

# 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Desenvolvimento de um gêmeo digital realístico para inspeção 3D submarina com ROV na indústria de petróleo e gás

## AUTORES:

Daniel Juchem Regner<sup>1</sup>, Gustavo Vieira Alcântara<sup>1</sup>, Raphael Frezza Klabunde<sup>1</sup>, João Facco de Andrade<sup>1</sup>, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto<sup>1</sup>, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior<sup>1</sup>

## INSTITUIÇÃO:

<sup>1</sup> LABMETRO / EMC / Universidade Federal de Santa Catarina

## DESENVOLVIMENTO DE UM GÊMEO DIGITAL REALÍSTICO PARA INSPEÇÃO 3D SUBMARINA COM ROV NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

### Resumo

A inspeção subaquática de estruturas offshore na indústria de petróleo e gás é um processo crítico, visto que é imprescindível que estes componentes sejam regularmente inspecionados, garantindo a confiabilidade e segurança estrutural. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um ambiente de simulação realista que se comporta como um gêmeo digital destinado à inspeção dessas estruturas realizada remotamente por um Veículo subaquático Operado Remotamente (ROV). O objetivo é permitir a operação remota do ROV e a inspeção 3D detalhada dos elementos de interesse, otimizando a eficiência e a segurança das operações. O projeto envolve o desenvolvimento de sistemas de medição que serão integrados ao ROV. Esses sistemas capturam dados em tempo real e atualizam o gêmeo digital, proporcionando uma representação virtual precisa do ROV e do ambiente subaquático. Esse gêmeo digital não só espelha o comportamento do ROV e das estruturas inspecionadas em tempo real, mas também serve como uma plataforma de simulação para o desenvolvimento de soluções de inspeção óptica 3D. O estado da arte em ambientes de simulação e gêmeos digitais subaquáticos é analisado, destacando as tecnologias e metodologias mais recentes empregadas na criação de simulações realísticas. A plataforma escolhida para o desenvolvimento deste projeto é discutida, justificando sua adequação e vantagens para a aplicação proposta. Os primeiros resultados do desenvolvimento do ambiente de simulação mostram uma alta fidelidade no controle de movimentação do ROV. Os trabalhos futuros do projeto incluem a ampliação das capacidades do gêmeo digital para incorporar mais variáveis ambientais e operacionais, o refinamento das técnicas de inspeção óptica, e a validação do sistema em condições reais de operação. O futuro desenvolvimento deste gêmeo digital realístico deve representar um avanço significativo na inspeção 3D subaquática de estruturas offshore, proporcionando uma ferramenta robusta para a operação remota de ROVs e a inspeção quantitativa detalhada de elementos críticos na indústria de petróleo e gás.

Palavras-chave: Inspeção subaquática, Gêmeo digital, ROV, plataforma offshore, indústria óleo e gás.

### Abstract

It is of the utmost importance that offshore structures in the oil and gas industry undergo regular underwater inspection. This is because it is essential to guarantee the structural reliability and safety of these components. This work presents the development of a realistic simulation environment that functions as a digital twin for the inspection of offshore structures, conducted remotely by a Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV). The objective is to facilitate the remote operation of the ROV and a comprehensive 3D inspection of the relevant components, thereby enhancing the efficiency and safety of operations. The project comprises the development of measurement systems for integration into the ROV. The aforementioned systems capture data in real time, thereby updating the digital twin and providing an accurate virtual representation of the ROV and the underwater environment. The digital twin not only reflects the behavior of the ROV and the inspected structures in real time, but also serves as a simulation platform for the development of 3D optical inspection solutions. This paper presents an analysis of the current state of the art in the field of underwater simulation environments and digital twins, with a particular focus on the latest technologies and methodologies employed in the creation of

realistic simulations. The selection of the platform for the project's development is subjected to a comprehensive examination, with specific focus on the rationale behind its choice and the advantages it bestows upon the proposed application. The preliminary results of the simulation environment's development indicate a high degree of precision in the control of the ROV's movements. The project will proceed with the expansion of the digital twin's capabilities to incorporate additional environmental and operational variables, the refinement of optical inspection techniques, and the validation of the system under real operating conditions. It is anticipated that the prospective evolution of this realistic digital twin will constitute a substantial advancement in the domain of underwater 3D inspection of offshore structures. It will serve as a robust instrument for the remote operation of ROVs and the comprehensive quantitative inspection of pivotal components within the oil and gas industry.

Keywords: Underwater Inspection, Digital Twin, ROV, offshore platform, oil & gas industry.

### Introdução

A inspeção subaquática com Veículos Subaquáticos Operados Remotamente, *Remotely Operated underwater Vehicle*, (ROVs) é amplamente utilizada em diversas indústrias, como petróleo e gás, energia, pesquisa oceanográfica e infraestrutura (KOENIG; HOWARD, 2004). Esses veículos, controlados remotamente, são equipados com câmeras, sonares, sensores e ferramentas, permitindo realizar inspeções e intervenções em ambientes subaquáticos de forma segura e eficiente, mesmo em profundidades e locais perigosos. Os ROVs possibilitam o acesso a áreas inacessíveis para mergulhadores humanos e a gravação de dados para análise posterior. Além disso, são utilizados na exploração de naufrágios (Mogstad et al., 2020), inspeções de reservatórios e controle da fauna aquática (MA et al., 2023; FANG et al., 2023; PRICE et al., 2019). Na indústria de Petróleo e Gás, são usados para análise de deformações, inspeções de equipamentos e manutenção de dutos em águas profundas (CARDAILLAC; SKJETNE; LUDVIGSEN, 2024; CHEMISKY et al., 2021).

O Laboratório de Metrologia e Automação (LABMETRO) desenvolveu, com financiamento da FINEP, o projeto "Veículo Operado Remotamente para Inspeção Submarina - VORIS", que visa incorporar quatro técnicas de medição ópticas ao ROV para melhorar a qualidade das inspeções subaquáticas. O projeto também inclui a criação de um ambiente tridimensional de realidade virtual para auxiliar os operadores, aumentando a qualidade metrológica, reduzindo custos e minimizando os riscos de acidentes.

Contudo, o uso de ROVs apresenta desafios, como altos custos de aquisição e manutenção, necessidade de equipes especializadas e dificuldades de comunicação e controle em ambientes subaquáticos. O desenvolvimento de novos ROVs exige testes extensivos em ambientes reais, o que é logisticamente complexo e caro, devido às condições extremas, como alta pressão, baixa temperatura e salinidade, que impõem restrições severas aos materiais e componentes.

Para enfrentar esses desafios, a tecnologia de Gêmeos Digitais, *Digital Twins* (GRIEVES; VICKERS, 2016; YIN et al., 2023), tem se destacado. Esses modelos digitais multi-físicos, alimentados por dados sensoriais, permitem simulações detalhadas e testes rigorosos sem a necessidade de hardware físico, otimizando operações industriais (SU et al., 2023; XU et al., 2021). No caso dos ROVs, os gêmeos digitais permitem testar e validar novos designs e algoritmos de controle em ambientes virtuais, reduzindo custos e riscos associados aos testes em campo, além de fornecer percepções valiosas para a melhoria contínua dos sistemas.

Atualmente, existem três principais plataformas de simulação são usadas para os ROVs: NVIDIA Isaac Simulator (NVIDIA CORPORATION, 2024), Unreal Engine (EPIC GAMES, 2024) e Gazebo Sim (OPEN ROBOTICS, 2024). Elas oferecem abordagens distintas para o desenvolvimento e teste de Veículos Operados Remotamente (ROVs). O NVIDIA Isaac Simulator destaca-se pelo realismo gráfico e precisão física, utilizando o poder das GPUs NVIDIA para simulações detalhadas, embora exija hardware específico e apresente uma curva de aprendizado acentuada. Por outro lado, o Unreal Engine é amplamente utilizado para simulações que requerem gráficos avançados e ambientes altamente customizáveis, sendo ideal para o desenvolvimento de datasets sintéticos e o treinamento de redes neurais, apesar de também demandar hardware potente e conhecimentos sob a plataforma. Já o Gazebo Sim, de código aberto e integrado ao *Robot Operating System* (ROS), é preferido por pesquisadores para simulações realistas e precisas de robôs, com a vantagem de facilitar a transferência de algoritmos entre o ambiente virtual e o mundo físico, ainda que tenha gráficos menos sofisticados e exija conhecimento técnico para configuração inicial. Juntas, essas plataformas oferecem uma gama de recursos que aprimoram o desenvolvimento, a validação e a otimização dos sistemas ROVs em diversos cenários onde a robótica móvel pode ser aplicada, não somente em ambientes subaquáticos.

Figura 1 – Exemplos de ambientes desenvolvidos em Isaac Simulator, Unreal Engine e Gazebo Sim.



Diante das características apresentadas, optou-se por buscar ambientes subaquáticos pré-estruturados e com código aberto para utilização e modificação conforme as necessidades do projeto VORIS. As plataformas avaliadas oferecem diferentes vantagens e desvantagens, sendo necessário considerar o equilíbrio entre realismo gráfico, facilidade de integração e custos envolvidos. Utilizar ambientes já desenvolvidos permitirá uma implementação mais rápida e eficiente dos sistemas de medição ópticos, facilitando o desenvolvimento e testes em condições controladas antes da aplicação em cenários reais.

## Metodologia

O projeto VORIS está desenvolvendo sistemas de medição ópticos para serem embarcados em um ROV simples, com código aberto, que permita a implementação de sistemas de terceiros. Nesse contexto, o modelo BlueROV2 (BLUE ROBOTICS, 2017) surgiu como uma solução ideal. O BlueROV2 é um ROV de classe profissional, oferecendo operações estáveis e confiáveis a um valor acessível. Ele é altamente customizável, permitindo a integração de diferentes sensores e câmeras ao sistema base. Além disso, a Blue Robotics oferece uma variedade de acessórios e componentes adicionais para personalizar e aprimorar as capacidades dos seus ROVs, tornando-os populares entre pesquisadores, empresas de inspeção subaquática, educadores e entusiastas da tecnologia subaquática.

O objetivo do projeto VORIS é desenvolver diferentes técnicas de medição óptica, utilizando diversas configurações de câmeras e lentes. As três técnicas propostas são: estereoscopia passiva com

algoritmos de SLAM (DURRANT-WHYTE; BAILEY, 2006), estereoscopia ativa com projeção laser e estereoscopia ativa com projeção de franjas. Embora os sistemas operem de forma independente, eles possuem campos de visão complementares, com cada técnica trabalhando em uma faixa específica de distância de inspeção e nível de detalhe. Portanto, é essencial que o ambiente de desenvolvimento permita a fácil alteração dos parâmetros intrínsecos de câmeras e lentes, por exemplo.

Também é crucial que a API disponibilize sensores como IMU e sonares. Além disso, desejamos alterar o cenário da simulação para construir um gêmeo digital da piscina onde serão realizados os testes e provas de conceito, com realismo suficiente para garantir uma transição suave dos algoritmos desenvolvidos em simulação para a vida real.

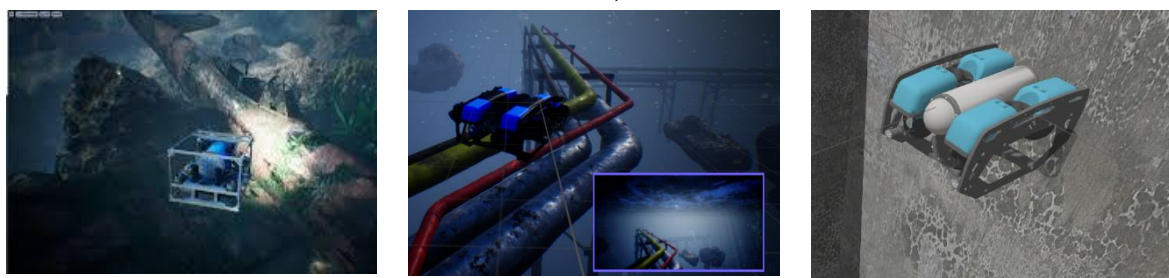
Figura 2 – BlueROV2 e suas diferentes configurações e acessórios disponíveis pela empresa (BLUE ROBOTICS, 2017).



Sob a plataforma Unreal Engine, há dois ambientes bem estabelecidos: HoloOcean, Figura 3a, e UNav-Sim, Figura 3b. HoloOcean foi desenvolvido no escopo de um projeto de P&D com o intuito de auxiliar na implementação e integração de sonares na simulação (POTOKAR et al., 2022a, 2022b). Já o UNav-Sim foi construído para testar algoritmos de navegação e controle em um ambiente 3D realístico (AMER et al., 2023). No entanto, a utilização desses ambientes requer conhecimento em modelagem na plataforma Unreal Engine, além de enfrentar desafios devido à escassa documentação sobre a alteração de parâmetros de sensores.

Por outro lado, MANHAES et al., desenvolveram um ambiente subaquático para Gazebo Sim que inclui descritores de física de fluidos através de plugins modulares de hidrostática e efeitos hidrodinâmicos, interagindo com sensores e atuadores. Isso permite uma simulação mais realista de ambientes subaquáticos. Graças a este trabalho, o Gazebo Sim incorporou esses plugins em sua biblioteca base, permitindo a criação de diversos ambientes subaquáticos pela comunidade. Um desses ambientes é o Orca4 (MCQUEEN, 2022), Figura 3c, um conjunto de pacotes ROS2 que fornece funcionalidade básica de AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) para o Blue Robotics BlueROV2, utilizando bibliotecas que fazem a ponte entre ArduSub e Gazebo. ArduSub (BLUE ROBOTICS, 2024) é uma solução de controlador de código aberto para veículos subaquáticos, oferecendo controle preciso para garantir que o veículo mantenha profundidade e direção adequadas.

Figura 3 – Ambientes de simulação (POTOKAR et al., 2022a; AMER et al., 2023; MCQUEEN, 2022).



(a) HoloOcean

(b) UNav-Sim

(c) Orca4

A escolha de utilizar plataforma Gazebo Sim, deve-se, além de ser fácil a transição de códigos desenvolvidos em simulação para prática por suportar nativamente ROS2, pela experiência que a equipe possui com desenvolvimento de ambientes de simulação de *drones* em inspeções fotogramétricas 3D de *risers* (DUENAS SALAZAR et al., 2019).

A utilização de Gazebo Ignition permite maior precisão nas simulações devido aos novos motores de física e renderização. No entanto, a curva de aprendizado pode ser íngreme devido à necessidade de adaptar bibliotecas e ferramentas que ainda estão em transição do Gazebo clássico para o Ignition. Além disso, a comunidade de desenvolvedores está constantemente atualizando e melhorando a integração com ROS2, o que significa que futuras versões do Ignition podem mitigar algumas dessas limitações atuais.

Como o ambiente de simulação em Gazebo Sim está completamente atrelado a versão de ROS Humble e, por sua vez, suporta nativamente específicas distribuições do sistema operacional Linux Ubuntu 22.04 (*Jammy Jellyfish*) um computador foi configurado para que os requisitos mínimos sejam sanados. Após o funcionamento mínimo da versão inicial do ambiente de simulação utilizado.

O ambiente Orca4 foi desenvolvido no Gazebo Ignition, uma versão mais recente e avançada do ambiente clássico de simulação Gazebo. Esta nova versão utiliza motores de física mais modernos e renderizações mais sofisticadas, além de permitir que as simulações sejam distribuídas em uma rede de computadores graças à sua arquitetura modular. No entanto, apesar do desenvolvimento contínuo, o Gazebo Ignition ainda não oferece todas as funcionalidades encontradas na versão clássica do Gazebo, especialmente em relação à integração com o ROS. Isso resulta em incompatibilidades com algumas bibliotecas existentes no Gazebo clássico, que são essenciais para a modularização na construção de sensores. Essas bibliotecas ainda estão em fase de transição, o que limita a análise de robustez de algoritmos no Gazebo Ignition.

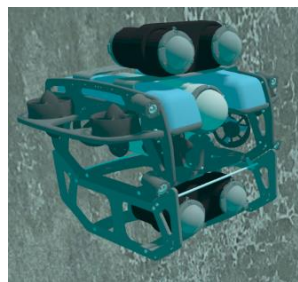
## Resultados e Discussão

Devido a fácil modularização de cenários e robôs, foi possível construir um ambiente similar a piscina que será utilizada para testes, além da adição de alguns corpos de prova com textura para uma análise da reconstrução tridimensional através de técnicas de fotogrametria, Figura 4a. Também foi alterado o modelo do ROV para configuração heavy e adicionado alguns encapsulamentos contendo sistema estéreo de câmeras para processamento e avaliação do algoritmo ORB SLAM 3 (CAMPOS et al., 2021) como dado de entrada na estimação de posição no controlador ArduSub, o qual realiza uma estimação de posição com a fusão de informação do SLAM, IMU e barômetro.

Figura 4 – Cenário semelhante à piscina de testes com modelos para reconstrução tridimensional.



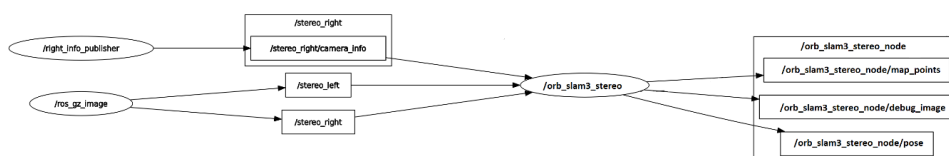
Ambiente simulação



BlueROV2 configuração *heavy*.

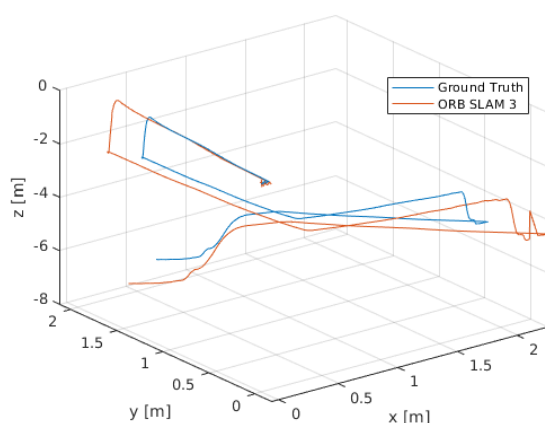
Através do sistema estéreo de câmeras adicionado ao modelo do ROV, foi realizada a integração com o algoritmo ORB SLAM 3, que gera uma nuvem esparsa de pontos para auto localização, retornando o vetor de posição do ROV. O ORB SLAM 3 é um algoritmo de mapeamento e localização visual simultâneos (SLAM) que utiliza características visuais extraídas de câmeras para construir e atualizar mapas 3D de ambientes em tempo real, essencial para navegação autônoma em ambientes desconhecidos. Para utilização deste algoritmo em simulação é necessário que seja construído sensores tipo câmera associados ao modelo do robô em questão. As imagens serão publicadas periodicamente na interface de comunicação do Gazebo Sim e, através de bibliotecas de transformação, serão interpretadas no formato desejado pelo ROS2 e publicadas nos devidos tópicos, assim como a publicação do tópico de informações dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera da direita do sistema estéreo. Feito esta ponte, um terceiro processo irá ler as informações dos tópicos, fazendo uma ponte com ROS2 e o algoritmo ORB SLAM 3, onde então publicará a posição estimada e o mapa de pontos 3D.

Figura 5 – Comunicação entre *nodos* para processamento do algoritmo ORB SLAM 3.

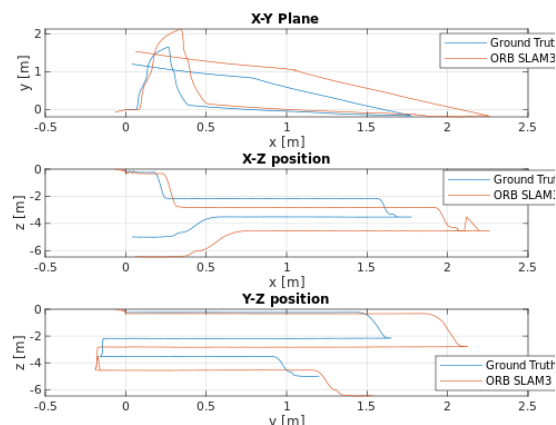


Para avaliar se o algoritmo é capaz de estimar a posição do ROV com uma certa fidelidade, foi realizado um teste no ambiente simulado descrito anteriormente e registrado as posições reais do ROV e as posições estimadas pelo SLAM. A Figura 6a apresenta a estimacão de posição e a posição original do ROV no espaço, e a Figura 6b comparação nos planos XY, XZ e YZ. Apesar do algoritmo ser capaz de acompanhar a trajetória real do ROV, existe um erro sistemático da posição que deve ser levada em consideração nos desenvolvimentos futuros.

Figura 6 – Resultados da utilização do algoritmo ORB SLAM 3 no ambiente de simulação.



Comparação estimação da posição



Comparação de posição nos planos.

## Conclusões

O desenvolvimento do projeto VORIS, utilizando ROVs e técnicas avançadas de medição óptica, representa um significativo avanço nas capacidades de inspeção subaquática. A implementação dos gêmeos digitais por meio de ambientes de simulação, como o Gazebo Ignition, permite uma transição eficiente e segura dos algoritmos desenvolvidos em simulação para testes práticos. A escolha pelo Gazebo Sim foi motivada pela sua robusta integração com ROS2, facilitando a modularização de cenários e robôs, e pela experiência prévia da equipe no desenvolvimento de ambientes de simulação. Contudo, o projeto enfrentou desafios, especialmente em relação à compatibilidade de bibliotecas entre as versões clássica e Ignition do Gazebo, o que limitou a análise de robustez de alguns algoritmos. A contínua evolução dessas ferramentas é essencial para superar essas limitações e expandir as capacidades dos ROVs.

A capacidade de simular ambientes complexos e testar algoritmos como o ORB SLAM 3 antes de implementá-los em hardware real é um grande avanço para a indústria de robótica subaquática. Isso não só reduz custos e riscos associados a testes em campo, mas também acelera o desenvolvimento de soluções robustas para inspeções subaquáticas.

Nos próximos passos, o projeto VORIS deve focar no aprimoramento da integração com o Gazebo Ignition. Além disso, é crucial realizar testes extensivos dos sistemas de medição óptica em ambientes reais e melhorar a precisão e eficiência dos algoritmos utilizados.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FINEP pelo apoio financeiro ao projeto VORIS, à bolsa de estudos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI e ao Labmetro da UFSC pelo espaço fornecido para desenvolvimento de pesquisa.

## **Referências Bibliográficas**

- AMER, A. et al. **UNav-Sim: A Visually Realistic Underwater Robotics Simulator and Synthetic Data-Generation Framework**. 2023 21st International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2023. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.
- APPLEBY, S. et al. **SWiMM DEEPeR: A Simulated Underwater Environment for Tracking Marine Mammals Using Deep Reinforcement Learning and BlueROV2**. IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, CIG. **Anais...**IEEE Computer Society, 2023.
- BLUE ROBOTICS. **BlueROV2 Technical Specifications**. [s.l: s.n.].
- BLUE ROBOTICS. **ArduSub**. Disponível em: <<https://www.ardubot.com/>>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- BONDI, E. et al. **AirSim-W: A simulation environment for wildlife conservation with UAVs**. Proceedings of the 1st ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies, COMPASS 2018. **Anais...**Association for Computing Machinery, Inc, 20 jun. 2018.
- CAMPOS, C. et al. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 37, n. 6, p. 1874–1890, 1 dez. 2021.
- CARDAILLAC, A.; SKJETNE, R.; LUDVIGSEN, M. ROV-Based Autonomous Maneuvering for Ship Hull Inspection with Coverage Monitoring. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 110, n. 2, p. 59, 11 abr. 2024.
- CHEMISKY, B. et al. **Underwater survey for oil and gas industry: A review of close range optical methods**. **Remote Sensing**MDPI AG, , 2 jul. 2021.
- DUENAS SALAZAR, J. A. et al. **Desenvolvimento de um ambiente de simulação ROS/Gazebo para inspeção fotogramétrica 3D de risers com RPAs**. Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. **Anais...**Galoa, 2019.
- DURRANT-WHYTE, H.; BAILEY, T. **Simultaneous Localization and Mapping: Part I History of the SLAM Problem**. [s.l: s.n.].
- EPIC GAMES. **Unreal Engine**. Disponível em: <<https://www.unrealengine.com/en-US>>. Acesso em: 9 jul. 2024.
- FANG, X. et al. Integration of ROV and vision-based underwater inspection for limnoperna Limnoperna fortunei in water conveyance structure. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 124, 1 set. 2023.
- FRANÇOIS-LAVET, V. et al. An introduction to deep reinforcement learning. **Foundations and Trends in Machine Learning**, v. 11, n. 3–4, p. 219–354, 20 dez. 2018.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Em: **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches**. [s.l.] Springer International Publishing, 2016. p. 85–113.

HE, J. **Introduction Remote-operated Underwater Vehicle for Inspection of Underwater Structure** Highlights in Science, Engineering and Technology MCEE. [s.l.: s.n.].

KOENIG, N.; HOWARD, A. **Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator** Proceedings. [s.l.: s.n.].

LI, Y. Deep Reinforcement Learning: An Overview. 25 jan. 2017.

MA, Y. et al. ROV-based binocular vision system for underwater structure crack detection and width measurement. **Multimedia Tools and Applications**, v. 82, n. 14, p. 20899–20923, 1 jun. 2023.

MANHAES, M. M. M. et al. **UUV Simulator: A Gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation**. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. **Anais...IEEE**, set. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7761080/>>

MOGSTAD, A. A. et al. Mapping the Historical Shipwreck Figaro in the High Arctic Using Underwater Sensor-Carrying Robots. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 997, 19 mar. 2020.

NVIDIA CORPORATION. **NVIDIA Isaac Sim**. Disponível em: <<https://developer.nvidia.com/isaac/sim>>. Acesso em: 9 jul. 2024.

OPEN ROBOTICS. **Gazebo Sim**. Disponível em: <<https://gazebo.org/home>>. Acesso em: 9 jul. 2024.

POTOKAR, E. et al. **HoloOcean: An Underwater Robotics Simulator**. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 2022a.

POTOKAR, E. et al. **HoloOcean: Realistic Sonar Simulation**. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 26 dez. 2022b.

PRICE, D. M. et al. Using 3D photogrammetry from ROV video to quantify cold-water coral reef structural complexity and investigate its influence on biodiversity and community assemblage. **Coral Reefs**, v. 38, n. 5, p. 1007–1021, 1 out. 2019.

SU, S. et al. Digital twin and its potential applications in construction industry: State-of-art review and a conceptual framework. **Advanced Engineering Informatics**, v. 57, 1 ago. 2023.

XU, W. et al. Digital twin-based industrial cloud robotics: Framework, control approach and implementation. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 58, p. 196–209, 1 jan. 2021.

YIN, Y. et al. **A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** Elsevier Ltd, , 1 jun. 2023.