

Computer System Integrated with Digital Models for Reconstruction of Underwater Structures with High Definition

L. P. Nardy, O. R. Pinheiro and H. A. Lepikson, *Member, IEEE*

Abstract—The development of research aimed at underwater inspection of subsea equipment has been gaining importance due to the exploration of oil and gas in deep waters. Often, the lack of accurate geometric information on subsea equipment used by the oil and gas industry leads to a series of difficulties in carrying out maintenance operations on this equipment. Currently, the use of sound-based technology is used for this purpose and its limits are known. In this sense, it is necessary to explore new methods that allow generating high-resolution three-dimensional models to represent, with adequate precision, underwater structures. The general objective of this research work presents a novel computational system that provides an accurate three-dimensional representation of structures of underwater equipment. The visualized application is in the oil exploration and production sector offshore, to fill important gap technology available for robotic underwater operations. This representation is a valuable resource to facilitate the planning and execution of the monitoring and maintenance activities in these assets. The feasibility of implementing this system is confirmed by the maps obtained during the testing phase.

Index Terms—3D reconstruction, fusion of sensors, underwater robotics interface

I. INTRODUÇÃO

Os modelos digitais de alta definição tridimensionais (3D) de equipamentos e estruturas subaquáticas são úteis para as empresas que possuem muitos equipamentos que necessitam de manutenção como geração de energia hidroelétrica, mineração ou petróleo gás. Neste último caso, as instalações *off-shore* apresentam desafios particulares, dadas as grandes distâncias entre as plataformas e os equipamentos no fundo do mar, sabendo-se que a presença de mergulhadores está limitada à profundidade de 300 m. Essas condições impõem que as atividades de inspeção e manutenção em equipamentos, por exemplo, só sejam possíveis com o apoio de *Underwater Unmanned Vehicles* (UUVs). UUVs abrangem o grupo de veículos subaquáticos não tripulados, onde se enquadram os AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*) e os ROVs (*Remotely Operated Vehicles*), que são plataformas eficazes e acessíveis para realizar tarefas de inspeção subaquática [1]. Os ROVs são conectados a uma embarcação por um cabo umbilical (*tether*) para transmissão de potência e controle e são comandados à distância por técnicos especializados nas salas

de operação das plataformas ou em embarcações específicas para prestar tal tipo de serviço [2].

Nos últimos anos a inspeção subaquática obteve um grande avanço no desenvolvimento tecnológico dos sistemas de visão, que têm se tornado cada vez mais sofisticados através de novas técnicas de calibração [3] e desenvolvimento de câmeras para aplicação subaquática [4]. Técnicas de visão computacional baseadas em abordagens estéreo oferecem métodos para reconstruções 3D com alta precisão e resolução para aplicações terrestres. No entanto, em ambiente subaquático, a turbidez, o retroespalhamento, a degradação da imagem causada por absorção da luz, a iluminação irregular causada por iluminação artificial e a própria calibração da câmera trazem uma série de desafios que normalmente não são endereçados para os sistemas de visão no ar. Segundo [5], estes fatores contribuem para degradação da qualidade das imagens captadas impactando na precisão do processo de reconstrução 3D. De acordo com [6], o sistema de visão estéreo é um método de fácil aplicação, pois possui uma configuração de *hardware* simples e o processo de calibração estéreo para determinar os parâmetros extrínsecos entre as duas câmeras é direto. No entanto, no ambiente subaquático ele não pode ser aplicado a superfícies metálicas planas com limitadas informações de textura, porque os pontos característicos aplicáveis não podem ser encontrados e rastreados para fazer a correspondência correta [6], [7]. Ainda de acordo com [6], o método constituído por visão estéreo, quando combinado com luz estruturada, pode ser usado para a medição de forma 3D de áreas sem informações de textura, porque a projeção desta luz cria formas geométricas na superfície alvo. Outra característica é que este método (visão estéreo e luz estruturada) demanda um grande esforço computacional e gera uma nuvem de pontos com alta densidade, especialmente em cenários de baixo contraste [2]. Essas importantes limitações justificam o interesse no desenvolvimento de novas soluções tecnológicas para superar as dificuldades encontradas para obtenção de informação através do uso de novos métodos de aquisição ópticos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho de investigação é desenvolver um sistema baseado em *software* e *hardware*, que forneça uma representação tridimensional precisa de estruturas dos equipamentos subaquáticos. Este artigo encontra-se organizado do seguinte modo: os trabalhos relacionados às técnicas e modelos de digitalização são apresentados na Seção II. Na Seção III é apresentado o método proposto para realizar a digitalização de ativos submarinos. Já na Seção IV são apresentados a avaliação e os resultados parciais da pesquisa. Por fim, na

L. P. Nardy, Gestão e Tecnologia Industrial, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brasil, leonardo.nardy@fieb.org.br.

O. R. Pinheiro, Gestão e Tecnologia Industrial, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brasil, oberdan.pinheiro@fieb.org.br.

H. A. Lepikson, Gestão e Tecnologia Industrial, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brasil, Herman.Lepikson@fieb.org.br.

Seção V, tem-se as conclusões.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção subsidia uma comparação entre os sensores ópticos 3D subaquáticos ativos presentes na literatura nos últimos anos, iniciando pelos sensores ToF (Time of Flight) controlados por faixa [8], [9] e [10]. [8] desenvolveram um algoritmo de localização de pico que pode lidar com dispersão direta e, ao mesmo tempo, pode perceber picos distantes que são pouco mais altos do que picos causados por ruído. Já [9] propuseram uma solução que permite a eliminação do retroespalhamento, melhorando a qualidade das imagens, fornecendo informações sobre a distância de cada objeto iluminado e dando acesso a medições 3D em tempo real. [10] introduziram um novo modelo de estimativa de intervalo para reduzir os efeitos induzidos pela distância, pela reflexão do alvo e pela distorção do intervalo, com base na reconstrução por divisão de tempo e função de distribuição de reflexão bidirecional.

[11] apresentaram um sensor *laser*, baseado em triangulação para reconstruções 3D subaquáticas de curto alcance, para operar em ambiente de alta turbidez. No trabalho desenvolvido por [12], eles compararam com a visão estéreo. Os autores descobriram que uma reconstrução baseada em estéreo é mais adequada para levantamentos longos, desde que a cena tenha textura e luz suficientes. Por outro lado, sua reconstrução estruturada de luz funcionou melhor em distâncias curtas, onde as dimensões precisas de um objeto ou estrutura eram necessárias.

[13] aplicaram sensores de triangulação a *laser* (LTS, do inglês *Laser Triangulation Sensor*) para medições subaquáticas. Algoritmos de calibração e medição também foram desenvolvidos e avaliados por experimentos controlados.

[6] trabalharam no desenvolvimento de um sistema de medição 3D subaquático utilizando uma câmera estéreo, um *laser line* e um motor de corrente contínua. Nesse trabalho, a calibração estéreo subaquática foi desenvolvida usando o método de Zhang [14], onde as imagens foram registradas e armazenadas para serem processadas e, a partir delas, gerada a nuvem de pontos. Em seguida, foram decodificadas com o objetivo de segmentá-las para detectar as linhas de *laser*.

[4] desenvolveram um sensor baseado em uma câmera, *laser* e galvanômetro. Nesse trabalho de pesquisa foi levada em consideração a distorção introduzida pela refração dupla através das janelas de visualização planas. Este sensor foi usado com sucesso para manipulação, bem como para reconhecimento de objetos e tarefas de Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM). [15] desenvolveram um *scanner* com *laser* de duas linhas (vermelho e verde) de baixo custo. Os resultados com o *laser* vermelho foram supostamente mais precisos do que com o verde, embora nenhuma explicação das possíveis causas tenha sido fornecida. No trabalho desenvolvido por [16] foi utilizado o Intel RealSense para uma solução barata e compacta que permitia a varredura manual da vida marinha por mergulhadores. Os desempenhos relatados dos *scanners* estão reunidos na Tab. I.

Como visto na Tab. I, o melhor atual estado da arte baseia-se na utilização de sensores ópticos 3D ativos, nos quais observa-

TABELA I
Scanners 3D ÓPTICOS ATIVOS SUBAQUÁTICOS ATUAIS.

Referência	Precisão (mm)	Tipo
[13]	0.48	Triangulação
[6]	4	Triangulação
[8]	23	Triangulação
[17]	0.98	Triangulação
[10]	12	ToF
[16]	4	X
[15]	0.22	Triangulação
[11]	2.6	Triangulação

se uma diferença de desempenho relacionado à precisão entre sensores ToF e sensores de triangulação, sendo que daqueles analisados a maioria dos sensores de triangulação alcançam precisões melhores. Os melhores resultados foram obtidos por [13], [15] e [17]. Por outro lado, os sensores ToF podem trabalhar em alcances mais longos, o que torna seu erro de profundidade relativo em distâncias mais longas comparável aos *scanners* de triangulação aplicados em alcances curtos (geralmente menos de 2 m).

A decisão sobre seguir com um ToF ou um *scanner* de triangulação é determinada principalmente pelo *trade-off* entre precisão de profundidade e alcance. Um sensor ToF é mais adequado para alcances de até algumas dezenas de metros, enquanto um sensor de triangulação pode ser capaz de precisão milimétrica ao trabalhar em distâncias menores. Outros fatores que implicam no desempenho do digitalizador estão relacionados à resolução, ao tempo de aquisição, à simplicidade estrutural e, principalmente, à distância até o objeto. Os sistemas de disparo único adquirem toda a cena de uma vez, o que os tornam mais adequados para cenas altamente dinâmicas. Os digitalizadores de linha de direção geram nuvens de pontos muito densas e, se estiverem conectados a um veículo, os movimentos relativos podem distorcer os dados resultantes.

Alguns sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*) subaquáticos usando *lasers* de luz visível são disponíveis, mas eles são usados principalmente para aplicações de exploração submarina ou levantamento topográfico, sendo que a precisão não é suficientemente alta para representar com exatidão equipamentos subaquáticos [18]. A visão estéreo é um método passivo que usa apenas duas câmeras. Trata-se de um sistema de fácil manuseio e aplicação em função das razões já expostas na seção I. Já o método que utiliza uma única câmera e luz estruturada é uma abordagem em que a deformação da luz é analisada para obter informações de objetos 3D e, portanto, também pode ser aplicado a áreas com falta de informações de textura. No entanto, esta abordagem requer um processo de calibração da câmera e do projetor da luz estruturada (*laser*), no qual os parâmetros extrínsecos entre o projetor e a câmera são obtidos [4]. De acordo com [6], um sistema baseado em visão estéreo, uma vez combinado com a utilização de luz estruturada, pode ser usado para a medição de objetos 3D de áreas sem informações de textura. Neste tipo de sistema, apenas as câmeras estéreo precisam ser calibradas, não sendo necessário conhecer o ângulo de rotação do motor do projetor de padrões (*laser line*) para geração da nuvem de pontos. A reconstrução é realizada utilizando um método de triangulação

óptica. Esse tipo de sistema tem a vantagem de ser simples, mas tem como desvantagens a baixa precisão e o longo tempo de medição. A baixa precisão está relacionada com o processo de aquisição das imagens, devido às distorções provocadas pelo feixe do *laser* que ocorre na água. Já em relação ao tempo de medição, ocorre devido à baixa velocidade do motor para garantir uma digitalização densa, ou seja, feixe do *laser* próximos uns aos outros. Isso acarreta outro problema ao processo de reconstrução da nuvem de pontos, pois é gerada uma nuvem de pontos muito densa, com ruídos e *outliers*. Segundo [19], nuvem de pontos criada a partir de digitalizador a *laser* contém pontos desorganizados (com ruído e *outliers*), sem estrutura inerente ou informações de orientação, o que prejudica o processo de reconstrução do objeto digitalizado.

Observa-se, a partir dos estudos sobre digitalização 3D subaquática, uma evolução nos métodos com o objetivo de melhorar a eficiência desse tipo de sistema, mas é necessário mais esforço de pesquisa, já que estes sistemas ópticos são complexos. Nesse trabalho de investigação, um sistema baseado em visão estéreo e um gerador de padrão de feixe de *laser* é proposto, porém a nuvem de pontos resultante apresenta, além de muita densidade, ruídos e *outliers*, o que compromete sua utilização para uma reconstrução 3D. Nesse sentido, pretende-se combinar a aplicação de diferentes algoritmos de filtros para simplificar a nuvem de pontos gerada, além de reconstruir sua superfície. Esse desenvolvimento pretende consolidar uma nuvem de pontos desorganizada com ruído e *outliers*. Além disto, um método de fusão de dados é desenvolvido com o objetivo de minimizar erros introduzidos nas nuvens de pontos, em decorrência das perturbações de movimentação que o ROV sofre no ambiente de operação. Para isto, dados de uma INS (*Inertial Navigation System*) são utilizados para estimar a localização relativa (pose e orientação) do protótipo, provendo informações necessárias para realizar transformações geométricas sobre as nuvens de pontos.

III. MÉTODO PROPOSTO

A Fig. 1 ilustra uma visão geral do conceito proposto. O usuário da aplicação acessa o sistema através de uma interface de operação disponível na estação de trabalho na embarcação de apoio às operações. Todo processamento e acionamento dos dispositivos de *hardware* é de responsabilidade do computador embarcado no protótipo, que está acoplado ao ROV. A comunicação entre estação de trabalho e o protótipo segue a arquitetura *Ethernet*, através de uma rede local que utiliza o umbilical do ROV para envio de pacotes de dados. Multiplexadores (MUX) estão instalados na embarcação (*topside*) e no ROV, o qual é responsável pela alimentação do sistema de potência do protótipo e comunicação.

O protótipo é totalmente encapsulado e composto por uma unidade de processamento e potência (Fig. 1 detalhe A), sistema óptico (*laser*, Fig. 1 detalhe B) e duas câmeras RGB que formam o sistema de visão estéreo (Fig. 1 detalhes C e D). Na parte central do protótipo encontra-se o invólucro, responsável pela conexão de energia entre o umbilical do ROV e os demais sistemas, bem como abrigar as unidades de processamento de dados adquiridos e de geração das nuvens

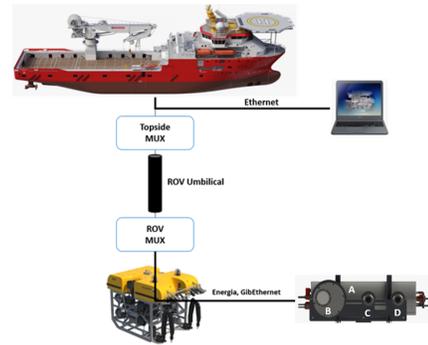


Fig. 1. Conceito preliminar da solução.

de pontos (Fig. 1 detalhe A). O encapsulamento óptico abriga um sistema composto por um *laser* de linha, que é projetado sobre um espelho, rotacionado por um galvanômetro (Fig. 1 detalhe B).

A. Projeto Eletroeletrônico

O projeto contempla um conjunto de sensores e atuadores independentes, que trabalham de forma sincronizada para realizar a digitalização de estruturas subaquáticas. Para que o processo de digitalização seja realizado de forma apropriada, uma fonte de alimentação deve ser capaz de prover energia para os sensores (INS e câmeras), dispositivo de iluminação (*laser*), assim como o galvanômetro, *switch*, unidade de aquisição de dados (DAQ), um processador FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) e computador embarcado (NUC). Na Tab. II são apresentados os componentes de *hardware* utilizados no protótipo.

TABELA II
COMPONENTES DE HARDWARE DO PROTÓTIPO.

Componente	Modelo
Câmera RGB	Basler Ace acA1920-155uc
Lente	Fujinon CF16HA-1
Mini computador	Intel NUC NUC8i7HVK
Processador Stereo	Nerian SceneScan Pro
Switch	Ubiquiti Es-10xp-br Edge Switch 8-ports Gigabit
INS	VECTORNAV 200 Rugged GPS/INS
DAC	USB-1608G Series devices provide 16-bit
Laser	Uniform 532nm Green Line Laser Module
Galvanômetro	GVS211/M - Galvo de 1D 10mm / espelhos

A energia para operação do protótipo é em corrente contínua e pode ser proveniente do ROV ou do conjunto de baterias instalado internamente ao protótipo.

B. Projeto de Software

A Fig. 2 ilustra arquitetura geral do protótipo e seus respectivos módulos funcionais. A arquitetura do protótipo foi projetada com características modulares para facilitar a utilização de todos os componentes do sistema.

O módulo de Interface trata das funcionalidades relacionadas à interação entre o sistema do protótipo digitalizador e o operador do ROV. O acionamento da instrumentação para a coleta dos dados é realizada pela estação de controle, através

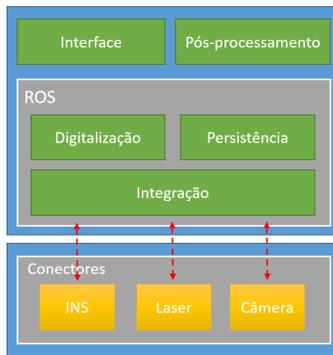


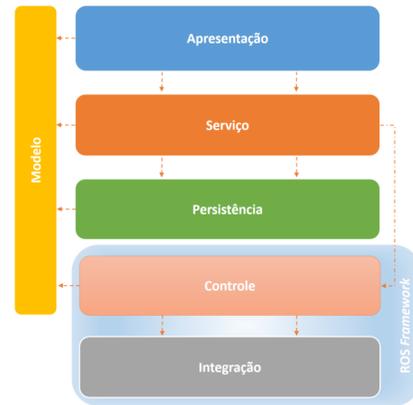
Fig. 2. Arquitetura Geral do Protótipo.

de uma interface de operação onde é possível controlar o início e término da operação de digitalização. O módulo de Pós-processamento é responsável pelo processo de aplicação de filtros e reconstrução da nuvem de pontos na operação de digitalização de um equipamento subaquático. Já o módulo de Digitalização permite a realização de medições tridimensionais dos equipamentos subaquáticos, tendo como resultado a geração da nuvem de pontos no formato PLY (*Polygon File Format*). O módulo de Persistência é responsável por manter o conteúdo do arquivo, que contém a nuvem de pontos. Consiste no armazenamento confiável e coerente dos dados coletados durante a etapa de digitalização, em um sistema de armazenamento de arquivos. O módulo de Integração, responsável pela integração do sistema com os sensores e *laser*, relaciona-se diretamente à aquisição dos dados brutos oriundos de cada sensor para processamento e análise. Esses dados são digitalizados e entregues ao módulo de Digitalização, responsável pelo processamento dos sinais. O módulo de Integração também executa serviços de abstração do *hardware* e controle de baixo nível de dispositivos (*drivers*). As classes dessa camada devem abstrair e encapsular todo acesso ao *hardware* do sistema, deixando transparente à camada de Controle o modo como os dados são obtidos. Dessa forma, toda a implementação de acesso aos dados fica isolada, facilitando sua manutenção e garantindo que a mudança de uma fonte de dados não venha a afetar as outras camadas da aplicação.

Os módulos de Digitalização, Persistência e Integração são coordenados pelo *framework* ROS (*Robotic Operational System*). A utilização do ROS é complementada pelo uso de uma biblioteca já bastante integrada com este *framework*, a *Point Cloud Library* (PCL). Esta biblioteca permite a manipulação e processamento de conjuntos de pontos (*pointclouds*), representados num sistema de coordenadas, por exemplo cartesiano, que têm como objetivo caracterizar as superfícies externas dos objetos presentes no meio. Além disso, a PCL contém estruturas de armazenamento extremamente eficientes (*octrees*), que permitem armazenar rapidamente todos os pontos das várias *pointclouds* que são publicadas. Para remover as distorções introduzidas pela refração, que ocorre quando a luz passa pelas janelas de vidro das caixas das câmeras subaquáticas, foi utilizado o modelo Pinax [20].

A Fig. 3 ilustra a arquitetura de *software* do sistema, baseada numa divisão em camadas com componentes de interfaces bem

definidos, proporcionando alta coesão e baixo acoplamento em diversos níveis.

Fig. 3. Arquitetura de *Software* do sistema.

A camada de Apresentação (*presentation*) contém os componentes de UI (*User Interface*) responsáveis pela interação do sistema com o usuário da aplicação. Esta camada comunica-se com as camadas de Serviço (*service*) e Modelo (*model*). Os métodos de acesso aos dados são fornecidos através de um *Facade* representado por uma interface. Já a camada de Serviço provê as funcionalidades referentes à lógica da aplicação, gerenciamento das classes de negócio e controle, sendo independente da camada de apresentação. A camada de Persistência (*persistence*) tem como objetivo implementar uma solução de acesso aos dados, provendo uma interface de métodos à camada de Serviço para consulta e gravação de objetos. O Modelo contém as abstrações que representam as classes de entidades do sistema e que são utilizadas para transferir dados entre as camadas da aplicação.

A camada de Controle (*control*), por sua vez, é composta por classes responsáveis pelo gerenciamento do *hardware* do sistema. Nesta camada, encontra-se o ROS *master* responsável por registrar e coordenar a comunicação entre os diversos nós (ROS Nodes) do sistema. A Fig. 4 ilustra o esquema de comunicação contendo quatro componentes do sistema: Câmeras, INS e *Laser*. Cada nó comunica-se com outros nós através de mensagens, que são atribuídas a um endereço de memória (local padrão daquele nó, no qual ele recebe ou envia mensagens). Assim, este nó pode ler a mensagem em um endereço e realizar uma ação.

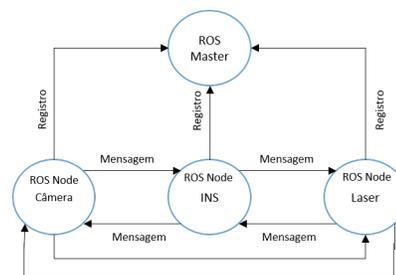


Fig. 4. Esquema de Comunicação.

Já a camada de Integração (*integration*) implementa classes, as quais oferecem serviços de abstração do *hardware* e cont-

role de baixo nível de dispositivos (*drivers*). As classes dessa camada devem abstrair e encapsular todo acesso ao *hardware* do sistema, deixando transparente à camada de Controle o modo como os dados são obtidos, mantendo a implementação de acesso aos dados isolada e facilitando sua manutenção. A estrutura de pacotes e/ou subsistemas da aplicação segue o formato presente no diagrama da Fig. 5.

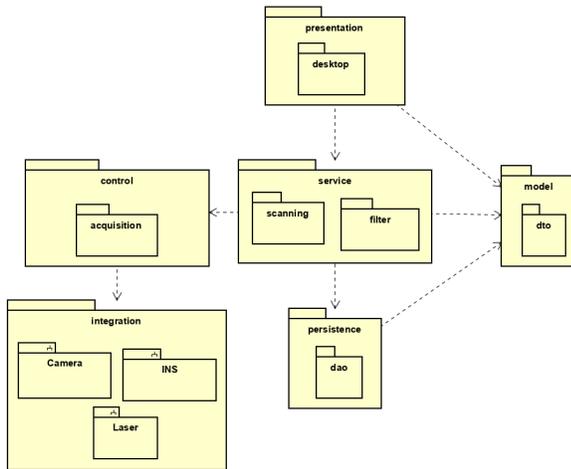


Fig. 5. Visão de Pacotes e Subsistemas da Aplicação.

A Fig. 6 apresenta a visão de implantação da arquitetura nos nós físicos para as configurações do sistema. Também apresenta a alocação dos pacotes em seus respectivos nós.

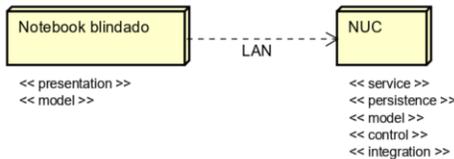


Fig. 6. Visão de Implantação da Aplicação.

A arquitetura proposta suporta os requisitos de uma arquitetura cliente/servidor. A parte cliente é implementada em um *notebook* na embarcação de apoio. Os componentes foram projetados para assegurar que sejam necessários requisitos mínimos de disco e memória no nó servidor (NUC). A seguir tem-se a descrição dos aspectos dinâmicos da aplicação existentes em cada nó:

- *Notebook* - onde são hospedados os componentes de *software* que tratam as funcionalidades relacionadas à interação entre o usuário e o sistema do protótipo digitalizador. Contém a versão do Java SE *Development Kit* 8u241 e o Ubuntu 16.04.6 LTS.
- NUC - onde é hospedado o conteúdo dinâmico da aplicação, abrangendo os componentes de *software* das camadas de serviço, persistência, modelo, controle e integração. Contém a versão do *ROS Kinetic Kame* e o Ubuntu 16.04.6 LTS.

IV. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Para avaliação preliminar do sistema proposto foram confeccionados três encapsulamentos, em nylon 6, exclusivamente

para execução dos testes em laboratório (Tanque de testes do SENAI CIMATEC). A Fig. 7 apresenta os três encapsulamentos em que o protótipo foi subdividido, compostos por uma unidade de processamento e potência (Fig. 7 detalhe A), um sistema óptico baseado em projeção de linhas por *laser* (Fig. 7 detalhe B) e duas câmeras RGB (Fig. 7 detalhes C e D). O encapsulamento de processamento e potência tem massa de 5,5 kg e dimensões: 180x500x8 mm. Já o encapsulamento óptico tem massa de 3,3 kg e dimensões: 200x183x8 mm e o encapsulamento das câmeras tem massa de 0,5 kg e dimensões: 130x160x8 mm. A estrutura em acrílico foi utilizada para suporte e alinhamento dos encapsulamentos em relação às câmeras.

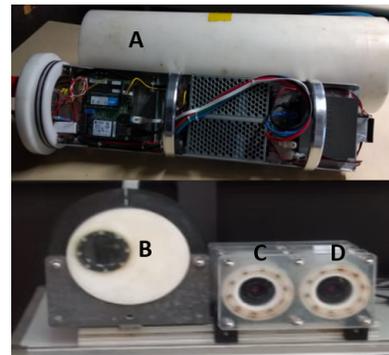


Fig. 7. Encapsulamentos do protótipo.

A Fig. 8 mostra o tanque (dimensões: 3,0x2,0x1,8 m) utilizado para validação do sistema em ambiente controlado, os encapsulamentos fixados em perfis de alumínio estrutural 4040 e a estrutura para representar o equipamento subaquático (dimensões: 71x69x69 cm).

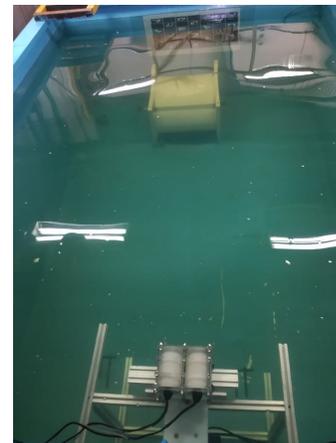


Fig. 8. Tanque de testes do SENAI CIMATEC.

O objetivo dos experimentos é avaliar o comportamento do sistema quando os dados fornecidos provêm de um ambiente subaquático controlado e, ao mesmo tempo, continuar a verificação do desempenho do sistema desenvolvido. Na primeira parte dos testes os dados são discretizados para, em seguida, ser analisada a reconstrução digital da superfície.

A. Geração da Nuvem de Pontos Bruta

A Fig. 9 apresenta a nuvem de pontos gerada já com a utilização do *laser*. Nesta configuração do sistema, ocorre a concatenação das nuvens de pontos geradas, ou seja, à medida que as nuvens de pontos chegam ao serviço de digitalização, é alocado espaço para acomodar as informações utilizando a estrutura de armazenamento *octree*.

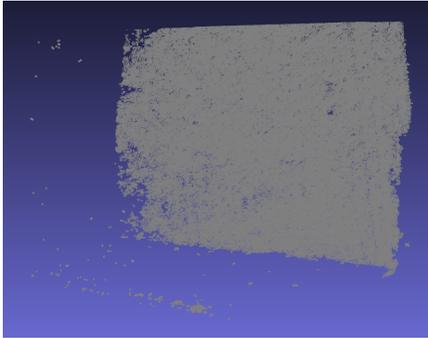


Fig. 9. Nuvem de pontos bruta gerada com utilização do *laser*.

O método usando sistema estéreo e luz estruturada (*laser*) foi capaz de obter informações de textura das formas geométricas na superfície do objeto alvo. Contudo, a nuvem de pontos foi gerada contendo 11.267.262 pontos (Fig. 10). Este processo teve a duração de aproximadamente 39 segundos, com um número de pontos variável em média de 4.173 pontos por segundo.

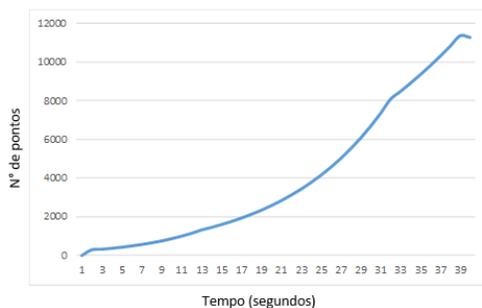


Fig. 10. Número de pontos mapeados ao longo do tempo.

Como resultado do processo de digitalização, tem-se uma nuvem mais densa e com ruídos introduzidos pela projeção das linhas por *laser*. Nesse sentido, foi utilizado o filtro *Point Cloud Simplification* disponível na biblioteca *PyMeshLab* [21] para simplificação da nuvem de pontos. Ou seja, cria-se uma nova camada preenchida com uma versão simplificada da nuvem de pontos atual. O resultado do processamento é apresentado na Fig. 11. A nuvem resultante apresenta apenas 840 pontos, estes pontos são os dados de entrada para a reconstrução da malha.

B. Reconstrução da Superfície

A reconstrução da malha é dividida em duas etapas: a primeira é para suavização da nuvem de pontos e a segunda, para a reconstrução da superfície.

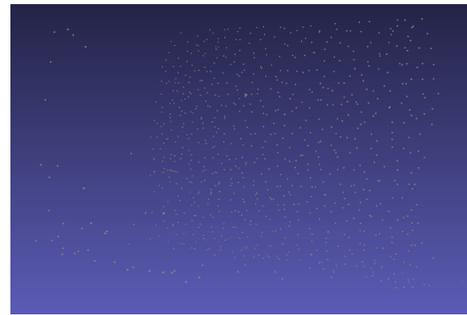


Fig. 11. Nuvem de pontos simplificada.

Após a recepção da nuvem de pontos simplificada, realiza-se a suavização da nuvem de pontos para remoção de ruídos, mantendo as feições subjacentes, tanto quanto possível, onde é calculada a posição real da superfície estimando possíveis erros nos dados com base nas posições dos pontos vizinhos. O algoritmo estima os vetores normais às superfícies. Tal estimativa é realizada como o vetor normal ao plano resultante da regressão linear entre os vizinhos de cada ponto analisado. Neste caso, foram analisados os dez pontos mais próximos (*k-nearest neighbors*) de cada ponto da nuvem, com base no algoritmo *KDTree*. Na Fig. 12 é ilustrada a nuvem de pontos com os vetores normais às superfícies estimadas.

Para a reconstrução da superfície, optou-se por utilizar o algoritmo *Ball-Pivoting Algorithm* (BPA) [21]. O BPA calcula uma malha triangular interpolando uma dada nuvem de pontos. Normalmente, os pontos são amostras de superfície adquiridas com várias varreduras de alcance de um determinado objeto. Este algoritmo de reconstrução de superfície usa os pontos existentes sem criar novos. A malha finalizada é apresentada na Fig. 13.

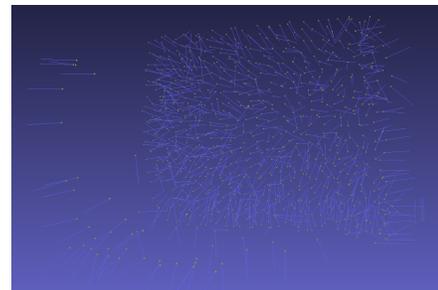


Fig. 12. Estimativa dos vetores normais às superfícies.

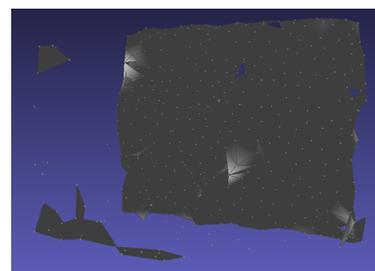


Fig. 13. Malha criada a partir da nuvem de pontos suavizados e superfícies reconstruídas com BPA.

Após a utilização do algoritmo BPA para reconstrução da superfície observa-se a presença de pontos não pertencentes às superfícies e pequenos objetos gerados pelo processo de aquisição de dados. Para solucionar este problema, foi implementado o filtro *Remove Isolated Pieces* [21] para remoção de pequenos componentes, ou seja, partes isoladas com diâmetro inferior a 200 mm ou *submeshes* isoladas com menos de 25 *faces*, o resultado é apresentado na Fig. 14.

Após a remoção dos componentes conectados isolados da malha, aplicou-se uma suavização laplaciana com base no algoritmo *ScaleDependent Laplacian Smooth* [22] para a remoção de *outliers* conectados ao *mesh*. O resultado da suavização laplaciana é mostrado na Fig. 15.

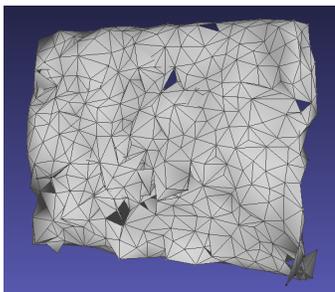


Fig. 14. Remoção de componentes conectados isolados.

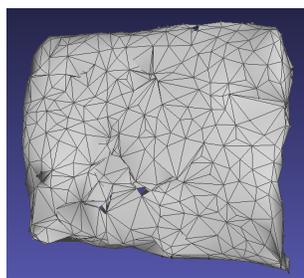


Fig. 15. Remoção de *outliers* conectados ao *mesh*.

Para finalizar a etapa de reconstrução dois filtros foram implementados: *Depth Smooth* responsável pela suavização da profundidade e que remove os *outliers* conectados à malha, preservando os pontos mais prováveis pertencentes à superfície escaneada; e o filtro *Colorize by border distance*, que atribui cores à malha de acordo com a distância geodésica das bordas. A Fig. 16 apresenta o resultado final da reconstrução. A malha é convertida em um arquivo PLY, o qual é gravado no disco rígido do *notebook* e que pode ser importado diretamente para um *software* de processamento de malha 3D (MeshLab, por exemplo).

O *software* Meshmixer foi utilizado para extração das medidas do objeto reconstruído. Trata-se de uma ferramenta de *design* de protótipo baseada em malhas de triângulos dinâmicos de alta resolução. As medidas correspondem à 68x68,04x39 cm. O sistema apresenta uma diferença em relação a largura de 3 cm, já em relação a altura essa diferença é de 0,96 cm. A medição do comprimento foi comprometida em função da disposição do sistema em relação ao objeto digitalizado.

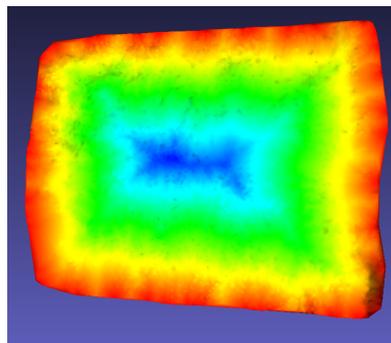


Fig. 16. Malha criada a partir do modelo proposto.

A utilização de técnicas de projeção de linhas *laser* permite obter informação precisa, sendo possível construir modelos de estruturas submersas 3D com alta resolução, independentemente da sua dimensão ou forma. Devido ao fato de utilizarem a projeção de linhas *laser* em vez de ondas acústicas, estes sistemas, quando otimizados, permitem reduzir o tempo necessário para aquisição de imagem, assumindo que as condições do meio são favoráveis para a propagação da luz. A exploração de novas técnicas e algoritmos, associados à necessidade de realizar operações de digitalização para inspeção de equipamentos subaquáticos, promovem o crescimento da exploração subaquática a partir da utilização de sistemas robóticos, tornando-os cada vez mais versáteis.

V. CONCLUSÃO

Como forma a explorar novas soluções que forneçam uma representação tridimensional de estruturas dos equipamentos subaquáticos, neste trabalho de investigação foi proposta uma solução de aquisição e processamento de informação para a criação de nuvens de pontos que, por sua vez, podem ser utilizadas para gerar modelos tridimensionais dos equipamentos subaquáticos digitalizados. Além disso, uma configuração de *hardware* e algoritmos foi desenvolvida, que permitiu a criação de um protótipo do sistema para aplicações subaquáticas. Experimentos de digitalização conduzidos em condições subaquáticas foram realizados e a reconstrução 3D foi feita para permitir a análise dos resultados. Apesar disso, ainda existem melhorias que podem ser feitas para possibilitar a utilização do sistema em ambiente operacional. As etapas de pós-processamento e de geração das malhas de polígonos estão em aprimoramento. Técnicas com base em aprendizado profundo para realizar segmentação semântica em nuvem de pontos 3D estão sendo estudadas para a obtenção de melhores resultados. Os algoritmos implementados foram capazes de realizar a digitalização e reconstrução do objeto em ambiente controlado. Os resultados até aqui obtidos são promissores e revelam que existe grande potencial para aplicação deste sistema em contexto real. Em estudo futuro, pretende-se projetar encapsulamentos que suportem as condições de profundidade (pressão e temperatura) de até 3.000 m e também realizar testes em ambiente relevante (águas da Baía de Todos os Santos, no estado da Bahia) para finalizar o processo de validação do sistema desenvolvido.

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho de investigação está inserido no projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado "Automação de Operações com ROV: Digitalização Submarina e Análise de Viabilidade", executado sob demanda da PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A., com apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Yu, E. Yang, P. Ren, C. Luo, G. Dobie, D. Gu and X. Yan, "Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends", in *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, pp. 1-6, 2019, doi:10.23919/ICAC.2019.8895089.
- [2] M. Castellón, A. Palomer, J. Forest and P. Ridaó, "State of the Art of Underwater Active Optical 3D Scanners", in *Sensors*, vol. 19, no. 23, pp. 5161, Nov. 2019, doi: 10.3390/s19235161.
- [3] M. Shortis, "Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems", in *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 30810-30826, Nov. 2015, doi: 10.3390/s151229831.
- [4] A. Palomer, P. Ridaó, J. Forest and D. Ribas, "Underwater Laser Scanner: Ray-Based Model and Calibration," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1986-1997, Oct. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2929652.
- [5] M. Wang, X. Wang, L. Sun, Y. Yang, and Y. Zhou, "Underwater 3D deblurring-gated range-intensity correlation imaging," in *Opt. Lett.*, vol.45, no. 6, pp. 1455-1458, Mar. 2020, doi: 10.1364/OL.385983.
- [6] Taewon Kim, Youngsoo Choi and Yun-ho Ko, "Development of underwater 3D shape measurement system with improved radiation tolerance" in *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, ISSN 1738-5733, doi: 10.1016/j.net.2020.09.026.
- [7] K. Konolige, "Projected texture stereo," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, AK, 2010, pp. 148-155, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509796.
- [8] P. Risholm, J. Thorstensen, J. Thielemann, K. Kaspersen, J. Tschudi, C. Yates, C. Softley, I. Abrosimov, J. Alexander, and K. Haugholt, "Real-time super-resolved 3D in turbid water using a fast range-gated CMOS camera", in *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 14, pp. 3927-3937, May. 2018, doi: 10.1364/AO.57.003927.
- [9] M. Patrizio, Q. Iñaki, H. Karl, C. Yves, V. Andre, Y. Chris, P. Giuliano, R. Giancarlo, R. Petter and T. Jens, "Range-Gated Imaging System for Underwater Monitoring in Ocean Environment", in *Sustainability*, vol. 11, no. 1, pp. 162, 2019, doi: 10.3390/su11010162.
- [10] S. Y. Chua, N. Guo, C. S. Tan and X. Wang, "Improved Range Estimation Model for Three-Dimensional (3D) Range Gated Reconstruction", in *Sensors*, vol. 17, no. 9, pp. 2031, 2017, doi:10.3390/s17092031.
- [11] M. Massot-Campos and G. Oliver-Codina, "Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction", in *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 31525-31557, 2015, doi:10.3390/s151229864.
- [12] M. Massot-Campos, G. Oliver-Codina, H. Kemal, Y. Petillot and F. Bonin-Font. "Structured light and stereo vision for underwater 3d reconstruction", in *OCEANS 2015 - Genova*, pp. 1-6, 2015.
- [13] G. Matos, P. Buschinelli and T. Pinto, "Underwater Laser Triangulation Sensor Model With Flat Refractive Interfaces", in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 937-945, 2020, doi:10.1109/JOE.2019.2891863.
- [14] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000, doi:10.1109/2f34.888718.
- [15] F. Lopes, H. Silva, J. M. Almeida, A. Martins and E. Silva, "Structured light system for underwater inspection operations", in *OCEANS 2015 - Genova*, pp. 1-6, 2015, doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271564.
- [16] S. T. Digumarti, G. Chaurasia, A. Taneja, R. Siegart, A. Thomas and P. Beardsley, "Underwater 3D capture using a low-cost commercial depth camera", in *2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Lake Placid, NY, 2016, pp. 1-9, doi: 10.1109/WACV.2016.7477644.
- [17] A. Palomer, P. Ridaó, D. Ribas and J. Forest, "Underwater 3D Laser Scanners: The Deformation of the Plane", in *Springer International Publishing*, pp. 73-88, 2017, doi:10.1007/978-3-319-55372-6_4.
- [18] M. Massot-Campos and G. Oliver-Codina, "Optical sensors and methods for underwater 3D reconstruction", in *Sensors*, Switzerland, vol. 15, no. 12, pp. 31525-31557, 2015, doi:10.3390/s151229864.

- [19] M. Berger, A. Tagliasacchi, L. Seversky, P. Alliez, J. Levine, J. Levine, A. Sharf, C. Silva, "A Survey of Surface Reconstruction from Point Clouds", in *Computer Graphics Forum*, vol. 36, no. 1, Mar. 2015, doi:10.1111/cgf.12802.
- [20] Tomasz Łuczynski, Max Pfingsthorn, Andreas Birk, "The Pinax-model for accurate and efficient refraction correction of underwater cameras in flat-pane housings", in *Ocean Engineering*, vol. 133, 2017, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.01.029.
- [21] A. Muntoni and P. Cignoni, "PyMeshLab: The open source mesh processing python library", in *Zenodo*, Jan. 2021, doi: 10.5281/zenodo.4438750.
- [22] D. Mathieu, M. Mark, S. Peter and B. H. Alan, "Implicit Fairing of Irregular Meshes Using Diffusion and Curvature Flow", in *ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.*, 1999, pp. 317-324, doi: 10.1145/311535.311576.



Leonardo de Paula Nardy Graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, especialista em Administração pela Universidade de Salvador, mestre em Gestão e Tecnologias Industriais pelo SENAI CIMATEC, doutorando em Gestão e Tecnologias Industriais pelo SENAI CIMATEC. Desde 2012 trabalha no SENAI CIMATEC, onde atualmente é gerente de desenvolvimento de negócios atuando em robótica, sistemas autônomos e automação. <http://lattes.cnpq.br/2005303009549143>.



Oberdan Rocha Pinheiro Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial pelo SENAI CIMATEC. Atualmente é Pesquisador Líder do Instituto Senai de Inovação em Automação da Produção, com ênfase em Robôs Especiais e Autônomos e Pesquisador do PPG Stricto Sensu em Gestão e Tecnologia Industrial (GETEC). <http://lattes.cnpq.br/4197802436808266>.



Herman Augusto Lepikson Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Foi professor associado da Universidade Federal da Bahia até 2013, onde coordenou o Centro de Capacitação Tecnológica em Automação Industrial. É professor dos Programas de pós-graduação do Centro Universitário SENAI CIMATEC. Atualmente é Pesquisador Líder do Instituto Senai de Inovação em Logística e Manufatura Avançada. <http://lattes.cnpq.br/1115148358376830>.