

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



TÍTULO DO TRABALHO:

Levantamento tecnológico de sistemas de medição ópticos 3D aplicados à inspeção subaquática

AUTORES:

Diego Tiburcio Fabre¹, Daniel Juchem Regner¹, João Facco de Andrade¹, Leonardo Sales¹, Alice Bilbao¹, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto¹ e Armando Albertazzi Gonçalves Júnior¹

INSTITUIÇÃO:

¹ LABMETRO / EMC / Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

LEVANTAMENTO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO ÓPTICOS 3D APLICADOS À INSPEÇÃO SUBAQUÁTICA

Resumo

Reconhecida como uma das principais atividades econômicas brasileiras, a indústria da extração de petróleo e gás natural tem como principais características o fato de que a maior parte de suas etapas de prospecção, exploração, produção, armazenamento e escoamento de petróleo e gás ocorrem *offshore*, ou seja, em alto mar, independentemente do tipo de estrutura, se em plataformas fixas, semissubmersíveis ou flutuantes. É imprescindível que todos os componentes das plataformas sejam regularmente inspecionados, garantindo a confiabilidade e segurança estrutural, além de evitar paradas operacionais, danos ambientais e, principalmente, evitar acidentes. Dentre as intervenções submarinas necessárias, a inspeção subaquática se destaca pois, a partir dela, é possível detectar discontinuidades aparentes e não conformidades de projeto e por meio desta, são avaliadas principalmente, a presença ou ausência de incrustações marinhas, a presença ou ausência de revestimento protetor, de processos corrosivos, de danos mecânicos e de corpos estranhos nas estruturas e tubulações, sendo que, essa inspeção pode ocorrer de forma direta, por meio da intervenção à olho nu de um profissional especializado e certificado ou de forma indireta, com o uso de equipamentos ópticos, como câmeras digitais e sistemas de medição 3D embarcadas em veículos subaquáticos operados remotamente (ROV – *Remotely Operated underwater Vehicles*). Apesar da alta confiabilidade dos resultados gerados por inspeções realizadas por operadores humanos, existe uma perspectiva de crescimento do emprego de veículos não tripulados na inspeção *offshore* para os próximos anos, justificada pela alta qualidade e velocidade para a geração dos resultados, possibilidade de redução dos custos operacionais, além de reduzir significativamente as chances de acidentes laborais e isso se deve também ao fato de que, com o avanço de tecnologias que proporcionam a exploração em águas mais profundas e havendo o limite de 300m de profundidade para a inspeção realizada por mergulhadores o emprego dessas tecnologias se torna inevitável. O presente trabalho tem por objetivo elaborar um levantamento do estado da arte referente às técnicas e tecnologias ópticas de medição 3D que são, ou que podem ser utilizadas em inspeções subaquáticas quantitativas, destacando seus princípios de funcionamento e principais parâmetros de desempenho, como seus limites de alcance e resoluções. Se espera, com a conclusão desse trabalho, que os dados levantados e as conclusões discutidas sirvam como elementos norteadores para os demais membros da comunidade acadêmica que também pretendem desenvolver pesquisas voltadas à aplicação de sistemas ópticos para inspeção tridimensional subaquática.

Palavras-chave: Inspeção subaquática, medição óptica.

Abstract

Recognized as one of Brazil's main economic activities, the oil and gas extraction industry's main characteristics are the fact that most of its prospecting, exploration, production, storage and disposal stages take place offshore, i.e. on the high seas, regardless of the type of structure, whether on fixed, semi-submersible or floating platforms. It is essential that all platform components are regularly inspected, guaranteeing reliability and structural safety, as well as avoiding operational downtime, environmental damage and, above all, preventing accidents. Among the necessary subsea interventions,

underwater inspection stands out because it enables the detection of apparent discontinuities and design non-conformities, and it mainly assesses the presence or absence of marine fouling, the presence or absence of protective coating, corrosive processes, mechanical damage and foreign bodies in the structures and pipes. This inspection can take place directly, through the intervention of a specialized and certified professional with the naked eye, or indirectly, with the use of optical equipment such as digital cameras and 3D measurement systems on board remotely operated underwater vehicles (ROVs). Despite the high reliability of the results generated by inspections carried out by human operators, there is a prospect of growth in the use of unmanned vehicles in offshore inspection over the next few years, justified by the high quality and speed with which results are generated, the possibility of reducing operating costs, as well as significantly reducing the chances of occupational accidents. This is also due to the fact that, with the advance of technologies that allow exploration in deeper waters and the 300m depth limit for inspections carried out by divers, the use of these technologies has become inevitable. The aim of this work is to draw up a state-of-the-art survey of optical 3D measurement techniques and technologies that are or can be used in quantitative underwater inspections, highlighting their operating principles and main performance parameters, such as their range limits and resolutions. With the conclusion of this work, it is hoped that the data collected and the conclusions discussed will serve as guiding elements for other members of the academic community who also intend to carry out research into the application of optical systems for three-dimensional underwater inspection.

Keywords: Underwater inspection, optical measurement.

Introdução

Segundo dados da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), vinculada ao Departamento de Comércio dos Estados Unidos da América, apesar dos oceanos corresponderem à aproximadamente 71% da superfície terrestre e contribuírem com mais de 96% de toda a água existente no planeta, mais de 80% de seu volume se encontra não mapeado e totalmente inexplorado (NOAA, 2024), o que torna a exploração oceânica uma atividade ainda em crescimento.

Entre as atividades econômicas relacionadas à exploração oceânica, certamente se destaca a de extração do petróleo e gás natural, atividade essa que correspondeu significativamente com 10% do Produto Interno Bruto (PIB), industrial do Brasil em 2022, com volume de produção de cerca de 3,6 milhões de barris por dia (ANP, 2023) e consolidando o país como o 9º maior produtor de petróleo do mundo, segundo dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP, 2024),

Como a maior parte das etapas de prospecção, exploração, produção, armazenamento e escoamento de petróleo e gás ocorrem *offshore*, ou seja, em alto mar, independentemente do tipo de estrutura, se em plataformas fixas, semissubmersíveis ou flutuantes é imprescindível que todos os seus componentes sejam regularmente inspecionados (LEMOS, 2022), garantindo a confiabilidade e segurança estrutural, além de evitar paradas operacionais, danos ambientais e, principalmente, evitar acidentes (NICOLAU, 2022).

Dentre as intervenções submarinas necessárias, a inspeção visual subaquática se destaca pois, a partir dela, é possível detectar discontinuidades aparentes e não conformidades de projeto e por meio dessa, são avaliadas principalmente, a presença ou ausência de incrustações marinhas, a presença ou ausência de revestimento protetor, de processos corrosivos, de danos mecânicos e de corpos estranhos nas estruturas e tubulações, sendo que, essa inspeção pode ocorrer de forma direta, por meio da

intervenção à olho nu de um profissional especializado e certificado ou de forma indireta, com o uso de equipamentos ópticos, como câmeras digitais embarcadas em ROVs.

Apesar da alta confiabilidade dos resultados gerados por inspeções realizadas por operadores humanos, segundo Costa (2023), existe uma perspectiva de crescimento do emprego de veículos não tripulados na inspeção *offshore* para os próximos anos, justificada pela alta qualidade e velocidade para a geração dos resultados, possibilidade de redução dos custos operacionais, além de reduzir significativamente as chances de acidentes laborais e isso se deve também ao fato de que, com o avanço de tecnologias que proporcionam a exploração em águas mais profundas e havendo o limite de 300m de profundidade para a inspeção realizada por mergulhadores (NARDY, 2022) o emprego dessas tecnologias se torna inevitável.

O presente projeto tem como objetivo estudar o estado atual de técnicas e tecnologias desenvolvidas para aplicações de inspeções ópticas tridimensionais em meios subaquáticos, tanto no meio acadêmico quanto nas soluções disponíveis comercialmente, comparando seus principais parâmetros de desempenho e avaliando seus usos potenciais.

Inspeção óptica subaquática

Nas indústrias de petróleo e gás, as inspeções visuais são necessárias e fazem parte da rotina pois, por meio delas, é possível identificar não conformidades, tanto estruturais quanto nos demais componentes do processo produtivo. Quando se trata de inspeção subaquática, a atividade pode ser realizada por meio de ensaios visuais de forma direta, realizados por mergulhadores humanos ou de forma indireta, na qual dispositivos ópticos são embarcados em ROVs, conectados a embarcações por meio de cabos de alimentação, controle e dados, sendo esses dispositivos cada vez mais utilizados para esse fim pois, podem realizar suas missões de forma mais segura e com menores custos (CASTILLÓN *et al.*, 2019).

De acordo com Campos e Codina (2015), na literatura, a maioria dos sistemas de inspeção 3D subaquáticos são baseados em sinais acústicos ou luminosos, sendo que em uma comparação direta, apesar dos sistemas baseados na emissão de luz apresentarem menores distâncias de operação, têm como principais vantagens uma melhor resolução lateral e maior taxa de atualização.

Quando se trata da aquisição e processamento de imagens digitais em meio subaquático, surgem alguns desafios provenientes das particularidades do cenário, caracterizado pela atenuação total sofrida pela luz, especialmente no comprimento de onda do infravermelho, o espalhamento sofrido pelo feixe luminoso provocado por partículas e organismos na água (ZHANG *et al.*, 2022), bem como o índice de refração da água e sua relação com temperatura e salinidade (FIGUEREDO, 2019), o que limita a distância operacional dos sistemas de inspeção ópticos.

Considerando ainda que em um sistema de inspeção óptico, comumente a câmera digital utilizada é encapsulada em invólucro com lentes, se acrescenta aos desafios citados anteriormente a questão da dupla refração da luz ao chegar à câmera (CASTILLÓN *et al.*, 2019) o que modifica os parâmetros intrínsecos da mesma, limitando o desempenho dos algoritmos de processamento de imagem (CAMPOS; CODINA, 2015) e exige do projeto um processo de calibração específico e confiável.

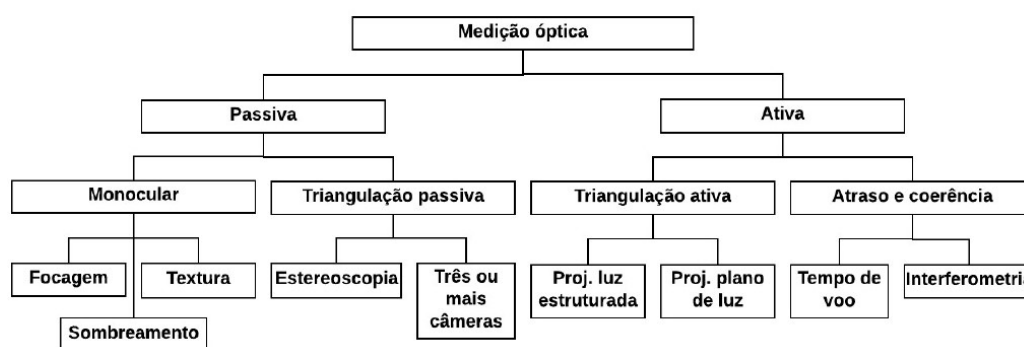
Principais técnicas utilizadas em inspeções ópticas 3D

Um dos grandes desafios da metrologia industrial se encontra na caracterização tridimensional da forma de objetos e cenários e para tanto, ao longo dos anos surgiram diversas tecnologias com esse

objetivo. Os métodos atuais para a aquisição de formas 3D podem ser divididos em dois grandes grupos, em função da forma como interagem com os objetos de interesse: métodos com contato físico e métodos sem contato físico (FABRE, 2019), sendo ambos os métodos ainda subdivididos em relação ao seu princípio de funcionamento.

Entre os métodos que não utilizam contato físico, se destacam aqueles que têm como princípio de funcionamento a emissão/recepção de luz, os chamados métodos ópticos, que podem também ser subdivididos, conforme representado na Figura 1. Diferentemente dos métodos passivos, que utilizam a iluminação natural do cenário, os métodos ativos utilizam uma fonte de irradiação própria, que podem vir de diferentes fontes e possuírem diferentes padrões.

Figura 1 - Métodos ópticos de aquisição de formas 3D.

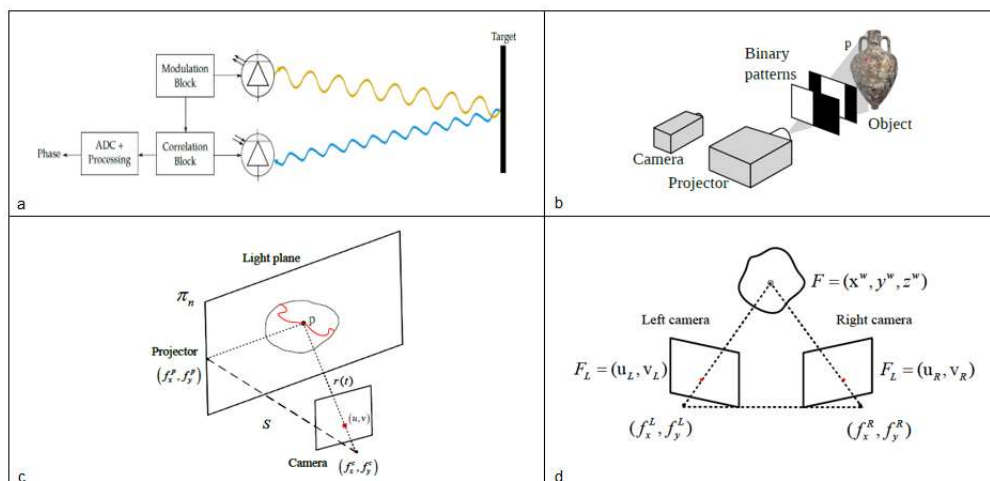


Fonte: FABRE (2019).

Entre os principais métodos ópticos de reconstrução 3D, alguns se destacam na literatura, como o que utiliza o princípio de Tempo de Voo, no qual a profundidade de um ponto medido é obtida por meio do cálculo do tempo de resposta de um raio de luz emitido por uma fonte (Figura 2a) e tem sua resolução limitada à precisão da medição do tempo de resposta e à tecnologia de seu receptor final. Também são largamente citados na literatura os métodos baseados no princípio da Triangulação, nos quais a posição 3D de um ponto é obtida por meio da combinação de informações geométricas entre dois ou mais dispositivos, podendo esses serem fontes de sinal ou receptores. A técnica de estereoscopia, ou Visão Estéreo, representada na Figura 2d, é um exemplo de aplicação desse método, porém, é consenso na literatura que, em inspeções subaquáticas, essa técnica apresenta limitações na aquisição de informações importantes do cenário, como sua textura e esse tipo de limitação pode ser superada com a utilização de fontes próprias de irradiação, nas chamadas técnicas de Triangulação Ativa.

As técnicas de Triangulação Ativa podem apresentar diferentes fontes de sinal, como emissores de pontos laser, de planos laser (Figura 2c), de multilinhas laser e de pontos aleatórios, sendo que esses padrões lasers podem ainda ser estáticos ou com feixe controlado por meio da movimentação de espelhos, de prismas ou galvanômetros. Outra variação dessa técnica muito empregada devido à sua simplicidade de uso e de emprego por meio de projetores, é a que utiliza padrões de luz estruturada binários (Figura 2b).

Figura 2: Principais métodos ópticos de reconstrução 3D.



Fonte: Adaptado de Campos e Codina (2015), Castellón *et al.* (2019) e Hu *et al.* (2023)

Ainda existem na literatura, porém em menor quantidade, trabalhos que foram desenvolvidos empregando técnicas não citadas anteriormente, mas que merecem destaque, como a Estrutura do Movimento (*Structure from Motion – SfM*) que consiste no emprego de uma câmera monocular para a aquisição de múltiplas fotografias sucessivas de um cenário e através da extração das principais características dessas imagens, é possível calcular o movimento relativo da câmera e em consequência, sua rota 3D (HU *et al.*, 2023) e a técnica de Estéreo Fotometria (*Photometric Stereo*), que consiste na utilização de uma câmera estática na aquisição de diversas imagens sob diferentes posicionamentos da fonte de luz.

Metodologia

Nos últimos anos, a exploração marítima tem alcançado lugar de destaque no meio acadêmico, impulsionada pelo avanço da ciência e da tecnologia e principalmente pelo grande campo de pesquisa e potenciais retornos comerciais e financeiros. Um estudo elaborado por Hu *et al.* (2023) afirma que entre os anos de 2005 e 2022 houve um aumento exponencial de citações de artigos com o termo “reconstrução 3D subaquática” no site *Web of Science*, partindo de um pouco mais de 200 citações, para mais de 1600 citações no período, comprovando o destaque e a relevância atual do tema. Entre os diversos artigos analisados durante a elaboração desse trabalho, alguns dos principais seguem resumidos nos parágrafos seguintes.

O projeto desenvolvido por Xue *et al.* (2021) aplicou a técnica de triangulação ativa por projeção de linha laser com feixe controlado, apresentando as soluções encontradas para a calibração da câmera, compensação da refração e projeto do mecanismo de movimentação do laser. O sistema foi testado na reconstrução 3D de esferas padrão e obteve precisão de aproximadamente 0,6mm para distâncias de até 1,2m, comprovando um bom desempenho frente à proposta de uma tecnologia de baixo custo. Utilizando a mesma técnica de triangulação ativa por projeção laser, o trabalho desenvolvido por Castellón *et al.* (2021) traz uma solução para a compensação da refração por meio do controle de movimentação de um espelho biaxial MEMS (*micro-electro-mechanical systems*), obtendo como resultado uma precisão inferior a 0,1mm para um alcance de até 4,0m.

Diferentemente dos casos anteriores, o estudo elaborado por Ammann (2024) avalia o desempenho do uso de um sistema fotogramétrico, ou seja, da aquisição de uma sequência de imagens com determinada sobreposição, embarcado em um ROV para a inspeção 3D subaquática de uma usina hidrelétrica e segundo a autora, apesar de ser alcançada uma boa precisão de 10,0mm para até 6,0m de alcance, há a possibilidade de se obter melhores resultados a partir de melhorias na calibração do sistema. Já o trabalho desenvolvido por Chadebecq *et al.* (2020) apresenta uma solução à não linearidade das distorções provocadas pela refração gerada entre o meio líquido e o encapsulamento da câmera, aplicando uma técnica chamada de Estrutura do Movimento Refrativa (RSfM) em um sistema estéreo na aquisição de imagens subaquáticas. Como resultados, pode comprovar uma significativa melhora de desempenho da técnica RSfM quando comparada à SfM convencional, obtendo precisão de até 3,2mm para um alcance de 0,5m. O projeto desenvolvido por Qiao, Yamashita e Asama (2019) também é baseado na aplicação de técnicas de RSfM na reconstrução 3D subaquática de uma parte da usina nuclear de Fukushima sendo sua maior contribuição relacionada ao método desenvolvido pelos autores para a calibração da posição da câmera em relação ao seu invólucro, aplicando a Lei de Snell para calcular e compensar a refração. Apesar de não apresentarem resultados numéricos, a conclusão dos autores foi de que o seu método foi capaz de reduzir as distorções provocadas pela refração, quando comparado ao método SfM convencional.

Outro trabalho desenvolvido buscando uma solução inovadora para o problema da refração foi apresentado por Castillón, Forest e Ridao (2022), no qual os autores propuseram uma técnica de triangulação ativa por projeção laser na qual, um controle de movimentação de um espelho biaxial de dois eixos gera uma linha laser idealmente curva que, ao ser projetada em meio aquático, é transformada em uma linha reta. O estudo apresentou resultados promissores, como uma precisão inferior a 3,5mm para um alcance de aproximadamente 1,7m em medições de uma esfera padrão de 100,0mm de raio, gerando uma perspectiva de trabalhos futuros para os autores. O trabalho apresentado por Deng e Sun (2020) trouxe contribuições importantes quanto à calibração de câmeras em sistemas de visão estéreo. Apesar de proporem a calibração das câmeras no ar, o emprego de algoritmo de Correspondência Semi-Global (SGM) gerou resultados promissores no ambiente aquático, onde um mapa de disparidade resultante possibilitou o cálculo com boa precisão da distância entre as câmeras e os mensurandos. De acordo com os autores, os resultados satisfatórios credenciam a aplicação do método em inspeções subaquáticas.

Ainda em relação à problemática da correção das distorções provocadas pela refração, o trabalho desenvolvido por Su *et al.* (2021) apresenta uma solução para a medição da deformação 3D de objetos em meio subaquático através da aplicação da técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC) em um sistema de visão estéreo e para tanto, os autores empregaram conceitos da refração plana de Snell para elaborar a geometria refrativa do sistema. Obtiveram como resultado um método capaz de descrever com precisão formas complexas, mesmo em medições de deslocamento, comprovando seu potencial na caracterização de deformação 3D e na reconstrução de objetos em meio subaquático.

Apesar do grande potencial de retorno financeiro, o número de empresas que se dedicam a desenvolver soluções comerciais para a inspeção 3D subaquática é relativamente baixo, em relação ao mercado aéreo, por exemplo. Entre as principais soluções comerciais encontradas, a Tabela 1 apresenta suas principais características.

Tabela 1: Soluções comerciais para inspeção 3D subaquática.

Fabricante	Modelo	Técnica	Resolução* (mm)	Alcance (m)
VOYIS	Insight Nano	Triang. Laser	1,20	2,50
VOYIS	Insight Micro	Triang. Laser	4,00	7,00
VOYIS	Insight Pro	Triang. Laser	4,10	10,00
Newton Labs	M500UW	Triang. Laser	0,15	0,90
Newton Labs	M210UW	Triang. Laser	0,70	0,90
Newton Labs	M310UW	Triang. Laser	1,20	5,00
Newton Labs	M1500UW	Triang. Laser	1,41	5,00
Newton Labs	PL4000UW	Triang. Laser	1,37	10,00
3D at Depth	SL3	Tempo Voo	2,50	45,00
3D at Depth	SL4	Tempo Voo	2,50	45,00

* resolução de profundidade

Fonte: Dos autores.

Durante a pesquisa foi possível observar que as soluções comerciais disponíveis apresentam, de maneira geral, alcances maiores que as soluções desenvolvidas no meio acadêmico e que ainda em relação a esse parâmetro, as soluções baseadas na técnica de Tempo de Voo, como nos casos dos *scanners LiDAR* da empresa 3D at Depth apresentam melhores desempenhos do que as soluções baseadas em Triangulação Laser. Outra característica interessante, mas não citada anteriormente, está na profundidade suportável pelas soluções comerciais, chegando a algumas centenas de metros, como no caso dos sensores da *Newton Labs*, algo muito superior a qualquer trabalho acadêmico analisado para esse trabalho.

Resultados e Discussão

Como a maioria dos trabalhos acadêmicos focam seus esforços na solução do problema das distorções provocadas pela refração da luz no ambiente aquático, carecerem de mais testes para uma avaliação completa porque parâmetros de desempenho importantes como a taxa de atualização do sensor, resolução lateral e o campo de visão não são avaliados na maioria dos trabalhos. Baseada nos trabalhos e equipamentos estudados, a Tabela 2 traz algumas características importantes das técnicas de inspeção óptica 3D aplicadas em inspeção subaquática mais citadas.

Tabela 2: Principais características de técnicas de inspeção ópticas 3D.

Método	Técnica	Alcance(m)	Resolução	Montagem	Preço
Tempo Voo	LiDAR	<50,0	Baixa	Simples	Alto
Triangulação	SfM	<3,0	Intermediária	Simples	Baixo
Triangulação	Visão Estéreo	<3,0	Intermediária	Intermediária	Baixo
Triangulação	Projeção Laser	<10,0	Intermediária	Complexa	Intermediário
Triangulação	Fotometria Estéreo	<3,0	Intermediária	Intermediária	Baixo
Triangulação	Luz Estruturada	<10,0	Alta	Intermediária	Intermediário

Fonte: Dos autores.

Conforme observado na Tabela 2, as principais técnicas de inspeção óptica 3D, quando comparadas entre si, apresentam diferentes vantagens e desvantagens, dependendo das características da aplicação. O LiDAR é amplamente reconhecido por sua boa precisão, grande alcance de operar em condições de pouca luz, mas enfrenta os desafios de um custo elevado e maior sensibilidade à turbidez da água. A técnica de SfM é mais acessível, usando câmeras padrão para reconstruções 3D flexíveis e de baixo custo, embora dependa de superfícies texturizadas e exija elevado processamento computacional, que pode afetar a precisão. A visão estéreo, com suas câmeras duplas, oferece resultados em tempo real e é versátil, mas exige um processo de calibração complexo e pode ser sensível às variações de iluminação, turbidez e oclusões. A projeção laser destaca-se pela precisão e velocidade na inspeção de cenários complexos e detalhados, mas o custo e a complexidade dos equipamentos, além dos riscos à segurança ocular, são considerações importantes. A fotometria estéreo, que utiliza iluminação controlada para capturar detalhes de textura, é econômica e flexível, mas depende de condições estáveis de luz e pode exigir processamento avançado, limitando sua precisão em ambientes variáveis. Finalmente, a luz estruturada combina alta precisão e rapidez, sendo eficaz na inspeção de cenários complexos, mas demanda um ambiente de iluminação controlado, além de exigir equipamentos potencialmente caros.

Conclusões

Mesmo com a crescente produção acadêmica sobre o tema nos últimos anos, é possível observar uma grande demanda por pesquisas e soluções, considerando as diferentes técnicas de inspeção ópticas tridimensionais e o farto campo de exploração. Cada técnica tem suas próprias áreas de aplicação ideais, e a escolha entre elas deve considerar o equilíbrio entre custo, precisão, velocidade e condições ambientais específicas do projeto, além do tipo de instalação, pois fica evidente que nos casos em que as técnicas são embarcadas em ROVs, um controle preciso de movimentação do equipamento e sua integração com o sistema de inspeção pode influenciar nos resultados.

Como cada técnica citada apresenta suas particularidades e limitações, um único sistema de inspeção subaquática não teria a propriedade de atender todos os requisitos da reconstrução 3D, como diferentes faixas de alcance e resoluções. Partindo dessa premissa, a fusão entre dois ou mais sistemas de inspeção ópticos se torna um campo de pesquisa necessário e promissor.

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 Laboratório de Metrologia e Instrumentação da UFSC pelo espaço fornecido para desenvolvimento de pesquisa.

Referências Bibliográficas

3D AT DEPTH. **SL3 subsea LiDAR laser**. Disponível em: <https://3datdepth.com/product/subsea-lidar-sl3>. Acesso em: 16 jul. 2024.

AMMANN, M. Robotic photogrammetric underwater inspection of hydropower plants. **The International Hydrographic Review**, Monaco, v. 30(1), n. 38-44. Mai. 2024. <https://doi.org/10.58440/ihr-30-1-a04>. Acesso em: 17 jul. 2024.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim mensal da produção de petróleo e gás natural**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2023/boletim-novembro.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2024.

CAMPOS, M. M.; CODINA, G. O. Optical sensors and methods for underwater 3D reconstruction. **MDPI Sensors Journal**, Basel, v. 15, n. 31525-31557. Dez. 2015. <https://doi.org/10.3390/s151229864>. Acesso em: 08 jun. 2024.

CASTILLÓN, M.; FOREST, J.; RIDAO, P. Underwater 3D Scanner to Counteract Refraction: Calibration and Experimental Results. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, New York, v. 27, n. 6. Dez. 2022. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3170504>. Acesso em 21 jun. 2024.

CASTILLÓN, M. *et al.* State of the art of underwater active optical 3D scanners. **MDPI Sensors Journal**, Basel, v. 19, n. 5161. Nov. 2019. <https://doi.org/10.3390/s19235161>. Acesso em: 21 jun. 2024.

CASTILLÓN, M. *et al.* Underwater 3D Scanner Model Using a Biaxial MEMS Mirror. **IEEE Access**, New York, v. 9, n. 50231-50243. Abr. 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069189. Acesso em: 22 jun. 2024.

CHADEBECQ, F. *et al.* Refractive Two-View Reconstruction for Underwater 3D Vision. **International Journal of Computer Vision**, Berlin, v. 128, n. 1101-1117. Nov. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11263-019-01218-9>. Acesso em: 22 jun. 2024.

COSTA, V. C. **Avaliação de uso de um LiDAR e algoritmos ICP (Iterative Closest Point) para inspeção de curta distância**. 2023. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

DENG, Z.; SUN, Z. Binocular camera calibration for underwater stereo matching. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 1550. Mai. 2020. Doi: 10.1088/1742-6596/1550/3/032047. Acesso em: 16 jul. 2024.

FABRE, D. T. **Desenvolvimento de um sistema de visão para inspeção automatizada de peças da indústria cerâmica**. 2019. 87p. Dissertação (Mestrado Profissional em Mecatrônica Industrial) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

FIGUEREDO, T. R. **Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos em ambiente subaquático pela técnica de shearografia**. 2019. 153p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

HU, K. *et al.* Overview of underwater 3D reconstruction technology based on optical images. **Journal of Marine Science and Engineering - MDPI**, Basel, v11, n.949. Abr. 2023. <https://doi.org/10.3390/jmse11050949>. Acesso em: 12 mai. 2024.

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Panorama geral do setor de petróleo e gás: uma agenda para o futuro**. Disponível em:

<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2023/04/panorama-geral-do-setor-og-22-03-2023-web.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2024.

LEMOS, J. V. A. **Proposta para um projeto conceitual de um veículo submerso autônomo (AUV) para inspeção e manutenção de estruturas oceânicas em águas rasas**. 2022. 72p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

NARDY, L. P. **Sistema computacional integrado a modelos digitais para reconstrução de estruturas subaquáticas com alta definição**. 2022. 123p. Tese (Doutorado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2022.

NEWTON LABS. **Underwater Laser Scanners**. Disponível em: https://www.newtonlabs.com/subsea_scanners-1.htm. Acesso em: 16 jul. 2024.

NICOLAU, A. L. **Live sobre intervenção submarina/Inspeção subaquática**. São Paulo: ABENDI, 2022. 1 vídeo (64 min). Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=LJ2ivo6n_hA. Acesso em: 02 jan. 2024.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce. **Oceans & Coasts**. Disponível em: <https://www.noaa.gov/oceans-coasts> Acesso em: 02 jan. 2024.

QIAO, X.; YAMASHITA, A.; ASAMA, H. 3D Reconstruction for underwater investigation at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using refractive structure from motion. **International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research**, Fukushima, 2019. Disponível em: <https://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/~yamashita/paper/B/B224Final.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SU, Z. et al. Refractive three-dimensional reconstruction for underwater stereo digital image correlation. **Optics Express**, Washington, v. 29, n. 08. Abr. 2021. <https://doi.org/10.1364/OE.421708>. Acesso em: 16 jul. 2024.

VOYIS. **Insight Laser Scanners**. Disponível em: <https://voyis.com/insight-laser-scanners/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

XUE, Q. et al. Underwater High-Precision 3D Reconstruction System Based on Rotating Scanning. **MDPI Sensors Journal**, Basel, v. 21, n. 1402. Fev. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21041402>. Acesso em: 21 jun. 2024.

ZHANG, S. et al. Visual SLAM for underwater vehicles: a survey. **Elsevier Computer Science Review**, Praha, v. 46, n.100510. Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2022.100510>. Acesso em: 15 mai. 2024.