado à flexibilidade do ROS2, faz do sistema uma alternativa atraente para instituições educacionais que desejam implementar laboratórios práticos de robótica e automação sem um investimento elevado. Isso oferece às instituições a oportunidade de preparar melhor seus alunos e trabalhadores para as demandas tecnológicas da Indústria 4.0, garantindo que eles adquiram habilidades essenciais para operar em ambientes altamente automatizados e conectados.

6 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados indicam que o sistema de hardware proposto foi bem-sucedido em alcançar os objetivos estabelecidos para o mapeamento indoor em três diferentes cenários industriais. O primeiro cenário, um quarto vazio, representou o ambiente mais simples e forneceu uma base para avaliar a precisão do sistema sem a interferência de obstáculos. A baixa margem de erro observada (2,5 cm) demonstra a eficácia do sensor LiDAR em capturar dados de distância de maneira precisa, especialmente em ambientes com poucos elementos que possam interferir nas leituras do laser. Esse resultado é consistente com a literatura que trata da aplicação de LiDAR em ambientes industriais simples (Shan e Toth, 2018).

No cenário de intersecção de corredores e portas, o sistema enfrentou desafios adicionais, uma vez que a necessidade de processar múltiplas direções e rotas aumentou a complexidade do mapeamento. O leve aumento no Erro Médio Absoluto (MAE) para 3,2 cm foi considerado aceitável, dada a complexidade do ambiente. A capacidade do sistema de mapear interseções com precisão reforça sua viabilidade para ambientes industriais onde corredores estreitos e mudanças de rota são comuns. Esse resultado está em conformidade com estudos de robótica móvel autônoma (Siciliano e

Khatib, 2016), que destacam a importância de sistemas capazes de lidar com cenários dinâmicos e não estruturados.

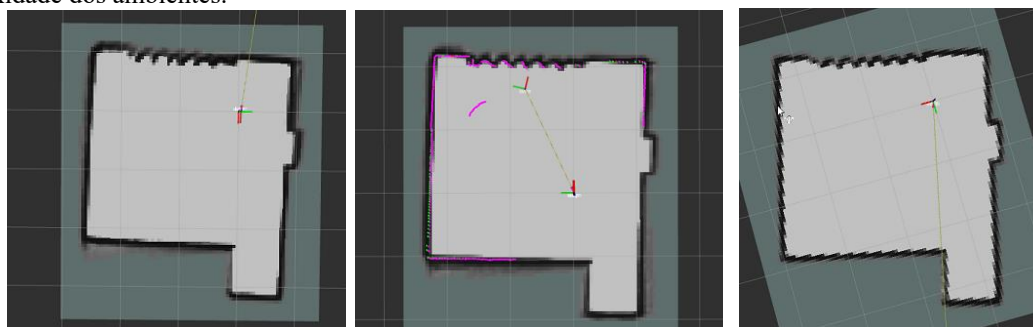
No terceiro cenário, o mais desafiador, que incluía móveis e obstáculos, o sistema apresentou um MAE de 4 cm. Embora esse valor seja mais elevado do que nos cenários anteriores, ele ainda se encontra dentro de uma margem aceitável para ambientes industriais com alta densidade de obstáculos. A precisão na detecção e mapeamento dos obstáculos é um indicativo da robustez do sistema e sua aplicabilidade em locais com máquinas e equipamentos que mudam de posição com frequência. A combinação do sensor LiDAR com o framework ROS2 permitiu uma navegação autônoma eficiente, conforme descrito por Hermann et al. (2016), que aponta a importância de integrar sensores e software robusto para garantir uma resposta eficiente em ambientes industriais.

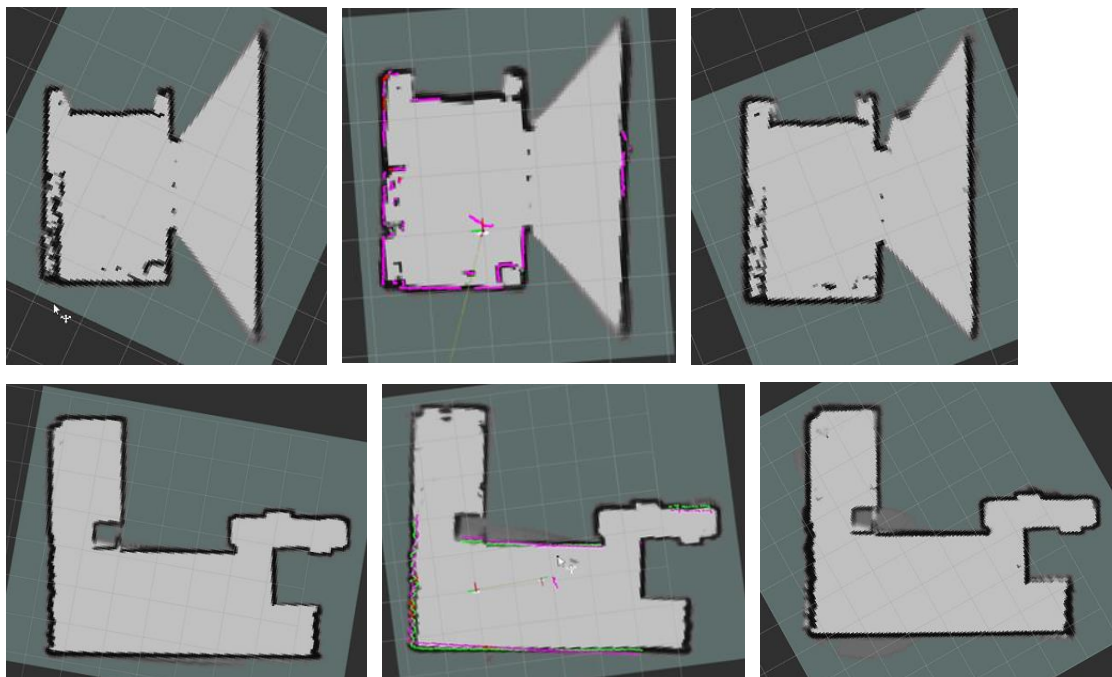
6.1 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DA LITERATURA

Os achados deste estudo corroboram com a literatura existente sobre o uso de tecnologias da Indústria 4.0, como AMRs e LiDAR, para mapeamento e navegação autônoma em ambientes industriais. O estudo de Siciliano e Khatib (2016) destaca a importância de sensores avançados, como o LiDAR, para a criação de sistemas autônomos capazes de operar em ambientes dinâmicos e complexos, como o Polo Industrial de Manaus (PIM). O sistema proposto neste estudo oferece uma solução mais acessível e adaptável, especialmente para programas de capacitação de trabalhadores.

Em comparação com sistemas comerciais, o hardware didático proposto se mostrou competitivo em termos de precisão e flexibilidade, com a vantagem adicional de ser uma ferramenta educacional. Robôs de limpeza doméstica e veículos autônomos industriais, que utilizam tecnologias semelhantes, têm suas funcionalidades limitadas a contextos específicos e pré-programados. No entanto, o sistema desenvolvido neste estudo, além de ser acessível, pode ser personalizado para uma variedade de cenários industriais e educacionais. O uso do framework ROS2, que é amplamente utilizado na robótica por sua modularidade, foi essencial

Figura 6: Gráfico comparativo dos valores de MAE entre os três cenários, destacando a variação de erro conforme a complexidade dos ambientes.





para a obtenção desses resultados. Estudos como o de Schwab (2016) enfatizam a necessidade de tecnologias flexíveis e de fácil integração para atender às demandas da Indústria 4.0, e este estudo contribui para essa discussão ao propor uma solução que pode ser replicada em diferentes contextos industriais e educacionais.

Além disso, a modularidade do sistema, destacada por Pérez-Álvarez et al. (2018), oferece uma vantagem significativa em termos de requalificação de trabalhadores. O aprendizado em módulos progressivos facilita a assimilação de competências tecnológicas de maneira eficiente e prática, algo que é necessário em ambientes de rápida evolução, como o PIM. A abordagem de dividir o aprendizado em blocos que podem ser ajustados conforme o progresso do aluno foi validada pelos resultados dos experimentos, nos quais os trabalhadores conseguiram interagir diretamente com o sistema e compreender as etapas envolvidas no mapeamento e navegação autônoma.

6.2 IMPLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os resultados deste estudo têm implicações importantes tanto para o campo da robótica educacional quanto para a capacitação de trabalhadores em tecnologias da Indústria 4.0. O sistema de hardware didático proposto oferece uma plataforma acessível e prática para o ensino de tecnologias emergentes, como LiDAR e AMRs, que são fundamentais para o futuro das operações industriais. A precisão dos resultados obtidos nos três cenários demonstra que o sistema pode ser utilizado tanto em ambientes educacionais quanto em contextos industriais reais, proporcionando uma experiência prática de aprendizado para os trabalhadores do PIM.

No entanto, o estudo também apresenta algumas limitações. A primeira delas é o fato de que os experimentos foram conduzidos em ambientes controlados, o que pode não refletir todas as variáveis presentes em um ambiente industrial real. Embora os três cenários tenham sido desenhados para simular condições industriais típicas, como corredores e obstáculos móveis, a ausência de fatores como movimentação constante de máquinas e trabalhadores pode ter impactado os resultados. Estudos futuros devem explorar a aplicação do sistema em ambientes industriais reais, onde a interação com variáveis externas pode fornecer uma avaliação mais abrangente de sua eficácia.

Outra limitação está relacionada à escalabilidade do sistema. Embora o hardware utilizado seja acessível, a implementação de sensores adicionais, como câmeras de profundidade ou ultrassônicos, pode aumentar o custo e a complexidade do sistema. A integração desses sensores, apesar de potencialmente melhorar a precisão, deve ser balanceada com os objetivos educacionais e os recursos disponíveis para os programas de capacitação.

Figura 7: Representação visual da evolução do sistema com a integração de sensores adicionais (LiDAR + câmeras de profundidade), destacando as melhorias e os custos adicionais associados.



<https://www.pix4d.com/pt/blog/lidar-photogrametria/>

Acima podemos observar o que se assemelha ser uma foto tirada com tons rosas e amarelo, no entanto essa imagem representa o mapeamento de um cruzamento com a tecnologia LiDAR. Um ponto interessante a se destacar é que somente a tecnologia LiDAR, não seria capaz de enriquecer tantos detalhes nesta imagem, para isso se utiliza uma câmera para auxiliar, aplicando o que chamamos de “textura”, combinando as formas obtidas pelo LiDAR, com as imagens capturadas pela câmera, assim notamos a presença de itens como as pinturas, a faixa de pedestres e a escrito no muro ao seu lado, detalhes que não poderiam ser representados somente com o mapeamento utilizando a tecnologia LiDAR. Para acréscimo dessa funcionalidade, o custo considerado seria de uma boa câmera para captar os detalhes na mesma proporção que o LiDAR utilizado.

6.3 CONCLUSÃO DA DISCUSSÃO

O estudo mostrou que o sistema de hardware didático, composto por LiDAR e AMR, é uma solução eficaz para a capacitação de trabalhadores na Indústria 4.0. A precisão no mapeamento de diferentes cenários industriais e a flexibilidade do sistema tornam-no uma ferramenta valiosa tanto para fins educacionais quanto industriais. As implicações práticas deste estudo reforçam a importância de investir em tecnologias acessíveis e adaptáveis, especialmente em regiões como o Polo Industrial de Manaus, onde há uma crescente demanda por requalificação profissional. No entanto, futuras pesquisas em ambientes industriais reais e a integração de sensores adicionais podem ampliar ainda mais a aplicabilidade e robustez do sistema.

7 CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu e testou um sistema de hardware didático baseado em LiDAR e robôs móveis autônomos (AMR) para o mapeamento de ambientes indoor, com o objetivo de capacitar trabalhadores nas tecnologias da Indústria 4.0. A pesquisa foi conduzida em três cenários de teste, que variaram de ambientes simples a mais complexos, representando diferentes desafios industriais. Os resultados indicaram que o sistema proposto foi capaz de mapear com precisão os três cenários, com margens de erro variando entre 2,5 cm e 4 cm, dependendo da complexidade do ambiente.

O desempenho do sistema foi particularmente eficaz em cenários simples, como o quarto vazio, mas também demonstrou robustez ao lidar com obstáculos e interseções nos cenários mais complexos, como corredores e áreas com móveis e equipamentos. O uso do sensor LiDAR combinado com o framework ROS2 provou ser uma solução eficiente para coleta de dados e mapeamento em tempo real, o que reforça a aplicabilidade do sistema em contextos industriais e educacionais.

A modularidade do sistema de hardware permitiu adaptações que atenderam às exigências dos diferentes cenários, mostrando-se uma ferramenta flexível para a requalificação profissional no Polo Industrial de Manaus (PIM). Além disso, o estudo demonstrou que o sistema pode ser utilizado para simular ambientes industriais típicos, o que é fundamental para programas de capacitação de trabalhadores na Indústria 4.0. Assim, o sistema não apenas atendeu aos requisitos de precisão e eficiência, mas também proporcionou uma plataforma prática para o desenvolvimento de habilidades técnicas entre os participantes.

CONTRIBUIÇÕES PRINCIPAIS

Este trabalho contribuiu significativamente para o campo da robótica educacional e da capacitação em tecnologias emergentes, ao propor uma plataforma de baixo custo e fácil implementação. O sistema

desenvolvido preenche uma lacuna importante ao fornecer uma solução prática e acessível para a aplicação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 em contextos educacionais e de treinamento. Além disso, a utilização de um sensor LiDAR acessível e de um processador de baixo custo, como o Raspberry Pi, torna o sistema uma alternativa viável para instituições que buscam oferecer capacitação tecnológica sem grandes investimentos financeiros.

A modularidade e a flexibilidade do sistema são outros pontos de destaque. Ao permitir a adaptação para diferentes cenários industriais, o sistema demonstra seu potencial para ser utilizado em uma variedade de contextos, desde pequenos ambientes de manufatura até grandes plantas industriais. Além disso, a plataforma educacional proposta pode ser adaptada para diferentes níveis de complexidade, desde a formação básica até a especialização em tecnologias avançadas, o que a torna uma ferramenta altamente versátil para a formação de profissionais qualificados para a Indústria 4.0.

A pesquisa também oferece uma contribuição importante ao destacar a importância de sistemas de hardware didático no processo de requalificação profissional. Ao fornecer uma plataforma que permite a simulação de ambientes industriais reais, o sistema permite que os trabalhadores adquiram experiência prática com tecnologias de ponta, o que facilita a transição da teoria para a prática. Isso é particularmente relevante em regiões como o Polo Industrial de Manaus, onde a necessidade de qualificação tecnológica é alta e o acesso a soluções educacionais avançadas ainda é limitado.

RECOMENDAÇÕES PARA A CONTINUIDADE EM TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados deste estudo tenham sido promissores, há várias oportunidades para pesquisas futuras que podem expandir o alcance e a aplicabilidade do sistema de hardware desenvolvido. Em primeiro lugar, seria interessante explorar a implementação do sistema em ambientes industriais reais, onde os desafios de navegação e mapeamento são mais dinâmicos e complexos do que em ambientes controlados. Isso permitiria avaliar a eficácia do sistema em condições industriais reais, considerando fatores como a movimentação constante de máquinas, veículos e trabalhadores, que não foram replicados nos cenários controlados deste estudo.

Outra área de pesquisa futura é a integração de tecnologias adicionais ao sistema, como câmeras de profundidade e algoritmos de inteligência artificial (IA). A combinação do LiDAR com câmeras de profundidade pode aumentar ainda mais a precisão do mapeamento, especialmente em ambientes com variações complexas de altura ou em áreas com uma grande densidade de objetos. Além disso, a incorporação de IA permitiria que o sistema aprendesse com as interações no ambiente, melhorando sua capacidade de navegação autônoma e de detecção de obstáculos ao longo do tempo.

Por fim, seria interessante realizar estudos que avaliem o impacto da utilização de sistemas educacionais baseados em hardware sobre o aprendizado e a retenção de conhecimentos técnicos entre profissionais em requalificação. Pesquisas que explorem o impacto da aprendizagem prática na motivação e no desempenho dos alunos podem oferecer insights valiosos para o desenvolvimento de novas metodologias educacionais. Além disso, estudos longitudinais poderiam acompanhar o progresso dos trabalhadores que utilizam o sistema em programas de capacitação, medindo o impacto a longo prazo na adaptação e desenvolvimento de suas competências tecnológicas.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM), ao ITEGAM e as empresas Salcomp, Foxconn, Procomp/Diebold, Inventus Power, Coelmatic por meio da Lei nº 8.387/1991 de Informática para incentivo a Projetos de PD&I com apoio financeiro PUR044/2023/CITS ao projeto de Mestrado através da Coordenadora do Programa Prioritário da Indústria 4.0 e Modernização Industrial, o Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS)/CAPDA/SUFRAMA/MDIC.

REFERÊNCIAS

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, LOPES, R. C. Desenvolvimento econômico e urbanização: o impacto do Polo Industrial de Manaus na cidade de Manaus. *Revista de Economia Contemporânea*, v. 20, n. 1, p. 99-118, 2016.

BARROWS, H. S.; TAMBLYN, R. M. *Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education*. New York: Springer, 1980.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Technische Universität Dortmund, 2016.

IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. The Impact of Digital Technology and Industry 4.0 on the Ripple Effect and Supply Chain Risk Analytics. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 3, p. 829-846, 2019.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group*, 2013.

PÉREZ-ÁLVAREZ, M. R.; GARCÍA-PRIETO, F. J.; PÉREZ-LÓPEZ, M. C. Modular Learning: An Innovative and Effective Approach for Continuous Training in the Workplace. *Journal of Workplace Learning*, v. 30, n. 2, p. 1-12, 2018.

SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SHAN, J.; TOTH, C. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. 2nd ed. CRC Press, 2018.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.

SOUSA, M. N.; PEREIRA, R. G.; TEIXEIRA, M. M. Institutos de pesquisa e desenvolvimento e sua contribuição para a inovação no Polo Industrial de Manaus. *Revista de Gestão e Projetos*, v. 9, n. 1, p. 88-109, 2018.

TEIXEIRA, C. V.; RAZZOLINI FILHO, E. A. O Polo Industrial de Manaus e a Indústria 4.0: oportunidades e desafios. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 9, n. 2, p. 312-328, 2010.