



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

VANGÜNTHER BOHN JÚNIOR

EMBARCAÇÃO NÃO TRIPULADA DE BAIXO CUSTO PARA LEVANTAMENTOS  
HIDROGRÁFICOS EM ÁGUAS ABRIGADAS

Joinville  
2023

VANGÜNTHER BOHN JÚNIOR

EMBARCAÇÃO NÃO TRIPULADA DE BAIXO CUSTO PARA LEVANTAMENTOS  
HIDROGRÁFICOS EM ÁGUAS ABRIGADAS

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville  
2023

VANGÜNTHER BOHN JÚNIOR

EMBARCAÇÃO NÃO TRIPULADA DE BAIXO CUSTO PARA LEVANTAMENTOS  
HIDROGRÁFICOS EM ÁGUAS ABRIGADAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 11 de dezembro de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra  
Orientador(a)  
Presidente

---

Prof. Dr. Alexandre Mikowski  
Membro(a)  
UFSC

---

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni  
Membro(a)  
UFSC

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente as interações e relacionamentos que em maior ou menor grau me influenciaram e me conduziram até este momento.

A meus pais, dando a base necessária para meu desenvolvimento.

A Ana Rita Tomazelli, que me deu suporte emocional e auxiliou na revisão textual.

A meu orientador, Dr. André Luís Condino Fugarra, por acreditar em meu potencial, pela determinação e conhecimento, que muito me influenciaram.

A todo corpo docente do curso de Engenharia Naval, que ajudou a formar minha bagagem técnica e sempre foram solícitos e atenciosos.

A equipe de competição Barco Solar Babitonga, por ceder o casco de fibra em escala reduzida do catamarã.

A banca, que investiu seu tempo para auxílio e análise deste trabalho.

A você, caso não tenha sido citado acima, e está empregando seu tempo e empenho na busca de conhecimento.

*“A imaginação muitas vezes nos leva a mundos que nunca sequer existiram. Mas sem ela não vamos a lugar algum.”*

Carl Sagan

## RESUMO

Nos portos brasileiros, é perceptível processos que podem ser otimizados e melhorados, visando ganhos de eficiência, portanto, a revitalização de procedimentos para diminuir custos e automatiza-los é imprescindível. Dentre os procedimentos realizados pelos portos nacionais e internacionais, tem-se a batimetria, que é um dos segmentos da agrimensura responsável pela mensuração, representação gráfica da superfície terrestre submersa e a reapresentação cartográfica por meio de curvas batimétricas. A batimetria é realizada nos canais de acesso, bacias de evolução, canais internos de navegação, reservatórios, lagos e rios. Este trabalho apresenta um protótipo de uma embarcação em escala reduzida e não tripulada, para realizar batimetria em águas abrigadas visando a redução de custos. A metodologia consiste em demonstrar a construção e arranjo do sistema motriz e sistema de processamento de dados utilizando Arduíno, efetuar testes de módulos e sensores, levantando assim sua precisão em experimentos laboratoriais e em campo. O valor total investido no projeto foi de R\$ 1.442,96. Dentre os dois sensores ultrassônicos analisados, um deles não funcionou submerso, o outro obteve resultados satisfatórios para os níveis de linha d'água avaliados com a devida calibração, após calibrado apresentou em experimentos estáticos diferença relativas abaixo de 1%, embora tenha uma distância de bloqueio de 95 centímetros. O sensor *Global Positioning System* (GPS) utilizado demonstrou ter uma precisão interessante em relação ao seu custo, com médias do raio de distância entre os pontos abaixo de 3,32 metros, entretanto, depende do tempo de sincronização entre satélites e sua precisão é sensível ao clima e barreiras, como coberturas e telhados, por exemplo. O experimento em campo (Expoville) demonstrou a importância das linhas de verificação em um levantamento hidrográfico, e surgiram algumas medições anômalas (*spikes*) que devem ser tratadas por alguma metodologia ou *software* específico. O protótipo pode ser usado para verificar medições batimétricas periodicamente por possuir um valor acessível, e como sugestões futuras estão a criação de uma interface amigável, telemetria dos dados e piloto automático, assim programando rotas e analisando coleta de dados remotamente.

**Palavras-chave:** Arduíno. Águas abrigadas. Levantamento batimétrico. Método de baixo custo. USV.

## ABSTRACT

In Brazilian ports, processes that can be optimized and improved are noticeable, aiming for efficiency gains, therefore, the revitalization of procedures to reduce costs and automating them is essential. Among the procedures carried out by national and international ports, there is bathymetry, which is one of the segments of the surveyor responsible for measuring, graphical representation of the surface submerged land and cartographic re-presentation through bathymetric curves. Bathymetry is carried out in access channels, evolution basins, internal channels navigation, reservoirs, lakes and rivers. This work presents a prototype of a small-scale, unmanned vessel to perform bathymetry in sheltered waters aiming to reduce costs. The methodology consists of demonstrating the construction and arrangement of the driving system and data processing system using Arduino, carry out module and sensor tests, thus raising your precision in laboratory and field experiments. The total amount invested in the project was R\$1,442.96. Among the two ultrasonic sensors analyzed, one of them did not worked submerged, the other obtained satisfactory results for line levels of water evaluated with due calibration, after calibrated it presented in experiments static relative difference below 1%, although it has a blocking distance 95 centimeters. The Global Positioning System (GPS) sensor used demonstrated have an interesting precision in relation to its cost, with averages of the distance between points below 3.32 meters, however, depends on the synchronization between satellites and its accuracy is sensitive to weather and barriers such as coverings and roofs, for example. The field experiment (Expoville) demonstrated the importance of verification lines in a hydrographic survey, and emerged some anomalous measurements (spikes) that must be treated by some methodology or specific software. The prototype can be used to verify bathymetric measurements periodically (Order 1b) as it has an affordable value, and as future suggestions are the creation of a user-friendly interface, data telemetry and autopilot, thus programming routes and analyzing data collection remotely.

**Keywords:** Arduino. Sheltered waters. Bathymetric survey. Low cost method. USV.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de sondagem de ecobatímetro monofeixe (A) e multifeixe (B)	21
Figura 2 – Levantamento batimétrico . . . . .	22
Figura 3 – Princípio de funcionamento do medidor ultrassônico . . . . .	24
Figura 4 – Exemplo de planejamento das linhas regulares de sondagem e das linhas de verificação . . . . .	28
Figura 5 – Ecograma formado por hipérbolas devido à largura do feixe e as irregularidades de fundo, a esquerda, sondagem realizada em um fundo irregular e, a direita, ecograma registrado não condizente ao fundo real . . . . .	30
Figura 6 – Ecograma digital proveniente do ecobatímetro modelo <i>Hydrobox</i> da fabricante <i>SyOQwest</i> , à esquerda, e perfil de fundo digitalizado de forma automática pelo <i>software</i> de coleta de dados, a direita . . . .	31
Figura 7 – Representação dos Graus de Liberdade de uma embarcação . . . .	31
Figura 8 – Incerteza na medição da profundidade devido aos movimentos de <i>Roll</i> , de <i>Pitch</i> e de <i>Heave</i> da plataforma de sondagem . . . . .	32
Figura 9 – Posicionamento Absoluto Cinemático . . . . .	34
Figura 10 – USV Tupan TideWise . . . . .	41
Figura 11 – <i>Unmanned Surface Vehicles</i> (USV) Mero USSVTech . . . . .	42
Figura 12 – USV Tucunaré USSVTech . . . . .	42
Figura 13 – Arduíno UNO R3 . . . . .	44
Figura 14 – Sensor MPU-6050 . . . . .	46
Figura 15 – Sensor GPS Ublox NEO-6Mv2 . . . . .	47
Figura 16 – Módulo SD Card . . . . .	48
Figura 17 – Sensor Ultrassônico JSN-SR04T 2.0 . . . . .	49
Figura 18 – Sensor Ultrassônico DYP-A02YY . . . . .	51
Figura 19 – Proposta de método . . . . .	52
Figura 20 – Modelagem de casco do catamarã Babitonga . . . . .	53
Figura 21 – Processo de fabricação estrutural . . . . .	55
Figura 22 – Ligação dos cascos . . . . .	55
Figura 23 – Caixa para componentes eletrônicos . . . . .	56
Figura 24 – Esquema de conexões dos componentes eletrônicos . . . . .	58
Figura 25 – Caixa com componentes montados . . . . .	58
Figura 26 – Reforço da haste do motor . . . . .	59
Figura 27 – Base de apoio do motor . . . . .	59
Figura 28 – Servomotor e direção do motor . . . . .	60

Figura 29 – Diagrama de ligação de componentes do Arduíno . . . . .	61
Figura 30 – Ligação dos componentes do Arduíno UNO ao USV . . . . .	61
Figura 31 – Realocação dos componentes do Arduíno UNO . . . . .	62
Figura 32 – Teste do protótipo USV em piscina . . . . .	63
Figura 33 – Leitura de coordenadas geográficas, profundidade e distância frontal	64
Figura 34 – Marcos geodésicos de Joinville que foram selecionados . . . . .	65
Figura 35 – Medições nos marcos geodésicos de Joinville selecionados . . . . .	66
Figura 36 – Medições com sensores ultrassônicos no Tanque Hidrostático . . . . .	67
Figura 37 – Vista superior do tanque com o protótipo e pontos de medição de profundidade . . . . .	68
Figura 38 – Vista superior da piscina pequena com pontos de medição de profundidade . . . . .	68
Figura 39 – Execução do experimento em piscina pequena . . . . .	69
Figura 40 – Vista superior da piscina grande com pontos de medição de profundidade . . . . .	69
Figura 41 – Execução do experimento em piscina grande . . . . .	70
Figura 42 – Operação protótipo USV em lago da Expoville . . . . .	70
Figura 43 – Pontos da trajetória em levantamento batimétrico da Expoville . . . . .	71
Figura 44 – Dados coletados marco Geodésico MR42 de Joinville . . . . .	74
Figura 45 – Dados coletados marco Geodésico MR43 de Joinville . . . . .	74
Figura 46 – Dados coletados marco Geodésico zero de Joinville . . . . .	75
Figura 47 – Dados consolidados do experimento no tanque de prova e função calibração $k$ . . . . .	79
Figura 48 – Dados para função calibração $k$ considerando medições na piscina pequena . . . . .	81
Figura 49 – Dados que compõem a incerteza padrão e total de cada componente	82
Figura 50 – Dados das medições em piscina grande . . . . .	85
Figura 51 – Mapa com interpolações por <i>Triangulated Irregular Network</i> (TIN) e <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW) da profundidade reduzida Expoville	87
Figura 52 – Embarcação em coleta de dados . . . . .	110

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW) . . . . .	37
Gráfico 2 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método <i>Triangulated Irregular Network</i> (TIN) . . . . .	37
Gráfico 3 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método Multinível <i>B-Spline</i> (MBS) . . . . .	37
Gráfico 4 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método <i>Spline</i> de Placa Fina (TPS) . . . . .	38
Gráfico 5 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método <i>Kriging</i> (KRG) . . . . .	38
Gráfico 6 – Gráfico de dispersão dos dados coletados MR42 . . . . .	76
Gráfico 7 – Gráfico de dispersão dos dados coletados MR42 sem os 60 primeiros registros . . . . .	76
Gráfico 8 – Gráfico de dispersão dos dados coletados MR43 . . . . .	77
Gráfico 9 – Dados coletados no tanque de prova com 90 a 120 cm de linha d'água	78
Gráfico 10 – Diferenças entre aferição e coleta de dados e sua função calibração $k$	79
Gráfico 11 – Dados consolidados do experimento no tanque de prova e piscina pequena . . . . .	80
Gráfico 12 – Diferenças entre aferição e coleta de dados e sua função calibração $k$	81
Gráfico 13 – Resultado da profundidade reduzida e calculada e suas incertezas totais . . . . .	83
Gráfico 14 – Dados consolidados do experimento em piscina grande . . . . .	84
Gráfico 15 – Leitura de profundidade reduzida Expoville . . . . .	85
Gráfico 16 – Interpolação com código Octave profundidade reduzida Expoville ( <i>surf</i> ) . . . . .	86
Gráfico 17 – Interpolação com código Octave profundidade reduzida Expoville ( <i>mesh</i> ) . . . . .	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes utilizadas no cálculo do $IVT_{max}$ . . . . .	27
Tabela 2 – Velocidade da propagação do som na água . . . . .	29
Tabela 3 – Lista de USVs internacionais . . . . .	40
Tabela 4 – Especificações Técnicas do Arduíno UNO . . . . .	45
Tabela 5 – Propriedades hidrostáticas do modelo . . . . .	54
Tabela 6 – Custos de construção do protótipo USV . . . . .	72
Tabela 7 – Dados da coleta de pulsos ( $\mu s$ ) e sua estatística descritiva dos experimentos (90 a 120 cm) . . . . .	78
Tabela 8 – Dados da estatística descritiva do experimento dos pulsos sonoros ( $\mu s$ ) (136 cm) . . . . .	80
Tabela 9 – Dados da estatística descritiva dos pulsos sonoros ( $\mu s$ ) em 130 cm	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
AS	<i>Anti-Spoofing</i>
ASC	<i>Autonomous Surface Craft</i>
ASV	<i>Autonomous Surface Vessel</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicles</i>
BDS	Batimetria Derivada de Satélite
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DMT	<i>Data Metrics</i>
DP	posição dinâmica
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements</i>
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IHO	<i>International Hydrographic Organization</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
KRG	<i>Kriging</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>

LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LIFE	Laboratório de Interação Fluido-Estrutura
LiPo	Polímero de Lítio
LPL	<i>Local Polynomial</i>
MAV	<i>Moving Average</i>
MBE	<i>Multibeam Echo Sounders</i>
MBS	Multinível <i>B-Spline</i>
MDP	Modelo Digital de Profundidade
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MSP	<i>Modified Shepard's</i>
MVC	<i>Minimum Curvature</i>
NEN	<i>Nearest Neighbour</i>
NR	Nível de Redução
PRG	<i>Polynomial Regression</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ROV	Submarino Operado Remotamente
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SBES	<i>Single Beam Echo Sounders</i>
SD	<i>Secure Digital Cards</i>
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SONAR	<i>Sound Navigation And Ranging</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
TPS	<i>Spline de Placa Fina</i>

TTL     *Transistor–transistor logic*

UFSC    Universidade Federal de Santa Catarina

USB     *Universal Serial Bus*

USV     *Unmanned Surface Vehicles*

UUV     *Unmanned Underwater Vehicle*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Omega$	Unidade de medida de resistência elétrica Ohm
Hz	Unidade de medida de frequência Hertz
V	Unidade de medida de tensão elétrica Volts
m	Unidade de medida de distância metros
cm	Unidade de medida de distância centímetros
m/s	Unidade de medida de velocidade em metros por segundo
m <sup>3</sup>	Unidade de medida de volume em metros cúbicos
°C	Unidade de medida de temperatura em graus Celsius
‰	Unidade de medida de quantidade em partes por mil
mA	Unidade de medida de corrente elétrica em miliamperes
A	Unidade de medida de corrente elétrica em Amperes
kB	Unidade de medida de memória na computação em quilobite
mm	Unidade de medida de distância em milímetros
g	Unidade de medida de massa em gramas
GB	Unidade de medida de memória na computação em gigabites
kg	Unidade de medida de massa em quilogramas
RPM	Unidade de medida de velocidade angular em rotações por minuto
ton	Unidade de medida de massa em toneladas
m <sup>2</sup>	Unidade de medida de área em metros quadrados
m <sup>3</sup>	Unidade de medida de área em metros cúbicos
s	Unidade temporal em segundos
ms	Unidade temporal em milisegundos
kgf/cm	Unidade de medida de torque em quilograma-força por centímetros

mAh	Unidade de medida de consumo de corrente em miliamperes por hora
dBm	Unidade de medida utilizada principalmente em telecomunicações para expressar a potência absoluta, mediante uma relação logarítmica em <i>decibel miliwatt</i>
W	Unidade de medida de potência de energia em watts
"	Unidade de medida de distância em polegadas
$\mu$ S	Unidade de medida de tempo em microssegundos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Objetivo	18
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>18</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>BATIMETRIA E SEUS MÉTODOS</b>	<b>20</b>
2.1	Ecobatímetro	21
2.2	Ecobatímetro monofeixe	23
2.3	Ecobatímetro multifeixe	25
2.4	Principais fontes de incerteza na medição de profundidade	25
<b>2.4.1</b>	<b>Incerteza devido à velocidade de propagação do som</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Incerteza devido à forma e ao tipo de fundo</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Incerteza devido aos movimentos da embarcação</b>	<b>31</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Incerteza devido à disposição dos equipamentos a bordo</b>	<b>32</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Incerteza devido ao <i>draft</i>, demais variações dinâmicas da embarcação e ao estabelecimento do nível de redução</b>	<b>33</b>
2.5	Sistema de geolocalização	34
2.6	Análise e representação de dados	35
2.7	Plataformas batimétricas não tripuladas	38
2.8	Microcontroladores	43
<b>2.8.1</b>	<b>Arduíno UNO</b>	<b>44</b>
2.8.1.1	Módulos e seus dispositivos	45
2.8.1.2	Acelerômetro e Giroscópio CI MPU-6050	46
2.8.1.3	GPS Ublox NEO-6M	47
2.8.1.4	Módulo SD Card	48
2.8.1.5	Sensor Ultrassônico JSN-SR04T 2.0	49
2.8.1.6	Sensor Ultrassônico DYP-A02YY	50
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>52</b>
3.1	Fase 1 - Estrutura do Protótipo	53
<b>3.1.1</b>	<b>Modelo de casco</b>	<b>53</b>
3.2	Fase 2 - Núcleo de Processamento Lógico	56
3.3	Fase 3 - Sistema Mecânico de Deslocamento	58
3.4	Fase 4 - Adaptação Sonar e GPS	60
3.5	Fase 5 - Integração de todas as fases do protótipo	63
3.6	Fase 6 - Representação Gráfica do Relevo	64

3.7	Experimentos . . . . .	65
3.7.1	<b>Verificação de acurácia sensor GPS . . . . .</b>	<b>65</b>
3.7.2	<b>Experimentos em tanque hidrostático para calibração . . . . .</b>	<b>66</b>
3.7.3	<b>Experimentos em piscina pequena para extrapolação da função <math>k</math> . . . . .</b>	<b>68</b>
3.7.4	<b>Experimentos em piscina grande para verificar impacto da velocidade do protótipo na acurácia da medição . . . . .</b>	<b>69</b>
3.7.5	<b>Experimentos de levantamento batimétrico em campo (Expoville) . . . . .</b>	<b>70</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE DADOS . . . . .</b>	<b>72</b>
4.1	Custo da construção do protótipo . . . . .	72
4.2	Estimativa da incerteza do sensor GPS . . . . .	73
4.3	Medição de profundidade experimentos em Tanque hidrostático . . . . .	77
4.4	Medição de profundidade em piscina pequena para extrapolação da função $k$ . . . . .	80
4.5	Aferição de profundidade em piscina grande para verificar impacto da velocidade do protótipo na acurácia da medição . . . . .	83
4.6	Levantamento batimétrico em campo (Expoville) . . . . .	85
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>88</b>
5.1	Conclusões . . . . .	88
5.2	Perspectivas e desdobramentos futuros . . . . .	89
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE A . . . . .</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE B . . . . .</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os complexos portuários e seus terminais desempenham papel estratégico no comércio exterior em âmbito mundial (Linn *et al.*, 2003). Dados da plataforma Comex Stat (BRASIL, 2022a), relatam que em 2021, exclusivamente no Brasil, a movimentação em valor por vias marítimas representou 82% (US\$ 409,2 bilhões) do fluxo de comércio exterior e um percentual em peso de 97% (851,8 milhões de toneladas) em movimentações. A Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) (BRASIL, 2022b), relata um volume de carga recorde transportado pelos portos brasileiros em 2021, ultrapassando a quantia de 1,2 bilhões de toneladas, um crescimento de 4,8% referente a 2020, com perfis de carga variando entre 58% de granéis sólidos, 26% de granéis líquidos, 11% contêineres e 5% carga geral solta.

Os portos, tanto privados como públicos, para suprir, manter e ampliar sua capacidade produtiva exercem diversas atividades e procedimentos relativos à infraestrutura. A manutenção e o investimento em equipamentos, área em cais de operação, vias de acesso, entre outros pontos são vitais para a eficiência da operação. Dentre esses procedimentos, existe a batimetria, que será o ponto focal deste trabalho.

A batimetria é a ciência de mensuração a fim de determinar e representar graficamente o relevo do fundo de áreas submersas, tais como lagos, rios e mares. Em um primeiro estágio, se obtêm os dados, em seguida, a representação é feita cartograficamente por meio de curvas batimétricas, relacionando o ponto referencial com pontos de profundidade semelhantes, correlacionadas com curvas topográficas que unem pontos de mesma altitude (Pereira; Barachuy, 2008). A importância deste procedimento reside na tomada de decisão para a manutenção de profundidades navegáveis através de dragagens e medidas de prevenção de áreas que tem maior probabilidade de assoreamento e sedimentação, assim evitando encalhar embarcações, garantindo a navegabilidade.

Segundo Pereira e Barachuy (2008), o ecobatímetro é o instrumento para realização dos levantamentos batimétricos, que emite ondas sonoras para fazer a medição da profundidade. Esse fenômeno ocorre devido ao intervalo de tempo de emissão e recepção dessas ondas, com auxílio de um relógio interno que mensura esses instantes. Existem dois modelos de ecobatímetros: monofeixe e multifeixe.

A batimetria monofeixe utiliza apenas uma faixa sonora e é emitida em um determinado instante, enquanto a batimetria multifeixe emprega diversas faixas sonoras simultaneamente, possibilitando mapeamento abrangente de áreas em alta resolução.

Frazae e Amaro (2016) aplicaram a metodologia de cálculos geoestatísticos com a finalidade de analisar os dados obtidos do levantamento batimétrico. Para isso,

fizeram uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) aliados a técnicas de sensoriamento remoto, resultando em imagens georreferenciadas do levantamento batimétrico.

Conforme Pereira e Barachuy (2008), os estudos das áreas hidrográficas aumentaram devido a contínua ocupação e exploração, como por exemplo a construção e operação de portos, porém, existem lacunas de eficiência neste processo que o limitam, o qual é extremamente oneroso nos portos brasileiros. Essa restrição ocorre devido a necessidade de equipamentos específicos e de profissionais especializados que elaborem ensaios geofísicos sobre a lâmina d'água e representem as profundidades graficamente (Santana; Lima, 2011).

Existe uma visível tendência, nos últimos anos, onde cientistas e engenheiros se concentraram no desenvolvimento de plataformas autônomas de pequeno porte e baixo custo para o monitoramento de dados com o objetivo de aumentar a taxa de amostragem e reduzir o custo (Chavez *et al.*, 2018). Cabe citar um exemplo relevante, elaborado por Nunes *et al.* (2017), sendo um protótipo automatizado e de baixo custo com a finalidade de realizar o levantamento batimétrico, utilizando um *Sound Navigation And Ranging* (SONAR) para obtenção de valores de profundidade e um sistema de localização por GPS responsável pelo posicionamento. Marques *et al.* (2017) também executaram trabalho semelhante, com foco na análise de incerteza do sensor de baixo custo para a batimetria. Este trabalho tem viés tecnológico, de caráter aplicado da engenharia, afim de otimizar e baratear o processo da batimetria.

## 1.1 OBJETIVO

Como maneira de otimizar recursos e possibilitar automações no processo de batimetria, este trabalho propõe um protótipo como alternativa de baixo custo e de fácil replicação, dando enfoque nos seguintes objetivos:

### 1.1.1 Objetivo Geral

Produzir uma embarcação não tripulada de baixo custo como alternativa para levantamentos batimétricos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender os principais métodos convencionais de batimetria e suas ferramentas, além de sistemas comerciais;
- Construir a plataforma (embarcação) para a inserção da instrumentação e motorização;
- Acoplar sistema fotovoltaico para auxílio na autonomia e alimentação do sistema de coleta de dados (Arduíno);

- Montar e programar o sistema de coleta de dados (Arduíno);
- Aplicar testes do sistema de controle da embarcação e acurácia da instrumentação de coleta e armazenamento de dados (Arduíno);
- Realizar levantamento batimétrico em lago do Centro de Convenções e Exposições Expoville (Joinville/SC);
- Levantar custos totais na construção do protótipo.

O método de pesquisa empregado neste estudo se baseia em etapas de estudo, prototipagem e análise. Na etapa de estudo, compreendeu-se os mecanismos essenciais do objeto de estudo, construindo o modelo de itens essenciais para execução da batimetria. A prototipagem foi realizada através da definição do método focado na redução de custo. A análise partiu de testes experimentais e em campo realizados pelo autor.

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos contabilizado com este, de caráter introdutório. O capítulo dois trata do referencial teórico, abordando temas sobre batimetria e tipos de equipamentos batimétricos, microcontrolador Arduíno e alguns dos seus módulos, GPS e pequenas embarcações não tripuladas. O terceiro capítulo apresenta a metodologia aplicada a este trabalho. No quarto capítulo é realizada a análise dos resultados obtidos e, por fim, no quinto capítulo apresentam-se as considerações finais do trabalho e as recomendações a trabalhos futuros.

## 2 BATIMETRIA E SEUS MÉTODOS

Conforme Pereira e Barachuy (2008), os estudos das áreas hidrográficas aumentaram devido à sua contínua ocupação, por meio das intervenções humanas através de construções de portos, pontes, barragens, dutos submarinos, túneis, entre outros. Houve um grande avanço no que tange os sensores utilizados na oceanografia, entretanto em questões de plataforma para adquirir os dados, não existiram grandes alterações (Curtin *et al.*, 1993). Referente a coleta de dados na oceanografia, tem-se as principais plataformas (Curtin *et al.*, 1993; Ferreira *et al.*, 2009; Giordano *et al.*, 2015; Manley, 2008; Trembanis *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2002; Zhao; Yan; Jin, 2011):

- Fundeios;
- Boias fixas e de deriva;
- Navios, embarcações e submarinos tripulados;
- Satélites;
- Veículo Submarino Operado Remotamente (ROV);
- *Glíder e Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*;
- Veículo aquático não tripulado de superfície (USV, *Autonomous Surface Craft (ASC), Autonomous Surface Vessel (ASV)*).

De maneira convencional, o levantamento batimétrico consiste na sondagem de leitões submersos, obtendo dados de profundidades georreferenciados, que possibilitam a geração de modelos tridimensionais dos terrenos, resultando no relevo de fundo e/ou volume de água armazenado em represas. Sendo que as atividades de campo que empregam ecobatímetro e receptor de posicionamento global embarcados, são morosas e apresentam custo elevado, além de expor o homem a riscos de acidentes (Brasil, 2013).

Contemporaneamente, o levantamento batimétrico passou a ser executado através do emprego de sistemas de sondagem compostos por ecobatímetros para medição da profundidade em conjunto com receptores *Global Navigation Satellite System (GNSS)* para o georreferenciamento e, em casos específicos, por sensores que medem o perfil da velocidade do som e a altitude da plataforma de sondagem (IHO, 2005).

De maneira prática, a respeito do crescente progresso da tecnologia, ecobatímetros monofeixe (*Single Beam Echo Sounders (SBES)*) são utilizados em grande escala, devido as facilidades operacionais aliadas ao baixo custo de aquisição (Estigoni; Matos; Mauad, 2012; Ferreira *et al.*, 2016; Freitas *et al.*, 2016).

Em contraponto, recentemente surgiram sistemas de sondagem autônomos e não tripulados, ferramentas excelentes para aplicação em reservatórios de água e barragens de rejeitos (Ferreira; Neto; Monteiro, 2016).

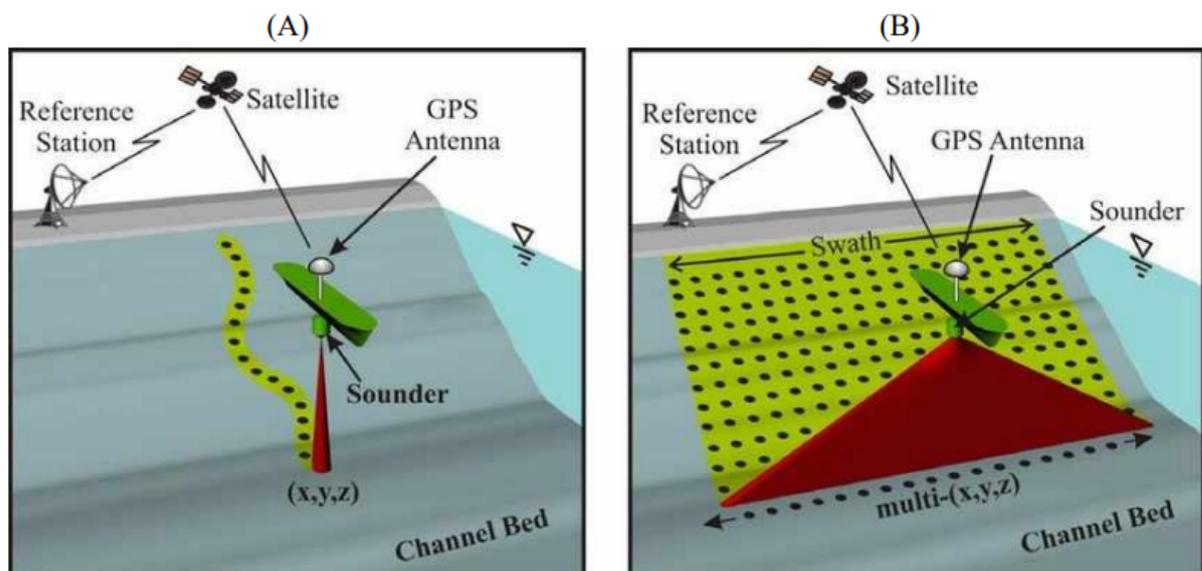
Outros métodos vem se consolidando, como o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), onde um sensor remoto, geralmente aerotransportado, emite feixes de *laser* infravermelho que ao atingirem a superfície a ser estudada, retorna um sinal ao sensor, capturando informações sobre uma superfície para gerar um modelo tridimensional da área. Tendo em vista que o *laser* obtém dados da distância entre objetos, este permite a medição de diversas feições sobre área de estudo, como por exemplo o desnível de um terreno ou a altitude de prédios e árvores (MENSURAR, 2023).

A Batimetria Derivada de Satélite (BDS) também é uma técnica útil para mapear a batimetria de águas rasas, caracterizar a área costeira e monitorar as mudanças do fundo marinho que podem ter ocorrido desde o último levantamento batimétrico realizado (Lyzenga, 1978). E mais recentemente se destaca a utilização de inteligência artificial para o processamento de imagens a fim de gerar a estimativa batimétrica.

## 2.1 ECOBATÍMETRO

Tradicionalmente, em medição da profundidade são utilizados sistemas acústicos, como ecobatímetros monofeixe, multifeixe e sondadores interferométricos (IHO, 2005) (Figura 1). O ecobatímetro monofeixe é regulamentado pela Agência Nacional de Águas (ANA) (Brasil, 2013) e pela Marinha do Brasil (DHN, 2017).

Figura 1 – Sistema de sondagem de ecobatímetro monofeixe (A) e multifeixe (B)



Fonte: Muste, Kim e Merwade (2012)

O ecobatímetro monofeixe ainda é utilizado para levantamentos batimétricos de reservatórios e águas interiores, embora o multifeixe venha o substituindo (Ferreira

*et al.*, 2016). As profundidades medidas com ecobatímetro devem apresentar incerteza vertical máxima de 5%, com grau de confiança de 95% (DHN, 2017). Para a determinação da profundidade (unidade de medida em metros) emprega-se a Equação 1 para definir a sondagem (IHO, 2005):

$$S = \frac{v_{H2O}(t_r - t_e)}{2} \quad (1)$$

Sendo as variáveis:

$S$  – sondagem realizada (metros);

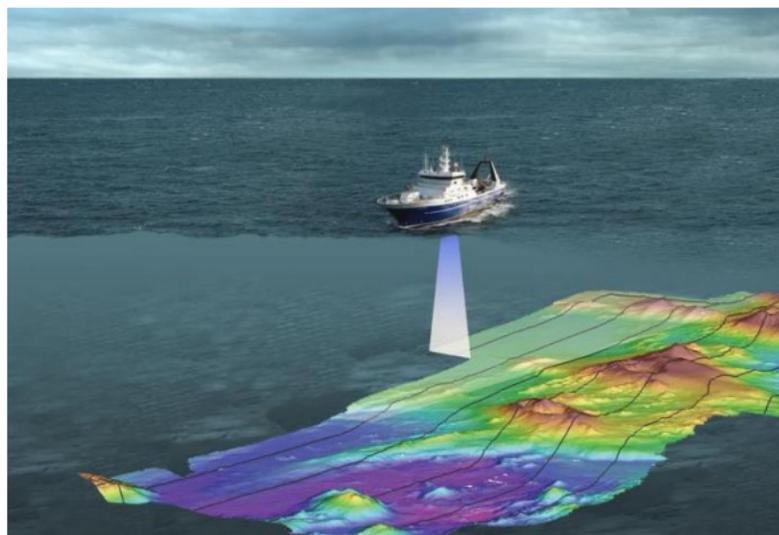
$v_{H2O}$  – velocidade de propagação do som (ou função que representa essa velocidade em metros por segundo, variando conforme temperatura e salinidade);

$t_e$  – instante (segundos) da emissão do pulso emitido pelo ecobatímetro respectivamente;

$t_r$  – instante (segundos) da recepção do pulso emitido pelo ecobatímetro respectivamente.

A frequência do pulso é quem define o alcance de medição, e sua penetração nos sedimentos. O alcance de um pulso é inversamente proporcional à sua frequência, o que implica que as frequências mais altas são usadas em menores profundidades, e as mais baixas para maiores. De modo geral, a batimetria possui duas metodologias, a direta e a indireta. Um exemplo de medição direta é a utilização de cabos e medições de profundidade com uso de régua graduada. A medição indireta é a aquisição da informação que será utilizada para calcular a profundidade, por exemplo, a aferição da propagação de sinais acústicos (Gagg, 2016). A Figura 2 ilustra um levantamento indireto.

Figura 2 – Levantamento batimétrico



Fonte: SUBSEAWORDNEWS (2023)

A temperatura, salinidade e pressão influenciam na velocidade de propagação das ondas sonoras na água. Conforme Telford (1976), a velocidade de propagação do som na água pode variar de 1440 m/s a 1520 m/s em águas salgadas rasas, e em águas doces rasas atingindo valores mais baixos, ao redor de 1430 m/s.

## 2.2 ECOBATÍMETRO MONOFEIXE

Segundo Freitas *et al.* (2016), os ecobatímetros monofeixe são constituídos em geral por:

- **Gerador de pulso:** sendo o dispositivo automático que provoca a emissão de vibrações;
- **Gerador de alta tensão:** responsável por gerar uma voltagem elevada para excitação do transdutor;
- **Transdutor:** converte a energia elétrica em ondas sonoras, e vice e versa;
- **Amplificador:** amplifica as oscilações elétricas geradas no transdutor e transmite-as para o registrador;
- **Registrador:** transforma o intervalo de tempo decorrido entre a emissão do pulso sonoro e a recepção do seu eco em registros de profundidades, em função da velocidade de propagação do som na água.

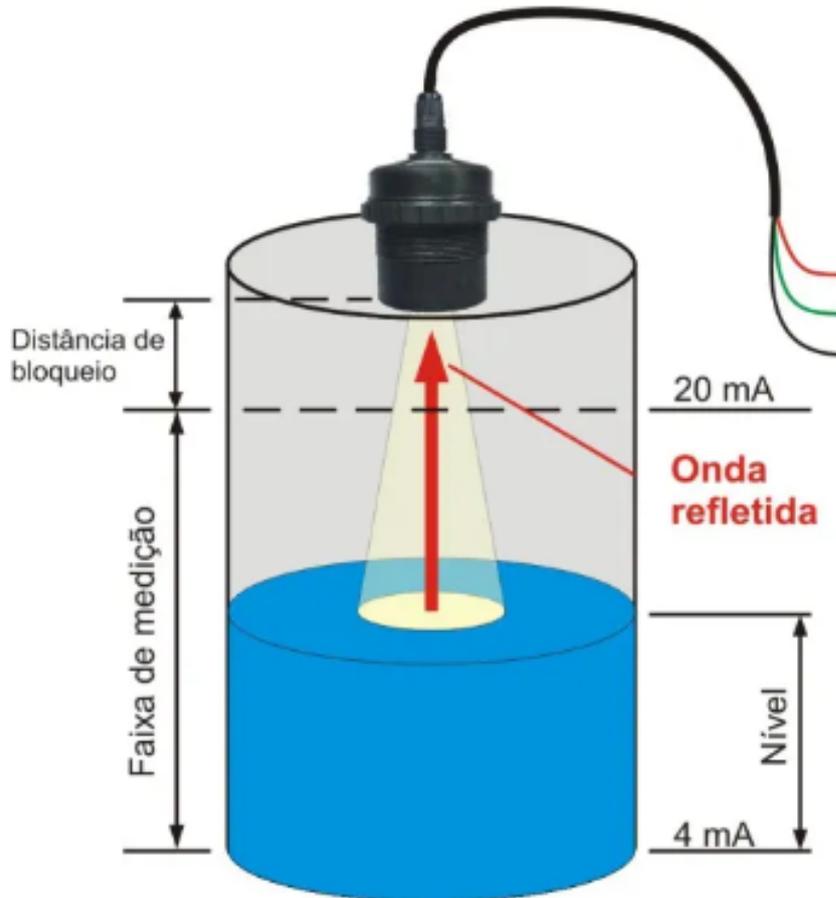
Em relação ao funcionamento, o gerador de pulso produz periodicamente um pulso de energia elétrica, que é enviado ao registrador, ao mesmo tempo o transdutor converte o pulso recebido de energia elétrica em um pulso de energia sônica ou ultrassônica pelo princípio da piezoelectricidade e o emite verticalmente para a coluna d'água. Neste processo, parte da energia sonora é refletida e retorna a superfície em forma de eco após encontrar o leito. O sinal recebido pelo transdutor é então transformado em energia elétrica e enviado ao amplificador, que amplia e filtra o pulso elétrico. Feito isso o pulso elétrico é enviado ao registrador, que converte automaticamente o intervalo de tempo decorrido entre a emissão do pulso sonoro e a recepção de seu eco em registros de profundidade (Freitas *et al.*, 2016).

Em relação a propagação da onda sonora, alguns fatores exercem grande influência, como profundidade, os sedimentos que cobrem o leito submerso. Fundos de lama, por exemplo, absorvem uma parte considerável da onda sonora, enquanto que fundos de areias refletem muito bem o som. Para melhorar a acurácia da mensuração, são consideradas correções conforme o equipamento é instalado e o estado da água (Freitas *et al.*, 2016).

O ecobatímetro monofeixe de 200 kHz (recomendado para medições até 100 metros de profundidade) é um equipamento amplamente difundido no levantamento de

pequenos reservatórios, mensurando o tempo entre propagação da onda emitida e o eco refletido pelo leito através do seu transdutor. A profundidade mínima alcançada (distância de bloqueio, Figura 3) pode variar conforme dispositivo e frequência utilizada (equipamento utilizado neste trabalho é da ordem de 0,95 metros) e em levantamentos onde é exigida maior acurácia a velocidade de propagação da onda sonora deve ser determinada e introduzida no equipamento (Wilson; Richards, 2006).

Figura 3 – Princípio de funcionamento do medidor ultrassônico



Fonte: ALFACORP (2023)

A Marinha do Brasil (Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)), seguindo recomendações da *International Hydrographic Organization* (IHO), ainda permite o uso dos sistemas monofeixe em casos específicos, como em levantamentos de Ordem 1b e 2, conforme especificado na Publicação Especial S-44 (IHO, 2008), e conforme descrito na Normam 25:

“Para que seja atingida a Ordem Especial ou a Ordem 1a faz-se necessário o levantamento completo do fundo marinho, a fim de que seja possível a detecção de feições iguais ou maiores a 1 m<sup>3</sup> (no caso de Ordem Especial) e iguais ou maiores a 2 m<sup>3</sup> (no caso de Ordem 1a), bem como das menores profundidades locais. Para que ambas as necessidades sejam atendidas, torna-se necessário, nos LH de Ordem Especial e de Ordem 1a, o emprego de ecobatímetros multifeixe e a cobertura de 200% do fundo marinho.” (DHN, 2017, p. 11).

## 2.3 ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

Conforme Silveira (2004), os *Multibeam Echo Sounders* (MBEs) efetuam medidas simultâneas de profundidade no mesmo instante, que é emitido por múltiplos feixes, arranjados angularmente de maneira a mapear áreas contíguas na direção perpendicular à navegação, propiciando levantar faixas extensas (variando com a profundidade) do fundo, atingindo elevada resolução da área levantada. Assim, o mapeamento contínuo de uma área no fundo é realizado pela “ensonificação” de subáreas que são chamadas *foot-print*. O conjunto formado por essas subáreas é a cobertura lateral ou *swath*.

A densidade de dados obtidas a partir dos ecobatímetros multifeixes é maior se comparada aos dados de monofeixe, devido ao número de sensores em direções diferentes. Este arranjo permite obter uma medição com alta precisão da espessura de coluna d’água. A sua grande vantagem é a possibilidade de disponibilizar em tempo real a geração do mapa topográfico da região levantada (Gagg, 2016).

Recomenda-se o levantamento por multifeixes onde é necessário um alto nível de detalhamento da superfície do fundo ou uma “ensonificação” completa do leito (levantamentos de ordem especial – OHI S44, canais de navegação, localização de obstáculos e objetos, instalação de dutos submersos). A complexidade do processo de aquisição dos dados é maior e é fundamental o emprego de vários equipamentos de auxílio para posicionamento e medição da velocidade do som na água, representando maiores custos nos equipamentos e nas atividades de processamento, que em contrapartida resulta em alta resolução e precisão (Gagg, 2016; IHO, 2008; USACE, 2013).

## 2.4 PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA NA MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE

Independentemente dos equipamentos utilizados, em levantamentos hidrográficos, assim como nos levantamentos fotogramétricos, geodésicos ou topográficos, as observações conterão erros. Segundo Ferreira *et al.* (2016), os erros podem ser divididos em grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

O *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements* (GUM) descreve que as incertezas podem ser analisadas em dois tipos mais comuns: tipo A e tipo B. A incerteza padrão tipo A deve ser baseada em métodos estatísticos válidos para tratamento de dados. A incerteza padrão tipo B é efetuada por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações, sendo usualmente baseada em julgamentos científicos utilizando todas as informações disponíveis. O procedimento de estimativa de incerteza nas medições também deve considerar a determinação da incerteza combinada, o número de graus de liberdade e o fator de abrangência e incerteza expandida (INMETRO, 2012).

Após o cálculo das sondagens, deve-se acrescentar diversas correções para minimizar as incertezas e ajustar a distância da sonda, para assim obter a profundidade corrigida (IHO, 2008; USACE, 2013; Ferreira; Rodrigues; Santos, 2015). O termo Profundidade Reduzida é utilizado na comunidade hidrográfica, sendo entendido como a profundidade corrigida referenciada a um Nível de Redução (NR), ou seja, corrigida também dos efeitos de maré do dia e hora da sondagem.

Para considerar a correção instrumental, de posição do transdutor, dos movimentos da embarcação de sondagem e ambientais, pode-se calcular a profundidade reduzida através da Equação 2 (Ramos, 2007; Ferreira, 2013):

$$P = S + k + D + \epsilon \quad (2)$$

Sendo as variáveis:

$P$  – profundidade reduzida, referida a um nível de redução em metros;

$S$  – sondagem realizada em metros;

$k$  – índice de correção instrumental para o ecobatímetro em metros;

$D$  – *Draft*, profundidade de imersão do transdutor em metros;

$\epsilon$  - demais correções, como: variações dinâmicas de calado (motivado pelo consumo de água e de combustível), movimento de *Settlement*<sup>1</sup> e *squat*<sup>2</sup> da embarcação de sondagem, definição do NR e variação do nível d'água.

Os levantamentos batimétricos devem cumprir as normas firmadas pela DHN em consenso com a IHO. Na determinação da profundidade, a Incerteza Vertical Total Máxima permitida ( $IVT_{max}$ ) para um nível de confiança de 95% é dada pela Equação 3:

$$IVT_{max} = \pm \sqrt{a^2 + (bP_{media})^2} \quad (3)$$

Sendo as variáveis:

$a$  – coeficiente da fração da incerteza que não varia com a profundidade;

$b$  – coeficiente da fração da incerteza que varia com a profundidade;

$P_{media}$  – profundidade média.

As constantes  $a$  e  $b$  são fornecidas pela Tabela 1 e se alteram de acordo com a classificação dos levantamentos hidrográficos (IHO, 2008).

<sup>1</sup> Corresponde a um decréscimo do nível da linha d'água de uma embarcação em movimento, relativamente ao mesmo nível, considerando-se a embarcação imobilizada (IHO, 2005).

<sup>2</sup> Diferença de nível observada entre a proa e a popa de uma embarcação, quando em movimento, gerando um sistema de ondas da proa para popa da embarcação (IHO, 2005).

Tabela 1 – Constantes utilizadas no cálculo do  $IVT_{max}$ 

Classificação	Especial	1a	1b	2
Precisão das Profundidades	$a = 0,25$ m	$a = 0,50$ m	$a = 0,50$ m	$a = 1,00$ m
Reduzidas (nível de confiança de 95%)	$b = 0,0075$	$b = 0,013$	$b = 0,013$	$b = 0,023$

Fonte: Adaptado de IHO (2008) e Ferreira (2013)

O levantamento estará dentro dos padrões de qualidade quando o valor da Incerteza Vertical Total estimada ( $IVT_{est}$ ) das profundidades reduzidas for inferior ao  $IVT_{max}$ . Obtêm-se o  $IVT_{est}$  das profundidades reduzidas através da verificação dos erros, sem correlações entre si, do sistema de sondagem. Esta avaliação do  $IVT_{est}$  verifica a capacidade de determinados sistemas em alcançar as condições mínimas de qualidade para determinado tipo de levantamento (IHO, 2005; Ramos, 2007).

O  $IVT_{est}$ , ao nível de confiança de 68% é obtido através da raiz quadrada do somatório das variâncias de todos os componentes integrantes da Equação 2, dado pela Equação 4 (IHO, 2005):

$$IVT_{est} = \pm \sqrt{\sigma_{zv}^2 + \sigma_{zt}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_R^2 + \sigma_{tide}^2} \quad (4)$$

Sendo as variáveis:

$\sigma_{zv}^2$  – variância da profundidade devida à incerteza na medida da velocidade do som e à sua variação temporal e espacial;

$\sigma_{zt}^2$  – variância da profundidade devida à incerteza na medida do tempo de propagação do feixe acústico;

$\sigma_h^2$  – variância da profundidade devido ao efeito *heave*;

$\sigma_i^2$  – variância da profundidade em função da incerteza na posição do transdutor, alterações de calado, efeitos de assentamento e *squat*;

$\sigma_R^2$  – variância da profundidade devido à incerteza na leitura dos registros do ecobatímetro e em função da sua resolução;

$\sigma_{tide}^2$  – variância da profundidade em função às incertezas na observação e redução das variações do nível d'água.

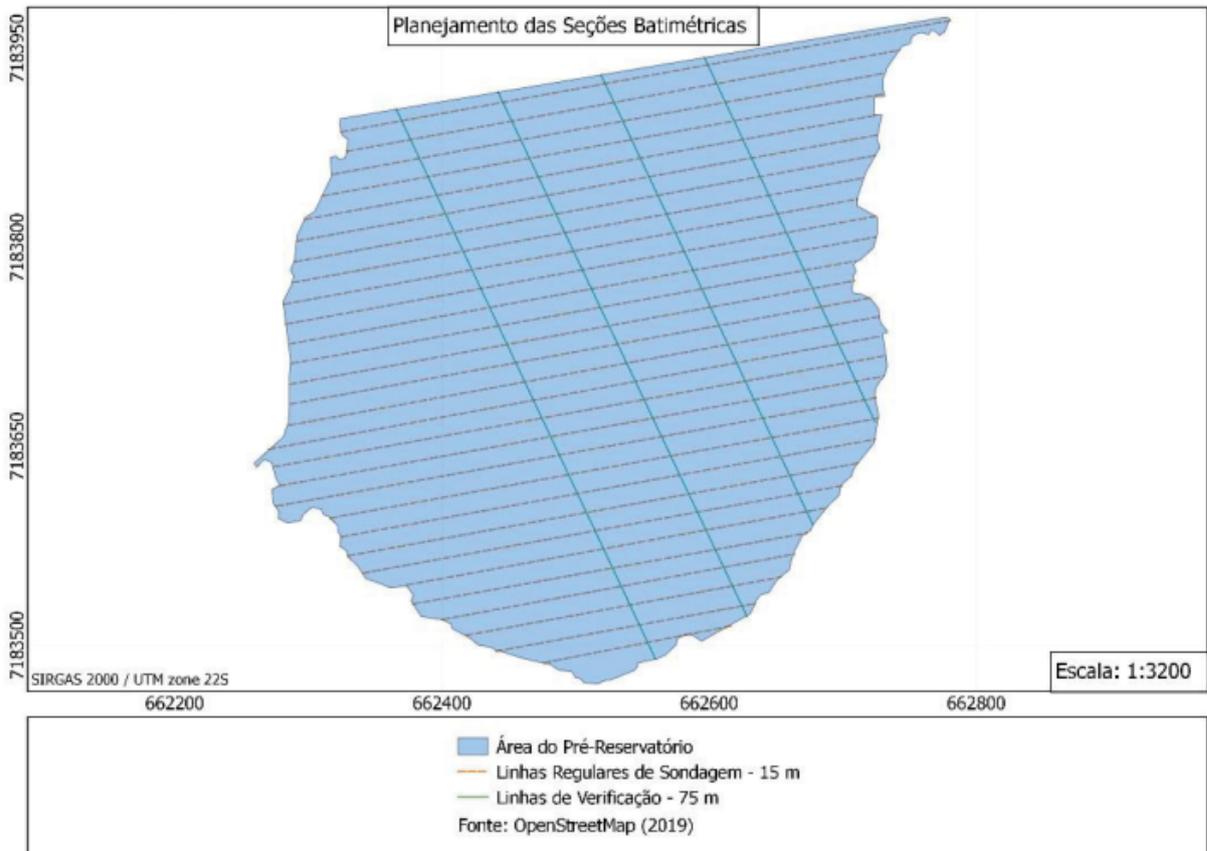
Considerando que os elementos das incertezas seguem uma distribuição normal, o  $IVT_{est}$ , a um nível de confiança de 95% é obtido substituindo na Equação 4 cada variância  $\sigma^2$  por  $(1,96\sigma)^2$  (IHO, 2005).

É aconselhável que a precisão do levantamento batimétrico seja fundamentada em observações redundantes obtidas pela mesma embarcação de sondagem. Entretanto a obtenção de dados redundantes em recintos submersos não é tão elementar como em levantamentos topográficos, fotogramétricos ou geodésicos, no qual é possível executar várias medições repetidas para a realização de uma calibração

subsequente e ainda, consolidar pontos de controle (Ferreira, 2013; Ramos, 2007).

Diante desta dificuldade, são realizadas nos levantamentos batimétricos linhas de verificação que transpassam as linhas regulares de sondagem ortogonalmente, com o objetivo de se obter um segundo conjunto de observações através da mesma embarcação de sondagem, conforme ilustrado a Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de planejamento das linhas regulares de sondagem e das linhas de verificação



Fonte: Alves (2019)

Na confluência entre os perfis longitudinais e transversais, é estabelecido um raio de busca onde a diferença entre as profundidades reduzidas das linhas de verificação e linhas regulares de sondagem deveriam ser nulas. Por meio desta diferença, são obtidos índices estatísticos fundamentados no desvio padrão das diferenças entre as profundidades ( $\sigma_{erro}$ ), fração dependente da profundidade, e na média das diferenças entre as profundidades ( $\sigma_{media}$ ), fração que não depende das profundidades. Através destes valores, também é viável o cálculo da estimativa do  $IVT_{LV}$ , ao nível de confiança de 95%, por meio da Equação 5, indicada por Ramos (2007):

$$IVT_{LV} = 1,96\sqrt{\sigma_{erro}^2 + \sigma_{media}^2} \quad (5)$$

Sendo fundamental uma quantidade apropriada de intersecções para uma análise correta da precisão do levantamento (Ramos, 2007), é sugerida pela DHN que a avaliação das linhas de verificação seja feita com o objetivo de se encontrar erros grosseiros e sistemáticos que possam ser provenientes dos sistemas de posicionamento, sondagem ou processo de redução do nível d'água (DHN, 2017).

Segundo Gagg (2016), é necessário adotar linhas de sondagem regulares dispostas perpendicularmente às linhas isobatimétricas da área, com o seguinte espaçamento entre linhas (conforme estabelecido na publicação S-44, 5ª. edição, da OHI):

- Levantamento Hidrográfico Ordem 1b: 3 vezes a profundidade média ou 25 metros (o que for maior); e
- Levantamento Hidrográfico Ordem 2: 4 vezes a profundidade média.

#### 2.4.1 Incerteza devido à velocidade de propagação do som

Determinar a velocidade do som é um fator muito relevante numa sondagem batimétrica, devido a sua variação local (a superfície) e ao longo da coluna d'água (USACE, 2013). A temperatura, a salinidade e a pressão são os principais fatores que contribuem para a sua variação, sendo que a primeira tem a maior contribuição, principalmente em rios e reservatórios (IHO, 2005; USACE, 2013). Estima-se que uma variação de 1 °C na temperatura traduz-se, aproximadamente, numa variação de 4,5 m/s na velocidade (IHO, 2005). Enquanto que uma incerteza de 1 m/s na estimativa da velocidade do som resultará em uma incerteza de 1 cm em uma sondagem de 15 m (Ferreira *et al.*, 2016). A Tabela 2 ilustra algumas variações para estes parâmetros.

Tabela 2 – Velocidade da propagação do som na água

		VELOCIDADE DO SOM (m/s)								
		Salinidade (‰)								
Temperatura (°C)		0	5	10	15	20	25	30	35	40
	0	1400	1407	1414	1421	1481	1435	1442	1449	1445
	5	1424	1431	1437	1444	1451	1457	1464	1470	1447
	10	1445	1452	1458	1464	1471	1477	1483	1490	1496
	15	1464	1470	1476	1482	1488	1495	1501	1507	1513
	20	1481	1487	1493	1498	1504	1510	1516	1521	1527
	25	1496	1502	1507	1513	1518	1523	1529	1534	1540
	30	1510	1515	1520	1525	1530	1535	1540	1546	1551
	35	1522	1526	1531	1536	1541	1546	1551	1555	1560
40	1532	1537	1541	1546	1551	1555	1560	1564	1569	

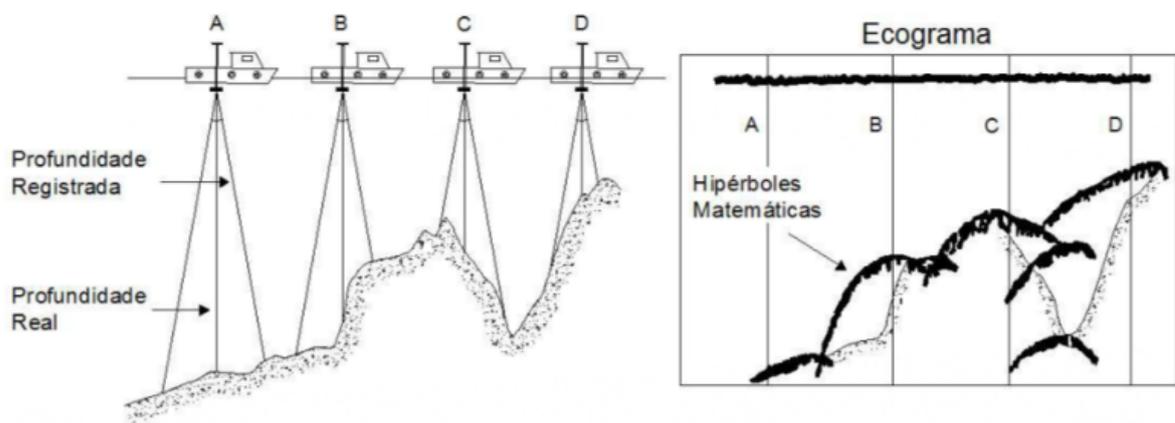
Fonte: Adaptado do Manual SOUTHSURVEYING (S.D.)

### 2.4.2 Incerteza devido à forma e ao tipo de fundo

A inclinação de fundo pode afetar a leitura adequada do pulso sonoro, e é desconhecida previamente ao levantamento batimétrico, sendo assim, as incertezas devido ao formato de fundo tornam-se difíceis de quantificar, transdutores com feixe estreito diminuem este erro de leitura. Estes possuem maior diretividade com consequente diminuição de lóbulos secundários (ou laterais), o que resulta em melhores estimativas de profundidade, principalmente em águas rasas (Ferreira *et al.*, 2016).

A Figura 5 mostra um exemplo de falso registro de fundo devido a largura do feixe emitido pelo transdutor e ao relevo irregular do fundo submerso. Pode-se notar que o ecograma registra o fundo, em teoria, com o relevo mais suave do que o real. Quanto maior for a largura do feixe, mais suavizado será o registro do relevo submerso. A presença de hipérbolas matemáticas no ecograma é um indicativo da ocorrência deste problema (Ferreira *et al.*, 2016).

Figura 5 – Ecograma formado por hipérbolas devido à largura do feixe e as irregularidades de fundo, a esquerda, sondagem realizada em um fundo irregular e, a direita, ecograma registrado não condizente ao fundo real

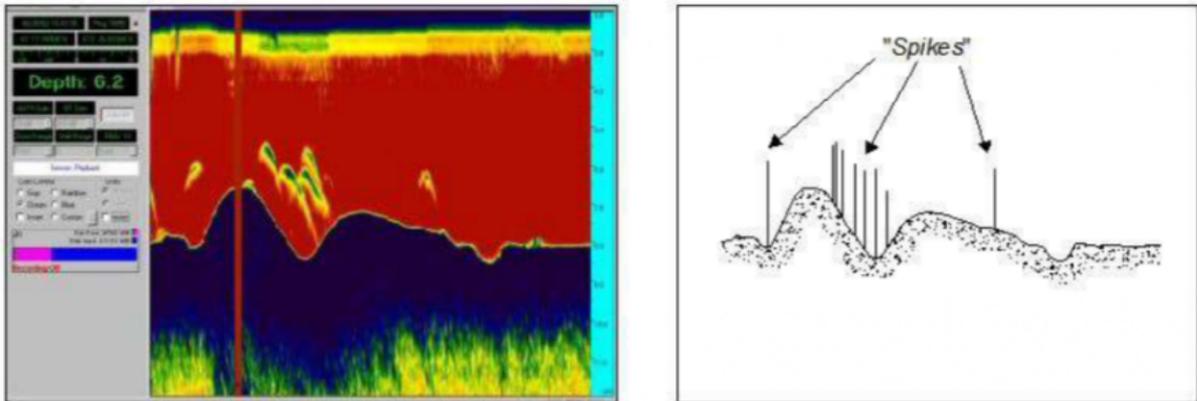


Fonte: adaptado de Jong *et al.* (2010)

O pacote comercial *Hypack*, produzido pela *Coastal Oceanographics*, possui uma ferramenta chamada *sounding migration* para correção das profundidades coletadas das incertezas supracitadas. Foram realizados testes por Ferreira *et al.* (2016) com a ferramenta e, a priori, obtiveram-se bons resultados para sondagens realizadas em taludes com inclinação regular.

A Figura 6 ilustra um ecograma digital do ecobatímetro *Hydrobox* e o perfil de fundo digitalizado de forma automática pelo sistema de aquisição de dados. Analisando o ecograma, pode-se perceber que as profundidades anômalas (*spikes*) digitalizadas de forma automática são realmente ecos falsos, sendo assim, devem ser eliminadas durante o processamento dos dados.

Figura 6 – Ecograma digital proveniente do ecobatímetro modelo *Hydrobox* da fabricante *SyOQwest*, à esquerda, e perfil de fundo digitalizado de forma automática pelo *software* de coleta de dados, a direita

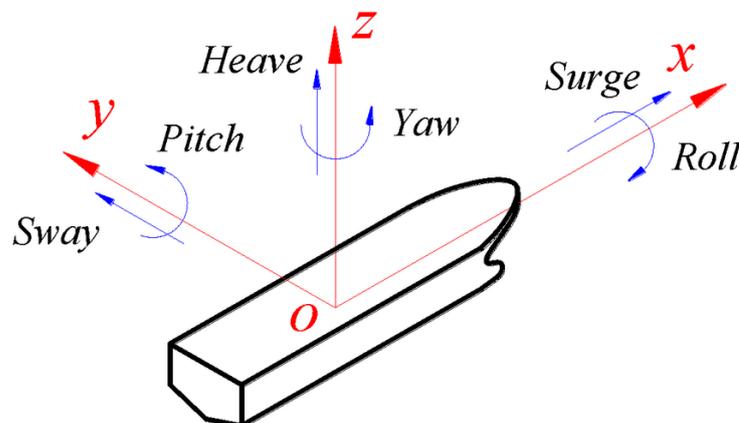


Fonte: Ferreira *et al.* (2016)

### 2.4.3 Incerteza devido aos movimentos da embarcação

Para que todas as medições realizadas no levantamento batimétrico tenham qualidade posicional, é importante a associação a um sistema de referência na superfície da água. Este processo é conhecido como georreferenciamento subaquático. Porém é importante ressaltar que a embarcação está submetida a movimentos que influenciam diretamente na qualidade do levantamento (Gagg, 2016). Com o impacto de ondas e movimento da água, a embarcação sofre movimentos de translação e rotação. Os movimentos de translação podem ser definidos como longitudinais (*surge*) no eixo X, transversais (*sway*) no eixo Y e verticais no eixo Z (*heave*). Já os movimentos de rotação podem ser classificados em balanço (*roll*) no eixo X, caturro (*pitch*) no eixo Y e guinada (*yaw*) no eixo Z (Thomas, 2001). Todos esses movimentos estão ilustrados na Figura 7.

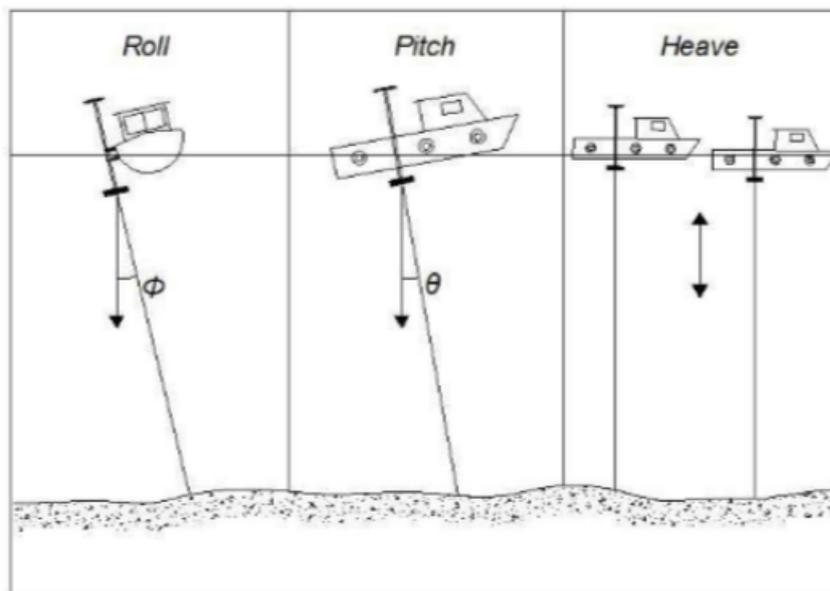
Figura 7 – Representação dos Graus de Liberdade de uma embarcação



Fonte: Winter (2018)

De acordo com IHO (2005) o *roll* e o *pitch* afetam a medição da profundidade somente quando a sua magnitude é superior a metade da largura do feixe acústico emitido pelo transdutor. Operando em águas calmas (como no caso de reservatórios) a compensação destes efeitos pode ser negligenciada (USACE, 2013; Ferreira; Rodrigues; Santos, 2015). Entretanto, quando se utilizam transdutores com feixe estreito o conhecimento dos ângulos de *roll* e de *pitch* são necessários para a estabilização do feixe, permitindo a correta medição da profundidade na vertical do transdutor. A Figura 8 ilustra a incerteza devido ao movimento.

Figura 8 – Incerteza na medição da profundidade devido aos movimentos de *Roll*, de *Pitch* e de *Heave* da plataforma de sondagem



Fonte: Ferreira *et al.* (2016)

Estas rotações podem ser determinadas através de sensores inerciais (*Inertial Measurement Unit* (IMU)). Os sensores inerciais aplicam as leis de movimento de Newton e são compostos por giroscópios e acelerômetros. Os acelerômetros são usados para medir as acelerações do centro de massa da embarcação, fornecendo assim as forças que agem sobre o mesmo. Os giroscópios são empregados para determinar as rotações em torno deste centro de massa e, por conseguinte, permitem analisar a situação de equilíbrio da embarcação (Ferreira; Rodrigues; Santos, 2015; Kuchler *et al.*, 2011). Quando se utilizarem sensores inerciais, a instalação deve ser efetuada próximo ao centro de massa da plataforma de sondagem.

#### 2.4.4 Incerteza devido à disposição dos equipamentos a bordo

Um sistema de sondagem é composto por diversos equipamentos, como por exemplo, ecobatímetros, receptores GNSS e sensores inerciais. Para que as informações coletadas pelos diversos sensores possam ser sincronizadas, a localização

referencial na embarcação é necessário. Incertezas no posicionamento destes sensores irão introduzir incertezas horizontais e verticais na medição da profundidade reduzida (Clarke, 2003).

É comum em pequenas embarcações de sondagem monofeixe a instalação de sensores (transdutor, compensador de ondas e antena GNSS) alinhados na vertical do transdutor, sem afastamentos horizontais (*offsets*). Esse alinhamento possibilita a simplificação do modelo matemático de correção das incertezas de posicionamento da antena GNSS em relação ao transdutor, permite a medição do efeito *heave* de forma efetiva e evita a introdução de efeitos sistemáticos derivados da medição de afastamentos (Ferreira; Rodrigues; Santos, 2015).

Ao utilizar um sistema inercial para medição do *roll*, *pitch* e *heave*, a instalação deste ocorre, preferencialmente, no centro de massa da plataforma de sondagem. Nestes casos, poderão ser gerados afastamentos (*offsets*) entre o sistema inercial e os demais sistemas a bordo. Entretanto, essa configuração tem o efeito *heave* observado pelo sistema inercial não condizente com o *heave* efetivamente sofrido pelo transdutor, devendo-se este efeito ser transferido para a posição do transdutor através do *heave* induzido e, diante disso, qualquer incerteza na medição dos afastamentos irá se propagar para a determinação do efeito *heave* (IHO, 2005; Hare, 1995)

Em todos os casos, quando não for possível a instalação de todos os equipamentos alinhados na vertical do transdutor, devem-se medir os afastamentos com a menor incerteza possível, preferencialmente, por topografia clássica, empregando ajustamento de observações e com a plataforma de sondagem em doca seca. Principalmente para grandes embarcações, pode não ser possível o emprego desta metodologia. Neste sentido, Clarke (2003) propôs uma metodologia para detecção dos alinhamentos entre os sensores com a embarcação em movimento (alinhamento dinâmico). Contudo, algumas falhas são apontadas, especialmente, a que a metodologia proposta não possibilita o alinhamento dos sensores em relação ao sistema de referência da embarcação.

#### **2.4.5 Incerteza devido ao *draft*, demais variações dinâmicas da embarcação e ao estabelecimento do nível de redução**

Para a obtenção das profundidades com o SBES é necessário somar ao valor das sondagens a profundidade de imersão do transdutor, ou seja, a distância da lâmina d'água até o início do feixe sonoro (*draft*). O *draft* deve ser medido com alto rigor, pois qualquer incerteza na sua medição se propagará de forma direta para a profundidade.

Usar sensores de *heave* sempre que se realizarem sondagens onde os efeitos ondulatórios do mar forem significativos, podendo causar a degradação da qualidade

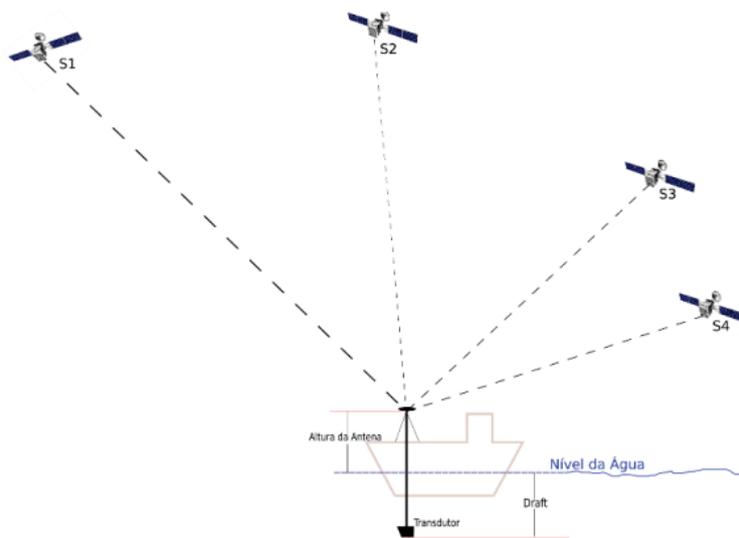
de medição das profundidades devido ao movimento de arfagem<sup>3</sup> da embarcação, prejudicando a obtenção da qualidade dos dados batimétricos, que é estabelecida nas especificações S-44 da OHI (Gagg, 2016).

## 2.5 SISTEMA DE GEOLOCALIZAÇÃO

Conforme Brasil (2013), empregando-se equipamentos GPS na execução dessa atividade, as técnicas de levantamento a serem utilizadas são o *Stop and Go* (pós-processado) ou RTK (tempo real). Para ambas as técnicas é necessário que as ambiguidades inteiras estejam resolvidas antes do levantamento propriamente dito. No caso da técnica *Stop and Go* o técnico deverá coletar no mínimo 6 épocas por ponto coletado, enquanto para a técnica RTK o deslocamento poderá ser contínuo.

Alves (2019) disserta que, levantamento batimétrico no qual a embarcação está em movimento o método absoluto (sem ponto de referencia terrestre), emprega a técnica cinemática para determinar a sua posição em diferentes instantes. A acurácia da posição da embarcação vai depender da disponibilidade e da distribuição dos satélites no instante da aquisição dos dados. A Figura 9 esquematiza um levantamento batimétrico utilizando um receptor GPS usando o método de posicionamento absoluto com a observação mínima de 4 pseudodistâncias formadas entre os satélites rastreados e a antena instalada na embarcação.

Figura 9 – Posicionamento Absoluto Cinemático



Fonte: Alves (2019)

De início, o GPS era um projeto militar dos Estados Unidos da América chamado NAVSTAR, criado na década de 1960, mas que se concretizou totalmente em 1995, depois de 35 anos, custando alguns bilhões de dólares. O GPS vem

<sup>3</sup> levantar da proa do navio, no balanço de proa a popa, produzido pela agitação do mar.

sendo utilizado no âmbito marinho desde 1985, inicialmente, a precisão alcançada no posicionamento cinemático absoluto para os receptores era de 10 a 15 metros, porém, com a introdução dos efeitos *Selective Availability* (SA) e *Anti-Spoofing* (AS), onde os usuários autorizados, recebem dados com melhor precisão, enquanto que os usuários não autorizados (civis), recebem dados com precisão de 15 a 100 m. Para a maioria das aplicações na geodésia marinha, essa precisão não era satisfatória.

Visando melhorar a precisão, criou-se o GPS Diferencial (DGPS), que consistia no posicionamento de uma estação móvel através das correções geradas na estação de referência. A precisão relativa alcançada está entre 1 a 10 m, dependendo da observável utilizada. No caso de se utilizar a fase do código, obtém-se uma precisão relativa de 1 m a 10 m, e, com o código suavizado pela portadora, de 1 m a 3 m (SEEBER, 1993).

Contemporaneamente, é possível estabelecer a posição praticamente exata, com margem de incerteza mínima de 1 metro, de qualquer ponto do planeta a qualquer momento. Alguns receptores de maior acurácia conseguem alcançar, após alguns dias, uma precisão de até 10 mm utilizando-se de técnicas de processamento específicas.

É necessário empregar métodos de posicionamento que atendam a incerteza horizontal total (IHT) definida pela publicação S-44 da OHI, ou seja:

- Levantamento Hidrográfico Ordem 1b: 5 metros + 5% profundidade;
- Levantamento Hidrográfico Ordem 2: 20 metros + 10% profundidade.

## 2.6 ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE DADOS

Os dados brutos coletados em um levantamento batimétrico monofeixe é uma malha de pontos tridimensionais que, por si só, não é capaz de gerar diretamente a superfície do fundo mensurada. Para construir o Modelo Digital de Profundidade (MDP) que representa tal morfologia, é necessário empregar técnicas de interpolação para estimar o valor da profundidade em locais não amostrados (Camara; Medeiros, 1998).

Os interpoladores constroem funções matemáticas para representação de superfícies contínuas a partir de um conjunto de pontos coletados. Eles são utilizados para densificação de uma amostra que não cobre todo o domínio de interesse (Ferreira, 2013). A literatura classifica os interpoladores em determinísticos e probabilísticos. Segundo Mesquita (2009 apud Alves, 2019), os modelos determinísticos realizam previsões a partir de funções matemáticas, sendo que os modelos probabilísticos, além das funções matemáticas, estimam a incerteza das previsões.

Como exemplos de interpoladores determinísticos podem-se citar: TIN, Vizinho mais Próximo (*Nearest Neighbour* (NEN)) e Inverso da Potência das Distâncias (IDW). O método KRG é um exemplo de um interpolador probabilístico. Existem diversos interpoladores e há um certo grau subjetivo na sua seleção, pois cada um deles possui

vantagens e desvantagens que muitas das vezes se assemelham (Alves, 2019).

EL-Hattab (2014) efetuou um estudo comparativo com os principais interpoladores de MDP através dos dados batimétricos de um ecobatímetro monofeixe. Os interpoladores comparados foram KRG, Curvatura Mínima (*Minimum Curvature* (MVC)), *Modified Shepard's* (MSP), NEN, *Polynomial Regression* (PRG), *Radial Basis Function* (RBF), TIN, *Moving Average* (MAV), *Data Metrics* (DMT) e o *Local Polynomial* (LPL). Analisou-se a precisão de cada interpolador e o esforço computacional para o processamento dos dados. O autor concluiu que os métodos TIN e NEN apresentaram menores discrepâncias, sendo que o tamanho da grade para gerar o MDP teve uma grande influência na performance dos interpoladores. No entanto, o interpolador TIN foi mais performático do que o NEN.

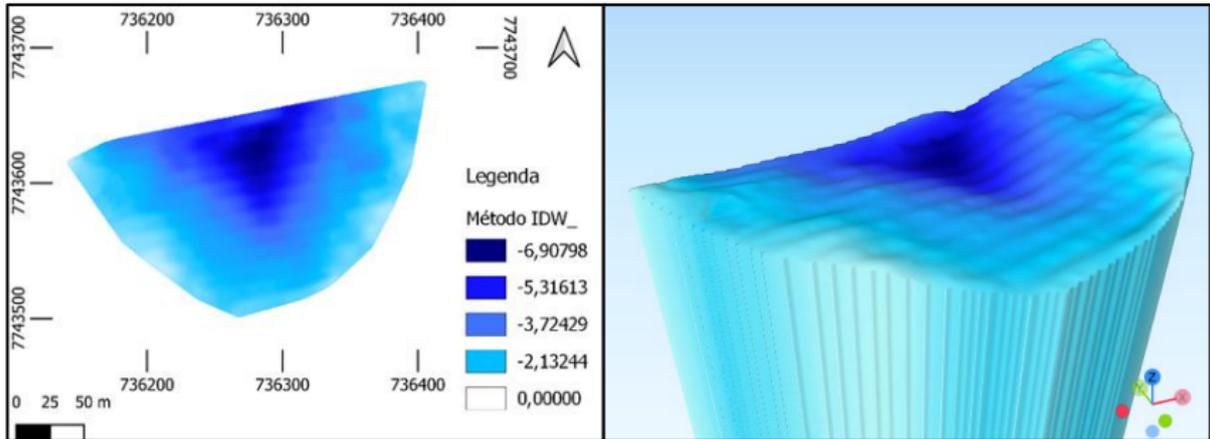
Ferreira (2013) analisou os interpoladores KRG e o IDW para a representação computacional de superfícies batimétricas. Ao comparar o KRG com o IDW, o autor concluiu que o interpolador KRG apresentou melhores resultados para o conjunto de dados estudado. Notou, que para o cálculo de volume do estudo, o resultado mostrou-se mais acurado quando se aplicou a KRG em um *grid* amostral esparso, comparativamente ao IDW aplicado em dados abundantes. Outro diferencial para se optar pelo uso do KRG é a possibilidade de se gerar um mapa de incertezas da interpolação.

Setianto e Triandini (2013 apud Alves, 2019), compararam o IDW e KRG e concluíram que a acurácia é bem semelhante. A vantagem do IDW é a simplicidade nos procedimentos para gerar um MDP. No entanto, o KRG resulta em uma interpolação mais sofisticada por basear-se em análise pontual e atribuindo valores baseados na autocorrelação espacial, ao invés de atribuir um peso universal fundamentado na distância.

Baseado nas conclusões desses autores, Alves (2019) optou por utilizar em sua dissertação os interpoladores KRG e o IDW por apresentarem maior precisão para análise do volume calculado através do MDP gerados. O interpolador TIN é o mais utilizado na geração de MDP quando se têm dados topo-batimétricos de seções transversais (USACE, 2004).

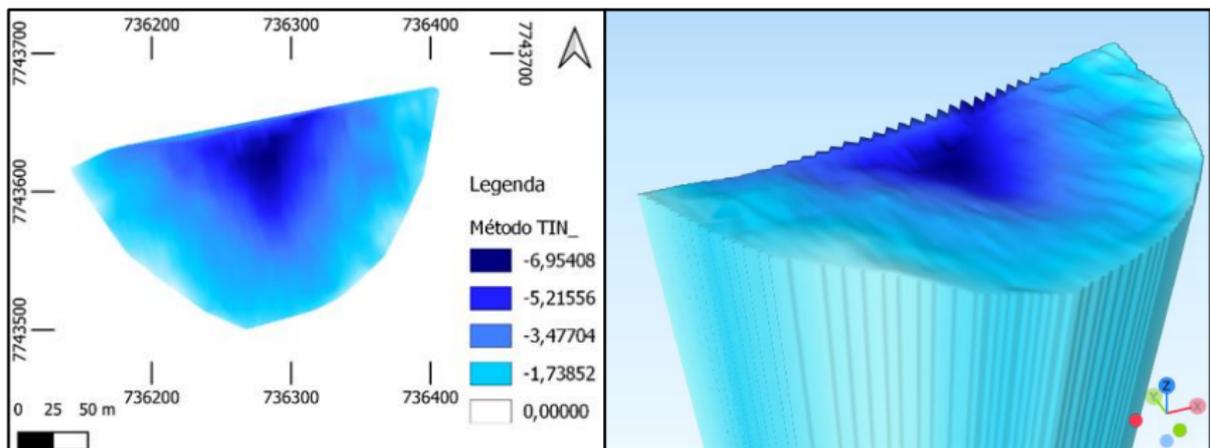
Os gráficos 1, 2, 3, 4 e 5 mostram a aplicação de distintas interpolações para o mesmo levantamento batimétrico realizado por um ASV (protótipo) no trabalho de dissertação de Cano (2022).

Gráfico 1 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW)



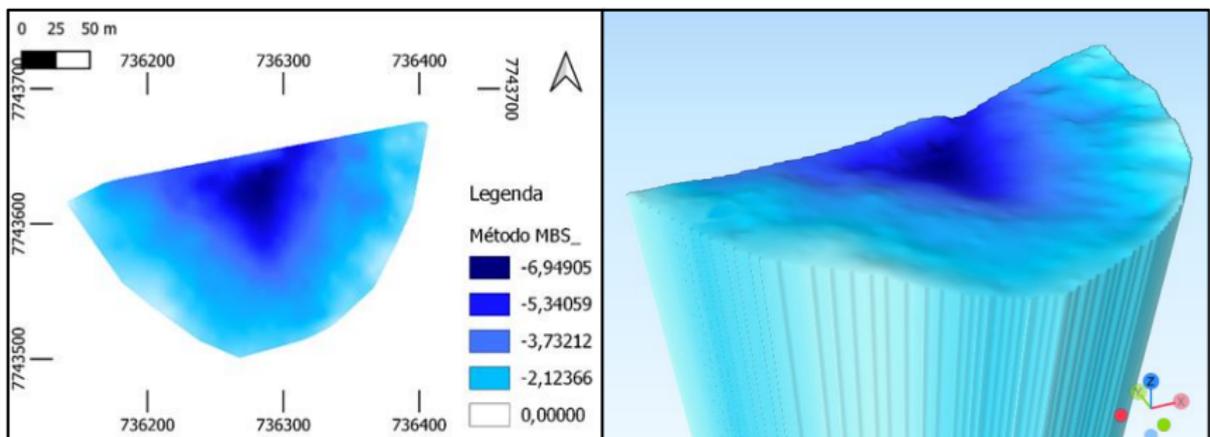
Fonte: Cano (2022)

Gráfico 2 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método *Triangulated Irregular Network* (TIN)



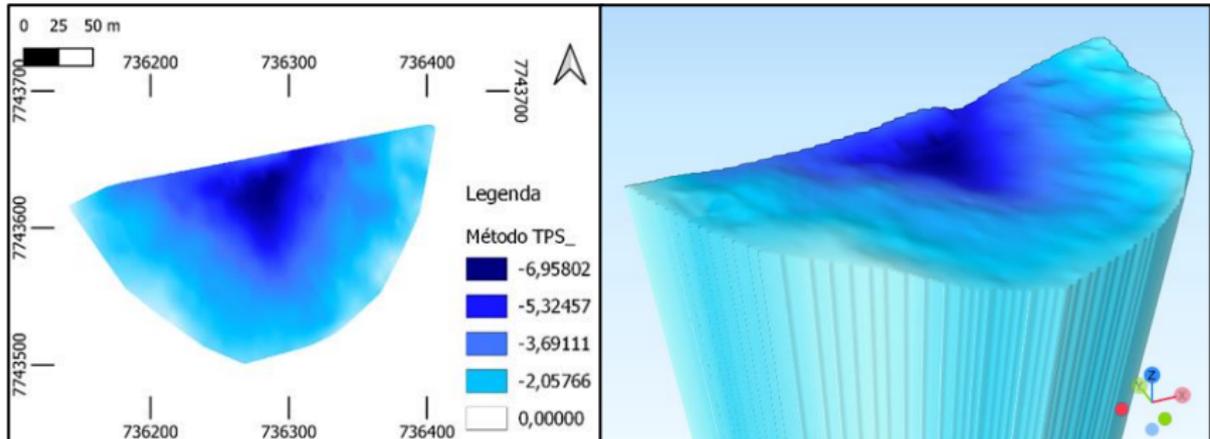
Fonte: Cano (2022)

Gráfico 3 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método *Multinível B-Spline* (MBS)



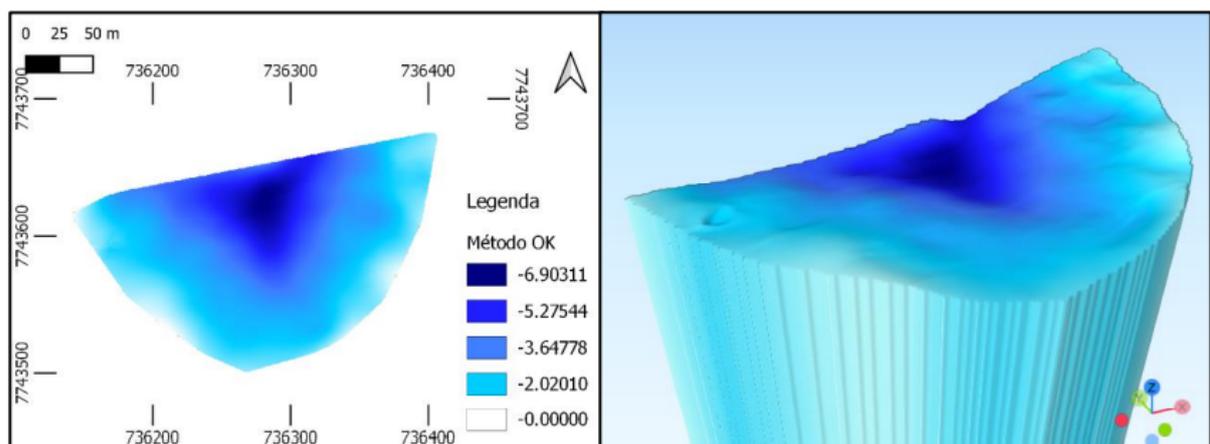
Fonte: Cano (2022)

Gráfico 4 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método *Spline de Placa Fina (TPS)*



Fonte: Cano (2022)

Gráfico 5 – Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método *Kriging (KRG)*



Fonte: Cano (2022)

## 2.7 PLATAFORMAS BATIMÉTRICAS NÃO TRIPULADAS

Atualmente, plataformas de levantamento batimétrico incluem navios de pequeno e grande porte e embarcações tripuladas, submarinos tripulados, ROVs, AUVs, aeronaves e satélites, além dos “drones marinhos de superfície”. (Ferreira *et al.*, 2016). A metodologia escolhida para a coleta de dados depende de cada aplicação em particular, bem como da resolução e acurácia requeridas. O uso do LiDAR batimétrico ainda esbarra nos altos custos, enquanto que imagens de satélite carecem de mais pesquisas e desenvolvimentos.

Segundo a dissertação de Cano (2022), após extensa pesquisa sobre o tema, demonstrou que estudos publicados entre os anos de 2001 e 2012, (início do crescimento constante de publicações científicas sobre o tema), são em sua maioria relacionados ao desenvolvimento de veículos de superfície aquática não tripulados, de

interesse militar, para aplicação em ambientes oceânicos e costeiros, com a criação de sistemas de sensores, algoritmos e componentes de controle. Segundo Liu *et al.* (2022 apud Cano, 2022), após 2012 até 2021, com o surgimento e o desenvolvimento de tecnologias de inteligência artificial, as pesquisas em USV atraíram cada vez mais atenção, sendo uma tecnologia ainda está em desenvolvimento, buscando cada vez mais controles autônomos.

Os AUVs, em sua forma mais fundamental, são dispositivos robóticos submersíveis não tripulados controlados e pilotados por um sistema de computador a bordo. O desenvolvimento destes sistemas data de 1960, porém, foi apenas a partir de 1980 que os avanços tecnológicos, sistemas de computador com baixo consumo de energia e memória compatível com os complexos algoritmos envolvidos na navegação, permitiram desenvolver AUVs eficientes e em tamanhos menores. A comercialização destes sistemas teve um aumento significativo nos últimos anos (Wernli, 1999; Ruiz, 2010).

Frequentemente, os AUVs são confundidos com os *Unmanned Underwater Vehicles* (UUVs), que apesar de serem bastante semelhantes aos AUVs, possuem como diferença principal a necessidade de manter certo nível de comunicação durante a execução das tarefas (Ruiz, 2010). Os AUVs são considerados autônomos por não necessitar da intervenção do operador durante a missão de pesquisa.

Os desenvolvimentos de USVs, as vezes chamadas de ASV, remontam a 1983, quando o *International Submarine Engineering* (Canadá), desenvolveu um veículo semi-submersível não tripulado, chamado *Deep Ocean Logging Platform with Hydrographic Instrumentation and Navigation* (DOLPHIN) (Curcio; Leonard; Patrikalakis, 2005; Zhao; Yan; Jin, 2011). Desde então, os avanços tecnológicos na área de navegação inercial, microeletrônica, micromecânica e dispositivos de comunicação sem fio possibilitaram o amadurecimento dos USVs, e atualmente existem diversos para fins científicos e comerciais. Neste trabalho se utilizará o termo USV, palavra-chave mais recorrente e também a denominação mais comum após a clusterização das palavras chaves realizada pelo estudo de Cano (2022). A Tabela 3 apresenta um resumo dos USVs científicos desenvolvidos nos últimos anos.

Tabela 3 – Lista de USVs internacionais

ANO	USV	PAIS	ORGANIZAÇÃO	UTILIDADE
1993	ARTEMIS	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	Levantamento/ testes
1996	ACES	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	Levantamento/ testes
1999	MESSIN	Alemanha	Universidade de Rostock	Levantamento/ testes
1999	DELFIN	Portugal	ISR/IST	Operação coordenada
2000	AutoCAT	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	Levantamento
2003	SESAMO	Itália	CNR-ISSIA	Levantamento
2004	SCOUTEUA	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	Operação coordenada
2005	Charlie	Itália	CNR-ISSIA	Levantamento
2005	ROSS	Índia	Instituto Nacional de Oceanografia	Levantamento
2005	Springer	Grã-Bretanha	Universidade de Plymouth	Levantamento
2005	BOBEUA	Virginia	Tech	Levantamento
2006	-	EUA	Academia Naval dos Estados Unidos	Testes
2006	IRIS	EUA	WHSC	Levantamento
2007	Tri0601	China	Instituto de Automação de Shenyang	Testes
2007	Swordfish	Portugal	Instituto Politécnico de Porto	Operação coordenada
2007	Circe	EUA	Colégio de Eng. Franklin W. Olin	Uso educacional
2007	ROAZ II	Portugal	Instituto Politécnico de Porto	Levantamento
2007	OASIS-3	EUA	Emergent Space Technologies	Levantamento
2008	Sea-RAI	EUA	Universidade Texas AEM	Levantamento
2008	-	China	Universidade Marítima de Shanghai	Levantamento
2008	WASP	EUA	Universidade Florida Atlantic	Levantamento
2009	Nereus	EUA	Universidade Florida Atlantic	Levantamento
2009	Wivenhoe	Austrália	CSIRO ICT Center	Levantamento
2012	CatOne	Itália	aerRobotix	Levantamento
2015	MicroVe-GA	Itália	Universidade de Nápoles	Levantamento

Fonte: Adaptado de Zhao, Yan e Jin (2011)

Pode-se citar os USVs brasileiros que já operam de maneira comercial para execução de serviços. A empresa Tidewise produz o USV Tupan (Figura 10), com 5 metros de comprimento. É o primeiro modelo de embarcação autônoma registrado no Brasil (Capitania dos Portos do Rio de Janeiro, 2020). Seu projeto e construção foi feito na cidade do Rio de Janeiro/RJ, sendo uma embarcação autônoma multipropósito (caracterização de ambiente marinho, inspeção de ativos, logística e *smart data*) validada para operar em ambiente *offshore*. Fabricada em alumínio naval e projetada de acordo com o *MASS Guideline Rev.3*.

Figura 10 – USV Tupan TideWise



Fonte: TIDEWISE (2023)

Pode-se citar a empresa brasileira USSV Embarcações Autônomas, sediada em Araquari (SC), com o USV Mero (Figura 11) e USV Tucunaré (Figura 12). Com o Apoio da Petrobras e do Sebrae, A USSV desenvolveu a embarcação nacional integrada a um ROV para inspeção visual submarina, o USV Mero, capaz de navegar até o ponto de mergulho e manter-se em posição dinâmica (DP) para que um operador realize a inspeção visual remota, equipado com ROV da *Blue Robotics* preparado para mergulhos de até 50 metros. Com todas estas capacidades, o USV Mero pode realizar outras missões, tais como batimetria mono e multifeixe, coleta física de água, detecção de vazamento de óleo, inspeção visual de ativos e transporte de cargas.

Figura 11 – USV Mero USSVTech



Fonte: USSVTech (2023a)

O USV Tucunará (Barco Drone/Drone Aquático), oferece duas versões de motor, submerso e aéreo, sendo uma solução portátil e econômica para segurança não tripulada e levantamento em reservatórios, lagos e baías com água abrigada para batimetrias, medição de qualidade d'água, medição de vazão, coleta de água para pesquisas e entre outros. Os equipamentos compatíveis incluem câmeras e *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) de grau de pesquisa, sonda de eco, sonda de qualidade da água e coleta de água. Ele é operado por meio de interface para computadores, integrado a software hidrográfico, podendo ser controlado por controle remoto.

Figura 12 – USV Tucunará USSVTech



Fonte: USSVTech (2023b)

De todas as fontes de incertezas envolvidas em um levantamento batimétrico, a incerteza devido aos movimentos da plataforma de sondagem é a componente mais crítica em levantamentos batimétricos utilizando um USV (Hare, 1995; Ferreira; Neto; Monteiro, 2016). Conforme IHO (2005), nos levantamentos monofeixe, o *roll* e o *pitch* afetam a medição da profundidade somente quando a sua magnitude é superior a metade da largura do feixe acústico emitido pelo transdutor. Operando em águas calmas (como no caso de reservatórios) a compensação destes efeitos pode ser negligenciada (USACE, 2013; Ferreira; Rodrigues; Santos, 2015). Entretanto, quando se utilizam transdutores com feixe estreito o conhecimento dos ângulos de *roll* e de *pitch* são necessários para a estabilização do feixe, permitindo a correta medição da profundidade na vertical do transdutor.

Para minimizar o efeito de *roll* pode-se utilizar plataformas com cascos do tipo catamarã ou trimarã (Manley, 2008; Dunbabin; Grinham; Udy, 2009; Ferreira *et al.*, 2009; Zhao; Yan; Jin, 2011; Giordano *et al.*, 2015). Estes formatos, além de prover maior estabilidade que sistemas monocasco, possuem ótima manobrabilidade e baixo calado. Outro grande problema inerente as embarcações de pequeno formato são as dificuldades enfrentadas durante a orientação (*heading*), principalmente, devido as ondas e ao vento (Furfaro, 2012). Este efeito pode, atualmente, ser medido com exatidão, empregando sistemas diferenciais de posicionamento GNSS em tempo real. Todavia, os efeitos de *pitch* e *heave* ainda são um problema para os USV, devido a incidência de ondas, principalmente em ambientes marinhos.

Nos USVs do tipo monocasco, o conjunto de transdutores é geralmente montado no casco, enquanto que para os USVs do tipo catamarã, prefere-se instalar o transdutor no centro da embarcação, ou seja, entre os dois cascos. Em ambos os casos o *draft* (altura de imersão do transdutor) pode ser mensurado com elevada precisão. Nos USVs, mudanças de carga a bordo são improváveis de ocorrer e os demais efeitos são minimizados ou eliminados.

## 2.8 MICROCONTROLADORES

Os microcontroladores podem ser representados analogamente a um computador em um único chip, contendo um processador, memória, periféricos de entrada e de saída, temporizadores, dispositivos de comunicação e circuitos integrados e programáveis a fim de realizar algumas funções específicas. São muito utilizados em testes de bancada pela praticidade, podem ser usados para cumprir as funcionalidades de aquisição de dados e para o controle de dispositivos simples (Negreiros, 2019).

Um microcontrolador bastante difundido em protótipos e na educação é o Arduíno, sendo uma placa eletrônica com um microcontrolador programável, com prototipagem eletrônica de código aberto (*open-source*), contendo linguagem de

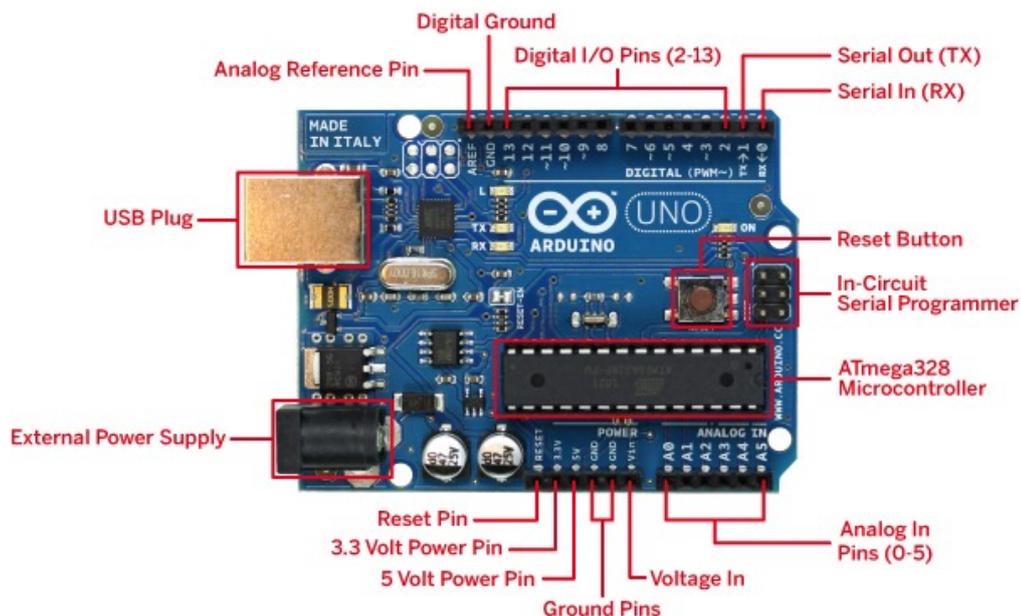
programação baseada na linguagem *Wiring* (Gonzaga; Oliveira; Castro, 2019). O *hardware* do Arduino é composto por uma placa de prototipagem principal na qual são construídos os projetos, com diversos módulos acopláveis, enquanto o *software* é um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), executado em um computador, onde é feita a programação.

Para a leitura de dados processados na placa de prototipagem Arduino, utiliza-se a saída USB do computador através de cabo serial, pode-se, como alternativa, utilizar telemetria ou módulos de armazenagem dos dados para posterior leitura. A IDE reúne características e ferramentas de apoio para agilizar e principalmente introduzir na programação usuários não familiarizados com o desenvolvimento de *software*, além de conter bibliotecas colaborativas que facilitam a utilização dos módulos. Os programas (*sketches*) instruem o microcontrolador ao que deve ser executado durante o seu funcionamento. A placa de prototipagem Arduino possui pinos de entrada e saída do microcontrolador utilizados para conectá-lo a outros circuitos ou sensores (Teixeira; Pereira, 2019).

### 2.8.1 Arduino UNO

A Figura 13 é uma ilustração de um Arduino do modelo UNO R3 com apontamentos referentes as suas portas de entrada e saída.

Figura 13 – Arduino UNO R3



Fonte: Voltage (2023)

Na Tabela 4, abaixo, são apresentadas as especificações técnicas do Arduino

UNO.

Tabela 4 – Especificações Técnicas do Arduino UNO

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
Microcontrolador	ATmega328
Tensão de operação	5 V
Tensão de alimentação (recomendada)	7-12 V
Tensão de alimentação (limite)	6-20 V
Entradas e saídas digitais	14 das quais 6 podem ser PWM
Entradas analógicas	6
Corrente contínua por pino de I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino 3,3 V	50 mA
Memória Flash	32 kB (ATmega328)
Memória SRAM	2 kB (ATmega328)
EEPROM	1 kB (ATmega328)
Velocidade do Clock	16 MHz
Dimensões	68,58 mm x 53,34 mm
Peso	150 g

Fonte: Adaptado de Silva (2017)

A linguagem de programação do Arduino é baseada na linguagem *Processing*, tendo raízes nas linguagens C e C++, com algumas bibliotecas padrões dessas linguagens. Existem as suas próprias bibliotecas (definindo as portas de entrada e saída: digitais, analógicas e moduladas por largura de pulso), além de outras disponibilizadas pela comunidade para os mais diversos fins, como o controle de telas de cristal líquido e configuração de diversos tipos de sensores (Silva *et al.*, 2014).

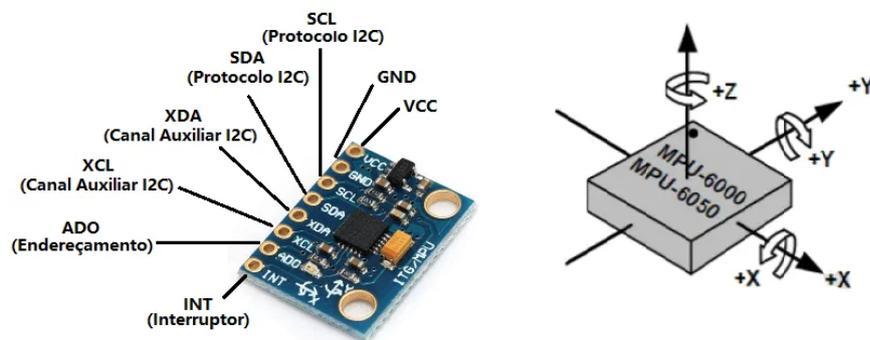
#### 2.8.1.1 Módulos e seus dispositivos

Para mensurar algumas grandezas físicas, seu monitoramento, controle e armazenamento, utilizam-se os dispositivos denominados de módulos, estes módulos podem conter sensores ou dispositivos úteis nos protótipos. Neste projeto foram selecionados os sensores que possibilitam obter algum tipo de referência de posição e aceleração em relação a um determinado eixo de referências, sensor sonoro de distância e módulo de armazenagem de dados através de cartão de memória. Tais sensores como acelerômetros, giroscópios, sensor ultrassônico e o sistema de posicionamento global serviriam para obter os dados necessários para o levantamento batimétrico. A plataforma foi equipada com os módulos que serão descritos nos tópicos a seguir com suas devidas especificações.

### 2.8.1.2 Acelerômetro e Giroscópio CI MPU-6050

O sensor MPU-6050 (Figura 14) contém em um único chip um acelerômetro e um giroscópio tipo *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS). São 3 eixos para o acelerômetro e 3 eixos para o giroscópio, sendo ao todo 6 graus de liberdade (6DOF). Além disso, esta placa tem um sensor de temperatura embutido no CI MPU6050, permitindo medições entre -40 e 85 °C. Possui alta precisão devido ao conversor analógico digital de 16-bits para cada canal. Portanto o sensor captura os canais X, Y e Z ao mesmo tempo.

Figura 14 – Sensor MPU-6050



Fonte: Adaptado de Eletrogate (2023)

Conforme as seguintes especificações:

- Chip: MPU-6050;
- Tensão de Operação: 3-5 V;
- Conversor AD 16 bits;
- Comunicação: Protocolo padrão I2C;
- Faixa do Giroscópio:  $\pm 250$ , 500, 1000, 2000 %/s;
- Faixa do Acelerômetro:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 16$  g;
- Dimensões: 2 x 1,6 x 0,1 mm.

Os acelerômetros digitais são sensores baseados em transdutores que nos permitem medir acelerações em um ou mais eixos do espaço em duas ou três dimensões, nos fornecendo o valor da aceleração ao redor destes quando em movimento, entretanto, quando parado, nos fornece apenas a direção do vetor de aceleração gravitacional. Assim, com essa diferença de potencial e com algumas operações trigonométricas pode-se determinar sua posição angular e sua aceleração, sendo o princípio de cálculo de movimentos da plataforma ASV de *Pitch*, *Roll* e *Yaw* com o auxílio da biblioteca “*Wire*” e “*MPU6050*”.

### 2.8.1.3 GPS Ublox NEO-6M

Neste protótipo, se utilizará o módulo GPS Neo-6M para informar a localização, enviando dados referentes a latitude e longitude, data, hora e velocidade de deslocamento. Uma informação importante do Módulo GPS é sua interface serial de 3,3 V, não sendo possível a alimentação com 5 V, sendo necessário utilizar um conversor de sinais lógicos, como foi feito neste trabalho.

Figura 15 – Sensor GPS Ublox NEO-6Mv2



Fonte: Adaptado de Eletrogate (2023)

As especificações são:

- Modelo: GY-GPS6MV2;
- Tensão de trabalho: 3,3 a 5 V *Direct Current* (DC);
- Interface serial de 3,3 V;
- Taxa de transmissão padrão: 9600;
- Dimensões do módulo (CxLxA): 30x23x4 mm;
- Dimensões da antena (CxLxA): 25x25x8 mm.

Para usar o módulo, utiliza-se a biblioteca chamada “NMEAGPS”, responsável apenas para a manipulação dos dados do GPS, para facilitar a leitura das variáveis de retorno que o módulo recebe. É necessário esperar um tempo, em torno de 5 a 15 minutos até o módulo iniciar o processamento (receber o sinal) de pelo menos 4 satélites de qualquer lugar do planeta.

#### 2.8.1.4 Módulo SD Card

Os cartões de segurança digital, ou *Secure Digital Cards* (SD) são usados em uma variedade de aplicações, onde precise de uma grande quantidade de memória não volátil e barata, um cartão SD (ou microSD) é uma boa escolha. Este Módulo serve para leitura e escrita em cartão SD, com suporte para a biblioteca oficial do Arduíno. Ele é compatível com cartões formatados em FAT32 com capacidade de até 4 GB. Pode ser utilizado para guardar histórico de valor de entradas ou *data logging*, valores de módulos GPS, sensores de temperaturas, distância, umidade e luminosidade, dentre outros.

O módulo *SD Card* (Figura 16) é bastante simples e possui apenas um único chip, um regulador de *dropout* ultra baixo integrado que converterá tensões de 3,3 V a 6 V em aproximadamente 3,3 V, já que a tensão de operação de qualquer cartão micro SD padrão é 3,3 V.

Figura 16 – Módulo SD Card



Fonte: Adaptado de Eletrogate (2023)

A biblioteca utilizada neste protótipo foi a “SdFat”, sendo as ligações do módulo (pinagens) as seguintes:

- GND – deve ser conectado ao GND do Arduíno;
- VCC – pino que fornece energia para o módulo e deve ser conectado ao 5 V / 3,3 V no Arduíno;
- MISO (*Master IN Slave OUT*) – é a saída SPI do Módulo SD Card;
- MOSI (*Master OUT Slave IN*) – é a entrada SPI do Módulo SD Card;
- SCK (*Serial Clock*) – pino que aceita pulsos de *clock* que sincronizam a transmissão de dados gerados pelo Arduíno;
- CS – pino que é usado pelo Arduíno (*Master*) para habilitar e desabilitar dispositivos específicos no barramento *Serial Peripheral Interface* (SPI).

### 2.8.1.5 Sensor Ultrassônico JSN-SR04T 2.0

O sensor ultrassônico impermeável JSN-SR04T oferece uma faixa de tensão de operação 5 V (o que significa que pode funcionar em microcontroladores de 5 V), possuindo baixo consumo de energia de apenas 20  $\mu\text{A}$  durante o repouso (podendo funcionar com baterias por anos). Os outros sensores HCSR05 e HC-SR04 possuem alta tensão de operação e consumo de corrente (o que não os torna a melhor escolha para baixo consumo de energia).

O sensor ultrassônico de distância JSN-SR04T 2.0 (Figura 17) possui funcionamento muito semelhante ao sensor ultrassônico de distância HC-SR04, onde permite utilizar o mesmo código de programação. Ideal para calcular a distância com precisão de objetos entre 25 a 450 cm, considerando o ar como meio de propagação sonora (caso o meio seja a água esta faixa se altera para 90 a 2000 cm). É resistente a água, dispondo de cabo com 2,5 m, o que possibilita medir distância e/ou velocidade em ambientes úmidos sem danificar o circuito.

Figura 17 – Sensor Ultrassônico JSN-SR04T 2.0



Fonte: Adaptado de Eletrogate (2023)

Dentre algumas características deste sensor estão: dimensões reduzidas, facilidade de uso, baixa tensão, baixo consumo de energia, alta precisão, resistente a interferências, sonda à prova d'água com fio alongado para medições em ambientes úmidos e outros. Algumas especificação técnicas do sensor ultrassônico JSN-SR04T 2.0, estão a seguir:

- Tensão de trabalho: 3 V a 5 V;

- Consumo de corrente quiescente: 5 mA;
- Corrente de trabalho: 30 mA;
- Frequência de emissão acústica: 40 kHz;
- Distância de medida máxima: 4,5 m;
- Distância de medida mínima: 0,2 m;
- Resolução: 0,5 cm;
- Ângulo de detecção: <50 graus;
- Comprimento do cabo: 2,5 m;
- Diâmetro do sensor: 22 mm;
- Temperatura de trabalho: -10 a 70 °C;
- Peso: 50 g;
- Dimensões: 41,5x28,5x17 mm.

Utiliza dois pinos digitais em seu microcontrolador e um temporizador de software para calcular a distância. O módulo permite a leitura das informações em até 3 modos distintos. O modo 1 tem funcionamento básico operando com pinos *Trigger* e *Echo*. O modo 2 tem saída de dados seriais 1, a cada 100 ms o módulo envia a distância lida através serialmente em nível *Transistor–transistor logic* (TTL) ( unidade em mm ). O modo 3 tem saída de dados seriais 2, ao receber o comando 0X55 o módulo inicia a medida e fornece o valor no formato: 0XFF + H\_DATA + L\_DATA + SUM.

A sequência de comunicação é a mesma do sensor HCSR04, o sinal alto no pino *Trigger* deve ter pelo menos 10 ms de largura. Alguns usuários relataram obter uma boa leitura somente após aumentar a largura do gatilho para 20 ms. Este modo funciona com a popular biblioteca “*Arduino Newping*”. Não é obrigatório usar esta biblioteca, é possível fazer o sensor funcionar com algumas linhas de código, entretanto, a biblioteca torna isso mais simples.

#### 2.8.1.6 Sensor Ultrassônico DYP-A02YY

Este sensor de alcance ultrassônico é um módulo de medição de distância sem contato, com desempenho estável e alta precisão de alcance, apresentando distância de bloqueio menor, ângulo de detecção mais amplo e um certo poder de penetração em comparação com outros sensores semelhantes. Ele pode detectar a distância entre a onda ultrassônica e o alvo. Amplamente utilizado para evitar obstáculos por robôs, sistema de gerenciamento de estacionamento, controle automático e assim por diante, contando com proteção IP67.

Figura 18 – Sensor Ultrassônico DYP-A02YY



Fonte: Adaptado de ELECROW (2023)

Algumas especificação técnicas do Sensor Ultrassônico DYP-A02YY estão a seguir:

- Tensão de trabalho: 3,3 V a 5 V;
- Corrente de pico: 60 mA;
- Corrente de trabalho: 8 mA;
- Distância de medida máxima: 4,2 m (no ar);
- Distância de medida mínima: 0,03 m (no ar);
- Precisão da medida:  $\pm(1 + s * 0.5\%) / \pm(1 + s * 0.3\%)$  cm (s é distância de medição);
- Ciclo de trabalho: controlado/100 ms;
- Modo de saída: largura de pulso *Pulse Width Modulation* (PWM);
- Ângulo de detecção: 60 graus;
- Temperatura de trabalho: -15 a 60 °C;
- Peso: 80 g;
- Dimensões: 63x29x16 mm.

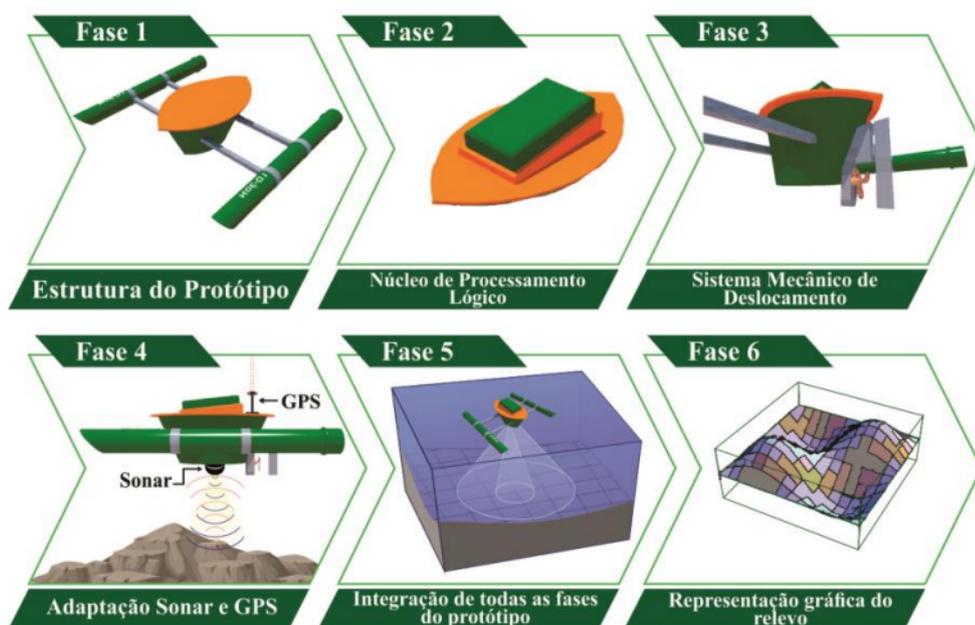
### 3 METODOLOGIA

Este estudo tem caráter aplicado, caracterizando-se como pesquisa aplicada. Partindo da definição do tema, buscou-se o referencial teórico e a compreensão, e a modelagem do objeto de estudo. Como base para o referencial teórico, realizou-se buscas de livros na Biblioteca Setorial de Joinville contida na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Portal de Periódicos da Capes e Repositório institucional da UFSC.

O foco dos livros escolhidos na Biblioteca Setorial de Joinville tinha como tema: “métodos de batimetria” e “procedimentos portuários”. Nas buscas realizadas através do Portal de Periódicos da Capes, sem restrições, utilizou-se os termos “*Métodos de batimetria em portos*”, “*Métodos de baixo custo para levantamento batimétrico*”, “*Embarcações não tripuladas*”, utilizando o operador “AND” e intercalando os termos, selecionando os 30 artigos e teses relevantes ao tema, o mais antigo datado do ano de 2003. A partir dos artigos selecionados, surgiram mais referências sobre o tema.

Após a etapa de estudo inicial, aplicou-se etapas de comparação, prototipagem e análise. A etapa de comparação elencou os métodos mais relevantes para este estudo, construindo o modelo de itens essenciais para execução da batimetria. A prototipagem foi realizada através das etapas apresentadas por Nunes *et al.* (2017), conforme a Figura 19.

Figura 19 – Proposta de método



Fonte: Nunes *et al.* (2017)

E como definido por Nunes *et al.* (2017), a metodologia esta elaborada a seguir:

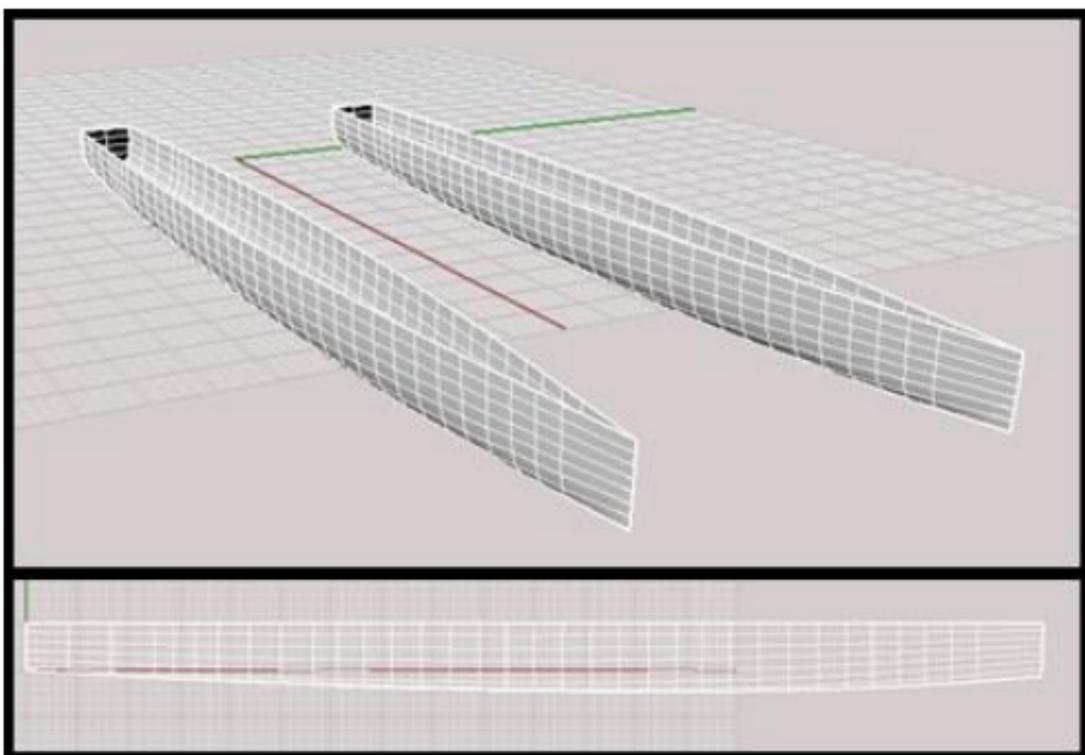
### 3.1 FASE 1 - ESTRUTURA DO PROTÓTIPO

A Fase 1 é a construção da estrutura do protótipo, promovendo a sua estabilidade, considerando acoplagem dos sistemas embarcados e de propulsão. Para este trabalho utilizou-se um modelo reduzido (1:6) do Barco Solar Babitonga estilo catamarã, os moldes foram construídos por Bedin (2016), possibilitando gerar os cascos utilizados. A escolha se deu pelo motivo dos cascos estarem construídos porem sem uso, contendo formas orgânicas e estilo catamarã, assim o autor concluiu ser uma ótima escolha para o projeto.

#### 3.1.1 Modelo de casco

Para definir a distância entre os semi cascos foram utilizados os resultados de resistência ao avanço de Bedin (2016), através dos testes realizados por ele, a distância que melhor se comportou foi de 32 centímetros. Para este projeto, outro estudo que otimizasse a estabilidade poderia ter sido realizado, entretanto o autor decidiu seguir com os resultados de Bedin (2016). O modelo em *Computer Aided Design* (CAD) está apresentado na Figura 20, e os parâmetros do modelo comparados com o modelo real estão na Tabela 5.

Figura 20 – Modelagem de casco do catamarã Babitonga



Fonte: Bedin (2016)

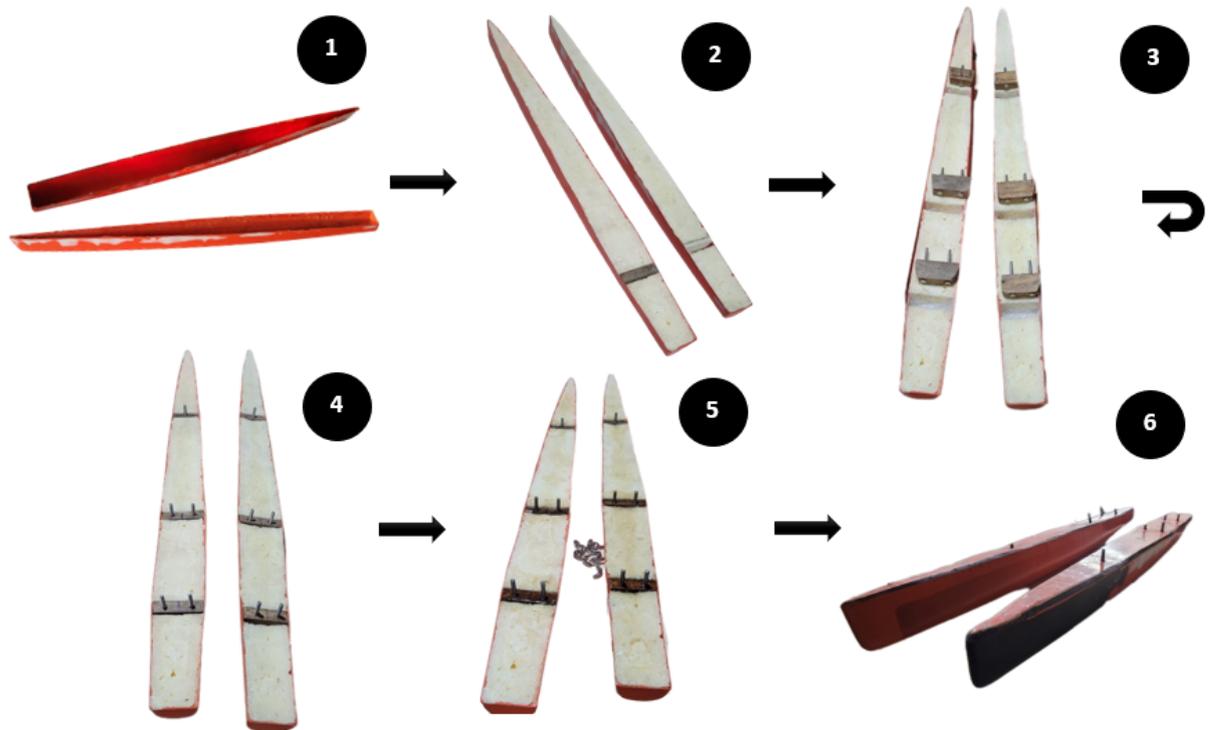
Tabela 5 – Propriedades hidrostáticas do modelo

Propriedade	Unidade	Escala Modelo	Escala Real	Memorial Descritivo
Deslocamento	ton	0,001	0,312	0,308
Volume deslocado	m <sup>3</sup>	0,001	0,305	0,301
Calado a meia nau	m	0,024	0,146	0,301
Comprimento na linha d'água	m	0,998	5,988	5,976
Boca na linha d'água	m	0,390	2,342	2,238
Área molhada	m <sup>2</sup>	0,134	4,860	4,834
Coefficiente prismático	-	0,572	0,573	4,834
Coefficiente de bloco	-	0,411	0,412	0,415
Coefficiente da secção mestra	-	0,762	0,764	0,768
Coefficiente de área de linha d'água	-	0,715	0,764	0,727
LCB a partir da meia nau	m	-0,011	-0,069	-0,069
LCF a partir da meia nau	m	-0,067	-0,069	-0,406
Posição vertical do centro de flutuação	m	0,016	0,095	0,093
Tonelada por centímetro de imersão	ton/m	0,001	0,095	0,018

Fonte: Adaptado de Bedin (2016)

A equipe Babitonga cedeu um dos modelos de casco existentes, feito em fibra de vidro (Figura 21, item 1). Para garantir a estanqueidade, o casco foi preenchido por espuma expansiva de Poliuretano (PU), assim garantido a reserva de flutuação (Figura 21, item 2). Para que a ligação entre cascos fossem confiáveis e firmes, inseriram-se bases de madeira densa em três pontos longitudinais do casco, com parafusos de aço inoxidável transpassados, após isto foram fixados no casco através da laminação em fibra (Figura 21, item 3, 4 e 5). Por último, foi inserido o convés do casco, fixado e vedado com laminação de fibra de vidro em suas laterais para manter o casco hermético (Figura 21, item 6). O processo está esquematizado na Figura 21.

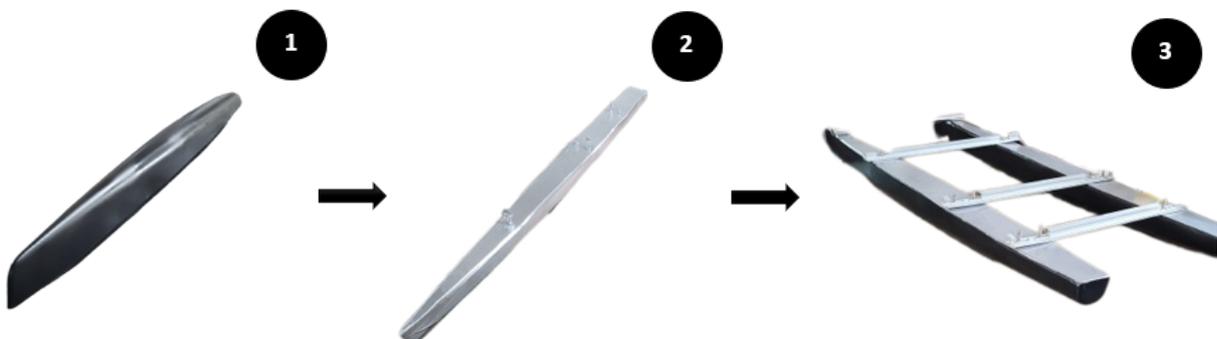
Figura 21 – Processo de fabricação estrutural



Fonte: Autor, 2023

Para fazer as conexões estruturais foram utilizadas três perfis de alumínio estrutural, com espessura de 3 milímetros e largura de 23 milímetros, sendo que todos respeitam os 32 centímetros entre os semi cascos. O convés foi pintado de prata e o casco de preto, após isto foram ligados com os perfis de alumínio estrutural, fixados por borboletas de aço inoxidável, conforme a Figura 22 demonstra.

Figura 22 – Ligação dos cascos



Fonte: Autor, 2023

### 3.2 FASE 2 - NÚCLEO DE PROCESSAMENTO LÓGICO

A Fase 2 consiste na definição e montagem dos controladores para os componentes mecânicos de velocidade e direção. Para tal, foi necessário inserir uma plataforma (retalho de ACM - Alumínio Composto) para apoio da caixa com componentes (caixa de ferramentas em plástico) na Figura 23. Os itens utilizados são componentes de modelismo, dentre eles foram empregados motor DC 12 V, *Electronic Speed Controller* (ESC) de escovas, servomotor de 15 kg de força, controle e receptor via rádio frequência, duas baterias de Polímero de Lítio (LiPo) 2S, hélice plástica de modelismo (2,7 x 2,7 x 2,1 cm). Além destes, foi empregado um fusível de 3 amperes para proteção dos componentes devido ao motor estar submerso, fiação 3 mm, seis conectores *wago* e dois pares de conectores tipo T DEAN para as baterias.

Figura 23 – Caixa para componentes eletrônicos



Fonte: Autor, 2023

Para melhorar a autonomia foram inseridas duas placas de energia solar de 5 watts cada, ligadas a um PWM para regular o carregamento das baterias e também aferir a voltagem do sistema. Os componentes desta etapa estão especificados a seguir:

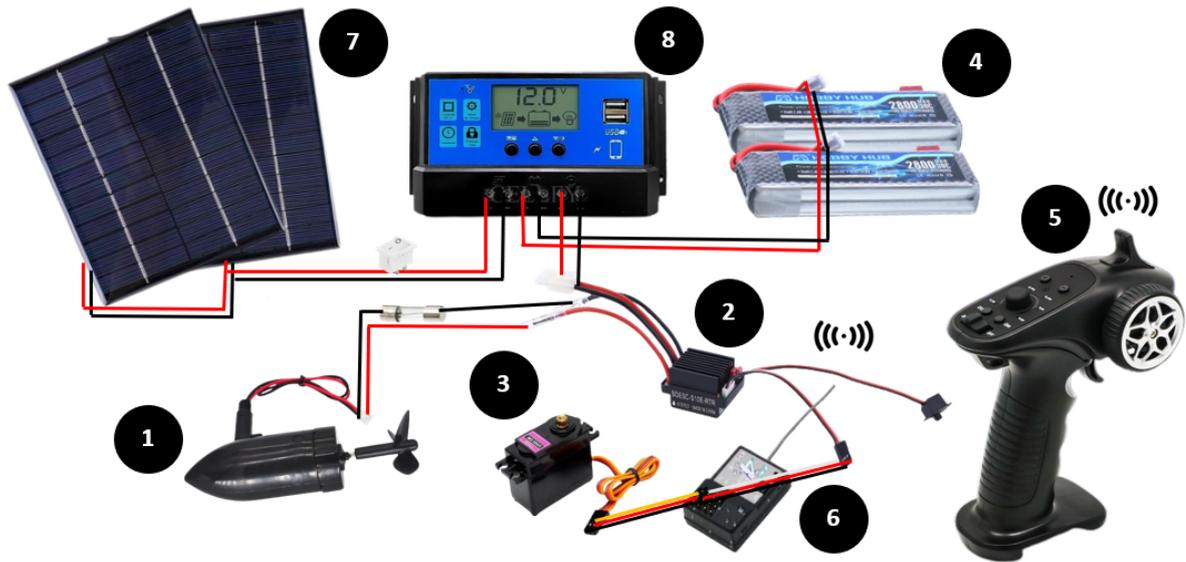
- **Item 1 - Propulsor subaquático (Flytec 2011-5):** Carcaça em plástico de engenharia ABS com 13 cm de comprimento, tensão entre 5 a 12 V, velocidade máxima em 12 V de 13000 RPM, pesando 91,75 g, com hélice de 27 mm de diâmetro;
- **Item 2 - ESC escovado (BDESC-S10e-RTR):** Dimensões de 43x29x27 mm, tensão de trabalho entre 6 a 12 V, resistência interna de 0,0076 mΩ, corrente de saída contínua de 320 A (frente) e 160 A (ré), com cabo 16 A WG de 140 mm (bateria e motor) e 450 mm (receptor), aceitando bateria de níquel cádmio (NiCd),

níquel hidreto metálico (Nimh) e LiPo, pesando 60 g;

- **Item 3 - Servomotor (MG 996R):** Com 180 graus de giro, fio conector de 300 mm, dimensão de 55x20x45 mm, peso de 57 g, velocidade de operação de 352,94 graus/s (4,8 V sem carga), torque de 9,4 kgf/cm em 4,8 V e 11 kgf/cm em 6 V;
- **Item 4 - Baterias LiPo:** duas baterias com tensão de 7,4 V, tipo 2S, capacidade de 2800 mAh e Tomada T;
- **Item 5 - Transmissor via rádio frequência (TX4 2.4 GHz)** Controle Remoto de 4 canais, com potência de RF menor que 20 dbm, tempo de resposta de 10 a 12 ms, com alcance de 200 a 300 m, tensão de 4,8 a 6 V (4 pilhas AAA), peso de 260 g e dimensões de 180x80x145 mm;
- **Item 6 - Receptor via rádio frequência (TX4 2.4 GHz):** Com 4 canais, frequência de 2,4 GHz, dimensões de 16x18x12 mm e 5 g.
- **Item 7 - Placas Solares (5 W):** duas placas solares de 5 watts, em resina Epóxi, tensão de trabalho de 12 V, tensão de circuito aberto de 13,5 V, corrente de curto-circuito de 180 mA, temperatura de operação de 0 a +60 °C, dimensões de 110x136 mm, peso de 70 g.
- **Item 8 - PWM (Knup AD10A):** Com *Liquid Crystal Display* (LCD), tensão de 12 V/24 V (Automática), corrente nominal de carga de 10 A, corrente nominal de descarga de 10 A, tensão solar máxima entre 12 a 23 V/24 a 46 V. Carregamento flutuante de 13,7 V (ajustável: 13 V a 15 V)/ 27,4 V (ajustável: 26 a 30 V), corrente em *stand-by* inferior a 10 mA, temperatura da operação entre -35 a +60 °C, dimensões de 133x70x35 mm, peso de 132 g.

O esquema simplificado das conexões dos componentes essenciais para o movimento da embarcação e sua autonomia estão representados pela Figura 24, contendo os elementos citados nos itens acima, correspondendo as numerações. Além dos supracitados, é inserida uma chave gangorra branca na ligação positiva para desligar/ligar as placas solares caso seja necessário, e acrescentado o fusível de 3A na ligação negativa do motor. O ESC escovado já vem com sua própria chave para ligar/desligar o sistema.

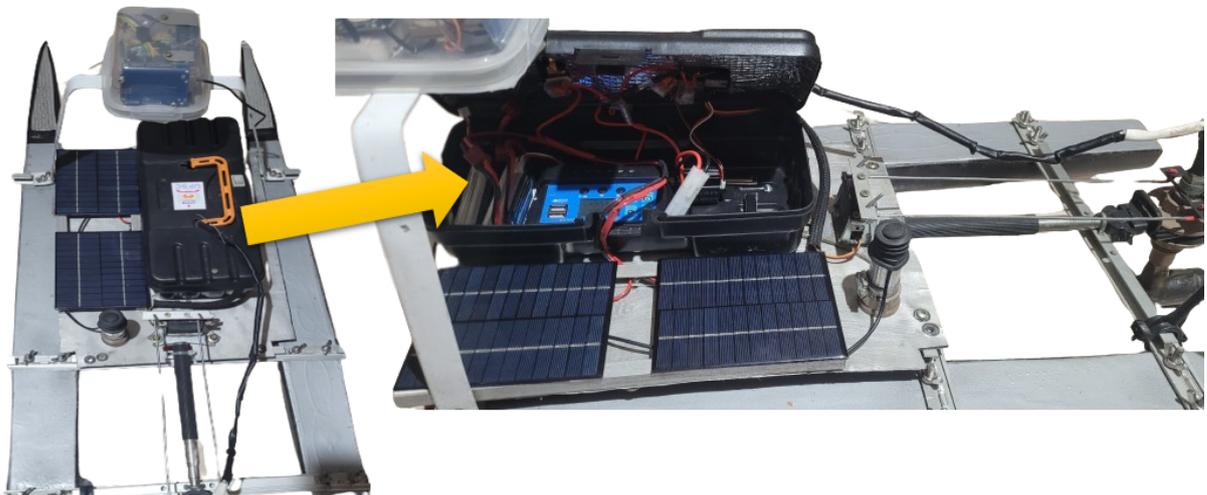
Figura 24 – Esquema de conexões dos componentes eletrônicos



Fonte: Autor, 2023

A Figura 25 ilustra a ligação física dentro da caixa com os componentes eletrônicos. As placas solares e a caixa foram posicionadas sobre a embarcação buscando equilibrar da melhor forma o peso entre os dois cascos, assim, inserindo a embarcação em um pequeno tanque e equalizando a linha d'água em ambos os casco.

Figura 25 – Caixa com componentes montados



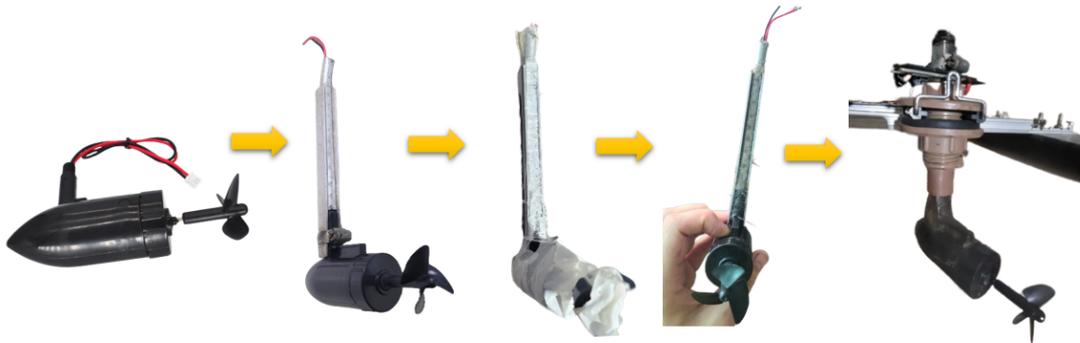
Fonte: Autor, 2023

### 3.3 FASE 3 - SISTEMA MECÂNICO DE DESLOCAMENTO

A Fase 3 consiste na construção do sistema para deslocar o protótipo sobre a superfície da água. Para maior simplicidade no sistema e melhor manobrabilidade, optou-se por um sistema sem leme, onde o motor submerso gira e direciona o fluxo de fluido, similar aos sistemas propulsores do tipo *azipod* e motores de popa de lanchas.

Para o sistema, a haste do motor foi alongada e reforçada com um perfil em “u” em alumínio fixado por fibra de vidro e resina epóxi, no interior se inseriu um tubo de alumínio para passar os cabos de energia do motor até a parte superior, e na parte exterior foi inserido um segmento de cano *Polyvinyl chloride* (PVC) para facilitar a rotação e diminuir folgas (Figura 26).

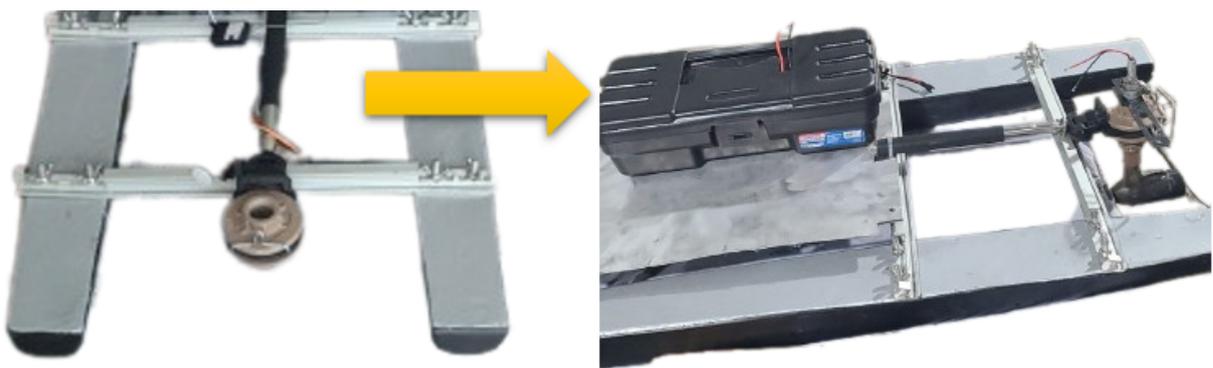
Figura 26 – Reforço da haste do motor



Fonte: Autor, 2023

Como base de apoio e fixação utilizou-se um adaptador flange com anel PVC marrom roscável e soldável 1/2"20 mm, que por sua vez estava rosqueado e preso sob pressão em um suporte bastão para aparelho celular que foi fixado nas duas últimas barras estruturais do casco. Este suporte bastão para aparelho celular, além de fazer o contrapeso do motor submerso, teria a vantagem da possibilidade de ajustar o trim por ser articulado (Figura 27).

Figura 27 – Base de apoio do motor

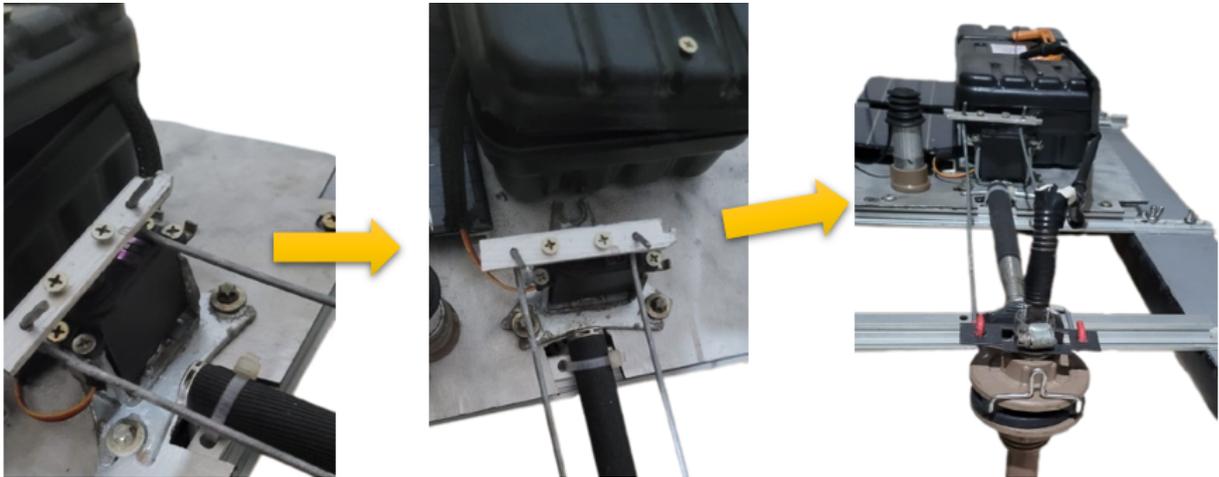


Fonte: Autor, 2023

Utilizou-se um pedaço de “testa de porta” como barra de direção, que se encaixou perfeitamente no perfil em “u” de alumínio do motor. O servomotor foi fixado com uma base de metal de uma peça automotiva em desuso, a haste plástica do servo motor foi reforçada com uma chapa de alumínio. A ligação entre a haste de direção do servomotor e a barra de direção inserida no motor foi realizada através de alças de

lata de tinta, conformadas manualmente a fim de ficarem retas. Para manter o motor apoiado no flange utilizou-se uma braçadeira sobre a barra de alumínio em “u” (Figura 28).

Figura 28 – Servomotor e direção do motor



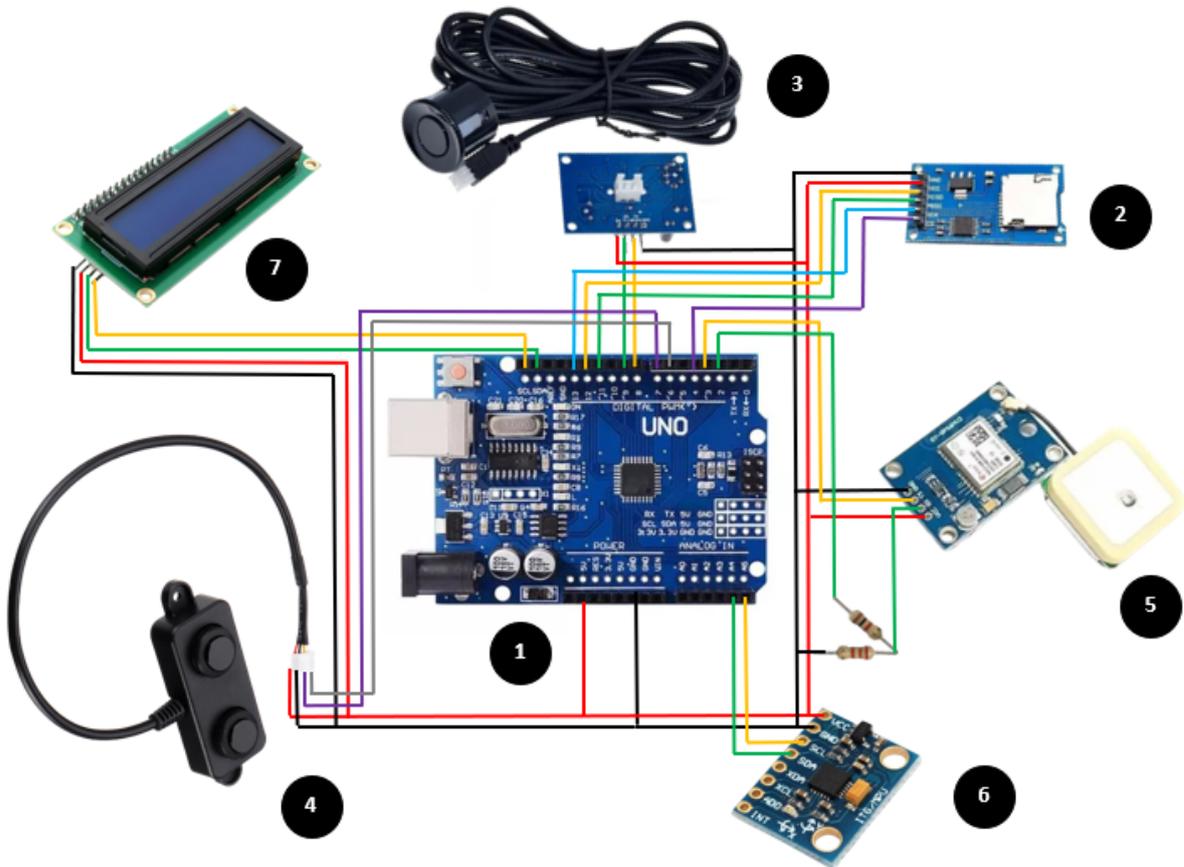
Fonte: Autor, 2023

### 3.4 FASE 4 - ADAPTAÇÃO SONAR E GPS

A Fase 4 adapta componentes para registrar os valores de profundidade e distância obtidos através de pulsos dos sensores ultrassônicos, o posicionamento (latitude, longitude e altitude), data e hora e velocidade através do GPS, movimentos de *roll* e o *pitch*, acelerações angulares e a temperatura ambiente calculados através do módulo giroscópio. Para testes e conexões iniciais usou-se um *proto board*, ligando os sensores e Arduino UNO, mas após a validação dos algoritmos e suas ligações, soldou-se os componentes com estanho a uma placa de circuito impresso ilhada 5x7 cm (Dupla Face) (Figura 30). Os itens e esquema de ligações (Figura 29) se encontram a seguir, o código implementado está no Apêndice A (5.2).

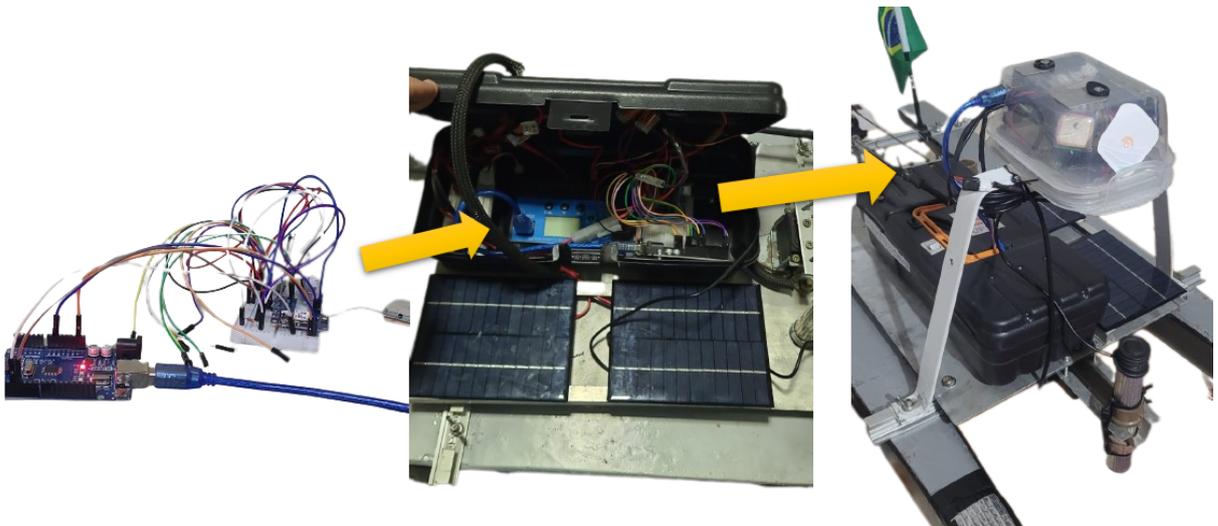
- **Item 1** - Arduino UNO R3
- **Item 2** - Módulo SD Card
- **Item 3** - Sensor ultrassônico JSN-SR04T 2.0
- **Item 4** - Sensor ultrassônico DYP-A02YY
- **Item 5** - Módulo GPS Ublox NEO-6M
- **Item 6** - Módulo acelerômetro e giroscópio CI MPU-6050
- **Item 7** - Display LCD 16x2 (azul) com módulo adaptador I2C

Figura 29 – Diagrama de ligação de componentes do Arduino



Fonte: Autor, 2023

Figura 30 – Ligação dos componentes do Arduino UNO ao USV



Fonte: Autor, 2023

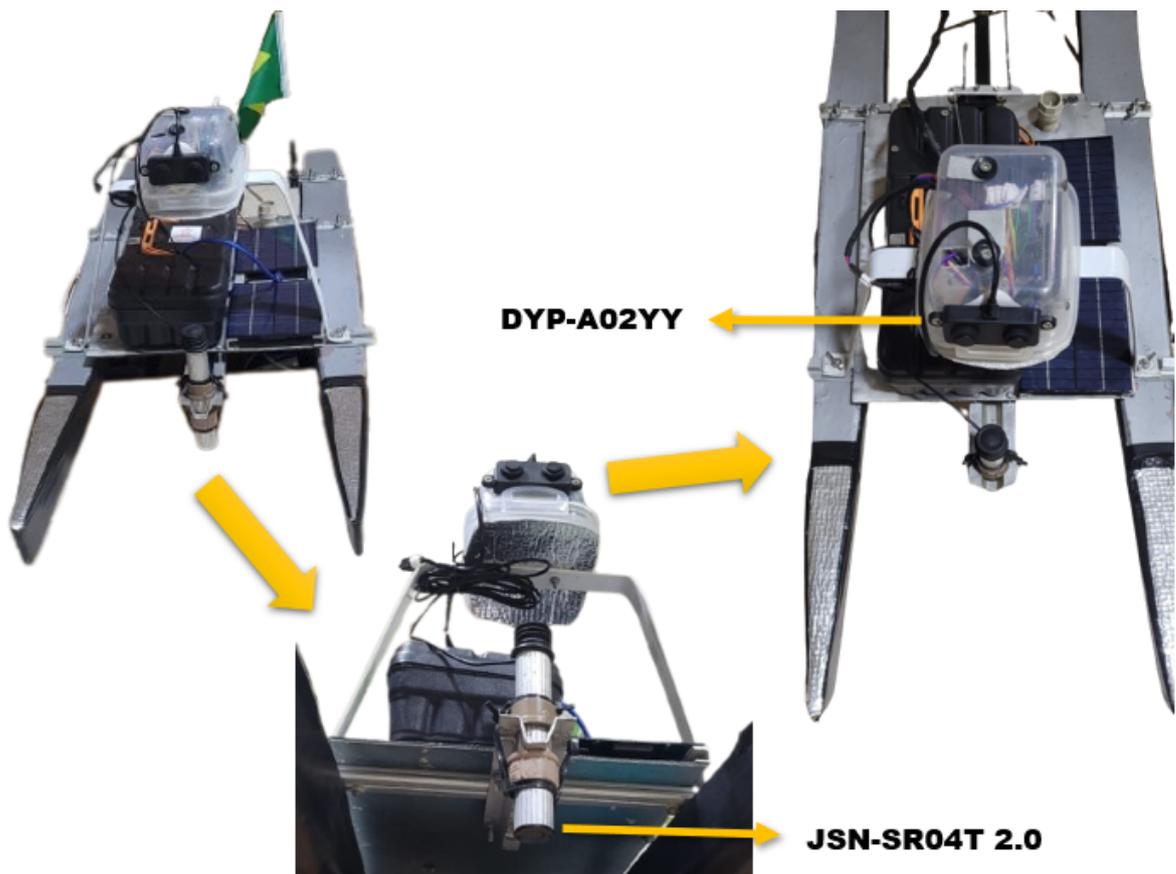
No início foram inseridos os componentes no interior da caixa de ferramentas em plástico, mas ao acelerar o motor a interferência magnética dos componentes propulsivos afetava o Arduino UNO, especificamente nos cabos e sensores do GPS, travando assim o processamento. A solução foi separar os componentes do Arduino em

outra caixa plástica hermética (com partes isoladas com manta térmica de alumínio), posicionado-a mais a vante e com maior elevação, auxiliando assim também na captação do sinal GPS (último item da direita na Figura 30).

Foi necessário inserir dois resistores de 1 k $\Omega$  e 2,2 k $\Omega$  na ligação RX do módulo GPS, assim equalizando a tensão de 5 volts para 3,3 volts. Para o algoritmo em C do Arduíno utilizou-se o *watchdog* para garantir que o software volte para uma condição conhecida em caso de algum erro ou situação inesperada, devido a interferências magnéticas no sensor GPS principalmente. Somando a isso, foi empregada uma técnica de reiniciar o sistema caso o módulo GPS fique muito tempo sem captar o sinal, através do comando “*asm volatile (“ jmp 0”)*”.

O posicionamento do sensor ultrassônico de distância JSN-SR04T, em primeira instância, ficou ao lado esquerdo do servomotor (bombordo), sendo realocado abaixo da caixa dos componentes do Arduíno UNO, para alinhar a medição do módulo GPS com a leitura do sensor (Figura 31).

Figura 31 – Realocação dos componentes do Arduíno UNO



Fonte: Autor, 2023

Este sensor tem uma distância de bloqueio elevada (aproximadamente 95 cm). Como alternativa testou-se a utilização do Sensor Ultrassônico DYP-A02YY (distância teórica de bloqueio na água de 15 cm), entretanto este sensor não funcionou submerso,

apenas no ar, sendo inserido à frente da embarcação na caixa plástica do Arduino, com intuito de perceber obstáculos a frente para projetos futuros de piloto automático. O sensor giroscópio do Arduino foi o único que ficou dentro da caixa de ferramenta em plástico, pois deve ficar o mais próximo do centro de massa da embarcação para a acurácia das suas medições.

### 3.5 FASE 5 - INTEGRAÇÃO DE TODAS AS FASES DO PROTÓTIPO

A Fase 5 integra todas as fases do protótipo, onde o núcleo de processamento lógico armazena os dados emitidos pelo Sonar e GPS e controla o sistema mecânico de deslocamento. Nesta etapa o protótipo foi testado em piscina para analisar seu deslocamento e leituras iniciais dos sensores (Figura 32).

Figura 32 – Teste do protótipo USV em piscina



Fonte: Autor, 2023

A tela LCD auxiliou na verificação do funcionamento dos sensores batimétricos e das coordenadas do GPS (Figura 33, a latitude e longitude estão na primeira linha e a profundidade está na segunda linha no canto esquerdo em centímetros), importante salientar que o sensor GPS utilizado é de baixo custo e leva em torno de 15 minutos para sincronizar com os satélites. O sistema de captação de energia fotovoltaica é instalado apenas para auxílio na autonomia, não para plena locomoção, e seu controlador PWM é muito útil, pois alimenta a placa do sistema Arduino UNO, visto que tem duas entradas *Universal Serial Bus* (USB) de 5 volts e afere a tensão de baterias e tensão produzida pelas placas solares.

Figura 33 – Leitura de coordenadas geográficas, profundidade e distância frontal



Fonte: Autor, 2023

### 3.6 FASE 6 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RELEVO

Sendo a última fase do processo, a Fase 6 é referente a obtenção e aplicação dos dados logrados e armazenados pelo protótipo. Escolheu-se utilizar um algoritmo em Octave para gerar a malha 3D do levantamento batimétrico. O algoritmo está descrito no Apêndice B (5.2), e utiliza as coordenadas de referência geradas pelo levantamento, com a função “griddata”, utilizando o método “nearest”, conhecido como “método de interpolação do vizinho mais próximo”. Utilizando o *software* QGis, aplicou-se o método TIN (mais utilizado) e IDW para representar parte da leitura realizada em campo.

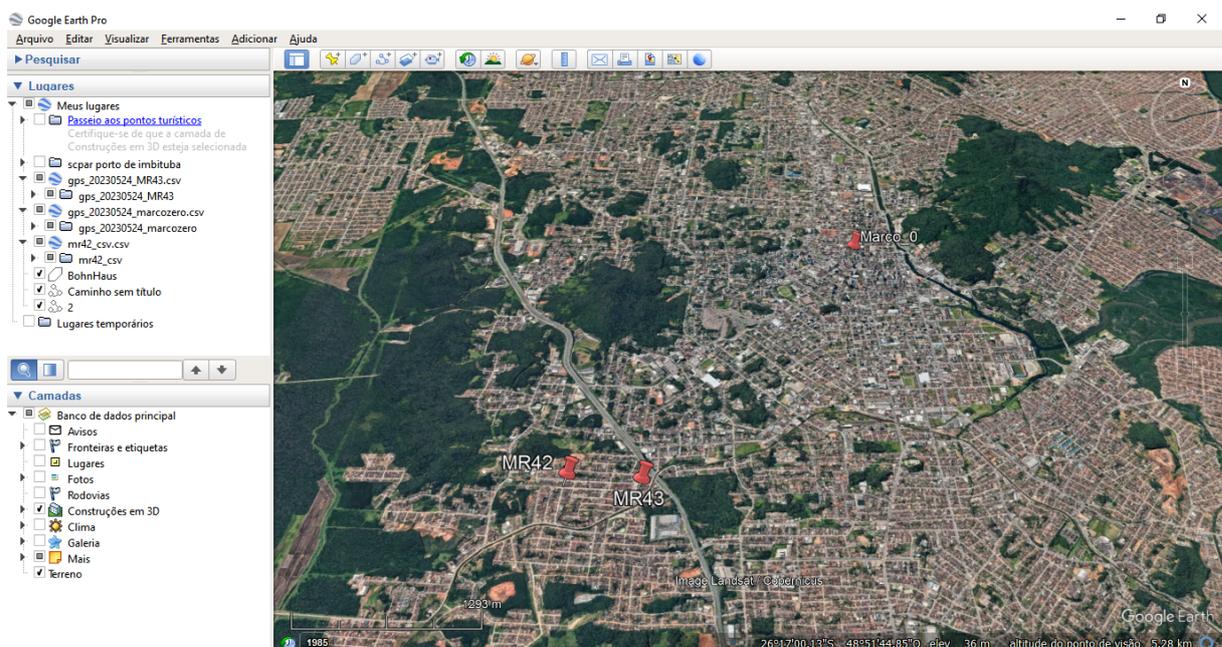
### 3.7 EXPERIMENTOS

Alguns experimentos são necessários para avaliar a medição dos sensores e seus limites, e estão descritos a seguir (todos os experimentos consideraram a água sem salinidade, interpolando a Tabela 2 com as temperaturas aferidas para determinar a velocidade do som na água, sendo a incerteza padrão (Tipo B) do termômetro digital com resolução de 0,1 °C, assumindo uma distribuição triangular é de 0,041 °C, a incerteza padrão (Tipo B) da trena metálica com resolução de 1 mm, assumindo uma distribuição retangular é de 0,058 cm):

#### 3.7.1 Verificação de acurácia sensor GPS

Com o intuito de verificar a flutuação das medições do módulo GPS, escolheu-se três pontos de início (conforme Figura 34, MR42, MR43 e o marco zero de Joinville, que fica dentro da Biblioteca Pública), conhecidos como marcos geodésicos, na cidade de Joinville, onde já existem marcações referenciais com os pontos geográficos de alta precisão (utilizados para medições em terrenos e referências topográficas). Para conhecimento dos marcos geodésicos, acessou-se o sistema SIMGeo (Joinville, 2023), na lista de camadas em “Planejamento”, selecionou-se o item “Marcos Geodésicos”, visualizando a tabela de atributos foi possível verificar o nome do marcador e suas coordenadas geográficas.

Figura 34 – Marcos geodésicos de Joinville que foram selecionados

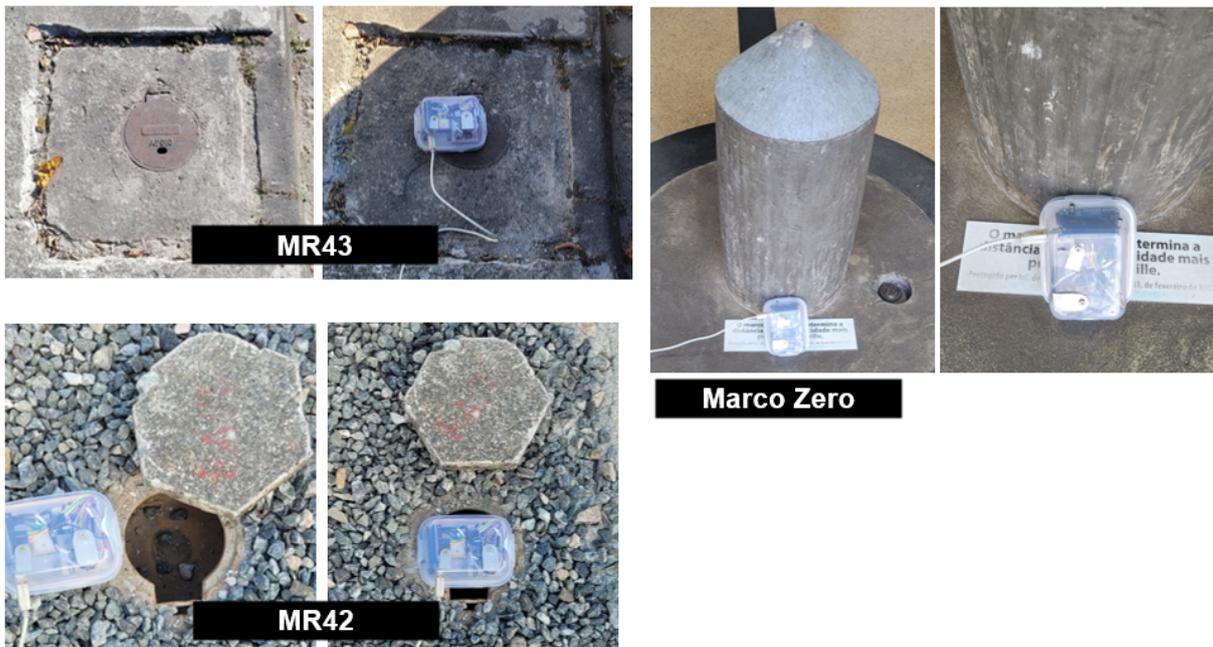


Fonte: Autor, 2023

Para a medição, em dia com poucas nuvens, esperou-se a sincronização e no momento em que iniciaram as medições pelo sensor, marcou-se 10 minutos de

captação de dados, com frequência de um segundo (1 Hz). A Figura 35 mostra a execução dos experimentos. Salientando que a precisão anunciada pelo fabricante é de 2,5 metros horizontalmente. Os marcos geodésicos obtidos da prefeitura tinham sete casas após a vírgula em graus decimais, as retornadas pelo módulo GPS continham seis casas decimais.

Figura 35 – Medições nos marcos geodésicos de Joinville selecionados



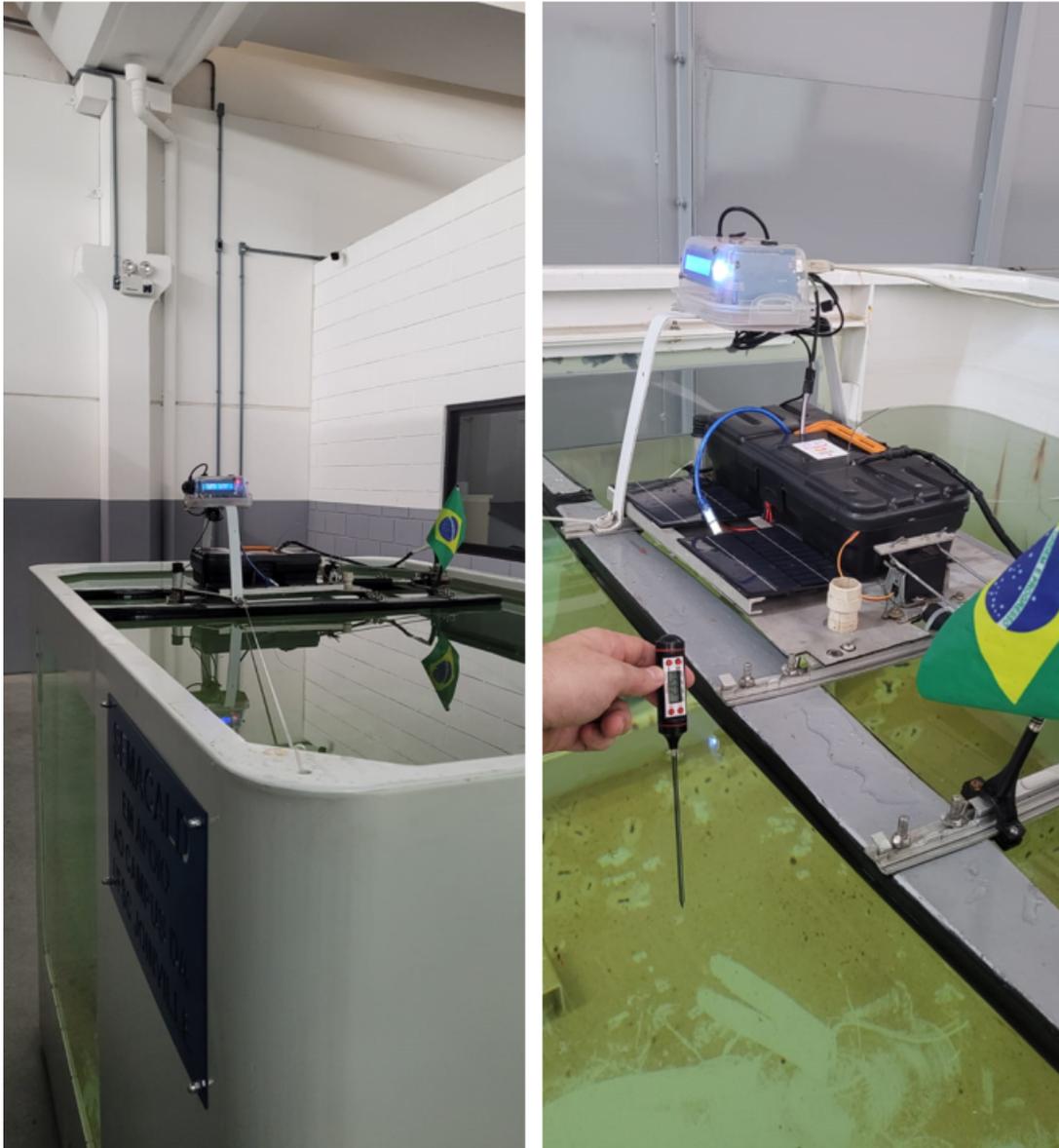
Fonte: Autor, 2023

### 3.7.2 Experimentos em tanque hidrostático para calibração

Com o intuito de verificar a flutuação das medições do módulo ultrassônico, utilizou-se o tanque hidrostático do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) na UFSC, com diferentes níveis de coluna d'água para aferir a profundidade através do tempo de respostas entre pulsos sonoros conforme Equação 1 (Figura 36). Para definir a velocidade do som na água também foi necessário aferir a temperatura da mesma (utilizou-se termômetro digital), salientando que a medição foi aferida apenas na superfície, desconsiderando os efeitos da alteração da temperatura conforme a profundidade aumenta, em medições de maiores profundidades esta incerteza deve ser considerada e corrigida.

Para definir a profundidade reduzida (Equação 2), com *draft* ( $D$ ) do sensor mensurado em  $(6,00 \pm 0,05)$  cm, desconsiderando o item  $\epsilon$  pois não temos efeitos dinâmicos e nem efeitos de fundo irregular, podemos definir a função  $k$  para correção em divergências provenientes diretamente do sensor.

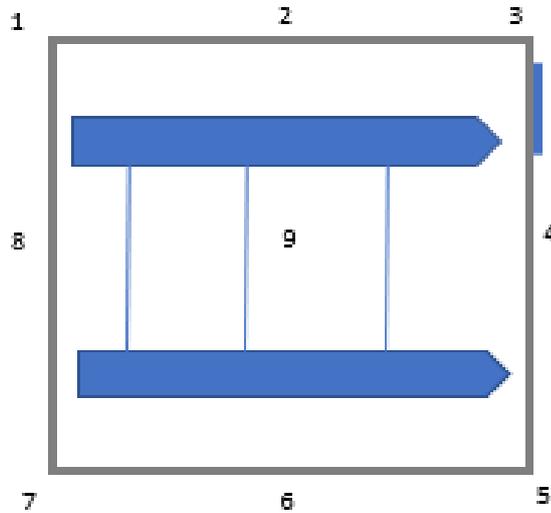
Figura 36 – Medições com sensores ultrassônicos no Tanque Hidrostático



Fonte: Autor, 2023

Para os experimentos, definiram-se 6 faixas com passo de 5 centímetros iniciando em 90 centímetros (próximo a distância de bloqueio do sensor JSN-SR04T 2.0) e terminando em 120 centímetros (limite do tanque hidrostático). Antes de iniciar cada ensaio, foram realizadas 9 medições em pontos distintos, aferindo a profundidade no tanque com uso de trena, conforme a Figura 37 representa. Em cada experimento, foi empregado para obtenção de dados, 20 minutos. As médias das medições da trena em cada ensaio foram comparadas com as medições do sensor, estimando assim a função  $k$  para correções. Salientasse que em todos os experimentos o protótipo USV foi ancorado para diminuir interferências.

Figura 37 – Vista superior do tanque com o protótipo e pontos de medição de profundidade

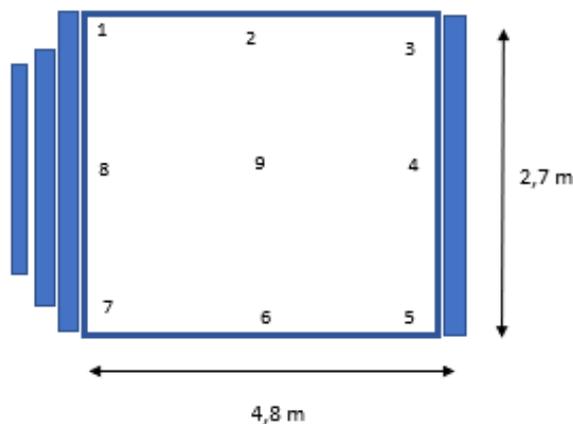


Fonte: Autor, 2023

### 3.7.3 Experimentos em piscina pequena para extrapolação da função $k$

Com o intuito de extrapolar os limites do tanque hidrostático, realizou-se o mesmo experimento em piscina de aproximadamente 136 cm de profundidade (piscina pequena), com período de 25 minutos de aquisição de dados, ancorando o protótipo USV no centro da piscina. Da mesma forma, antes do ensaio, foram realizadas 9 medições em pontos diferentes, fazendo novamente uso de trena para aferir a profundidade da piscina, conforme a Figura 38 representa, para que posteriormente se calculasse a média e a comparasse com as medições do sensor, recalculando assim a função  $k$  para correções.

Figura 38 – Vista superior da piscina pequena com pontos de medição de profundidade

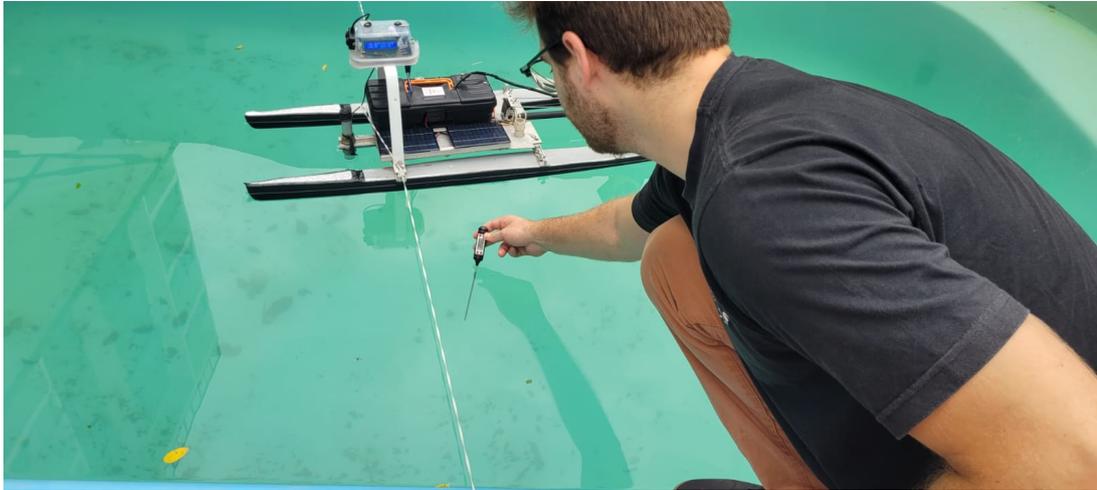


Fonte: Autor, 2023

A Figura 39 retrata a execução do experimento e a medição da temperatura da

água para executar os cálculos posteriormente.

Figura 39 – Execução do experimento em piscina pequena

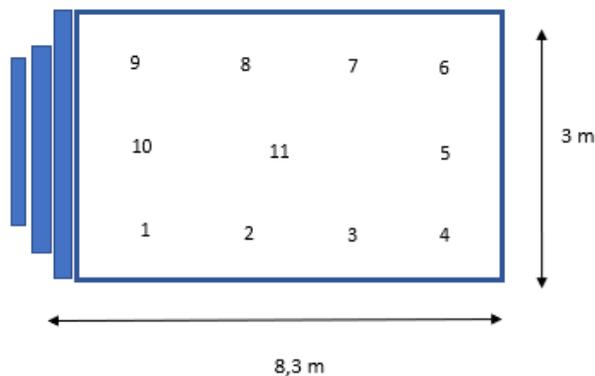


Fonte: Autor, 2023

### 3.7.4 Experimentos em piscina grande para verificar impacto da velocidade do protótipo na acurácia da medição

Com o intuito de verificar a influência de efeitos dinâmicos da velocidade do protótipo nas medições dos módulos ultrassônicos, aplicaram-se movimentos circulares em uma piscina de maior porte por 20 minutos, com aproximadamente 130 cm de profundidade. Antes do ensaio, foram realizadas 11 medições em pontos distintos, portando a trena, aferindo a profundidade na piscina conforme a Figura 40 representa, apurando a média entre estes e contrastando-os com os dados coletados pelo sensor.

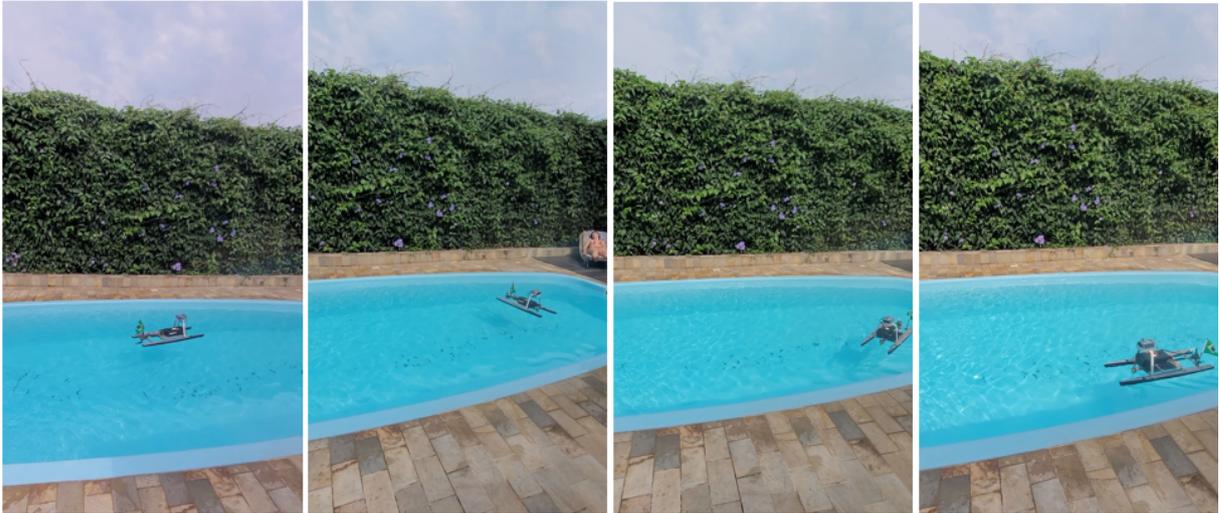
Figura 40 – Vista superior da piscina grande com pontos de medição de profundidade



Fonte: Autor, 2023

A Figura 41 retrata a execução do experimento, onde foram realizados movimentos circulares ininterruptos, sendo que os motores da piscina estavam ligados, simulando assim correntezas.

Figura 41 – Execução do experimento em piscina grande



Fonte: Autor, 2023

### 3.7.5 Experimentos de levantamento batimétrico em campo (Expoville)

Após os experimentos iniciais, este experimento buscou integrar a leitura de ambos o sensores GPS e ultrassônico em lamina d'água de maiores dimensões, e após a leitura gerar então o mapa topográfico do fundo. Escolheu-se um dos lagos da Expoville (Centro de Convenções Expoville), localizada em Joinville (SC) pelas dimensões e por ser aberto ao público, para efetuar o teste em campo (Figura 42).

Figura 42 – Operação protótipo USV em lago da Expoville

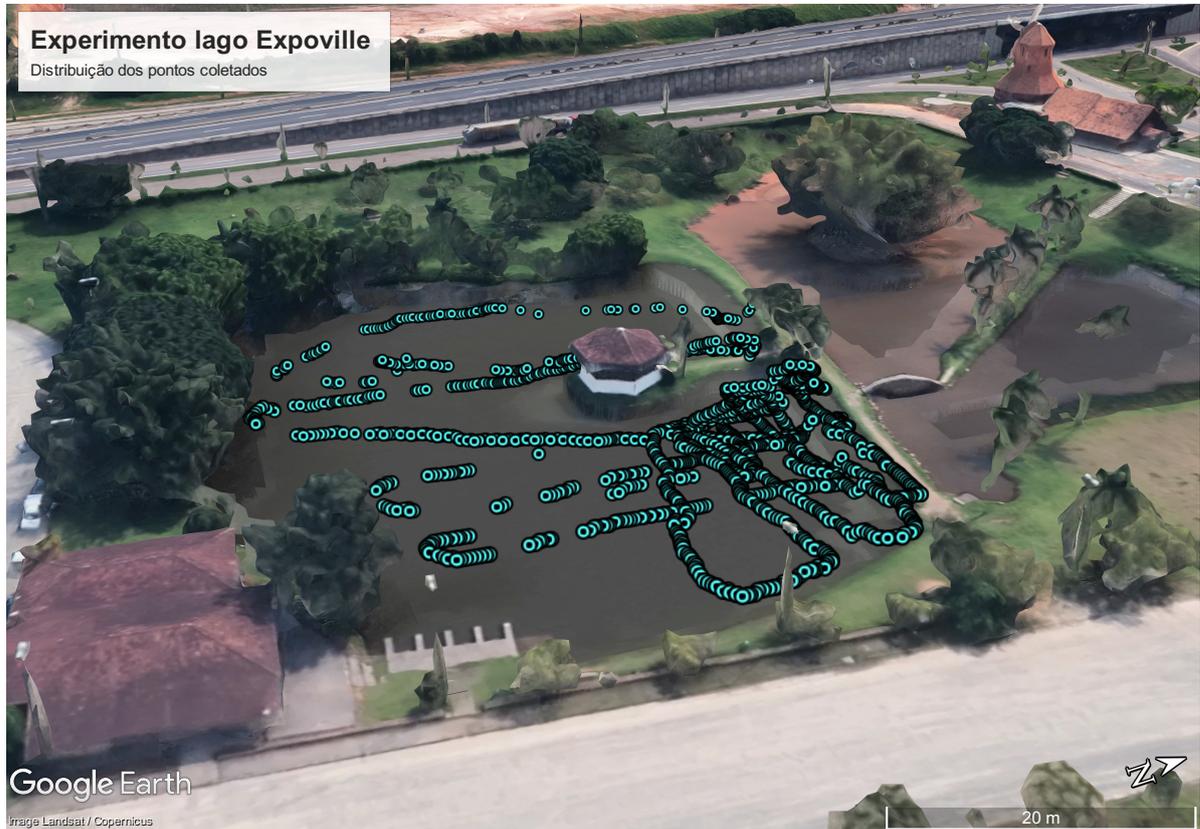


Fonte: Autor, 2023

A temperatura foi aferida com o mesmo termômetro digital e a salinidade ainda foi considerada como zero. Para este teste não foi efetuada nenhuma medição para conferência, pois considerou o equipamento como calibrado. O local não realiza

nenhum levantamento técnico referente a batimetria, tendo o intuito de verificar as medições integradas e possibilitar a geração do mapa topográfico. O circuito percorrido está ilustrado na Figura 43 (dados geográficos aferidos).

Figura 43 – Pontos da trajetória em levantamento batimétrico da Expoville



Fonte: Adaptado Google Earth, 2023

Para gerar o MDP aplicou-se o algoritmo em Octave no Apêndice B (5.2) (utilizando o método “surf” e “mesh”), e também gerou-se o mapa batimétrico de parte da área pelo *software* Qgis, com os métodos IDW e TIN. Embora o sistema embarcado registre o movimento de *roll* e *pitch*, os mesmos não foram considerados nos cálculos de ajuste por simplificação e pouca influência neste lago e pela velocidade reduzida aplicada ao USV (média de 0,8 m/s na medição aferida pelo módulo GPS).

## 4 ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises feitos a partir do estudo proposto.

### 4.1 CUSTO DA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A Tabela 6 apresenta os valores de custos do projeto, considerando também alguns itens como ferramentas para executar alguns processos do protótipo. Salientando que o casco em fibra de vidro foi cedido pela Equipe Babitonga e não entrou nos custos do projeto, assim como alguns itens que não foram comprados pois o autor reutilizou itens disponíveis, mas tiveram seus valores estimados (suporte bastão para aparelho celular, flange de cano, barra de alumínio de suportes de vidro, suporte do servomotor, tinta *spray* entre outros). É importante frisar que muitos componentes foram comprados em sites estrangeiros e não incidiram taxas de importação, comprados no ano de 2022 a 2023, podendo demonstrar grandes variações devido as taxas de importações atuais.

Tabela 6 – Custos de construção do protótipo USV

Item	Valor
Naval e Eletromecânica	
Propulsor subaquático 12 V (Flytec 2011-5)	R\$ 75,70
10 hélices plásticas (Reserva)	R\$ 36,84
ESC escovado (BDESC-S10e-RTR)	R\$ 43,00
Servomotor (MG 996R)	R\$ 38,44
8 pilhas AA	R\$ 46,90
Transmissor e receptor via rádio frequência (TX4 2.4 GHz)	R\$ 113,53
2 baterias LiPo com carregador	R\$ 150,75
Hastes de suporte de alumínio p/ cascos	R\$ 10,00
Suporte do motor (flange cano)	R\$ 16,92
Espuma expansiva PU uso geral 230g	R\$ 44,00
Resina poliéster 0,5 kg	R\$ 25,50
Aguarrás e pincel	R\$ 32,00
Parafusos inox e borboletas	R\$ 45,00
2 pares de conectores tipo T-Dean e 4 metros de cabos	R\$ 42,00
Tubo termoretrátil e fusível 3 A	R\$ 10,30
Suporte bastão para aparelho celular com controle <i>Bluetooth</i> LT2009	R\$ 23,50
Casco em fibra de vidro	-

Table 6 - Custos construção protótipo USV continuação

Item	Valor
6 conectores Wago e 8 parafusos com porca e arruela (fixar caixas)	R\$ 34,22
Caixa de ferramentas em plástico	R\$ 6,90
Ferro de solda c/ pasta de solda e estanho	R\$ 46,99
Bandeira do Brasil	R\$ 6,99
2 latas de tinta <i>spray</i>	R\$ 36,80
Total	R\$ 886,28
Energia solar	
2 placas solares 5 W 12 V Painéis Epóxi	R\$ 75,43
PWM (Knup AD10A)	R\$ 44,06
Total	R\$ 119,49
Batimetria	
Arduíno Uno r3	R\$ 44,00
Módulo SD <i>Card</i>	R\$ 21,00
Sensor ultrassônico JSN-SR04T 2.0	R\$ 44,00
Sensor ultrassônico DYP-A02YY	R\$ 75,00
Módulo GPS Ublox NEO-6M	R\$ 43,00
Sensor IC MPU-6050	R\$ 30,00
Conectores e <i>protoboard</i>	R\$ 31,60
Módulo GPS Ublox NEO-6M	R\$ 69,00
Display LCD 16x2 (Azul) com Módulo Adaptador I2C	R\$ 28,30
Caixa plástica hermética p/ Arduíno	R\$ 9,99
Cabos conectores macho-macho p/ Arduíno	R\$ 11,00
Pen Drive com leitor e Cartão de Memória 32 GB - MC163	R\$ 30,30
Total	R\$ 437,19
Total Geral	R\$ 1.442,96

Fonte: Autor, 2023

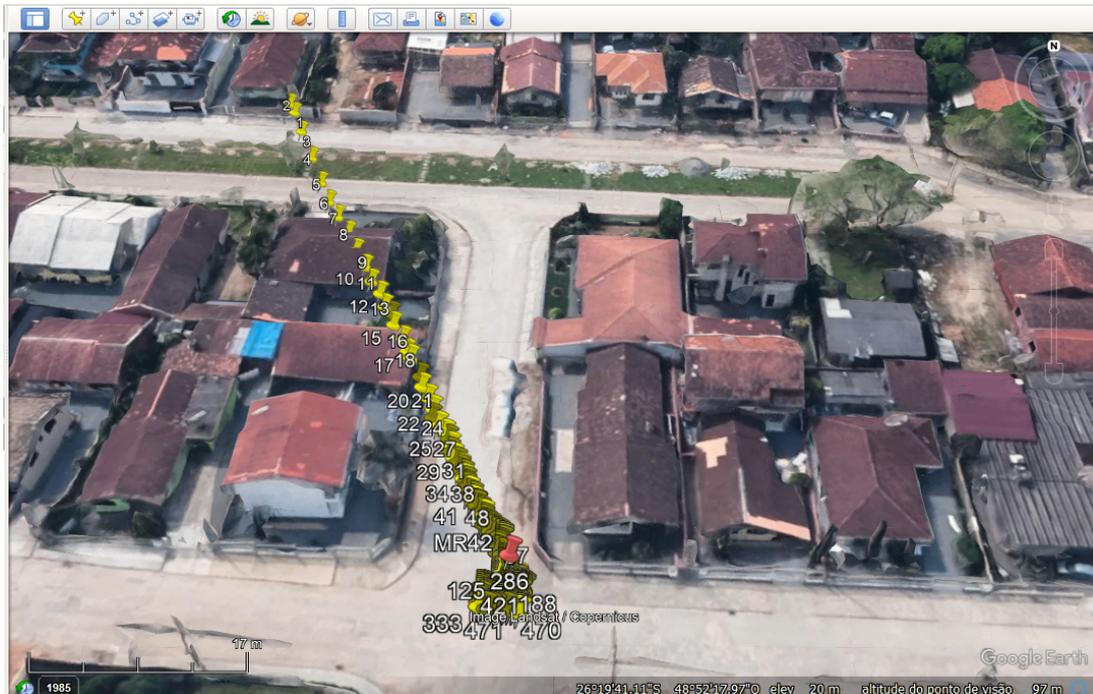
A maior parte dos custos do projeto se encontra na construção em si da embarcação, sendo que o sistema de batimetria é de baixo custo (Arduíno), entretanto componentes com maior confiabilidade, durabilidade e precisão podem inverter este cenário. O valor total do projeto piloto foi de R\$ 1.442,96, valor próximo aos equipamentos portáteis de sonar marítimos com GPS mais simples e acessíveis encontrados comercialmente.

#### 4.2 ESTIMATIVA DA INCERTEZA DO SENSOR GPS

Seguindo o método da seção 3.7.1, após as medições no dia 24 de junho de 2023 (sol com poucas nuvens), calculou-se o desvio padrão e a média dos pontos capturados *in loco*. Verificou-se que em locais com cobertura, como o exemplo do

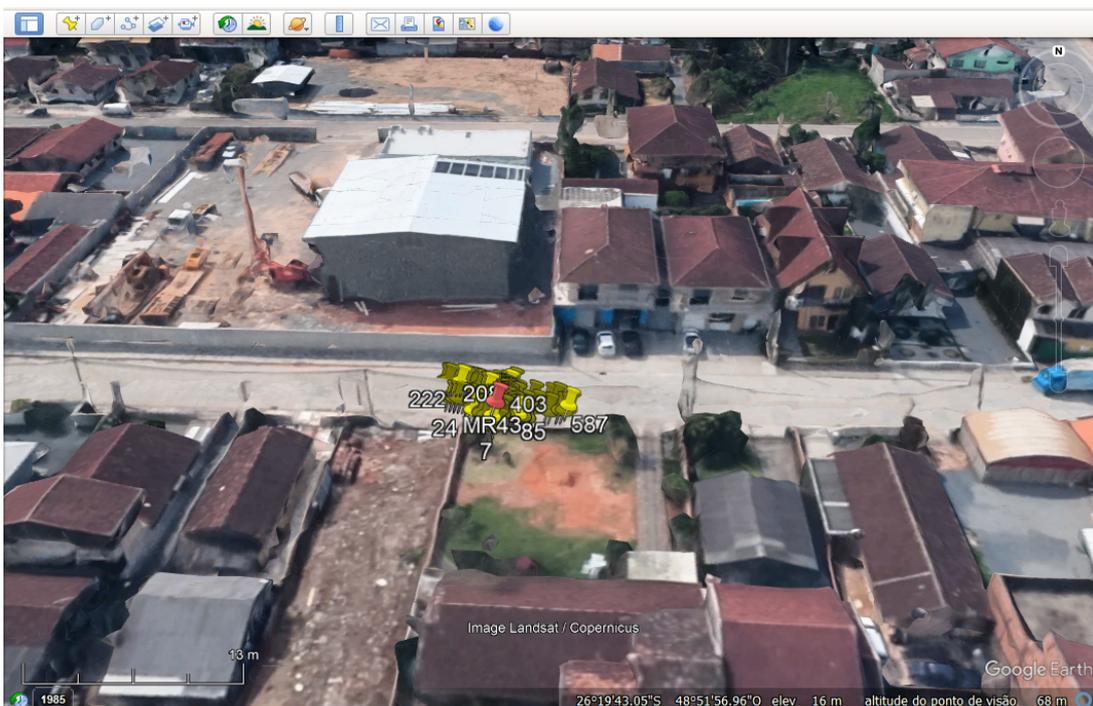
marco zero de Joinville, o sinal do módulo GPS fica muito instável e sua medição é precária, não sendo indicado para utilização (o mesmo foi desconsiderado após isto). Os outros dois marcos foram satisfatórios para a medição, um deles ao iniciar a sincronização teve uma incerteza maior que se estabilizou após um minuto.

Figura 44 – Dados coletados marco Geodésico MR42 de Joinville



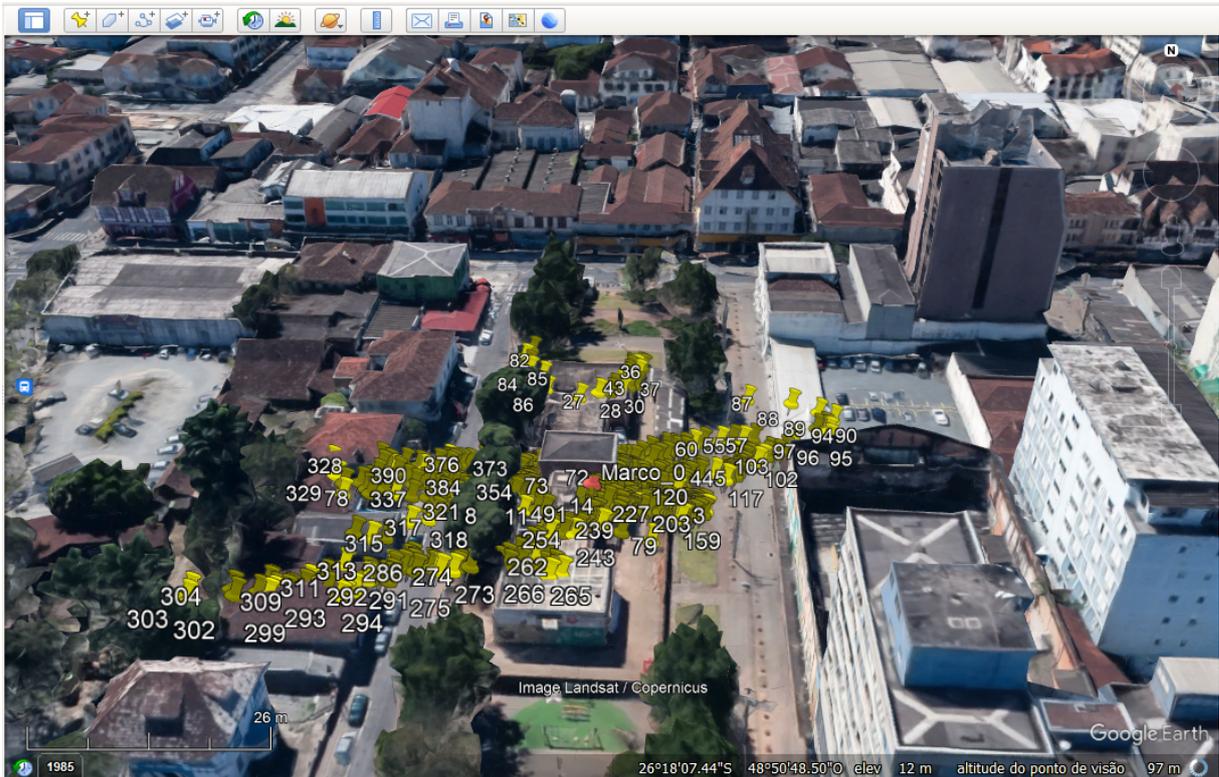
Fonte: Adaptado Google Earth, 2023

Figura 45 – Dados coletados marco Geodésico MR43 de Joinville



Fonte: Adaptado Google Earth, 2023

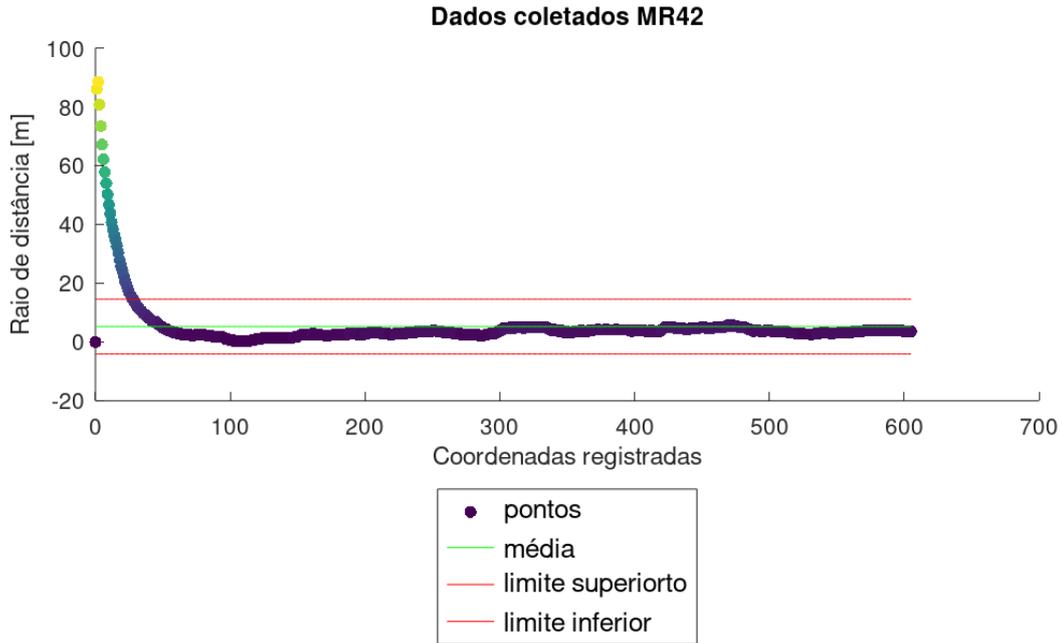
Figura 46 – Dados coletados marco Geodésico zero de Joinville



Fonte: Adaptado Google Earth, 2023

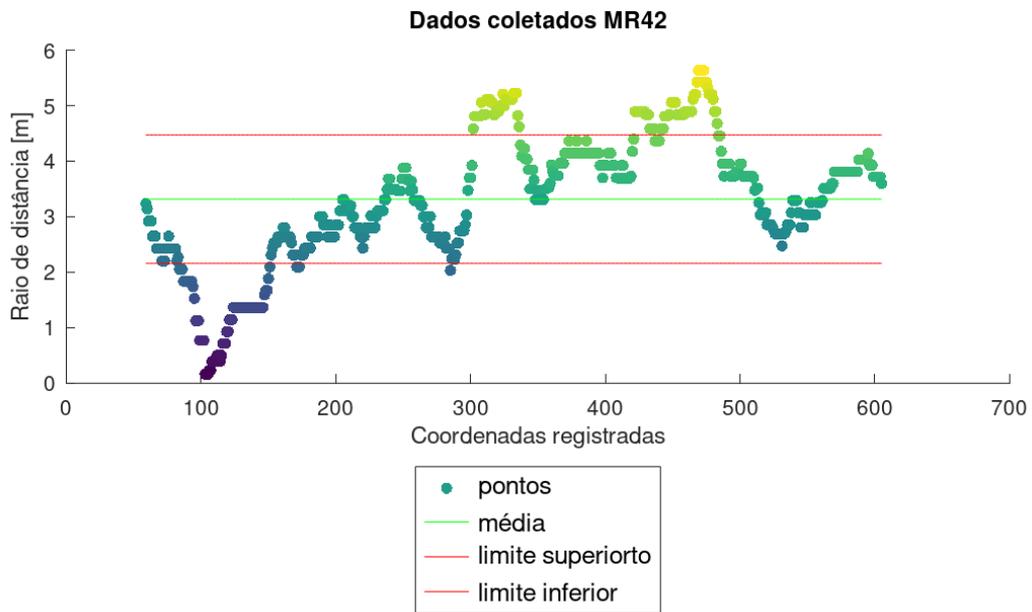
Para a coleta do MR42, calculando a distância relativa para cada medição, obteve-se uma média de 5,25 metros de raio de distância do ponto, com desvio padrão de 9,33 metros (Gráfico 6), mas caso retire-se os 60 primeiros registros devido a sincronização dos satélites, chegamos a uma média de 3,32 metros de raio de distância do ponto, com desvio padrão de 1,16 metros, conforme o Gráfico 7, mostrando a dispersão dos cálculos dos pontos, a média e os limites dos desvios padrões. Se calcularmos o raio de distância diretamente pela média das coordenadas geográficas em graus decimais, obtemos o valor de 2,78 metros. A incerteza padrão (Tipo A) considerando uma distribuição normal (nível de confiança de 95%) é de 0,05 metros, e a incerteza expandida é 0,09 metros (fator de abrangência  $k$  igual a 2).

Gráfico 6 – Gráfico de dispersão dos dados coletados MR42



Fonte: Autor, 2023

Gráfico 7 – Gráfico de dispersão dos dados coletados MR42 sem os 60 primeiros registros

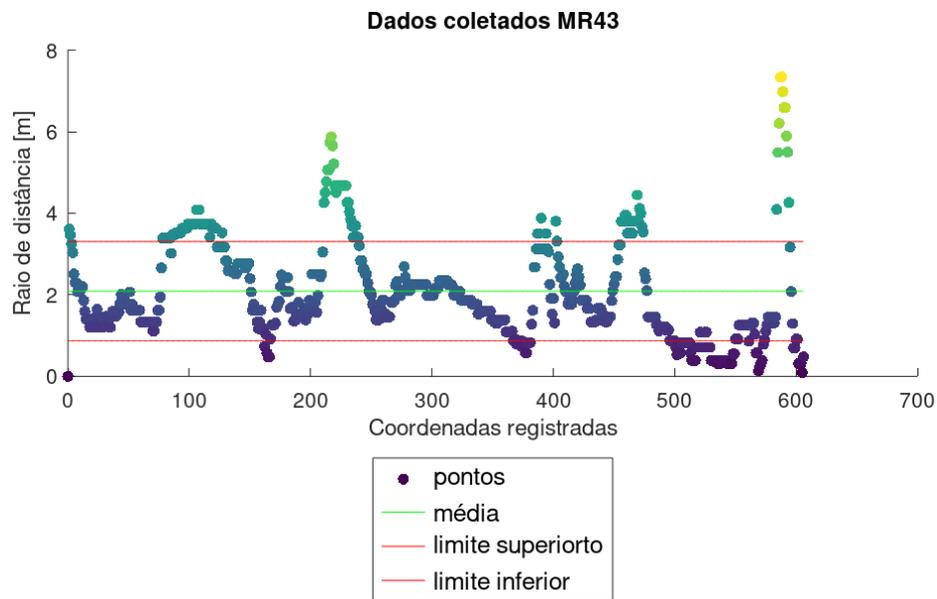


Fonte: Autor, 2023

Para a coleta do MR43, obteve-se uma média de 2,09 metros de raio de distância do ponto, com desvio padrão de 1,21 metros, o Gráfico 8 mostra a dispersão dos pontos, a média e os limites dos desvios padrões. Se calcularmos o raio de distância diretamente pela média das coordenadas geográficas em graus decimais, obtemos o valor de 0,67 metros, muito próximo do ponto de referência. A incerteza padrão (Tipo A) considerando uma distribuição normal (nível de confiança de 95%) é

de 0,05 metros, e a incerteza expandida é 0,10 metros (fator de abrangência k igual a 2).

Gráfico 8 – Gráfico de dispersão dos dados coletados MR43



Fonte: Autor, 2023

O Melhor cenário para a coleta seria se os raios de distância entre os pontos fossem nulos, sempre teremos oscilações em relação a medição e com este tipo de sensor. Pode-se, então, esperar uma distância de raio próxima dos 4,5 metros nos piores casos. Para levantamentos de Ordem 1b esta aceitável, mas para levantamentos de maior refino pode não ser adequado.

#### 4.3 MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE EXPERIMENTOS EM TANQUE HIDROSTÁTICO

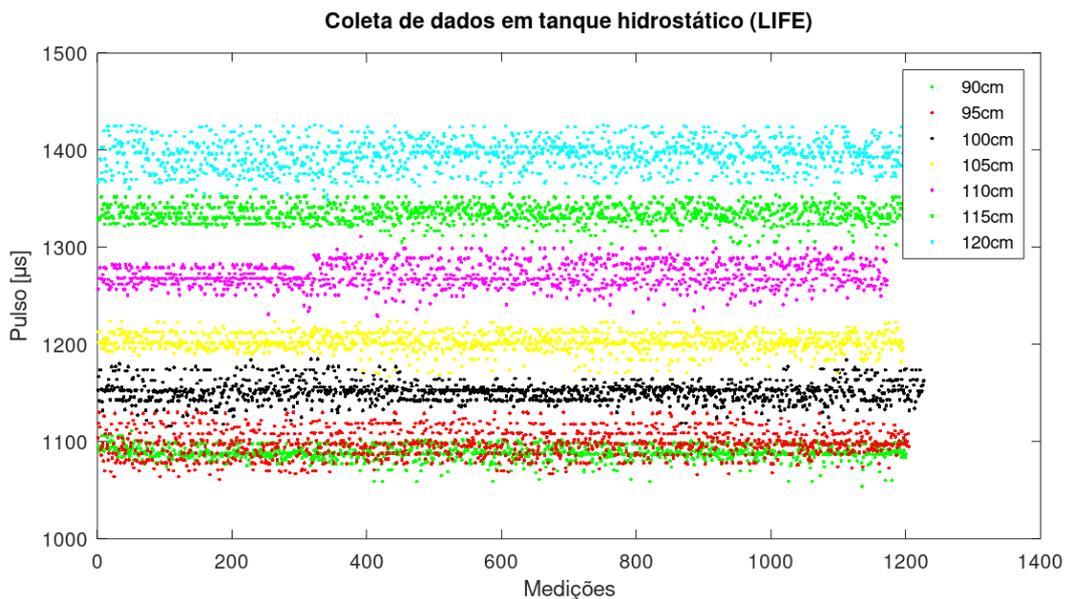
Os resultados do experimento da secção 3.7.2 estão no Gráfico 9, executados no dia 8 e 9 de novembro de 2023. Percebe-se que a flutuação é uniformemente distribuída entre leituras dos pulsos sonoros, e o desvio padrão das amostras nos experimentos ficam próximas de 1% em relação a média. A Tabela 7 contém os cálculos estatísticos para as amostras dos pulsos ( $\mu s$ ) coletadas nos experimentos, existem diversos parâmetros estatístico apresentados, que em sua maioria não foram utilizados neste trabalho, mas foram apresentados para futuras pesquisas e aplicações.

Tabela 7 – Dados da coleta de pulsos ( $\mu s$ ) e sua estatística descritiva dos experimentos (90 a 120 cm)

Estatística descritiva	Níveis de lâmina d'água						
	90	95	100	105	110	115	120
Parâmetros							
Média	1089,1	1099,3	1151,7	1203,2	1271,3	1334,3	1395,1
Incerteza padrão	0,221	0,418	0,301	0,281	0,363	0,271	0,461
Mediana	1088	1098	1153	1202	1268	1334	1397
Moda	1088	1098	1153	1202	1268	1330	1397
Desvio padrão	7,66	14,51	10,55	9,73	12,43	9,55	16,05
Variância da amostra	58,7	210,6	111,3	94,7	154,5	91,1	257,6
Mínimo	1054,0	1061,0	1115,0	1167,0	1229,0	1302,0	1349,0
Máximo	1111,0	1130,0	1185,0	1224,0	1311,0	1355,0	1426,0
Contagem	1201	1205	1228	1197	1173	1244	1213
Nível de confiança (95%)	0,434	0,820	0,591	0,552	0,712	0,531	0,904

Fonte: Autor, 2023

Gráfico 9 – Dados coletados no tanque de prova com 90 a 120 cm de linha d'água



Fonte: Autor, 2023

Ao efetuar o cálculo puro da distância (desconsiderando efeitos dinâmicos e de fundo) através do pulso e velocidade do som referente a temperatura, somando o *draft* de  $(6 \pm 0,05)$  cm, chegamos a uma diferença percentual relativa de 8 a 9,72% inferior ao esperado, verificando uma tendência crescente da discrepância (Figura 47). Na Figura 47 e nas Figuras semelhantes a ela, as colunas de “Profundidade aferida” e “Profundidade calculada” são as médias dos resultados, e a coluna “Recálculo” é a soma da “Função calibrada” com a “Profundidade calculada”.

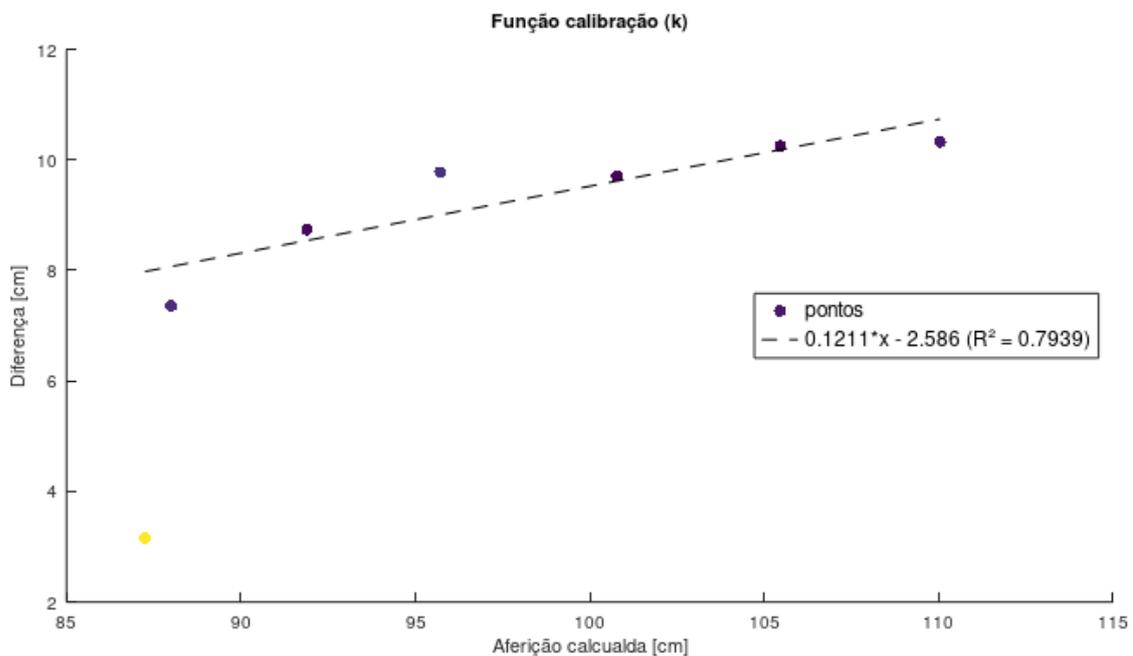
Figura 47 – Dados consolidados do experimento no tanque de prova e função calibração  $k$

Profundidades Referência [cm]	Temperatura da água (°C)	Velocidade do som na água [cm/μs]	Profundidade aferida [cm]	pulso médio [μs]	desvio pulso [μs]	Profundidade calculada [cm]	Desvio calculado [cm]	Diferença [cm]	Função calibração [cm]	Recálculo [cm]	Diferença Relativa [%]
90	23,7	0,14921	90,40	1089,10	7,66	87,25	0,57	3,15	7,98	95,23	5,35%
95	23,6	0,14918	95,36	1099,33	14,51	88,00	1,08	7,36	8,07	96,07	0,75%
100	23,5	0,14915	100,62	1151,67	10,55	91,89	0,79	8,74	8,54	100,43	0,19%
105	23,4	0,14912	105,49	1203,18	9,73	95,71	0,73	9,78	9,00	104,71	0,74%
110	23,3	0,14909	110,48	1271,29	12,43	100,77	0,93	9,71	9,62	110,39	0,08%
115	23,3	0,14909	115,71	1334,27	9,55	105,46	0,72	10,25	10,19	115,65	0,05%
120	23,5	0,14915	120,38	1395,15	16,05	110,04	1,20	10,33	10,74	120,78	0,34%

Fonte: Autor, 2023

Com isto, gerou-se uma linha de tendência linear (Gráfico 10) para a correção da divergência, sendo necessária a validação em uma extrapolação de maior profundidade (função de calibração do equipamento  $k$ ). A medição da profundidade na referência de 90 cm foi retirada da aproximação devida a sua inconsistência de leitura por estar no limite da distância de bloqueio do sensor (Gráfico 9). Os resultados obtidos com a calibração se encontram na Figura 47, na coluna “Recálculo”, e a diferença relativa entre a medição aferida está na ultima coluna, estando abaixo de 1%.

Gráfico 10 – Diferenças entre aferição e coleta de dados e sua função calibração  $k$

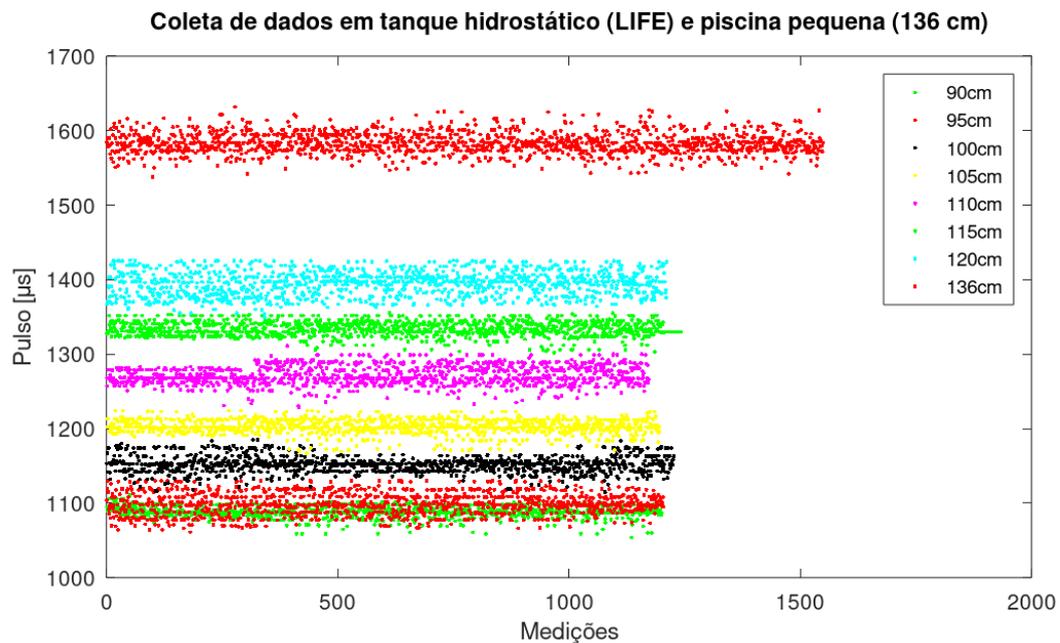


Fonte: Autor, 2023

#### 4.4 MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE EM PISCINA PEQUENA PARA EXTRAPOLAÇÃO DA FUNÇÃO $k$

Os resultados do experimento da secção 3.7.3 estão no Gráfico 11, executados no dia 14 de novembro de 2023. Percebe-se que a flutuação dos pulsos sonoros é uniformemente distribuída, e o desvio padrão das amostras está próxima de 1% em relação a média. A Tabela 8 contém os cálculos estatísticos para as amostras coletadas dos pulsos sonoros ( $\mu s$ ) nos experimentos.

Gráfico 11 – Dados consolidados do experimento no tanque de prova e piscina pequena



Fonte: Autor, 2023

Tabela 8 – Dados da estatística descritiva do experimento dos pulsos sonoros ( $\mu s$ ) (136 cm)

Estatística descritiva	Níveis de lâmina d'água
Parâmetros	136
Média	1584,2
Incerteza padrão	1,228
Mediana	1581
Moda	1584
Desvio padrão	48,50
Variância da amostra	2352,7
Mínimo	1538
Máximo	3390
Contagem	1559
Nível de confiança(95%)	2,409

Fonte: Autor, 2023

Tendo os dados coletados da extrapolação para 136 cm (piscina pequena), gerou-se uma nova linha de tendência linear (Gráfico 12) para a correção da divergência, sendo mais aderente e confirmando a tendência anterior (função de calibração do equipamento  $k$ ). Os resultados obtidos com a calibração se encontram na Figura 47, na coluna “Recálculo”, e a diferença relativa entre a medição aferida está na ultima coluna, abaixo de 1%.

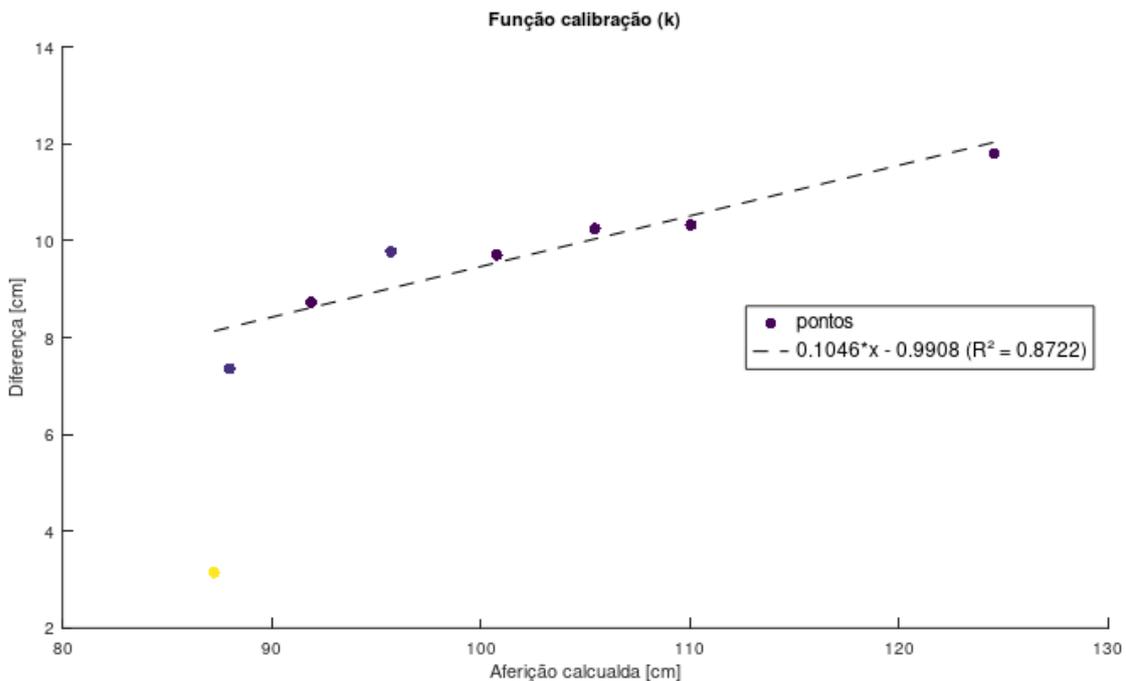
Figura 48 – Dados para função calibração  $k$  considerando medições na piscina pequena

Profundidades Referência [cm]	Temperatura da água (°C)	Velocidade do som na água [cm/μs]	Profundidade aferida [cm]	pulso médio [μs]	desvio pulso [μs]	Profundidade calculada [cm]	Desvio calculado [cm]	Diferença [cm]	Função calibração [cm]	Recálculo [cm]	Diferença Relativa [%]
90	23,7	0,14921	90,40	1089,10	7,66	87,25	0,57	3,15	8,14	95,39	5,52%
95	23,6	0,14918	95,36	1099,33	14,51	88,00	1,08	7,36	8,21	96,21	0,90%
100	23,5	0,14915	100,62	1151,67	10,55	91,89	0,79	8,74	8,62	100,51	0,12%
105	23,4	0,14912	105,49	1203,18	9,73	95,71	0,73	9,78	9,02	104,73	0,72%
110	23,3	0,14909	110,48	1271,29	12,43	100,77	0,93	9,71	9,55	110,32	0,14%
115	23,3	0,14909	115,71	1334,27	9,55	105,46	0,72	10,25	10,04	115,50	0,18%
120	23,5	0,14915	120,38	1395,15	16,05	110,04	1,20	10,33	10,52	120,56	0,15%
136	25,2	0,14966	136,36	1584,25	48,51	124,55	1,01	11,81	12,04	136,58	0,17%

Fonte: Autor, 2023

Pode-se observar que no Gráfico 12 obteve-se uma função de ajuste  $k$  com maior aderência, e confirmou-se a tendência de afastamento conforme o aumento da profundidade.

Gráfico 12 – Diferenças entre aferição e coleta de dados e sua função calibração  $k$



Fonte: Autor, 2023

Utilizando a Equação 3, considerando um levantamento de Ordem 1b e uma

profundidade média de 2 metros, obtemos o  $IVT_{max}$  de 50,27 cm. Quanto maior a profundidade, maior será o  $IVT_{max}$ , ou seja, maior a tolerância. Para calcular a  $IVT_{est}$  utilizou-se a Equação 4, onde se considerou as incertezas padrões de  $\sigma_{zv}^2$ ,  $\sigma_{zt}^2$ ,  $\sigma_i^2$  e  $\sigma_R^2$ .

Sendo  $\sigma_{zv}^2$  calculado através da incerteza padrão do termômetro digital de 0,041 °C (Tipo A), utilizando a Equação 1 verificou-se que esta incerteza padrão resultava em  $\pm 0,007$  cm para todas as medições. Para  $\sigma_{zt}^2$ , calculou-se as distribuições dos pulsos sonoros para cada experimento, considerando a incerteza padrão segundo uma distribuição normal, utilizando a Equação 1 para definir o impacto no cálculo em cm (Tipo B). Para o  $\sigma_i^2$  se considerou a incerteza padrão da medição da posição submersa do sensor (*draft*) de 0,058 cm, mensurado com trena metálica (Tipo A). Para o  $\sigma_R^2$  considerou a função ajuste  $k$ , conforme sua distribuição de correção (Tipo B). Todas incertezas padrões foram ajustadas conforme a fórmula  $(1,96\sigma)^2$  como descrito no item 2.4. Os dados para cálculo das incertezas padrões e expandidas estão na Figura 49 a seguir:

Figura 49 – Dados que compõem a incerteza padrão e total de cada componente

Prof. Referencia [cm]	u(H2O) [cm]	u(pulso) [cm]	u(k) [cm]	u(D) [cm]	u(total) [cm]	U(total) [cm]	Prof. Reduzida [cm]	u(med. referencia) [cm]	U(med. referencia) [cm]	Prof. aferida [cm]
90	0,0137	0,0314	0,0034	0,1137	0,1188	0,2375	95,41 ± 0,24	0,0898	0,1795	90,40 ± 0,18
95	0,0137	0,0612	0,0064	0,1137	0,1300	0,2599	96,23 ± 0,26	0,1015	0,2031	95,36 ± 0,20
100	0,0137	0,0431	0,0046	0,1137	0,1224	0,2449	100,52 ± 0,24	0,1746	0,3492	100,62 ± 0,35
105	0,0137	0,0412	0,0158	0,1137	0,1227	0,2454	104,66 ± 0,25	0,1207	0,2414	105,49 ± 0,24
110	0,0137	0,0529	0,0055	0,1137	0,1263	0,2525	110,33 ± 0,25	0,1051	0,2102	110,48 ± 0,21
115	0,0137	0,0392	0,0043	0,1137	0,1211	0,2422	115,51 ± 0,24	0,1184	0,2367	115,71 ± 0,24
120	0,0137	0,0666	0,0070	0,1137	0,1327	0,2653	120,56 ± 0,27	0,1222	0,2444	120,38 ± 0,24
136	0,0137	0,1803	0,0187	0,1137	0,2144	0,4288	136,57 ± 0,43	0,2609	0,5219	136,36 ± 0,52

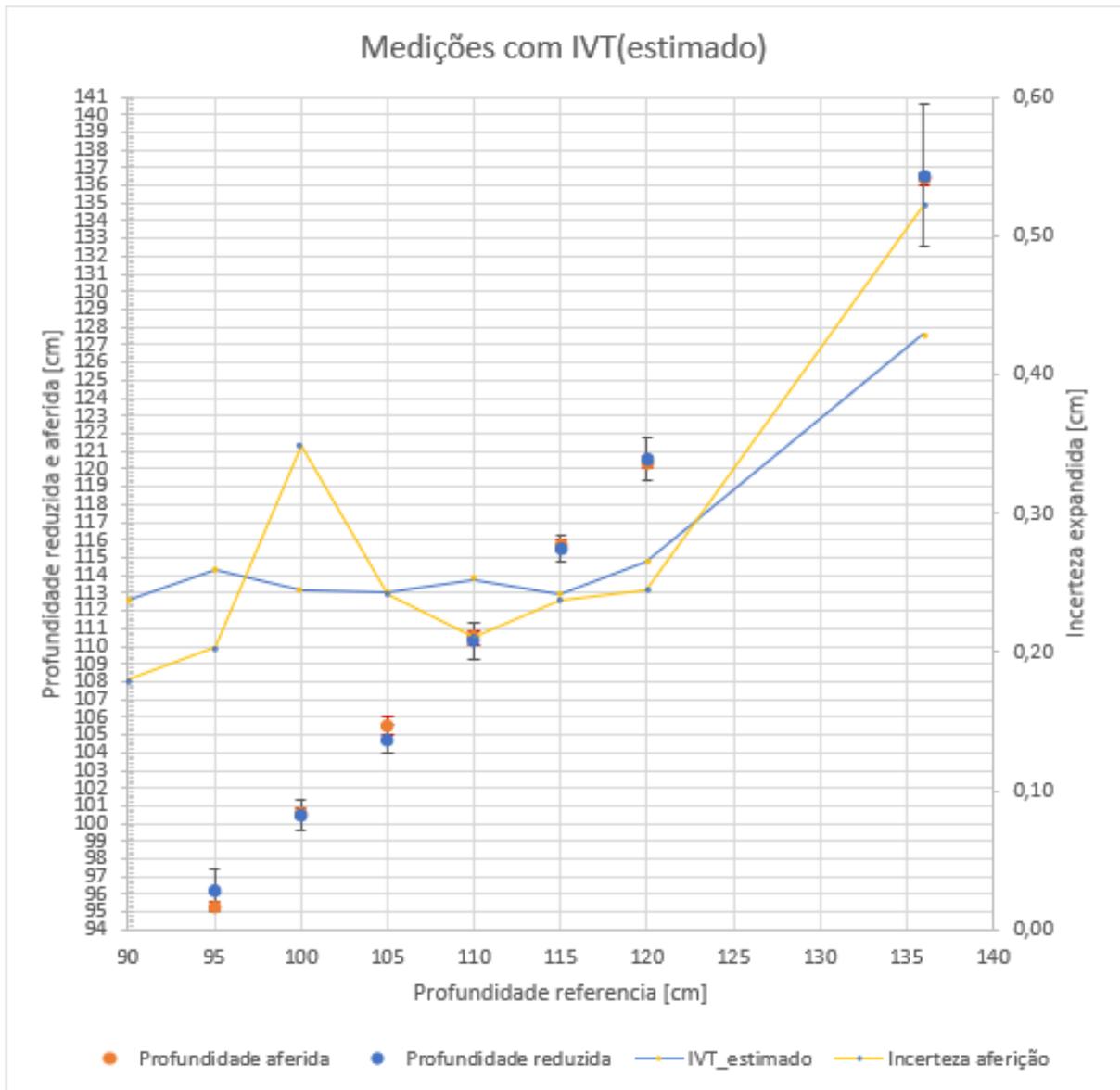
Fonte: Autor, 2023

O Gráfico 13 apresenta os pontos das profundidades aferidas e reduzidas, com as suas respectivas barras de incertezas totais (foram considerados os valores dos desvios padrões devido as incertezas terem grandezas muito menores, não aparecendo no gráfico). As linhas azul e amarela descrevem as incertezas totais, com suas grandezas no eixo secundário da direita. O desvio padrão mais elevado nas aferições foi de 0,78 cm e na profundidade reduzida foi de 4,01 cm, ambos na medição da piscina menor.

Os pontos se aproximam dos valores esperados, mas necessitaram a utilização de função de correção. A incerteza total do ponto de referência 136 cm obteve a maior magnitude, tanto da aferição quanto da profundidade reduzida, por ser executado na piscina menor, sendo um ambiente com fundo menos uniforme e com maior interferência do meio ambiente do que os experimentos em tanque, além de ter maior profundidade. A  $IVT_{est}$  tende a aumentar conforme a profundidade se eleva, assim

como o relatado.

Gráfico 13 – Resultado da profundidade reduzida e calculada e suas incertezas totais



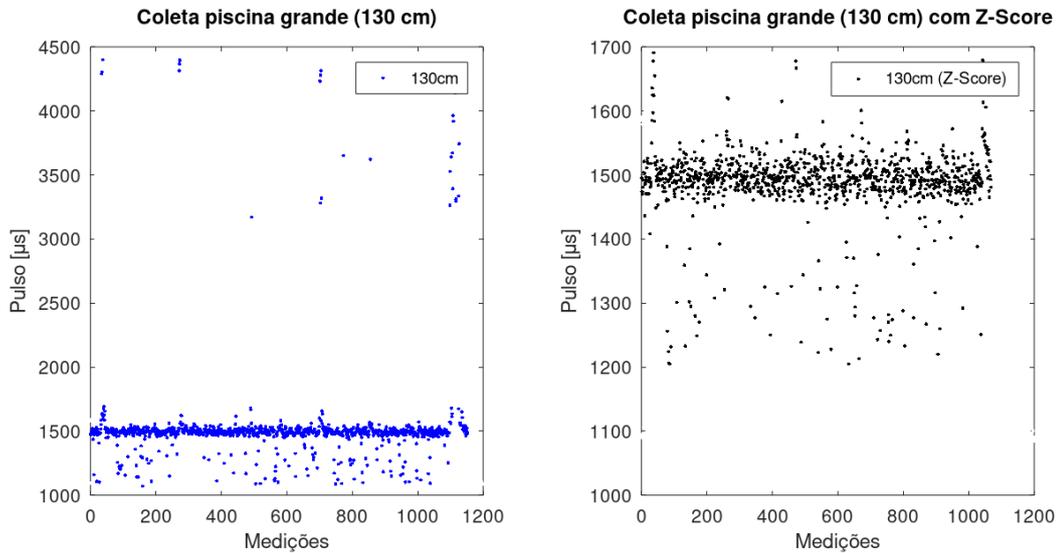
Fonte: Autor, 2023

#### 4.5 AFERIÇÃO DE PROFUNDIDADE EM PISCINA GRANDE PARA VERIFICAR IMPACTO DA VELOCIDADE DO PROTÓTIPO NA ACURÁCIA DA MEDIÇÃO

Os resultados do experimento da secção 3.7.4 estão no Gráfico 14 (lado esquerdo), executados no dia 15 de novembro de 2023. Percebe-se que a flutuação obteve maior perturbação na distribuição dos pulsos sonoros, e o desvio padrão das amostra ficou mais elevado. Pode-se adquirir estas discrepâncias (*outliers*), denominadas como profundidades anômalas (*spikes*), devido as bordas da piscina e escadas, onde o protótipo USV transitou durante os testes, e como o ângulo de abertura

do feixe sonoro do sensor está entorno de 50 graus, a leitura foi equivocada. Também cabe ressaltar os efeitos dinâmicos de correnteza e movimento da embarcação. Para retirada de leituras equivocadas, utilizou-se a metodologia *Z-Score* com limites de superior de 3 e inferior de -3 (Gráfico 14, lado direito).

Gráfico 14 – Dados consolidados do experimento em piscina grande



Fonte: Autor, 2023

A Tabela 9 contém os cálculos estatísticos para as amostras coletadas dos pulsos sonoros ( $\mu s$ ) nos experimentos.

Tabela 9 – Dados da estatística descritiva dos pulsos sonoros ( $\mu s$ ) em 130 cm

Estatística descritiva	Níveis de lâmina d'água	
	130	130 (Z-Score)
Parâmetros		
Média	1566,4	1474,0
Incerteza padrão	14,2	2,6
Mediana	1494	1493
Moda	1491	1491
Desvio padrão	483,35	89,96
Variância da amostra	233636,4	8092,9
Mínimo	1070	1070
Máximo	4399	1691
Contagem	1154	1111
Nível de confiança(95%)	27,917	5,295

Fonte: Autor, 2023.

Figura 50 – Dados das medições em piscina grande

Profundidades Referencia [cm]	Temperatura da agua (°C)	Velocidade do som na água [cm/μs]	Profundidade aferida [cm]	Profundidade calculada [cm]	Desvio calculado [cm]	Diferença [cm]	Função calibração [cm]	Recalculo [cm]	Diferença Relativa [%]
130	25,1	0,14963	129,35	116,28	6,73	13,07	11,17	127,45	1,47%

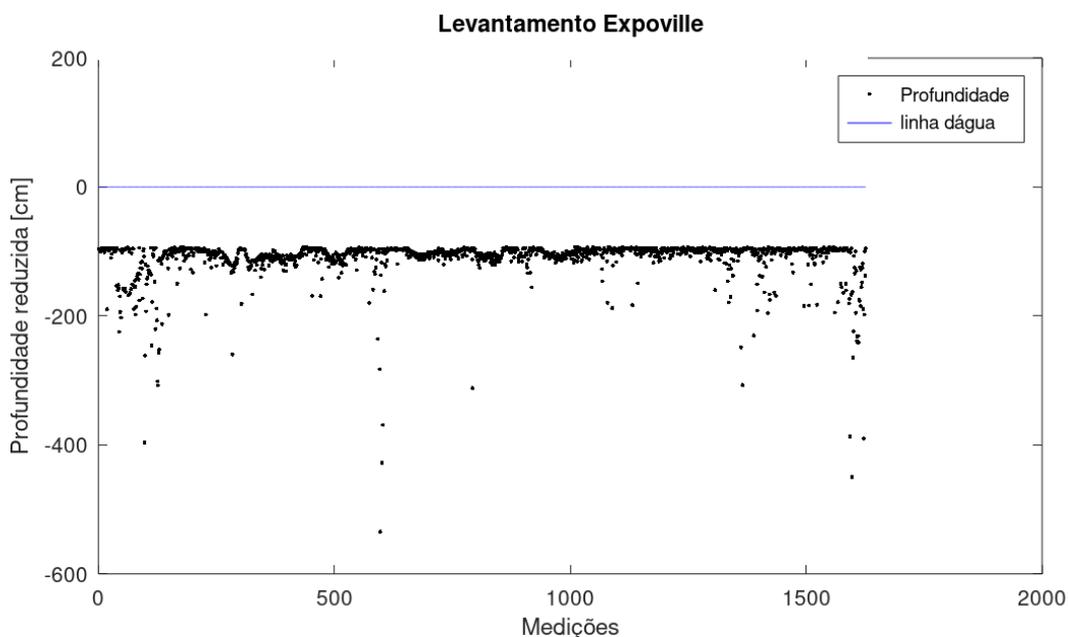
Fonte: Autor, 2023

Observando os resultados da Figura 50 percebe-se que o desvio ficou mais elevado comparado aos outros experimentos controlados (quase três vezes o valor do maior resultado), ficando evidente o cuidado no momento de tratar os dados coletados, *outliers* e falhas na leituras vão ocorrer devido a efeitos dinâmicos e falhas no sensor sonoro. O  $IVT_{est}$  para os dados brutos coletados é de 0,4147 cm (seguindo os cálculos da secção 4.4).

#### 4.6 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO EM CAMPO (EXPOVILLE)

Os resultados do experimento da secção 3.7.5 estão no Gráfico 15, executados no dia 15 de novembro de 2023, no período vespertino. Percebe-se que existem leituras discrepantes (*outliers*) devido a alguma anomalia de medição. Cabe ressaltar os efeitos dinâmicos e movimento da embarcação que podem gerar discrepâncias na aferição, assim como tipo do solo.

Gráfico 15 – Leitura de profundidade reduzida Expoville

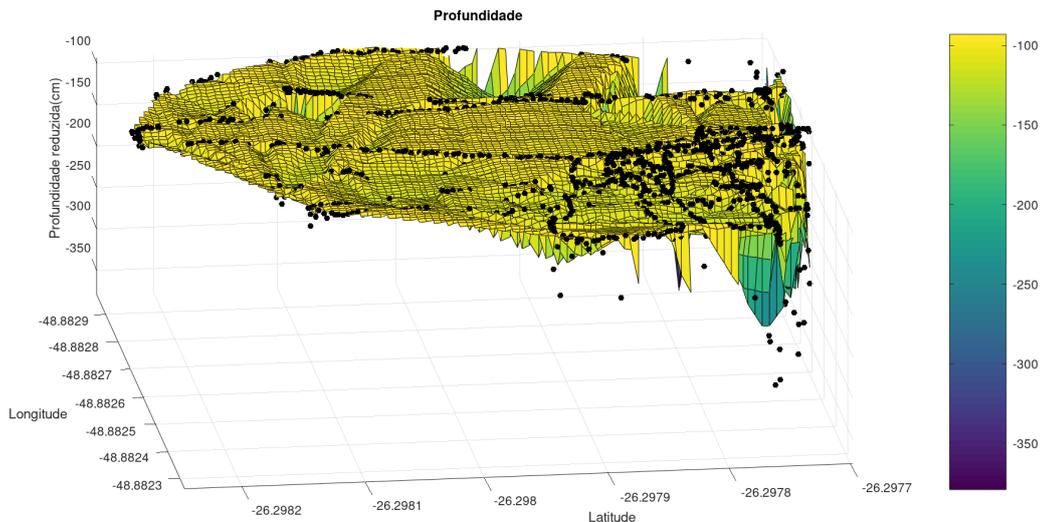


Fonte: Autor, 2023

A temperatura no lago estava em 23,9 °C, o levantamento durou cerca de uma hora. Pode-se observar que a profundidade permeia o limite do sensor (o que não era

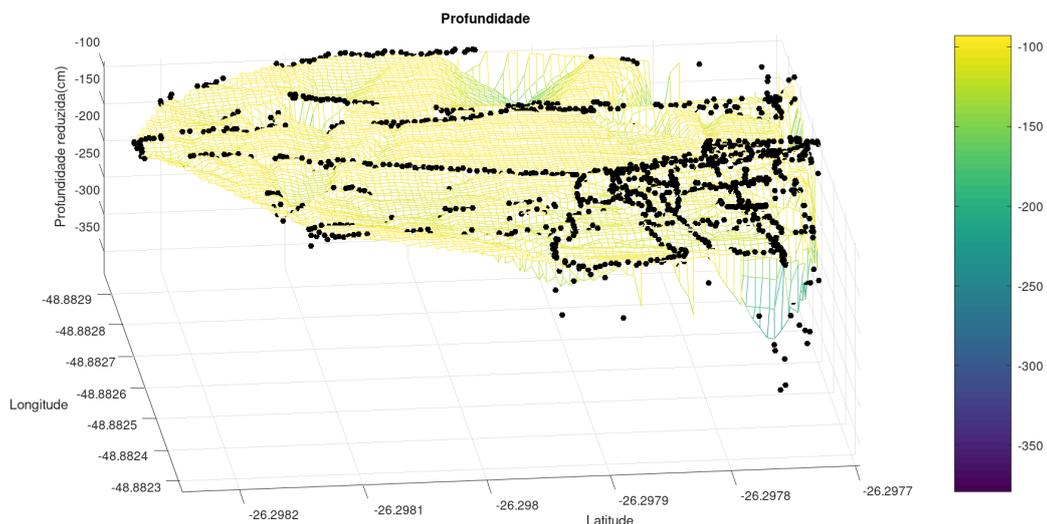
de conhecimento antes do experimento), mas na média está acima do limite (cerca de 109,93 cm com desvio de 32,49 cm), o fundo é plano, pouco acidentado, o que pode ser explicado por ser um lago sem correnteza. O Gráfico 16 utiliza o código em Octave para interpolar os dados batimétricos e gerar a superfície em três dimensões com o método “surf” e o Gráfico 17 utiliza o método “mesh”. O  $IVT_{est}$  para os dados brutos coletados é de 1,4430 cm (segundo os cálculos da secção 4.4).

Gráfico 16 – Interpolação com código Octave profundidade reduzida Expoville (*surf*)



Fonte: Autor, 2023

Gráfico 17 – Interpolação com código Octave profundidade reduzida Expoville (*mesh*)

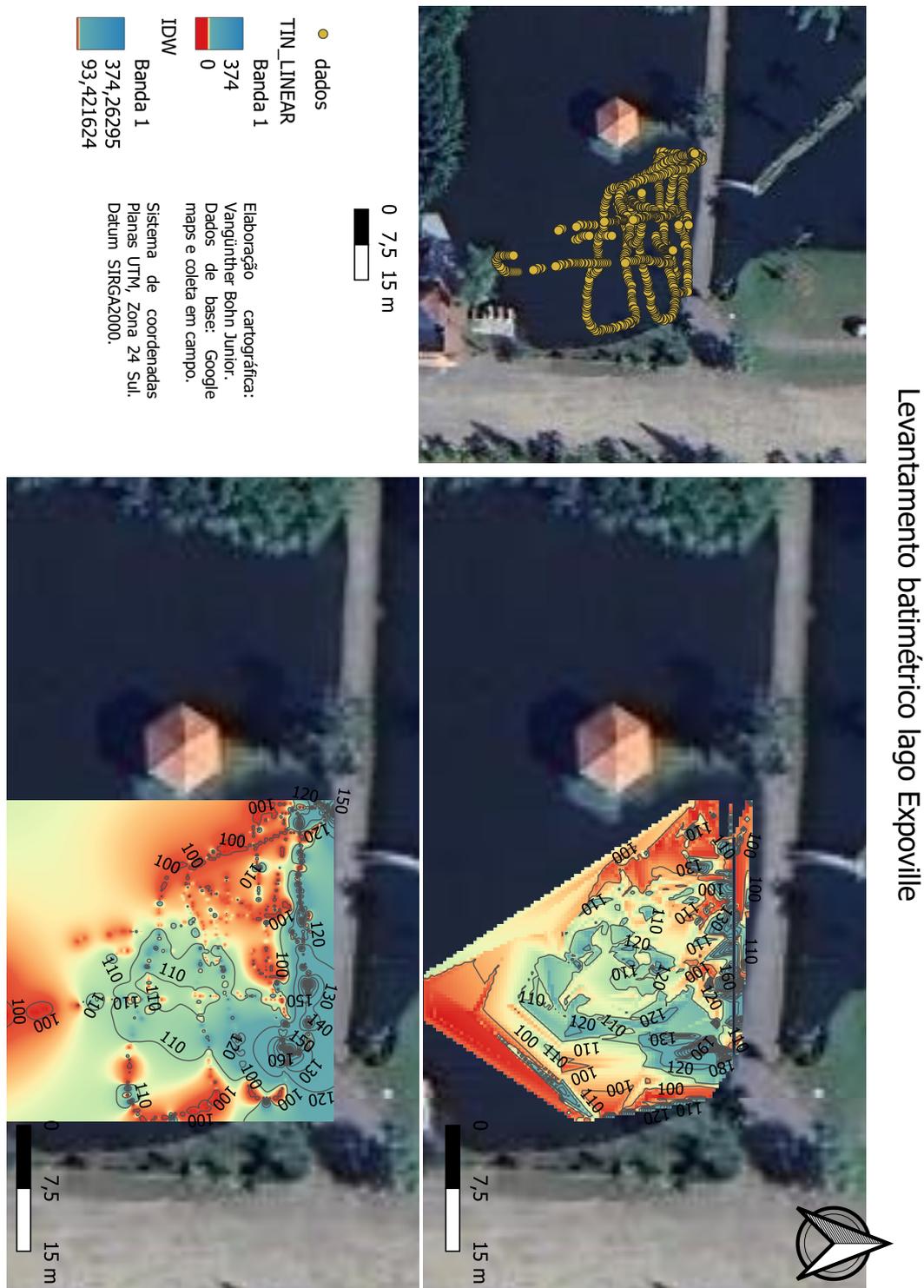


Fonte: Autor, 2023

Não foi possível utilizar os métodos TIN e IDW para gerar a superfície de fundo com o *software* Qgis com toda a amostra, possivelmente por não existir linha de verificação em algumas áreas, então se reduziu a área amostral (secção com linhas de verificação), conforme é ilustrado na Figura 51. Após executar a interpolação foi gerado

as curvas de nível, e fica claro que os resultados são distintos entre os métodos de representação mesmo tendo valores semelhantes.

Figura 51 – Mapa com interpolações por TIN e IDW da profundidade reduzida Expoville



Fonte: Autor, 2023

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

A mensuração de profundidade é complexa, pois depende de diversos fatores físicos para que uma embarcação realize o levantamento hidrográfico, e interferências sempre estão presentes, sendo difícil fixar pontos de referência. O projeto do USV atingiu os objetivos propostos pelo autor, mas melhorias existem, tanto do ponto de vista construtivo, quanto da parte analítica no tratamento dos dados. O sensor ultrassônico DYP-A02YY não funciona submerso na água, caso funcionasse poderia agregar na leitura e diminuir a distância de bloqueio (de 95 cm para 15 cm). O sensor ultrassônico JSN-SR04T 2.0 funciona perfeitamente submerso na água, mas necessita de calibração, embora seja o sensor mais barato encontrado, seu custo benefício é interessante. É necessário extrapolar as medições deste trabalho para locais de maior profundidade, visto que em teoria o sensor tem alcance de até 20 metros.

O casco catamarã nestas condições atende ao projeto, com ótima estabilidade e manobrabilidade, mas está em seu limite de capacidade de carga. Para projetos futuros, em que o objetivo contemple transportar maior peso, isto deve ser considerado. O conjunto mecânico se mostrou confiável, e em todos os testes não apresentou problemas assim como o sistema eletrônico. A interferência magnética entretanto afeta alguns componentes do Arduíno, sensores sensíveis como o módulo GPS podem travar, e isto ocorreu em algumas leituras. Para minimizar interferências foram realizados ajustes na programação para reiniciar o processamento do Arduíno, aplicação de isolações em manta aluminizada, além do posicionamento do sensor em uma maior distância dos cabos do sistema motriz. A autonomia do protótipo USV, ficou em torno de 2:30 a 3:30 horas, dependendo do uso do motor e da energia solar incidida nas placas solares, utilizando as duas baterias.

Este projeto cria uma alternativa para medições em águas abrigadas, mas a acurácia dos sensores e do sistema Arduíno é limitada, como ponto de melhoria futura, deve-se usar controladores mais robustos e analisar outras possibilidades de sensores, entretanto, isto pode encarecer o projeto. No tratamento dos dados recomenda-se utilizar algum *software* comercial ou metodologia, sendo outro ponto relevante a importância das linhas de verificação, para geração adequada do leito submerso.

## 5.2 PERSPECTIVAS E DESDOBRAMENTOS FUTUROS

Para projetos futuros, é interessante utilizar mais sensores ultrassônicos para formar uma leitura multifeixe, e varrer uma área maior, podendo assim entrar em classes de maior refino batimétrico. Acoplar sensor de temperatura na embarcação substituiria a leitura manualmente. A telemetria, uma interface em tempo real, inserção de piloto automático para execução de missões, seriam outros tipos de melhorias a serem consideradas.

Uma perspectiva futura é a adaptação do sistema Arduíno aqui aplicado para o casco em escala real do catamarã da equipe Babitonga. Com isto reduziria alguns efeitos indesejados que afetam a embarcação em escala reduzida pelas suas dimensões, podendo assim, executar aferições em laminas d'água com ondulações. Para isto seria interessante a aplicação de experimentos que avaliem o impacto dos movimentos dinâmicos nas coletas de dados pelo conjunto Arduíno aqui apresentado.

## REFERÊNCIAS

ALFACORP. **Medidor ultrassônico de nível – Como funciona e como aplicar**. 2023. <https://alfacomp.net/2021/01/01/medidor-ultrassonico-de-nivel/>.

ALVES, Sergio da C. **INVESTIGAÇÃO DA VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA MEDIANTE O EMPREGO DE DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE AS LINHAS REGULARES DE SONDAÇÃO**. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

BEDIN, Ricardo. **Ensaio simplificado de resistência ao avanço do modelo em escala reduzida do catamarã da equipe Babitonga**. 111 f. Monografia (Monografia) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

BRASIL. Orientações para atualização das curvas cota x área x volume. **Agência Nacional de Águas (ANA)**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, Brasília: ANA, SGH, 2013. Disponível em: <[https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas\\_Cota\\_Area\\_Volume\\_Versao\\_Dez2013.pdf](https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas_Cota_Area_Volume_Versao_Dez2013.pdf)>. Acesso em: 19 fev. 2022.

BRASIL. Exportação e importação geral. **Comex Stat** - sistema de estatísticas do comércio exterior, 2022. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 12 fev. 2022.

BRASIL. Setor portuário movimentou 1,2 bilhão de toneladas de cargas em 2021. **Gov.Br**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/antag/pt-br/noticias/2022/setor-portuario-movimentou-1-2-bilhao-de-toneladas-de-cargas-em-2021>>. Acesso em: 13 fev. 2022.

CAMARA, Gilberto; MEDEIROS, José Simeão de. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. [S.l.]: INPE, 1998. 36 p.

CANO, Eric Vieira. **MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA BATIMETRIA ADQUIRIDA POR VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADO**. 51 p. Dissertação (Mestrado) — Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul- Mestrado em Recursos Naturais. Geoprocessamento Aplicado., Campo Grande, MS, 2022.

CHAVEZ, Francisco P. *et al.* Measurements of pco<sub>2</sub> and ph from an autonomous surface vehicle in a coastal upwelling system. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 151, p. 137–146, 2018.

CLARKE, John E. Hughes. A reassessment of vessel coordinate systems: what is it that we are really aligning? In: **Hydrographic Conference. Anais[...]**. [S.l.]: 2003, 2003. v. 18, p. 14742–14747.

CURCIO, Joseph; LEONARD, John; PATRIKALAKIS, Andrew. Scout-a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy. **IEEE. Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE**, 2005. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1639838>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

CURTIN, Thomas B. *et al.* Autonomous oceanographic sampling networks. **Oceanography, JSTOR**, v. 6, n. 3, p. 86–94, 1993.

DHN. **Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos: NORMAM 25. 2 rev.** Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2017. 52 p. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2-MOD1.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2022.

DUNBABIN, Matthew David; GRINHAM, Alistair R.; UDY, James. An autonomous surface vehicle for water quality monitoring. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [s.n.], 2009. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13027579>>.

EL-HATTAB, Ahmed I. Single beam bathymetric data modelling techniques for accurate maintenance dredging. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. Elsevier**, v. 17, n. 2, p. 189–195, 2014.

ELECROW. **DYP-A02YY Waterproof Ultrasonic Ranging Sensor**. 2023. Disponível em: <<https://www.elecrow.com/dyp-a02yy-waterproof-ultrasonic-ranging-sensor.htm>>.

ELETROGATE. **Acelerômetros MPU-6050, MMA8452 e MPU-9250**. 2023. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/acelerometros-mpu-6050-mma8452-e-mpu-9250/>>.

ESTIGONI, Marcus Vinícius; MATOS, Artur José Soares; MAUAD, Frederico Fábio. Análise da orientação da ana para a atualização das curvas cota-área-volume de reservatórios. In: X ENES ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS : TRABALHOS SELECIONADOS. **Anais[...]**. [S.l.]. ABRH, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/002664739>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

FERREIRA, Hugo *et al.* Autonomous bathymetry for risk assessment with roaz robotic surface vehicle. **IEEE. Oceans**, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5278235>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

FERREIRA, Italo Oliveira. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos**. 70 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

FERREIRA, Italo Oliveira; NETO, Arthur Ayres; MONTEIRO, Cristina Sameiro. O uso de embarcações não tripuladas em levantamentos batimétricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 10, p. 1885–1903, 2016.

FERREIRA, Italo Oliveira. *et al.* Modelo de incerteza para sondadores de feixe simples. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 5, p. 863–881, 2016.

FERREIRA, Italo Oliveira; RODRIGUES, Domingos Dalto; SANTOS, Rodrigues dos Gerson. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos**. [S.l.]: Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, 2015. v. 1. 100 p.

FRAZAO, Luciana Sousa; AMARO, Venerando Eustáquio. Caracterização batimétrica e físico-oceanográfica do porto de cabedelo/pb, brasil: Uma análise ambiental ao derrame de óleo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, p. 125–143, 2016.

FREITAS, Erik Luiz *et al.* Representação do relevo submerso e identificação de elementos sob a ponte JK por aquisição e processamento de dados em levantamento batimétrico monofeixe. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 11, p. 01–09, 2016.

FURFARO, Thomas C. **A modular guidance, navigation and control system for unmanned surface vehicles**. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, 2012.

GAGG, Gilberto. Apostila de levantamentos hidrográficos – Noções gerais.. **S-44: IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication n. 44**. Instituto De Geociências da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Departamento de Geodésia.: International Hydrographic Organization, 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157210/001020445.pdf?sequence=1&isAllow>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

GIORDANO, Francesco. *et al.* Integrating sensors into a marine drone for bathymetric 3d surveys in shallow waters. **Sensors**, v. 16, n. 1, p. 41, 2015.

GONZAGA, Suelen Lobato; OLIVEIRA, Lívia da Silva; CASTRO, Anderson de Oliveira. Real time energy consumption monitoring system using smart meters end arduino platform in residence. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, v. 5, p. 118–124, 2019.

HARE, Rob. Depth and position error budgets for multibeam echosounding. **The International Hydrographic Review**, v. 72, n. 2, p. 37–69, 1995.

IHO. INTERNACIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **Manual on Hydrography**. Monaco: International Hydrographic Organization, 2005.

IHO. INTERNACIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **S-44: IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication n. 44**. Monaco: International Hydrographic Organization, 2008.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.

JOINVILLE, P. de. **SIMGeo**. 2023. Disponível em: <<https://geo.joinville.sc.gov.br/porta/apps/simgeo/index.html?id=0e2ffa64f4254dda952757813efb6565>>.

JONG, C. D. *et al.* **Hydrography**. [S.l.]: Delft University Press, 2010. 354 p.

KUCHLER, Sebastian *et al.* Heave motion estimation of a vessel using acceleration measurements. In: IFAC World Congress. **Anais[...]**. [S.l.]: 2011, 2011. v. 18, p. 14742–14747.

LINN, Richard *et al.* Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 45, p. 429–442, 2003.

LIU, Yufei *et al.* Unmanned airboat technology and applications in environment and agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 197, p. 106920, 2022. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992200237X>>.

LYZENGA, David R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. **Applied Optics**, v. 17, p. 379–383, 1978.

MANLEY, Justin E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. **IEEE. Oceans**, 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5152052>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

JUNIOR MARQUES, Ademir *et al.* Análise da incerteza de medição de sensor ultrassônico de um equipamento portátil para batimetria. In: II SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS. **Anais[...]**. Santana do Livramento: [s.n.], 2017. p. 5. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/297713707\\_Analise\\_da\\_incerteza\\_de\\_medicao\\_de\\_sensor\\_ultrassonico\\_de\\_um Equipamento\\_portatil\\_para\\_batimetria](https://www.researchgate.net/publication/297713707_Analise_da_incerteza_de_medicao_de_sensor_ultrassonico_de_um Equipamento_portatil_para_batimetria)>. Acesso em: 22 jan. 2022.

MENSURAR. **Tecnologia LiDAR e sua aplicação na Engenharia**. 2023. [https://www.mensurarjunior.com/post/tecnologia-lidar-e-sua-aplica%C3%A7%C3%A3o-na-engenharia?gclid=Cj0KCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAioAddHasujQ9SuGKp-dzSiMdn0vN2M5LzUS2XZ\\_e-RlIVtY5Py9\\_YaAhL\\_EALw\\_wcB](https://www.mensurarjunior.com/post/tecnologia-lidar-e-sua-aplica%C3%A7%C3%A3o-na-engenharia?gclid=Cj0KCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAioAddHasujQ9SuGKp-dzSiMdn0vN2M5LzUS2XZ_e-RlIVtY5Py9_YaAhL_EALw_wcB).

MESQUITA, Sandra Maria Pereira. **Modelação da distribuição espacial da qualidade do ar em Lisboa usando sistemas de informação geográfica**. 106 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nova de Lisboa, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, 2009.

MUSTE, Marian; KIM, Dongsu; MERWADE, Venkatesh. Modern digital instruments and techniques for hydrodynamic and morphologic characterization of stream. **Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments**, v. 1, p. 315–342, 2012.

NEGREIROS, Alvaro Pinto Fernandes de. **N-Boat: Projeto e Desenvolvimento de um Veleiro Robótico Autônomo**. 67 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2019.

NUNES, Vinícius Kuczynski. *et al.* Desenvolvimento de um sistema para realização de levantamentos batimétricos automatizados. In: IX SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO. **Anais[...]**. Santana do Livramento: [s.n.], 2017. p. 5. Disponível em: <<https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/98087>>. Acesso em: 22 jan. 2023.

PEREIRA, Jógerson Pinto Gomes; BARACHUY, José Geraldo de Vasconcelos. **Ecobatimetria: teoria e prática**. Campina Grande: Gráfica Agenda, 2008.

RAMOS, Alexandre Moreira. **Aplicação, Investigação e Análise da Metodologia de Reduções Batimétricas Através do Método GPS Diferencial Preciso**. 221 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2007.

RUIZ, Diego Valdes. **Estado del arte en robótica submarina**. 63 p. Dissertação (Mestrado) — Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, Espanha, 2010.

SANTANA, Gisele de; LIMA, Rafael. **Robô batimétrico**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) — Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Positivo, Curitiba, 2011.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 1993. 589 p.

SETIANTO, Agung; TRIANDINI, Tamia. Comparison of kriging and inverse distance weighted (idw) interpolation methods in lineament extraction and analysis. **Journal of Southeast Asian Applied Geology**, v. 5, n. 1, p. 21–29, 2013.

SILVA, João Lucas de Souza *et al.* Plataforma arduino integrado ao plx-daq: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no lm35. In: . [S.l.: s.n.], 2014.

SILVA, Luis Fernando da. **ELABORAÇÃO DE UMA PLATAFORMA PROTÓTIPO PARA APLICAÇÕES EM LEVANTAMENTOS TOPOBATIMÉTRICOS**. 68 f. Monografia (Monografia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SILVEIRA, Alexandre Coelho da. **Estimativa da acurácia da posição de pixels em sistemas de batimetria multifeixe**. 93 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SOUTHSURVEYING. **SDE-28 Echo Sounder Operation Manual**. Guangzhou: Tian He New & High Technology Industry Development Division, S.D. v. 86. 44 p.

SUBSEAWORLDNEWS, . **Eolien Plans OWFs Seabed Clearance Off France**. 2023. [Http://subseaworldnews.com/2014/10/03/eolienplans-owfs-seabed-clearance-off-france/](http://subseaworldnews.com/2014/10/03/eolienplans-owfs-seabed-clearance-off-france/).

TEIXEIRA, Aurélio de Brito; PEREIRA, Rafael. Construção de um equipamento de baixo custo para registro de biopotenciais cardíacos visando à análise da variabilidade da frequência cardíaca. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 10, n. 1, p. 6–12, 2019.

TELFORD, William Murray. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 860 p.

THOMAS, Jose Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001. 278 p.

TIDEWISE. **USV Tupan**. 2023. Disponível em: <<https://www.tidewise.io/pt/tecnologia-usv-tupan>>.

TREMBANIS, Arthur *et al.* Modular autonomous biosamples (mab) - a prototype system for sitinct biological size-class sampling and preservation. **Oceans**, 2012. Disponível em: <<https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1831&context=ccom>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

USACE. U.S. Arm Corps Engineers. **Reservoir Sedimentation Surveys**. Engineer Manual. Washington, D.C.: Department of the Army, 2004.

USACE. U.S. Arm Corps Engineers. **Hydrographic Surveying**. Engineer Manual. Washington, D.C.: Department of the Army, 2013.

USSVTECH. **USV Mero**. 2023. Disponível em: <<https://ussvtech.com/usv-mero>>.

USSVTECH. **USV Tucunaré**. 2023. Disponível em: <<https://ussvtech.com/usv-tucunare>>.

VOLTAGE, C. **Uno R3 Development Board**. 2023. Disponível em: <<https://www.controlvoltage.net/arduino-uno-r3-development-board.html>>.

WERNLI, Robert. Auvvs-the maturity of the technology. In: . [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 189 – 195 vol.1. ISBN 0-7803-5628-4.

WILSON, Gary L.; RICHARDS, Joseph M. Procedural documentation and accuracy assessment of bathymetric maps and area/capacity tables for small reservoirs: U.S. geological survey scientific investigations report 2006–5208. **U.S. Geological Survey**, Reston, Virginia, p. 24, 2006. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/sir/2006/5208/pdf/SIR-06-5208.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

WINTER, Roy de. **Designing Ships using Constrained Multi-Objective Efficient Global Optimization**. 43 p. Dissertação (Mestrado) — Leiden University, 05 2018.

YU, Xuri *et al.* The application of autonomous underwater vehicles for interdisciplinary measurements in massachusetts and cape cod bays. **Continental Shelf Research, Elsevier**, v. 22, n. 15, p. 2225–2245, 2002.

ZHAO, Jiang; YAN, Weisheng; JIN, Xuelian. Brief review of autonomous surface crafts. **ICIC Express Letters**, v. 5, n. 12, p. 4381–4386, 2011.

## APÊNDICE A - ALGORITMO EM C ARDUÍNO

```

1 /* =====
2 Trabalho de Conclusao de Curso – Engenharia Naval – UFSC
3 Sensor Ultrassonico resistente a agua
4 Ecobatimetro https://surtrtech.com/2019/01/27/waterproof-ultrasonic-module-jsn-sr-04t-to-measure-distance-with-arduino/
5 -> trig pino 9
6 -> echo pino 8
7 SD card attached to SPI bus as follows :
8 -> MOSI – pin 11
9 -> MISO – pin 12
10 -> CLK – pin 13
11 -> CS – pin 4 (for MKRZero SD: SDCARD_SS_PIN)
12 Giroscopio MPU 6050
13 -> SCL PINO A5
14 -> SDA PINO A4
15 GPS Neo-6M
16 -> RX PINO 3
17 -> TX PINO 2
18 DYPA02YYWM v1.0
19 -> Arduino UNO +5V ---> DYPA02YYUM Pin 1 Red
20 -> Arduino UNO GND ---> DYPA02YYUM Pin 2 Black
21 -> Arduino UNO Pin 7 ---> DYPA02YYUM Pin 3
22 -> Arduino UNO Pin 6 ---> DYPA02YYUM Pin 4
23 LCD
24 -> SDA ---> SDA
25 -> SCL ---> SCL
26 Autor: Eng. Vangunther Bohn Junior , 06/05/2023
27 ===== */
28 #include <SdFat.h>
29 // #include <SD.h>
30 // #include <SPI.h>
31 #include <NMEAGPS.h>
32 #include <Wire.h>
33 #include <MPU6050.h>
34 #include <avr/wdt.h>
35 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
36 #define ARDUINO_USD_CS 4 //10 // uSD card CS pin (pin 10 on SparkFun
GPS Logger Shield)
37 // link: https://forum.arduino.cc/t/neogps-mpu6050-acx-acy-acz-logger/457929
38
39 // --- Mapeamento de Hardware ---

```

```

40 #define trig 9 //Pino 9 do Arduino sera a saida de trigger
41 #define echo 8 //Pino 8 do Arduino sera a entrada de echo
42 // DECLARAcAO DE VARIaVEIS
43 float pulse; //Variavel que armazena o tempo de duracao do echo
44 float dist_cm = 0; //Variavel que armazena o valor da distancia em
    centimetros
45 int counter = 0;
46
47 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
48 // Log File Defintions //
49 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
50 // Keep in mind, the SD library has max file name lengths of 8.3 - 8
    char prefix ,
51 // and a 3 char suffix .
52 //char logFileName[12] = "GPSLOGXX.csv";
53 char logFileName[13]; // Char string to store the log file name
54 // Our log files are called "gpslogXX.csv, so "gpslog99.csv" is our
    max file .
55 #define LOG_FILE_PREFIX "GPSLOG" // Name of the log file .
56 #define LOG_FILE_SUFFIX ".csv" // Suffix of the log file
57
58 #define MAX_LOG_FILES 100
59 // Number of log files that can be made
60
61 // Data to be logged:
62 #define LOG_COLUMN_HEADER \
63 "Cont," \
64 "Pitch," \
65 "Roll," \
66 "Distance1," \
67 "Distance2," \
68 "latitude," \
69 "longitude," \
70 "altitude," \
71 "speed," \
72 "course," \
73 "date," \
74 "time," \
75 "satellites," \
76 "Acc.X," \
77 "Acc.Y," \
78 "Acc.Z," \
79 "Gy.X," \
80 "Gy.Y," \
81 "Gy.Z," \
82 "Temp," \
83 "Pulse1," \

```

```

84  "Pulse2"
85  // printed at the top of the file .
86  File logFile;
87  MPU6050 mpu;
88  SdFat SD;
89  // //////////////////////////////////////
90  // NeoGPS Definitions //
91  // //////////////////////////////////////
92  NMEAGPS gps;          // NeoGPS object to be used throughout
93  gps_fix fix;         // The latest GPS information received from the
                        gpsPort
94  #define GPS_BAUD 9600 // GPS module's default baud rate
95
96  // //////////////////////////////////////
97  // GPS Serial Port Definitions //
98  // //////////////////////////////////////
99  // If you're using a Mega, Leo or Due, use Serial1 for the GPS:-
100 // #define gpsPort Serial1
101
102 // If you're using an Arduino Uno or other ATmega328 board that uses
    the
103 // 0/1 UART for programming/Serial monitor-ing , use AltSoftSerial:
104 // #include <AltSoftSerial.h>
105 // AltSoftSerial gpsPort; // Always on pins 8 & 9
106 // If you can't use pins 8 & 9, use this:
107 #include <NeoSWSerial.h>
108 #define GPS_RX 3
109 #define GPS_TX 2
110 NeoSWSerial gpsPort(GPS_RX, GPS_TX);
111
112 // Define the serial monitor port. On the Uno, Mega, and Leonardo this
    is 'Serial'
113 // on other boards this may be 'SerialUSB'
114 #define SerialMonitor Serial
115
116 // #define USE_MPU
117 const int MPU = 0x68; // I2C address of the MPU-6050
118 int16_t Tmp, GyX, GyY, GyZ, hour;
119 float AcX, AcY, AcZ;
120 int cont = 0;
121
122 // DYPA02YYWM
123 #define TRIGGER_PIN 7
124 #define PWM_OUTPUT_PIN 6
125
126 float duration;
127 float distance;

```

```

128
129 // Inicializa o display no endereco 0x27
130 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
131
132 void setup() {
133   wdt_enable(WDTO_4S);
134   pinMode(trig, OUTPUT);           // Pino de trigger sera saida
   digital
135   pinMode(echo, INPUT);           // Pino de echo sera entrada
   digital
136   pinMode(ARDUINO_USD_CS, OUTPUT); // Declara pinoCS como saida
137   digitalWrite(trig, LOW);        // Saida trigger inicia em nivel
   baixo
138
139   pinMode(TRIGGER_PIN, OUTPUT);    // DYPA02YYWM
140   pinMode(PWM_OUTPUT_PIN, INPUT);  // DYPA02YYWM
141
142   Wire.begin();
143   Wire.beginTransmission(MPU);
144   Wire.write(0x6B); // PWR_MGMT_1 register
145   Wire.write(0);    // set to zero (wakes up the MPU-6050)
146   Wire.endTransmission(true);
147
148   SerialMonitor.begin(9600);
149
150   ///pinMode(GPS_RX, INPUT); // Pino de TX GPS sera entrada digital
151   ///pinMode(GPS_TX, OUTPUT); // Pino de RX GPS sera saida digital
152   gpsPort.begin(GPS_BAUD);
153
154   SerialMonitor.println(F("Setting up SD card.));
155   // see if the card is present and can be initialized:
156   if (!SD.begin(ARDUINO_USD_CS)) {
157     SerialMonitor.println(F("Error initializing SD card.));
158   } else {
159     updateFileName(); // Each time we start, create a new file,
   increment the number
160     logFile = SD.open(logFileName, FILE_WRITE);
161     // Print a header at the top of the new file
162     logFile.println(F(LOG_COLUMN_HEADER));
163     logFile.close();
164   }
165
166   while (!mpu.begin(MPU6050_SCALE_2000DPS, MPU6050_RANGE_2G)) {
167     Serial.println("Could not find a valid MPU6050 sensor, check
   wiring!");
168     delay(500);
169   }

```

```

170
171  lcd.init();
172 }
173
174 void loop() {
175  wdt_reset();
176
177  lcd.backlight();
178
179  Wire.beginTransmission(MPU);
180  Wire.write(0x3B); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
181  Wire.endTransmission(false);
182  Wire.requestFrom(MPU, 14, true); // request a total of 14
    registers
183  AcX = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C
    (ACCEL_XOUT_L)
184  AcY = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E
    (ACCEL_YOUT_L)
185  AcZ = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40
    (ACCEL_ZOUT_L)
186  Tmp = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x41 (TEMP_OUT_H) & 0x42 (
    TEMP_OUT_L)
187  GyX = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x43 (GYRO_XOUT_H) & 0x44
    (GYRO_XOUT_L)
188  GyY = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x45 (GYRO_YOUT_H) & 0x46
    (GYRO_YOUT_L)
189  GyZ = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48
    (GYRO_ZOUT_L)
190
191  Vector normAccel = mpu.readNormalizeAccel();
192  AcX = normAccel.XAxis; // 0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C (ACCEL_XOUT_L)
193  AcY = normAccel.YAxis; // 0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E (ACCEL_YOUT_L)
194  AcZ = normAccel.ZAxis; // 0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40 (ACCEL_ZOUT_L)
195  Tmp = mpu.readTemperature();
196
197  while (gps.available(gpsPort)) {
198    fix = gps.read(); // get the entire fix structure, once per
    second
199
200    if (logGPSData()) { // Log the GPS data
201      // SerialMonitor.println(F("GPS logged.)); // Print a debug
    message
202
203    } else { // If we failed to log GPS
204      // Print an error, don't update lastLog
205      cont = cont + 1;
206      SerialMonitor.println(F("Failed to log new GPS data.));

```

```

207     }
208     if (cont == 1300) {
209         software_Reset();
210     }
211 }
212 }
213
214
215 byte logGPSData() {
216
217     // if (logFile.isOpen()) { // Print longitude , latitude , altitude (
218     //     in feet), speed (in mph), course
219     logFile = SD.open(logFileName , FILE_WRITE);
220
221     if (logFile) {
222         // if (true) {
223
224         // in (degrees), date, time, and number of satellites.
225         // if (fix.valid.location) {
226         trigPulse();
227         TrigPulse2();
228
229         // make a string for assembling the data to log:
230         // Vector normAccel = mpu.readNormalizeAccel();
231         float pitch = (-(atan2(AcX, sqrt(AcY * AcY + AcZ * AcZ)) * 180.0)
232         / M_PI);
233         float roll = ((atan2(AcY, AcZ) * 180.0) / M_PI);
234
235         lcd.setCursor(0, 0);
236         lcd.print(fix.latitude(), 4);
237         lcd.setCursor(8, 0);
238         lcd.print(fix.longitude(), 4);
239         lcd.setCursor(0, 1);
240         lcd.print(dist_cm, 2);
241         lcd.setCursor(8, 1);
242         lcd.print(distance, 2);
243
244         // read three sensors and append to the string:
245         counter++;
246         Serial.print("Cont:");
247         Serial.print(counter);
248         logFile.print(counter);
249         logFile.print(",");
250         Serial.print(", Pitch:");
251         Serial.print(pitch);
252         logFile.print(pitch);

```

```

252     logfile.print(",");
253     Serial.print(", Roll:");
254     Serial.print(roll);
255     logfile.print(roll);
256     logfile.print(",");
257     Serial.print(", Dist1:");
258     Serial.print(dist_cm);
259     logfile.print(dist_cm);
260     logfile.print(",");
261     Serial.print(", Dist2:");
262     Serial.print(distance);
263     logfile.print(distance);
264     logfile.print(",");
265     Serial.print(" A(x,y,z) = (");
266     Serial.print(AcX);
267     Serial.print(",");
268     Serial.print(AcY);
269     Serial.print(",");
270     Serial.print(AcZ);
271     Serial.print(") ,");
272
273     // Serial.println();
274
275     if (fix.valid.location) {
276         logfile.print(fix.latitude(), 6);
277     } else {
278         cont = cont + 1;
279     }
280     Serial.print(fix.latitude(), 6);
281     logfile.print(',');
282     Serial.print(',');
283     if (fix.valid.location)
284         logfile.print(fix.longitude(), 6);
285     Serial.print(fix.longitude(), 6);
286     logfile.print(',');
287     Serial.print(',');
288     if (fix.valid.altitude)
289         logfile.print(fix.altitude() * 3.2808, 1);
290     Serial.print(fix.altitude() * 3.2808, 1);
291     logfile.print(',');
292     Serial.print(',');
293     if (fix.valid.speed)
294         logfile.print(fix.speed_mph(), 1);
295     Serial.print(fix.speed_mph(), 1);
296     logfile.print(',');
297     Serial.print(',');
298     if (fix.valid.heading)

```

```
299     logFile.print(fix.heading(), 1);
300     Serial.print(fix.heading(), 1);
301     logFile.print(',');
302     Serial.print(',');
303
304     if (fix.valid.date) {
305
306         if (fix.dateTime.date < 10) {
307             logFile.print('0');
308             Serial.print('0');
309         }
310         logFile.print(fix.dateTime.date);
311         Serial.print(fix.dateTime.date);
312         logFile.print('/');
313         Serial.print('/');
314         if (fix.dateTime.month < 10) {
315             logFile.print('0');
316             Serial.print('0');
317         }
318         logFile.print(fix.dateTime.month);
319         Serial.print(fix.dateTime.month);
320         logFile.print('/');
321         Serial.print('/');
322         logFile.print(fix.dateTime.full_year());
323         Serial.print(fix.dateTime.full_year());
324     }
325     logFile.print(',');
326     Serial.print(',');
327
328     if (fix.valid.time) {
329         hour = fix.dateTime.hours;
330         if (hour < 4) {
331             hour = 12 - hour;
332         } else {
333             hour = hour - 3;
334         }
335         if (fix.dateTime.hours < 10) {
336             logFile.print('0');
337             Serial.print('0');
338         }
339         logFile.print(hour);
340         Serial.print(hour);
341         logFile.print(':');
342         Serial.print(':');
343         if (fix.dateTime.minutes < 10) {
344             logFile.print('0');
345             Serial.print('0');
```

```
346     }
347     logfile.print(fix.dateTime.minutes);
348     Serial.print(fix.dateTime.minutes);
349     logfile.print(' ');
350     Serial.print(' ');
351     if (fix.dateTime.seconds < 10) {
352         logfile.print('0');
353         Serial.print('0');
354     }
355     logfile.print(fix.dateTime.seconds);
356     Serial.print(fix.dateTime.seconds);
357 }
358 logfile.print(' ');
359 Serial.print(' ');
360
361 if (fix.valid.satellites)
362     logfile.print(fix.satellites);
363     Serial.print(fix.satellites);
364     logfile.print(' ');
365     Serial.print(' ');
366     logfile.print(AcX);
367     Serial.print(AcX);
368     logfile.print(' ');
369     Serial.print(' ');
370     logfile.print(AcY);
371     Serial.print(AcY);
372     logfile.print(' ');
373     Serial.print(' ');
374     logfile.print(AcZ);
375     Serial.print(AcZ);
376     logfile.print(' ');
377     Serial.print(' ');
378     logfile.print(GyX);
379     Serial.print(GyX);
380     logfile.print(' ');
381     Serial.print(' ');
382     logfile.print(GyY);
383     Serial.print(GyY);
384     logfile.print(' ');
385     Serial.print(' ');
386     logfile.print(GyZ);
387     Serial.print(GyZ);
388     logfile.print(' ');
389     Serial.print(' ');
390     logfile.print(Tmp);
391     Serial.print(Tmp);
392     logfile.print(' ');
```

```

393     Serial.print(',');
394     logfile.print(pulse);
395     Serial.print(pulse);
396     logfile.print(',');
397     Serial.print(',');
398     logfile.print(duration);
399     Serial.print(duration);
400     logfile.println();
401     Serial.println();
402     logfile.flush(); // make sure the file contains at least this
much
403     logfile.close();
404     return 1; // Return success
405     //} else {
406     // return 0;
407     //}
408 } else {
409     return 0; // If we failed to open the file , return fail
410 }
411 delay(1000); //Taxa de atualizacao
412 }
413
414 // updateFileName() - Looks through the log files already present on a
card ,
415 // and creates a new file with an incremented file index.
416 void updateFileName() {
417     int i = 0;
418     for (; i < MAX_LOG_FILES; i++) {
419         memset(logFileName, 0, strlen(logFileName)); // Clear logFileName
string
420         // Set logFileName to "gpslogXX.csv":
421         sprintf(logFileName, "%s%d", LOG_FILE_PREFIX, i);
422         strcat(logFileName, LOG_FILE_SUFFIX);
423
424         if (!SD.exists(logFileName)) { // If a file doesn't exist
425             // sprintf(logFileName, "%s%d.%s", LOG_FILE_PREFIX, i,
LOG_FILE_SUFFIX);
426             Serial.print(logFileName);
427             Serial.print(" nao existe.");
428             Serial.println();
429             break; // Break out of this loop. We found our index
430         } else {
431             // Serial.print(logFileName);
432             // Serial.print(" existe.");
433             // Serial.println();
434         }
435     }

```

```

436 SerialMonitor.print("File name: ");
437 SerialMonitor.println(logFileName); // Debug print the file name
438 delay(1000);
439 }
440
441 void trigPulse() {
442
443     digitalWrite(trig , LOW); // Clears the trigPin condition
444     delayMicroseconds(2);
445
446     digitalWrite(trig , HIGH); // Sets the trigPin HIGH (ACTIVE) for 10
        microseconds
447     delayMicroseconds(20); //10
448
449     digitalWrite(trig , LOW); // Send pin low again
450     // Reads the echoPin, returns the sound wave travel time in
        microseconds
451     pulse = pulseIn(echo, HIGH, 26000); //26000
452
453     // Calculating the distance
454     //dist_cm= pulse/58; //Convert the pulse duration to distance
455     //dist_cm = pulse/13.3511; //13.3511 instead of 58 because the speed
        of a soundwave in water is far bigger than in air
456
457     //dist_cm = pulse * 0.0344 / 2; // Speed of sound wave air divided
        by 2 (go and back)
458     dist_cm = pulse * 0.1493 / 2; // Speed of sound wave water divided
        by 2 (go and back)
459     dist_cm = dist_cm + 6; // soma distancia do sensora dentro da
        estrutura ate o sensor menos a distancia ate a lamina d'Agua
460     //calibracao apos distancia de bloqueio
461     if (pulse > 1087) {
462         //funcao gerada a partir de medicoes de 90 cm a 120 cm em rampas
        de 5 cm, sendo validas apenas acima de 90 cm
463         dist_cm = dist_cm + (0.1202 * dist_cm + -2.4854);
464     }
465 }
466
467 void TrigPulse2() {
468     // The sensor is triggered by a falling edge of a HIGH pulse that
469     // is more than 60 microseconds in duration.
470     // Give a short LOW pulse beforehand to ensure a clean HIGH pulse:
471     digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);
472     delayMicroseconds(20);
473     digitalWrite(TRIGGER_PIN, HIGH);
474     delayMicroseconds(100);
475     digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);

```

```
476
477 // Read the signal from the sensor: a HIGH pulse whose
478 // duration is the time (in microseconds) from the sending
479 // of the ping to the reception of its echo off of an object.
480 // If no object detected, fixed pulse width of 35ms is sent
481 // by the sensor.
482 pinMode(PWM_OUTPUT_PIN, INPUT);
483 duration = pulseIn(PWM_OUTPUT_PIN, HIGH);
484
485 // Convert the pulse width duration into a distance
486 distance = duration;
487 //distance = duration * 0.1493 / 2; // Speed of sound wave water
// divided by 2 (go and back)
488 //distance = distance + 1.9; // soma distancia do sensora dentro
// da estrutura ate o sensor menos a distancia ate a lamina d'Agua
489 distance = duration / 58;
490
491 if (distance == 0) {
492     distance = 3000;
493 }
494 // Serial.print(distance);
495 // Serial.println(" cm");
496
497 //delay(250);
498 }
499
500 void software_Reset() {
501     asm volatile(" jmp 0");
502 }
```

## APÊNDICE B - ALGORITMO EM OCTAVE PARA VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

```

1  clear vars;
2
3  %D = readmatrix('depthlog_truncated.txt');
4  D = load('depthlog_truncated.txt');
5  %D = csvread('teste.csv');
6
7  lat = D(:,1);
8  lon = D(:,2);
9  dep = D(:,3);
10 dep = -1*dep;
11
12 latlin = linspace(min(lat), max(lat), 100);
13 lonlin = linspace(min(lon), max(lon), 100);
14
15 [LAT,LON] = meshgrid(latlin, lonlin);
16
17 %The interpolation method can be "nearest", "cubic" or "linear". If
18   method is omitted it defaults to "linear".
19 DEP = griddata(lon,lat,dep, LON, LAT,"linear");
20
21 %mesh(LON,LAT,DEP);
22 surf(LON,LAT,DEP);
23
24 axis tight; hold on
25
26 %plot3(lat,lon,dep, '.', 'MarkerSize',15, 'MarkerFaceColor','#D9FFFF');
27 #subplot(2,2,1);
28 plot3(lon,lat,dep, '.', 'MarkerSize',15, 'Color', [0 0 0]);
29 #hold on;
30 grid on;
31 title('Profundidade')
32 xlabel('Longitude');
33 ylabel('Latitude');
34 zlabel('Profundidade reduzida (cm)');
35 colorbar;
36
37 figure;
38 #subplot(2,2,3);
39 #colormap ("default");
40 #contourf (LAT ,LON , DEP, 20);

```

```
41 [ctr, h] = contour (LON,LAT, DEP);
42 contour (LON,LAT, DEP, 'showtext', 'on');
43 cll = clabel(ctr, h, -150:10:-80, "fontsize", 12, 'backgroundcolor', [1
    1 1]);
44 title ({"contour() plot, using clabel()"; "Z = pontos"});
45
46 colorbar;
47
48 figure;
49 colormap (cool (64));
50 surf(LON,LAT,DEP, "facecolor", "none", "edgecolor", [0.85 0.85 0.85]);
51 hold on;
52 contour3 (LON,LAT,DEP, 'showtext', 'on');
53 hold off;
54 axis tight;
55 zlim auto;
56 view (315, 17);
57 title ({"contour3 of peaks() function", "gray surf() shows peaks
    function"});
58 colorbar;
```

8\_Apendices/plotter2.m

## APÊNDICE C - EMBARCAÇÃO EM TESTES DE COLETA DE DADOS

Figura 52 – Embarcação em coleta de dados



Fonte: Autor, 2023