



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA

ENG633 - SISTEMAS MECATRÔNICOS

---

Relatório I  
Projeto Conceitual

---

*Professor:*  
Leizer Schnitman

*Grupo:*  
Jailson dos Santos Junior  
Maxwell Francisco da Silva  
Rafael Santana Queiroz  
Rosinery Rosária de Medeiros  
Yuri de Matos Alves de Oliveira

Salvador

19 de Agosto de 2021

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>6</b>
2.1	<i>Brainstorming</i>	7
2.2	Matriz QFD	8
2.3	Matriz Morfológica	8
2.4	Projeto Conceitual	11
<b>3</b>	<b>Design</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>18</b>
4.1	Modelo Dinâmico do Veículo	20
4.2	Matriz de Inércia	22
4.3	Forças de Propulsão	24
4.4	Forças Restauradoras	27
4.5	Força de Amortecimento	29
<b>5</b>	<b>Validação de projeto</b>	<b>31</b>
5.1	Módulos de simulação	31
5.2	Missões	33
	<b>Referências</b>	<b>38</b>

## **Lista de Figuras**

2.1	Metodologia adotada para o projeto . . . . .	6
2.2	Conceito inicial da solução . . . . .	7
2.3	Conceito da solução após matriz morfológica . . . . .	13
3.1	ROVs que inspiraram o design do BROV . . . . .	14
3.2	Estrutura conceitual do BROV . . . . .	15
3.3	Propulsor do BROV . . . . .	16
3.4	Posicionamento dos thrusters . . . . .	16
3.5	Prototipação do propulsor . . . . .	17
3.6	Aquário para testes de propulsão e comunicação . . . . .	17
3.7	Projeto conceitual da <i>housing</i> da câmera e seu controlador . . . . .	18
3.8	Lanterna que será usada no BROV . . . . .	19
3.9	Vista isométrica do BROV conceitual . . . . .	19
3.10	Vista frontal do BROV conceitual . . . . .	20
3.11	Vista lateral do BROV conceitual . . . . .	20
3.12	Vista superior do BROV conceitual . . . . .	21
4.1	Propulsores do veículo . . . . .	25
4.2	Visualização de parâmetros da matriz da Equação 7 em vista superior de representação do veículo. . . . .	26
5.1	Estrutura de programação de um nó acústico AUVNetSim . . . . .	32
5.2	Missão de submersão e emersão . . . . .	33
5.3	Missão de velocidade máxima e seguimento de trajetória . . . . .	34
5.4	Missão de mapeamento . . . . .	35
5.5	Missão de resgate da moeda . . . . .	36

## **Lista de Tabelas**

2.1	Matriz QFD . . . . .	9
2.2	Matriz morfológica . . . . .	12
4.1	Tabela de descrição dos parâmetros da Equação 1 . . . . .	22
4.2	Tabela de valores dos parâmetros da Equação 3 . . . . .	24
4.3	Tabela de valores dos parâmetros da Equação 5 . . . . .	24
4.4	Tabela de descrição dos parâmetros da Equação 7 . . . . .	25
4.5	Tabela de valores dos parâmetros da Equação 7 . . . . .	27
4.6	Tabela de descrição dos parâmetros e variáveis da Equação 9 . . . . .	28
4.7	Tabela de valores dos parâmetros da Equação 10 . . . . .	28
4.8	Tabela de descrição dos parâmetros e variáveis da Equação 12 . . . . .	29
4.9	Tabela de valores dos parâmetros da Equação 12 . . . . .	30
5.1	Tabela comparativa de simuladores e suas funcionalidades . . . . .	31

## 1 Introdução

A comunicação subaquática sem fio tem sido um tema de vasta pesquisa nos últimos anos por conta do interesse de exploração do ambiente marinho. Enquanto no ar a maioria dos sistemas de comunicação utilizam ondas de rádio ou espectro de esparlhamento e posicionamento global [1], na água os sensores acústicos são os mais utilizados. Contudo, outras tecnologias de comunicação sem fio também são aplicáveis nesse ambiente, como ondas de radiofrequência (RF) e ondas óticas [2].

Os sensores acústicos possuem a vantagem de permitir uma comunicação de longo alcance, da ordem de 20 km. Em contrapartida, possuem baixa taxa de transmissão (da ordem de kbps), alta latência (da ordem de segundos), são relativamente pesados e caros, além de serem perigosos para certas espécies marinhas [2].

A comunicação subaquática por ondas RF permite uma transição suave entre a interface água/ar, sendo útil para integração com sistemas RF terrestres. Além disso, é menos suscetível às interferências decorrentes de turbulência e turbidez marinha, se comparada com a comunicação acústica e ótica. A principal limitação da aplicação de RF na água é o baixo alcance e o alto custo decorrente da necessidade da instalação de antenas [2].

A comunicação ótica sem fio subaquática (UOWC, do inglês *Underwater Optical Wireless Communication*) possui, dentre os métodos supracitados, a maior taxa de transmissão, a menor latência e o menor custo de implementação. Por outro lado, o sinal ótico é alterado por conta de absorção e dispersão, demanda alinhamento preciso dos transceptores e possui alcance moderado (da ordem de dezenas de metros) [2].

Diante desse cenário, o objetivo geral desse trabalho é implementar, em ambiente de simulação, algoritmos de comunicação embarcados em um veículo submarino remotamente operado (ROV, do inglês *Remotely Operated Underwater Vehicle*), que deverá ser projetado para realizar uma operação de resgate de um objeto qualquer.

Os objetivos específicos do trabalho são:

1. Projetar um ROV para atuação em uma missão de resgate, com requisitos de funcionamento pré-estabelecidos.
2. Desenvolver e implementar, em ambiente simulado, algoritmos de comunicação subaquática.

3. Simular comportamento dinâmico, localização, mapeamento, navegação e comunicação do ROV.

O escopo do trabalho está restrito à entrega de três relatórios, desenhos 3D e de fabricação e algoritmos desenvolvidos. A prototipação física, assim como testes experimentais do ROV em piscina ou mar estão fora do escopo desse trabalho.

A divisão dos relatórios será feita da seguinte maneira:

1. Relatório I - Projeto Conceitual
2. Relatório II - Projeto Detalhado
3. Relatório III - Resultados de Simulação

No Relatório I, que é este documento, será apresentada inicialmente uma análise de requisitos do sistema, matriz QFD (do inglês *Quality Function Deployment*) para obtenção dos requisitos de projeto e matriz morfológica para seleção preliminar dos tipos de componentes do protótipo a ser simulado. Posteriormente serão apresentados o projeto conceitual, o design proposto e as estratégias para validação do protótipo em ambiente simulado.

No Relatório II será apresentado o projeto detalhado, com especificação dos componentes e sistema, juntamente com um cronograma para execução das tarefas.

No Relatório III serão mostrados os resultados da simulação do protótipo atuando na missão de resgate.

## 2 Metodologia

Para o cumprimento dos objetivos gerais e específicos do trabalho foram considerados catorze requisitos – dez funcionais e quatro desejáveis – pré-estabelecidos por um cliente fictício. Os requisitos estão listados abaixo:

### Funcionais

1. Ser capaz de estabelecer comunicação com operador na superfície.
2. Ser capaz de submergir e emergir de forma controlada.
3. Ser capaz de se locomover em baixo d'água com uma velocidade de 2 m/s.
4. Ser capaz de seguir trajetória pré-estabelecida.
5. Ser capaz de mapear o leito submarino abaixo (angulação mínima de  $\pm 10^\circ$ ).
6. Ser capaz de localizar no mapa um objeto pré-definido.
7. Ser capaz de se deslocar até uma coordenada (3D) ou objeto pré-definido.
8. Ser capaz de detectar “sinal de socorro” e se deslocar até a fonte emissora.
9. Ser capaz de transmitir dados, inclusive a localização (3D) em tempo real.
10. Ser capaz de armazenar o caminho percorrido para o cumprimento da missão.

### Desejáveis

11. O protótipo deve suportar pressões correspondentes a pelo menos 10 mca.
12. O protótipo deve ser “bem montado” e “apresentável”.
13. Deve-se preservar aspectos de segurança na operação, resgate e manutenção.
14. Deve-se desenvolver IHM para monitoramento em tempo real.

A metodologia adotada para levantamento de ideias, ponderação de requisitos e seleção preliminar de componentes está descrita na Figura 2.1. As subseções a seguir detalham o que foi desenvolvido em cada etapa da metodologia.

Figura 2.1: Metodologia adotada para o projeto

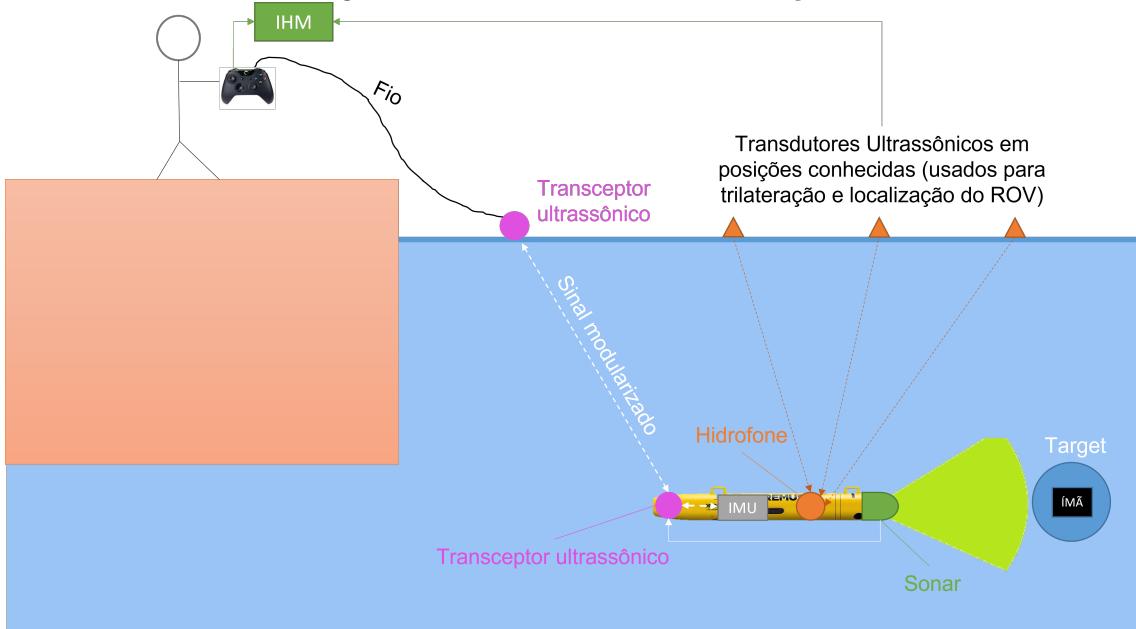


Fonte: Autores

## 2.1 Brainstorming

Na fase de *brainstorming* foram levantadas algumas soluções que poderiam atender ao maior número possível de requisitos. Ao término dessa etapa, a equipe chegou a um conceito inicial, que está mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Conceito inicial da solução



Fonte: Autores

Nesse conceito, o operador seria responsável por enviar comandos de deslocamento para um transceptor ultrassônico – que estaria dentro de uma bóia na superfície – através de um controle. O comando seria então convertido em um sinal modularizado para ser enviado ao transceptor ultrassônico presente no ROV. Em seguida, esse sinal seria decodificado e o ROV se deslocaria para a posição desejada.

A localização do ROV seria periodicamente monitorada por três transdutores ultrassônicos presentes na superfície da água, que atuariam como *ground-truth*, recebendo a informação de um hidrofone presente no ROV e calculando a localização por meio de trilateração. Essa informação seria então enviada para a interface homem-máquina (IHM) via cabo ou RF.

A medida em que o ROV se aproximasse do objeto de interesse – que estaria emitindo sinal acústico –, haveria uma amplificação do sinal do sonar embarcado,

que seria transmitido para o transceptor ultrassônico presente no ROV e enviado de volta para o operador. O objeto teria também um ímã para facilitar a captura e resgate.

O mapeamento do leito seria feito de modo *offline* por outros sensores ultrassônicos embarcados no ROV. O registro da trajetória também não seria feito em tempo real, mas de modo *offline* por meio do rastro calculado pela IMU (do inglês *Inertial Measurement Unit*).

## 2.2 Matriz QFD

Após obtenção de um conceito inicial, a equipe utilizou a Matriz QFD (do inglês *Quality Function Deployment*) para conversão das necessidades do cliente fictício em requisitos factíveis de projeto. Nessa etapa foram avaliadas as relações entre as necessidades e os requisitos, assim como as correlações dos requisitos entre si. Não foi feita uma análise de concorrentes. Ao término do preenchimento da QFD, cujo recorte está mostrado na Tabela 2.1, foi possível determinar a ordem de priorização dos requisitos. Os principais requisitos listados foram:

1. Comunicação *wireless*.
2. Localizar ROV.
3. Seguir trajetória pré-estabelecida.

## 2.3 Matriz Morfológica

A matriz morfológica, mostrada na Tabela 2.2, foi utilizada para seleção preliminar dos componentes e sistemas que viriam compor o ROV, de modo a solucionar cada requisito de projeto. Ao término do preenchimento da matriz morfológica, o conceito inicial sofreu alterações, como substituição e inclusão de novos sensores. Cada requisito de sistema foi convertido em um problema de engenharia e as soluções possíveis foram pesquisadas e escolhidas. Os argumentos para seleção de alguns dos componentes estão expostos a seguir.

**Comunicação Wireless** em meio aquoso pode ser realizada de três formas: acústica, eletromagnética e óptica. Dentre essas formas, a acústica foi selecionada pois o atenuamento do sinal é menor do que as outras opções debaixo água. Além disso,

Tabela 2.1: Matriz QFD

The diagram illustrates the QFD process flow:

- 客户需求 (Client Needs):** Represented by the left side of the house.
- 项目需求 (Project Requirements):** Represented by the right side of the house.
- 关联 (Association):** Represented by the roof and walls connecting the two sides.

Número da linha	Máx. relacionamento na linha	Importância relativa (%)	Modelo Kano	Importância ou peso	Direção da Melhoria: Minimizar (▼), Maximizar (▲), Alvo (x)								
					Comunicação Wireless	Submergir e emergir de forma controlada	Seguir trajetória pré-estabelecida	Mapear leito	Localizar objeto	Localizar ROV	IHM	Supportar pressão	
1	9	16,1	M	5	Estabelecer comunicação com operador na superfície	○	○	○	▲	▲	▲	○	▲
2	9	9,7	E	3	Submergir e emergir de forma controlada	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲
3	3	3,2	A	1	Velocidade mínima de 2 m/s	▲	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲
4	9	9,7	E	3	Seguir trajetória pré-estabelecida	○	▲	○	▲	▲	○	○	▲
5	9	3,2	A	1	Mapear leito submarino	▲	▲	▲	○	▲	○	▲	▲
6	9	12,9	M	4	Localizar objeto	○	▲	○	▲	○	○	▲	▲
7	9	12,9	M	4	Se deslocar até coordenada	○	○	▲	▲	▲	○	○	▲
8	9	12,9	M	4	Detectar sinal de socorro	○	▲	▲	▲	○	▲	▲	▲
9	9	16,1	M	5	Transmitir dados em tempo real	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
10	9	3,2	A	1	Armazenar o caminho	▲	▲	▲	▲	▲	○	▲	▲
					Limite superior	-	200	29	3000	-	-	-	1230
					Alvo	-	140	8	1000	-	-	-	37
					Limite inferior	-	100	8	250	-	-	-	37
					Dificuldade organizacional								
					Máx. relacionamento na coluna	9	9	9	9	9	9	9	1
					Peso ou importância	551,6	241,9	351,6	125,8	229,0	358,1	312,9	100,0
					Importância relativa	24,3	10,7	15,5	5,5	10,1	15,8	13,8	4,4
					Ordem de atuação	1	5	3	7	6	2	4	8

Fonte: Autores

a comunicação óptica apresenta restrição com alinhamento entre transmissor e receptor e a eletromagnética é fortemente atenuada na água, o que favorece mais a escolha da onda acústica, que não apresenta essas peculiaridades negativas.

**Medição de Profundidade** vai ser realizada a partir da medição de sensor de pressão, que através de uma simples equação, pode ser convertida em profundidade. Essa alternativa foi escolhida visto a maior complexidade das outras alternativas: utilização de um transdutor para medição da distância da superfície da água e utilização de visão computacional e marcos fiduciais. Além de serem mais complexas, não apresentam grande melhoria em comparação com sensor de pressão.

**Sistema de propulsão** pode ser composto por bombas de porão, motores de corrente contínua e motores *brushless*. Os dois primeiros necessitam de conversores de corrente contínua para controle de velocidade, porém a resolução do conversor de corrente contínua é menor do que a resolução que se pode obter com os motores *brushless*. Ademais, o motor *brushless* consegue atingir velocidade maiores na mesma faixa de preço.

**Controle de velocidade** do veículo pode-se usar diversas estratégias de controle, a escolhida pra ser adotada foi o controle multivariável baseado em modelo. Esse controlador foi escolhido pois permite controlar o empuxo em cada propulsor para se atingir a velocidade desejada, juntamente com a atenuação de grandes variações de velocidade do motor.

**Mapeamento de leito** utilizará sensores ultrassom de distância e a localização do veículo para geração de um mapa de ocupação 3D. Essa alternativa foi selecionada pela menor complexidade e custo das demais. Apesar de também ter menor qualidade, é o requisito que é o segundo menos importante de acordo com a Tabela 2.1, dessa forma, não é interessante gastar recurso financeiro de tempo para adotar uma técnica melhor.

**Localização de objeto** vai contar com duas formas de localização. A primeira é a localização acústica com SBL (do inglês, *Short BaseLine*), que através da trilateração estima a posição de um objecto no plano paralelo a superfície. A segunda é através de marcos fiduciais, que são adesivos com formato similares a um QR Code, o qual permite a estimativa da pose de um objeto nos seis graus de liberdade. As duas serão utilizadas em conjunto pois são complementares. O SBL não fornece todos os

graus de liberdade, mas consegue transmitir a direção do objeto para uma distância maior que a do marco artificial, que por sua vez estima todos os graus de liberdade de um objeto.

**Localização do veículo** é o segundo requisito mais importante do projeto, por isso, com finalidade de ter um sistema preciso, diversas estratégias serão adotadas em conjunto. A localização do veículo consiste em saber a pose nos seis DOF (*Degrees of Freedom*) do veículo em relação ao ambiente no qual está inserido. Para isso, o sistema SBL será usado para estimativa da posição em XY, a medição de profundidade será usada para calcular o Z e o giroscópio para a orientação do veículo. Mesmo já sendo dessa forma possível obter a pose 6DOF do veículo com essas três soluções, a detecção de Arucos, *dead-reckoning* e dados do acelerômetros também serão usados visando obtenção de uma localização mais precisa.

**Interface Homem Máquina** será realizada através do RVIZ. Essa escolha foi feita simplesmente pela compatibilidade de arquitetura de *software*, visto que essa ferramenta é incorporada ao ROS (do inglês, *Robotics Operating System*), que já será utilizado.

**Estrutura** do veículo será tubular. Esse tipo de estrutura permite a fácil modificação do projeto, além de ter uma menor massa adicional, o que permite o melhor controle do veículo, como também a fácil modificação do projeto.

## 2.4 Projeto Conceitual

Após as decisões de projetos tomadas a partir da matriz QFD e morfológica, o projeto conceitual resultante do *brainstorm* passou por algumas modificações, que podem ser observadas na Figura 2.3. Quanto aos sensores do veículo, o sonar foi substituído pela câmera, visto que é um recurso muito mais barato e atende a estimativa da pose do objeto. O acréscimo de sensores ultrassom no fundo do veículo para mapeamento e o imã para possibilitar o resgate de uma moeda.

Na superfície, também modificou-se o módulo flutuante, que deve se comunicar sem fio tanto com o controle do operador, como com a IHM, não há necessidade de

Tabela 2.2: Matriz morfológica

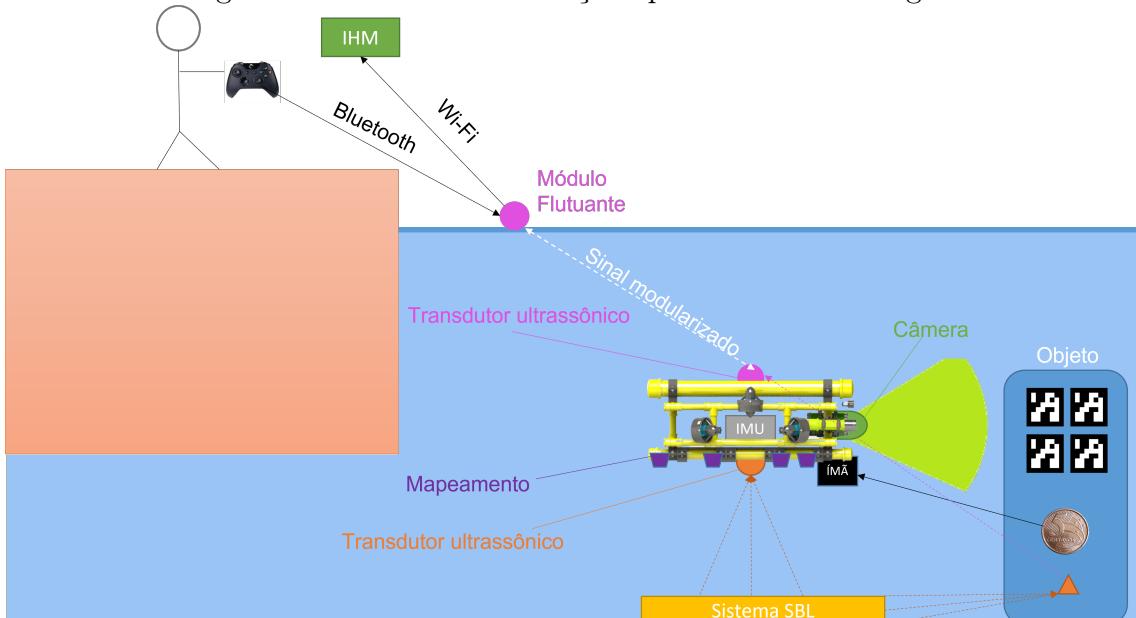
Requisitos	Definição do problema	Soluções			
Comunicação Wireless com Operador e Detecção de Sinal de Socorro	Transmissão de Sinal em Meio Subaquático	Acústica		Óptica	Eletromagnética
Sub/Emersão Controlada e Locomoção em 4 DOF	Medição de Profundidade	Ultrassom apontado para superfície		Sensor de pressão	Câmera e objetos pré definidos
	Sistema de Propulsão	Bomba de Porão		Motor CC	Motor Brushless
Seguir Trajetória Pré-estabelecida	Controle de Posição	Controle PID cascata		Controle multivariável com base em modelo	Controle não linear
Mapeamento de Leito	Sensores para Mapeamento	Múltiplos Ultrassom		Câmera Stereo	Sonar
Localização de Objeto	Método de Localização de Objeto	Marco Artificial Passivo		Marco Artificial Ativo	Rede Neural e Visão Computacional
Localização do Veículo Submarino	Técnicas	Trilateração (SBL)	Marcos Artificiais	Dead Reckoning	IMU
IHM	API e Métodos de Criação de GUI	Qt Creator	Swing	WebDesign	Rviz
Suportar Pressão	Estruturas Possíveis	Tubular (PVC / Aço Inox)			Monocoque

Fonte: Autores

comunicação com fio. Além disso, o sistema SBL vai deixar de estar boiando, pois pode sair do lugar e gerar erro no sistema de localização.

Por fim, o objeto vai contar com uma moeda, um transdutor e marcos fiduciais. A moeda é simplesmente para comprovação de que o veículo se alcançou o objeto. O transdutor é para estimativa da pose do objeto e transmissão dessa informação pro veículo. Por fim, os marcos fiduciais para fazer são para uma estimativa mais precisa e com todos os graus de liberdade do veículo.

Figura 2.3: Conceito da solução apóis matriz morfológica

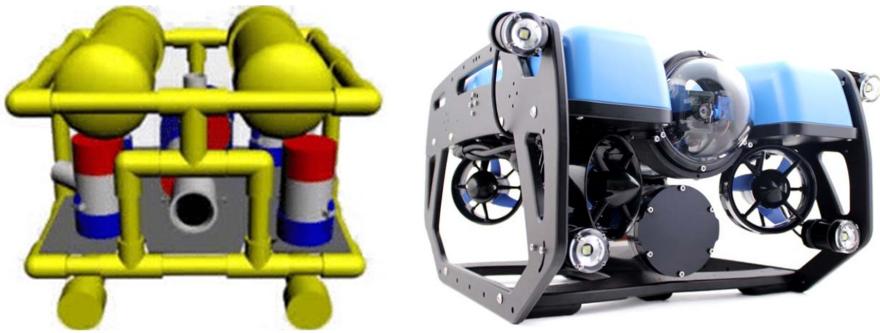


Fonte: Autores

### 3 Design

O design do protótipo foi concebido a partir das definições oriundas da matriz morfológica e também de inspirações de ROVs comerciais, como o *Seafox* e o *BlueROV2*, mostrados na Figura 3.1.

Figura 3.1: ROVs que inspiraram o design do BROV: *Seafox* (à esquerda) e *BlueROV2* (à direita)



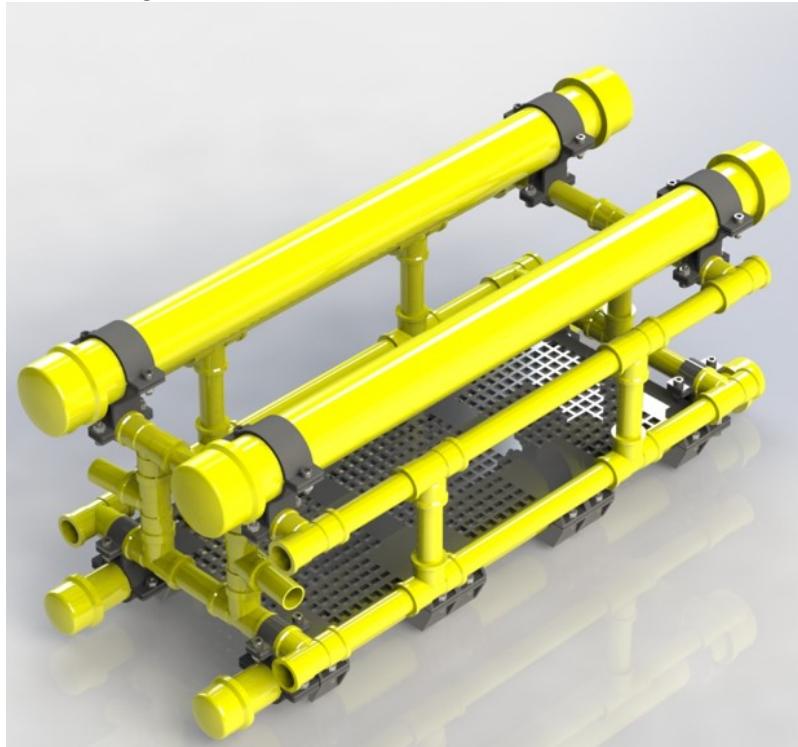
Fonte: [3] e [4]

Para escolha do material da estrutura do BROV foram levados em consideração o baixo custo e a versatilidade para futuras integrações de novos sensores. Dessa forma, optou-se por utilizar estrutura tubular, como a do *Seafox*. O design conceitual da estrutura está mostrado na Figura 3.2.

Para a fixação da estrutura tubular entre si foram utilizados conectores do tipo “tê soldável” e “joelho 90°”, itens comerciais retirados do catálogo da Tigre® [5]. Nos casos em que não foi possível a união tubular através desses conectores, optou-se por utilizar peças impressas 3D em ABS, modeladas exclusivamente para esse fim, evitando-se uso de abraçadeiras metálicas e do tipo “enforca-gato”, que viriam a prejudicar a estética do ROV. Julgou-se necessário também a utilização de uma base (impressa 3D) para apoio e fixação dos mais diversos tipos de componentes, como *housings*, fios e acessórios. Parafusos e porcas de aço inoxidável austenítico 304 foram selecionados como elementos padrão de fixação.

No design do ROV também foi levado em consideração a versatilidade no controle da flutuabilidade. Os dois maiores tubos da parte superior podem acomodar um grande volume de espuma expansível, que possui baixa densidade, da ordem de 0,1 g/cm<sup>3</sup>. Caso os tubos não resistam aos esforços de pressão na profundidade

Figura 3.2: Estrutura conceitual do BROV



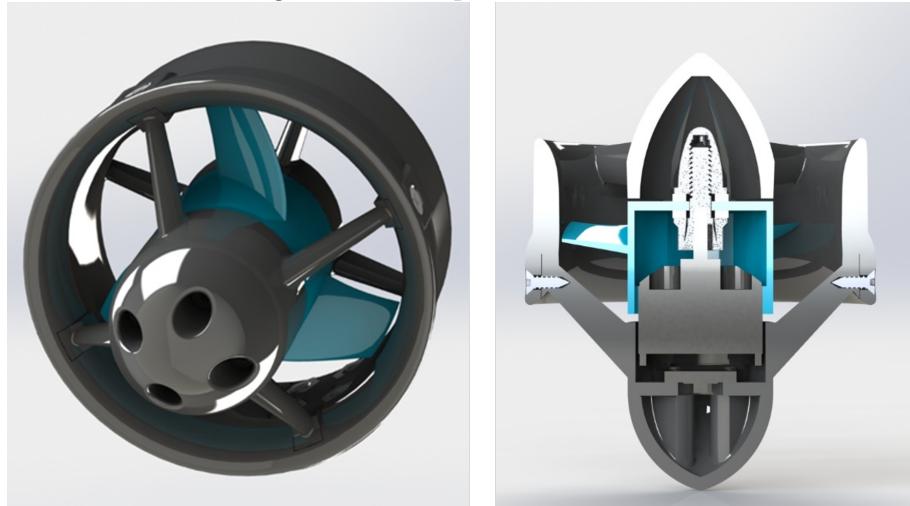
Fonte: Autores

especificada pelo projeto, a espuma poderá ser aplicada para evitar o colapso do tubo, ao mesmo tempo que favorecerá o empuxo se comparado com o preenchimento com água. De modo análogo, os tubos inferiores foram pensados para um eventual acréscimo discreto de massa – com bolas de gude, por exemplo – para ajuste da altura do centro de gravidade do protótipo. Os tubos menores, que compõem a parte central da estrutura, foram mantidos abertos para circulação de água.

O sistema de propulsão foi fortemente inspirado no *BlueROV2*, que é um ROV *open source* da empresa *BlueRobotics*. Algumas alterações em nível de escala, elementos de fixação e componentes do duto canalizador foram feitas em relação aos presentes no *BlueROV2*, de modo a tornar a montagem compatível com o motor *brushless A2212*, que será utilizado no projeto. A Figura 3.3 mostra o propulsor que será utilizado no BROV.

Os motivos pela escolha desse modelo de motor foram: não necessidade de selagem, facilidade de montagem, alto torque e baixo *lead time*. A alocação dos *thrusters*

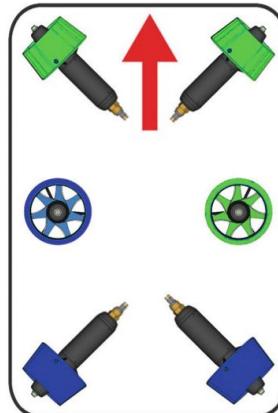
Figura 3.3: Propulsor do BROV



Fonte: Autores

– mostrada na Figura 3.4 – foi pensada de modo a obter o controle dos 3 graus de liberdade translacionais – *surge*, *sway* e *heave* – e de 2 rotacionais – *roll* e *yaw* [6].

Figura 3.4: Posicionamento dos thrusters

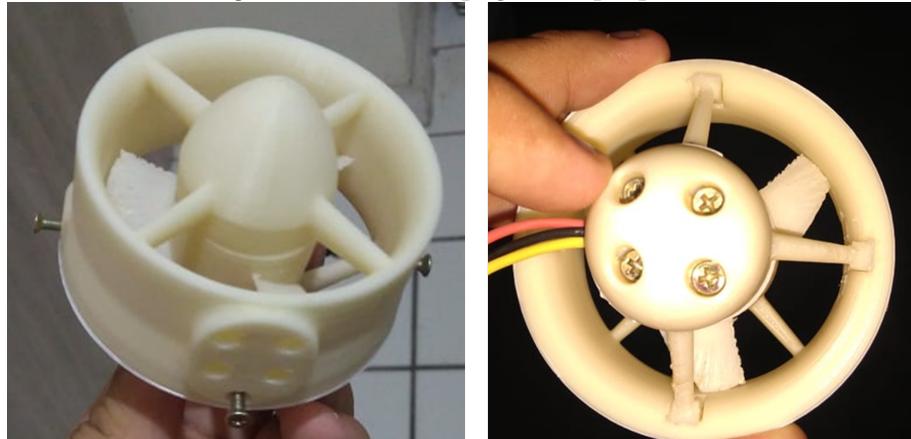


Fonte: [6]

No momento em que foi escrito esse relatório o propulsor se encontrava em fase de testes, tendo a hélice e demais acessórios sido fabricados em ABS, em uma impressora 3D, conforme indicado pela Figura 3.5. A próxima etapa a ser realizada para modelagem computacional do sistema de propulsão consiste no levantamento

da curva Corrente x Torque do motor através de testes em um aquário adquirido pela equipe, conforme indicado pela Figura 3.6, de modo que seja possível estimar o comportamento dinâmico do ROV quando submerso.

Figura 3.5: Prototipação do propulsor



Fonte: Autores

Figura 3.6: Aquário para testes de propulsão e comunicação

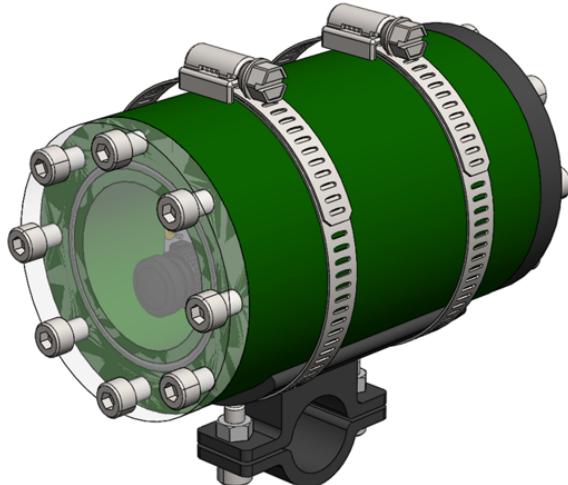


Fonte: Autores

*Housings* tiveram que ser projetadas para uma vedação confiável da câmera monocular juntamente com seu controlador, assim como dos componentes eletrônicos de controle – Arduino, IMU e bateria.

O corpo da *housing* da câmera foi concebido para ser impresso 3D, com um visor de policarbonato na parte frontal, comprimido com parafusos e vedado com *o-ring*. A fixação na estrutura se dará por meio do uso de abraçadeiras metálicas, de modo que seja permitida a sua rápida montagem e desmontagem, sem que haja nenhum tipo de perfuração. A Figura 3.7 mostra o projeto conceitual dessa *housing*. A outra *housing*, que acomodará os demais componentes eletrônicos e bateria, ainda está em desenvolvimento.

Figura 3.7: Projeto conceitual da *housing* da câmera e seu controlador



Fonte: Autores

Para prover iluminação na profundidade de 10 m, a equipe optou por utilizar uma solução de mercado já pronta: uma lanterna de pesca à prova d'água de baixo custo com fonte de alimentação própria, mostrada na Figura 3.8.

Além dos componentes mencionados acima, também serão acomodados no BROV sensores de ultrassom para mapeamento e comunicação. Todos esses itens estão representados nas vistas de montagem das Figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12.

## 4 Modelagem Matemática

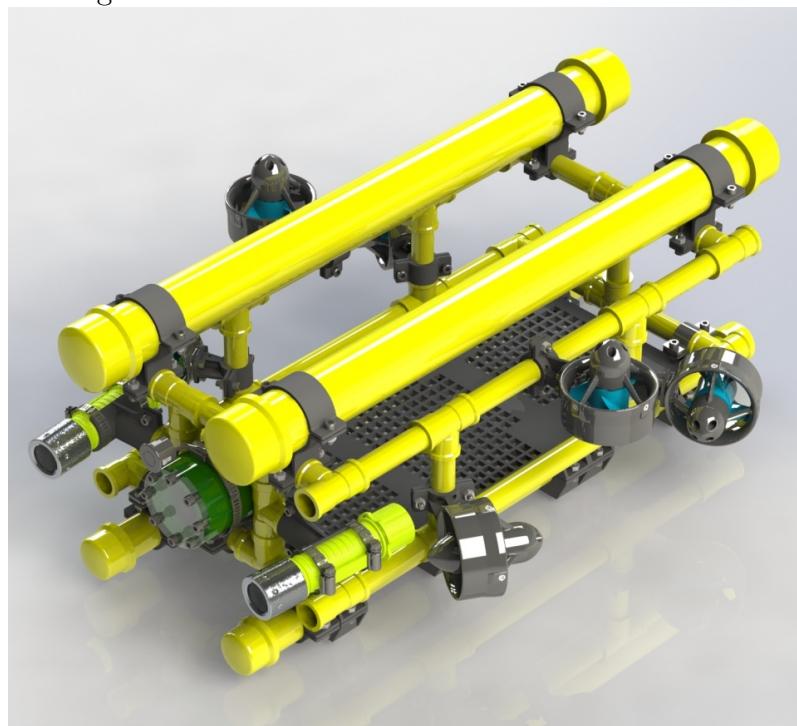
A modelagem matemática da dinâmica do veículo é importante para o seu projeto. A partir dessa, é possível saber a força necessária no eixo X para se atingir o requisito de velocidade de dois metros por segundo. Por consequência, consegue-se

Figura 3.8: Lanterna que será usada no BROV



Fonte: Banggod

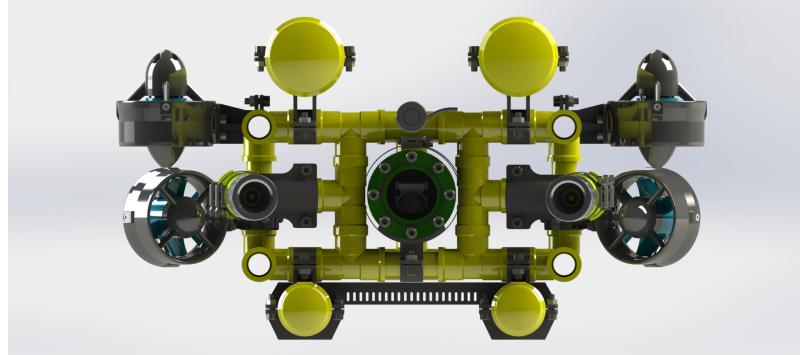
Figura 3.9: Vista isométrica do BROV conceitual



Fonte: Autores

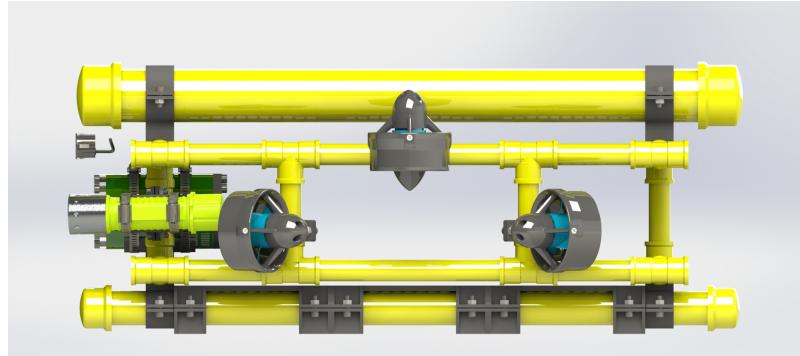
selecionar um propulsor que consiga exercer essa força no veículo e a partir da escolha do propulsor, diversos componentes também podem ser especificados. Visto que

Figura 3.10: Vista frontal do BROV conceitual



Fonte: Autores

Figura 3.11: Vista lateral do BROV conceitual



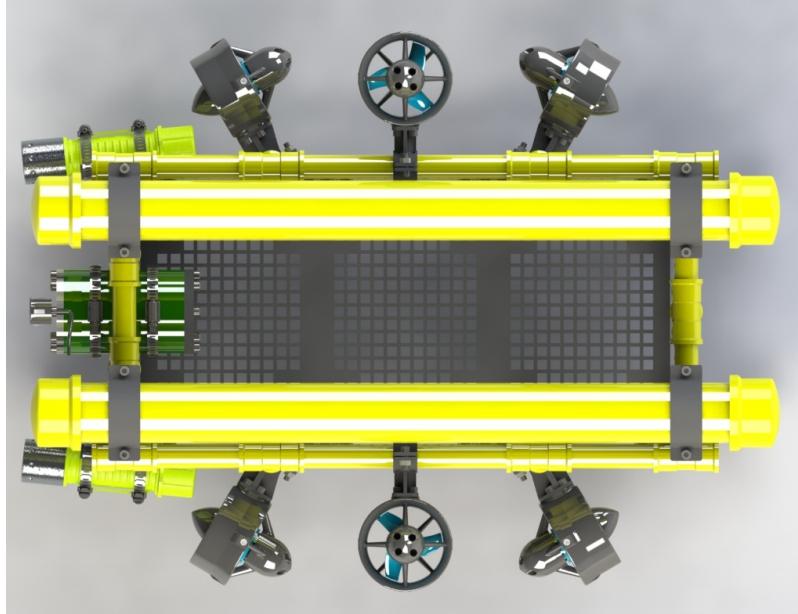
Fonte: Autores

o modelo matemático é o começo de toda essa cadeia de decisões de projeto, esse será o ponto de partida para as definições mais específicas do projeto. Adicionalmente, o modelo matemática influencia o controle e localização do veículo, pois pode ser utilizado para estimação de deslocamento e para otimização da lei de controle.

#### 4.1 Modelo Dinâmico do Veículo

Existem diversos tipos de modelos matemáticos que podem ser adotados para a representação da dinâmica de um submarino [6] [7]. A principal diferença entre cada tipo de modelo é quanto ao número de DOF a serem considerados, o grau de linearização e desacoplamento, e os fenômenos mecânicos do deslocamento de um corpo rígido na água a serem considerados. A fórmula geral para o modelo dinâmico de um veículo marinho [8] está representada na Equação 1, as quais tem parâmetros

Figura 3.12: Vista superior do BROV conceitual



Fonte: Autores

e funções que estão discriminadas na Tabela 4.1. No modelo matemático, as linhas e colunas correspondem aos graus de liberdade na seguinte ordem:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $roll$ ,  $pitch$  e  $yaw$ . Ademais, a notação utilizada para modelagem do veículo está descrita em [7], a qual corresponde a notação adotada pela SNAME (Sociedade Naval de Engenheiros e Arquitetos Marítimos).

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) + g_o = \tau + \tau_e \quad (1)$$

O sistema de referência do veículo é NED (*North East Down*), isso significa que o sistemas de coordenadas do veículo tem o eixo  $x$  saindo do seu centro para a parte frontal, o eixo  $y$  saindo do seu centro para a esquerda e o  $z$  saindo do seu centro para baixo. Esse sistema foi adotado por convenção de veículos submarinos, na qual toda modelagem é baseada nesse sistema de coordenadas [6] [7] [8]. Outra premissa a ser utilizada na modelagem é que o sistema de coordenadas é originado no centro de gravidade, de forma a facilitar a modelagem matemática. O veículo foi projetado para ser simétrico em relação aos planos  $XZ$  e  $YZ$ , além disso, quase todos os componentes são simétricos em relação aos seus plano  $XY$ . Essa premissa facilita

Tabela 4.1: Tabela de descrição dos parâmetros da Equação 1

Símbolo	Descrição
$\eta$	vetor de pose [6x1]
$v$	vetor de velocidade [6x1]
$M$	matriz de inércia [6x6]
$C$	matriz coriolis em função da velocidade [6x6]
$D$	matriz de amortecimento em função da velocidade [6x6]
$g$	vetor de forças restauradoras hidrostáticas [6x1]
$g_o$	vetor de força restauradoras por sistemas de lastro [6x1]
$\tau$	vetor de força dos propulsores [6x1]
$\tau_e$	vetor de forças externas de perturbação [6x1]

o controle do veículo, visto que essas simetrias desacoplam o sistema, de forma que a movimentação do veículo em um grau de liberdade, não gera uma força em outra direção. Portanto, todos os componentes do modelo serão matrizes diagonais, pois o sistema é considerado desacoplado e pois os únicos termos que não relacionam um grau de liberdade com o outro é justamente a diagonal das matrizes.

Na Equação 1 pode se observar sete termos sendo somados, porém alguns desses termos não serão considerados. Os termos  $\tau_e$  e  $g_o$  não serão considerados, pois o veículo não foi projetado com sistemas de lastros e porque perturbações no veículo não serão medidas ou consideradas em seu modelo. Ademais, o termo de coriolis também vai ser desconsiderado pois é a força gerada pela rotação da terra, a qual em pequenas velocidades é próxima a zero e não precisa ser considerada [9] [? ]. Por fim, eliminando esses três componentes da equação, obtém-se a Equação 2 que vai ser utilizada.

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2)$$

## 4.2 Matriz de Inércia

A matriz de inércia de um corpo rígido  $M_{RB}$  tem o formato da Equação 3, porém no caso de um veículo submarino a matriz de inércia  $M$  é representada pela Equação 4 [7]. O termo  $M_A$  da é a matriz de massa adicional. A matriz de massa adicional, definida pela Equação 5 representa a força que o fluido no qual o veículo está imerso

exerce no veículo durante o seu deslocamento.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M = M_A + M_{RB} \quad (4)$$

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Os parâmetros da matriz de inércia do corpo rígido são definidos na Tabela ???. Esses parâmetros são comumente obtidos pelos *software* de CAD, no caso se utilizou o mesmo software usado na modelagem, o *OnShape*. Os parâmetros da matriz de massa adicional estão definidos na Tabela 4.2, para obtenção desses parâmetros se utilizou o *software capytaine*, o qual é utilizado especificamente para estimativa de parâmetros de estruturas e veículos marinhos a partir de um arquivo com o formato do que se quer estimar [10].

Tabela 4.2: Tabela de valores dos parâmetros da Equação 3

$I_x$	0.12915888	$kgm^2$
$I_y$	0.27890934	$kgm^2$
$I_z$	0.33540447	$kgm^2$
$I_{xy}$	0	$kgm^2$
$I_{xz}$	0	$kgm^2$
$I_{yz}$	0	$kgm^2$
$m$	9.19851484	$kg$
$x_g$	0	$m$
$y_g$	0	$m$
$z_g$	0	$m$

Tabela 4.3: Tabela de valores dos parâmetros da Equação 5

$X_u$	6.4832996	$kgm^2$
$Y_v$	10.271688	$kgm^2$
$Z_w$	47.014015	$kgm^2$
$K_p$	0.1089654	$kgm^2$
$M_q$	0.0962604	$kgm^2$
$N_r$	0.1505059	$kgm^2$

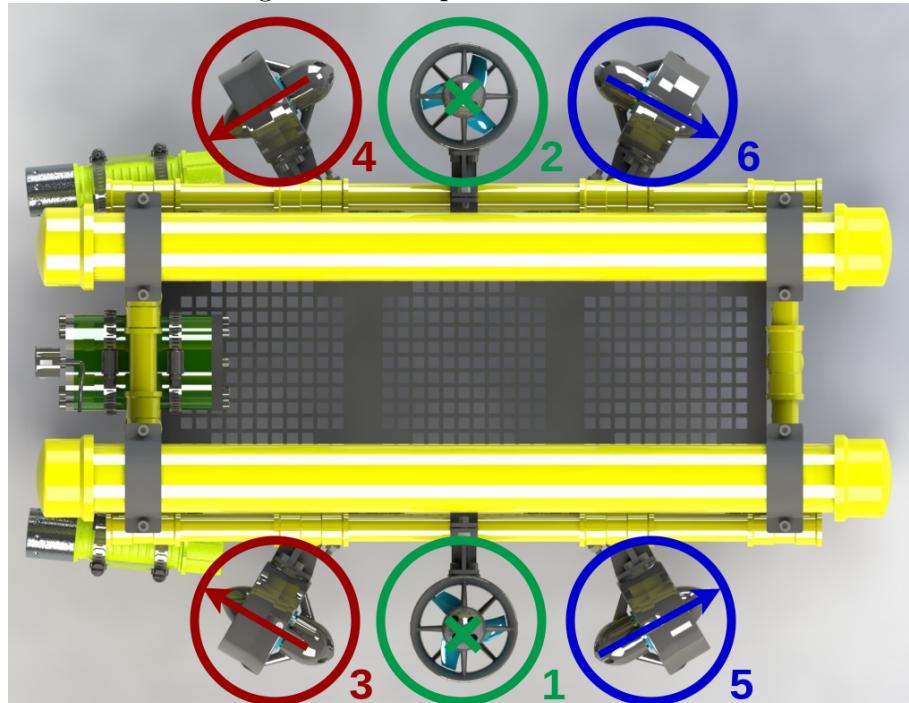
### 4.3 Forças de Propulsão

As forças de propulsão, representadas pela Equação 6, são as forças em cada grau de liberdade gerada por cada motor. Na Equação 6, a matriz  $B$  representa a relação geométrica do vetor de direção da força de cada propulsor com os seis graus de liberdade, na qual cada linha um dos graus de liberdade e cada coluna representa um propulsor do veículo, os quais foram numerados de acordo com a Figura 4.1. Na matriz existem termos que não foram apresentados, esses estão descritos na Tabela 4.3 e nas Equações 8.

$$\tau = Bu \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cos(\alpha_3) & \cos(\alpha_4) & -\cos(\alpha_5) & -\cos(\alpha_6) \\ 0 & 0 & -\sin(\alpha_3) & \sin(\alpha_4) & -\sin(\alpha_5) & \sin(\alpha_6) \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \sin(\gamma_3) & -d_4 \sin(\gamma_4) & -d_5 \sin(\gamma_5) & d_6 \sin(\gamma_6) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Figura 4.1: Propulsores do veículo



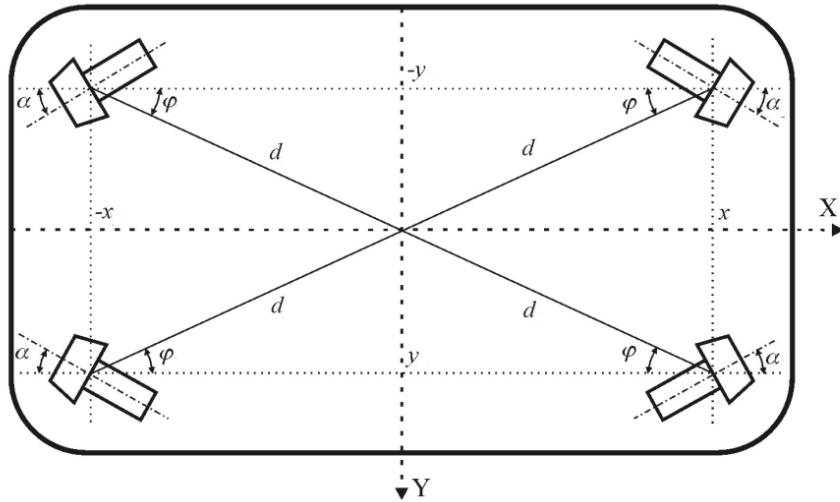
Fonte: Autores

Tabela 4.4: Tabela de descrição dos parâmetros da Equação 7

Símbolo	Descrição
$\alpha_n$	módulo do ângulo entre eixo do motor com eixo x do veículo
$x_n, y_n, z_n$	coordenadas dos motores em relação a posição de referência (CoG)
$d_n$	distância do motor para o CoG no plano XY
$\gamma_n$	soma de $\alpha$ e $\varphi$
$\varphi_n$	ângulo entre eixo x do veículo e reta que parte do CoG para o motor no plano XY

$$\begin{aligned}
 \alpha_n &= 30^\circ \\
 d_n &= \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \\
 \gamma_n &= \varphi_n + \alpha_n \\
 \varphi_n &= \tan^{-1}\left(\frac{y_n}{x_n}\right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Figura 4.2: Visualização de parâmetros da matriz da Equação 7 em vista superior de representação do veículo.



Fonte: Adaptada de [11]

A obtenção da matriz da Equação 7 é realizada através do cálculo das projeções dos vetores de força dos propulsores em cada grau de liberdade da movimentação do veículo. Para isso, os trabalhos [6] [8] [7] [9], [?] e principalmente [11] foram utilizados como guias. Os parâmetros da matriz são medidas geométricas que também foram obtidas com o *software CAD* de modelagem do veículo, seus valores estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.5: Tabela de valores dos parâmetros da Equação 7

$x_1$	-0.0277	m
$y_1$	0.1932	m
$x_2$	-0.0277	m
$y_2$	-0.1932	m
$\alpha_n$	30	°
$d_3$	0.2188	m
$d_4$	0.2188	m
$d_5$	0.2519	m
$d_6$	0.2519	m
$\varphi_3$	88.9221	°
$\varphi_4$	88.9221	°
$\varphi_5$	78.0432	°
$\varphi_6$	78.0432	°

Dessa forma, se conclui a modelagem da força de propulsão do veículo. A partir dessa matriz é possível saber como acionar cada propulsor para se obter uma determinada força em um grau de liberdade do veículo, assim como saber qual a consequência dos acionamentos dos motores para o algoritmo de localização.

#### 4.4 Forças Restauradoras

As forças restauradoras, representadas pela Equação 9 [9], são forças resultantes da atuação do empuxo no centro de flutuabilidade do pedo no centro de gravidade do veículo, que se comporta como um corpo rígido imerso em um fluído. A descrição dos parâmetros da Equação 9 pode ser observada na Tabela 4.4.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} -(W - B)\sin(\theta) \\ (W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ (y_g W - y_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) - (z_g W - z_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (z_g W - z_b B)\sin(\theta) - (x_g W - x_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ (x_g W - x_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) + (y_g W - y_b B)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Tabela 4.6: Tabela de descrição dos parâmetros e variáveis da Equação 9

Símbolo	Descrição
$W$	Módulo da força peso
$B$	Módulo da força empuxo
$\theta$	ângulo <i>yaw</i> do veículo
$\phi$	ângulo <i>roll</i> do veículo
$x_g, y_g, z_g$	coordenadas do centro de gravidade em relação a posição de referência
$x_b, y_b, z_b$	coordenadas do centro de flutuabilidade em relação a posição de referência

No início da desta seção algumas premissas de modelagem do veículo foram estabelecidas e justificadas. Uma dessas premissas consiste na adoção do CoG do veículo como posição de referência para sua modelagem, dessa forma,  $x_g$ ,  $y_g$  e  $z_g$  são iguais a zero. Ademais, também definiu-se que o seria modelado para ser simétrico em relação aos planos XZ e YZ, dessa forma, o  $x_b$  e  $y_b$  ficaram muito próximos ao  $x_g$  e  $y_g$ , portanto, também serão considerados iguais a zero. A partir disso, é possível simplificar a Equação 9 na Equação 10, a qual tem parâmetros com valores detalhados na Tabela 4.4. É importante observar que  $\theta$  e  $\phi$  são variáveis e por isso não tem seu valor definido.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} -(W - B)\sin(\theta) \\ (W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ z_b B\cos(\theta)\sin(\phi) \\ z_b B\sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tabela 4.7: Tabela de valores dos parâmetros da Equação 10

$W$	90.1735	$\frac{kgm}{s^2}$
$B$	92.3277	$\frac{kgm}{s^2}$
$z_b$	-0.0164	$m$

É possível observar com a Tabela 4.4 que o peso é aproximadamente 2 Newtons menor do que o empuxo, logo, o veículo tem flutuabilidade positiva e somente é necessário 2 Newtons de força resultante dos propulsores para baixa para que o

veículo afunde. Outra coisa importante de se observar é que o veículo naturalmente controla *roll* e *pitch*, visto que o termo 4 e 5 do vetor da Equação 10 no intervalo de zero a  $\frac{\pi}{2}$  é negativo e de  $-\frac{\pi}{2}$  a zero é positivo, sempre levando esses ângulos pra zero.

## 4.5 Força de Amortecimento

A força de amortecimento ou arrasto, que é representada pela Equação 11, é a força contraria ao movimento que é proporcional a velocidade do veículo. Na Equação 11,  $D_l$  representa uma matriz de coeficientes lineares do arrasto e  $D_q$  uma matriz de coeficientes quadráticos do arrasto. De acordo com [7], esse termo ocorre devido a 4 fenômenos, dos quais somente o derramamento de vórtices, representado pela Equação 12, tem grande influência e pode ser modelado fenomenologicamente. Os parâmetros da Equação 12 tem sua descrição na Tabela 4.5 e valores na Tabela 4.5.

$$D = D_l v + D_q v^2 \quad (11)$$

$$D_q = - \begin{bmatrix} \frac{\rho C_d A_{fx}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho C_d A_{fy}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho C_d A_{fz}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\rho C_d A_{fz}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho C_d A_{fz}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho C_d A_{fy}}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Tabela 4.8: Tabela de descrição dos parâmetros e variáveis da Equação 12

Símbolo	Descrição
$C_d$	coeficiente de arrasto
$\rho$	densidade do meio
$A_{nf}$	área projetada no eixo n

Tabela 4.9: Tabela de valores dos parâmetros da Equação 12

$\rho$	1023	$\frac{kg}{m^3}$
$C_d$	1.17	<i>Adimensional</i>
$A_{xf}$	0.04705	$m^2$
$A_{yf}$	0.08222	$m^2$
$A_{zf}$	0.115115	$m^2$

## 5 Validação de projeto

Nessa seção será discutido como a simulação deve ser realizada para validação dos requisitos de projeto, assim como a configuração do ambiente virtual submarino.

### 5.1 Módulos de simulação

A simulação fidedigna de um veículo submarino deve contar com a simulação dos atuadores, sensores e da física de corpo rígido debaixo d'água. Com o objetivo de obter uma simulação que incluísse todos esses tópicos, algumas soluções de *software* disponíveis serão adotas e algumas desenvolvidas, como está descrito a seguir.

#### Sensores, atuadores e física

A função de simular o comportamento de um robô no meio com seus sensores e atuadores é tarefa de um simulador de robótica. A Tabela 5.1 mostra as alternativas de simuladores que possuem funcionalidades essenciais para validação de um robô submarino. Dentre as cinco alternativas apresentadas, três delas utilizam o simulador Gazebo [12]: UWSim (do inglês *Underwater Simulator*), UUV (do inglês *Unmanned Underwater Vehicle Simulator*) e USVSim (do inglês *Unmanned Surface Vehicle Simulator*). Dentre esses, o USVSim é o mais completo, pois dispõe de quase todas as funcionalidades analisadas.

Tabela 5.1: Tabela comparativa de simuladores e suas funcionalidades

Simulator	Hydrodynamics	Hydrostatics	Thruster	Fins	Pressure Sensor	GPS	DVL	Realistic Rendering	Contact Dynamics	Wind	Waves	Water Currents
UWSim	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓, osgOcean	✓	✗	✓	✗
UUV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Stonefish	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓, custom	✓	✓	✓	✓
URSim	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓, Unity	✗	✗	✓	✗
USVSim	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Fonte: [13]

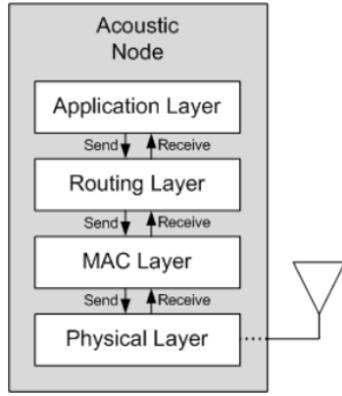
Recentemente, a Open Robotic lançou o Ignition, um novo simulador de robótica que substituirá o Gazebo. Pelo fato desse simulador incorporar todas as funcionalidades descritas na Tabela 5.1, ele foi selecionado para ser o *software* de simulação. Ademais, no Ignition é possível carregar um ambiente submarino 3D e o veículo, sendo possível visualizar, mas também obter dados simulados de sensores, controlar motores e simular a interação do robô com o ambiente ao seu redor.

## Comunicação

Apesar do Ignition possibilitar a simulação dos motores e sensores do veículo, a simulação da comunicação por meio sensor acústico é uma funcionalidade que não consta no *software*. Portanto, serão desenvolvidos *plugins* para o *software* que simulam as peculiaridades desse tipo de sensor. Os *plugins* devem simular atraso da onda sonora na água, ruído e atenuação.

Para simular a comunicação, foi escolhida preliminarmente a biblioteca AUVNetSim [14], que contém uma grande variedade parâmetros e protocolos para redes acústicas subaquáticas. Na simulação de cada nó acústico nessa biblioteca, a comunicação é realizada por troca de mensagens curtas entre as camadas que podem ser configuradas na ordem descrita na Figura 5.1.

Figura 5.1: Estrutura de programação de um nó acústico AUVNetSim



Fonte: [14]

Outros ferramentas disponíveis no mercado fornecem mais funcionalidades do que a AUVNetSim, como a Network Simulator (NS-3), a SUNSET ou a Aqua-Sim [15]. Contudo, AUVNetSim foi selecionada por ser de código aberto, possuir manual de utilização e ser de fácil integração e manutenção [14].

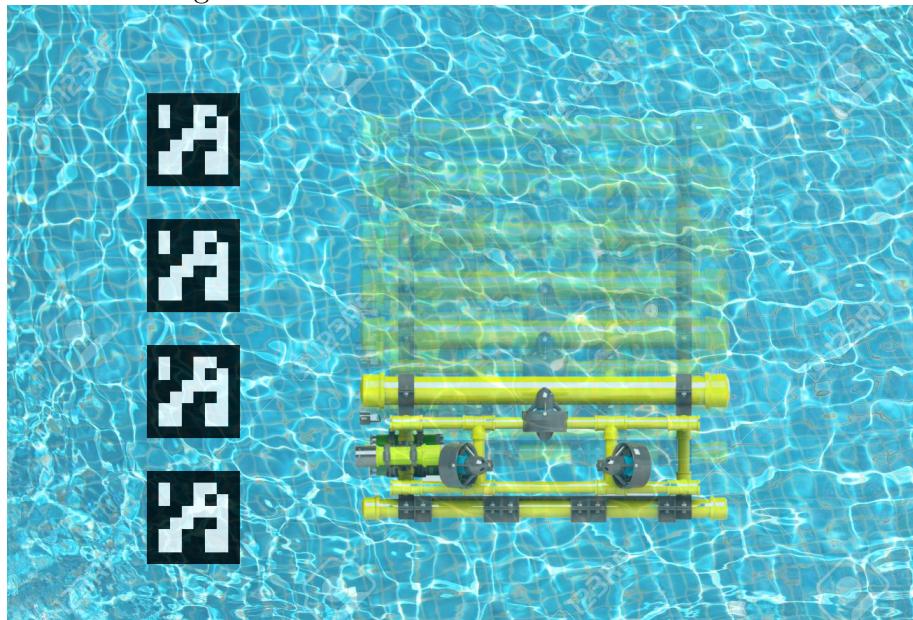
De forma a simular a comunicação com o protótipo, a AUVNetSim será integrada com o *framework* ROS (do inglês *Robot Operating System*). Do mesmo modo, ainda serão estudados, avaliados e testados outros protocolos propostos na literatura com o propósito de se obter uma configuração satisfatória e que se aproxime do mundo real na simulação.

## 5.2 Missões

### Submersão e emersão controlada

Essa missão consiste em submergir e emergir o ROV a uma determinada profundidade, como pode ser visto na Figura 5.2. Esse procedimento será executado tanto com controle manual de velocidade, como também com controle automático, no qual o ROV se desloca ao longo de um caminho previamente estabelecido. Além disso, Arucos serão posicionados ao longo de todo o trajeto para obtenção de uma medição mais precisa de profundidade.

Figura 5.2: Missão de submersão e emersão



Fonte: Autores

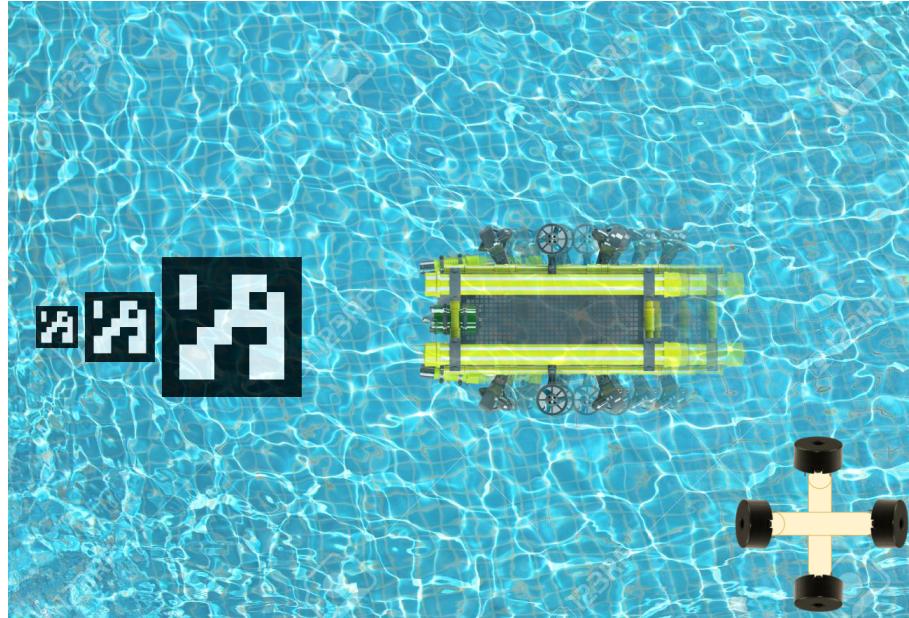
Dessa forma, os requisitos 2, 6 e 7 (apresentados na Seção 2) seriam validados, visto que, para a execução dessa tarefa, o ROV deve ser capaz de ir para uma posição previamente conhecida, localizar os Arucos e submergir e emergir de forma controlada.

### Teste de velocidade e trajetória circular

O requisito 3 determina a velocidade máxima que o veículo deve atingir. Então, é necessário que haja algum teste em que os motores do veículo operem na máxima capacidade de modo a se verificar se a velocidade determinada pode ser alcançada. O ROV foi projetado para ter mais velocidade em *surge*, de forma a se deslocar mais rápido ao se mover para frente. Nesse contexto, o teste de velocidade consiste em colocar a referência de velocidade no seu valor máximo e medir a velocidade de deslocamento do ROV nesse trecho, porém essa medição é pouco precisa com a configuração de sensores atuais.

Portanto, para medir a velocidade, serão posicionados Arucos de diferentes tamanhos e o sistema de SBL. A configuração do ambiente de teste pode ser observada na Figura 5.3.

Figura 5.3: Missão de velocidade máxima e seguimento de trajetória



Fonte: Autores

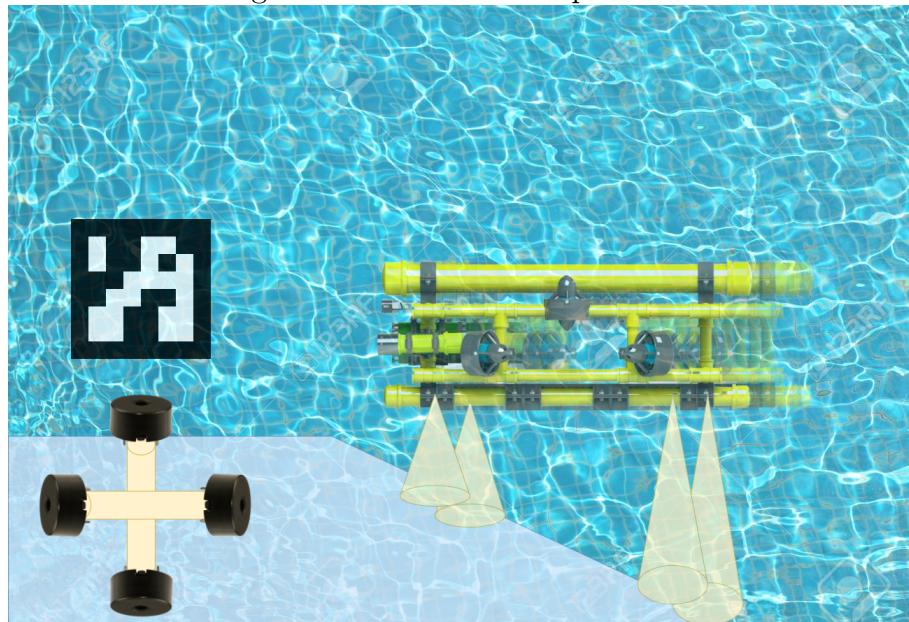
Outra missão que será executada nessa mesma configuração é a execução de uma trajetória circular, para validação dos requisitos 4, 6 e 7. Ao se executar a trajetória circular, mantendo-se a profundidade e mantendo-se os Arucos no campo de visão da câmera, pode-se usar o armazenamento da trajetória para validar se o requisito

de seguir uma trajetória realmente foi cumprido.

### Mapeamento de rampa

A validação do requisito 5, que se refere ao mapeamento do leito marinho, pode ser feito através da utilização de um terreno conhecido. Então, propõe-se aqui a execução do simples mapeamento de uma rampa. Caso a inclinação da rampa seja semelhante ao do mapeamento, pode-se afirmar que o sistema funciona. O mapeamento não será muito detalhado, visto que irá se adquirir somente informação de 4 pontos, medidos com sensores de distância ultrassom abaixo do ROV. Portanto, um cenário simples como uma rampa é adequado para validação. Além disso, também se necessita do Aruco para posicionamento do ROV, como mostra a Figura 5.4.

Figura 5.4: Missão de mapeamento



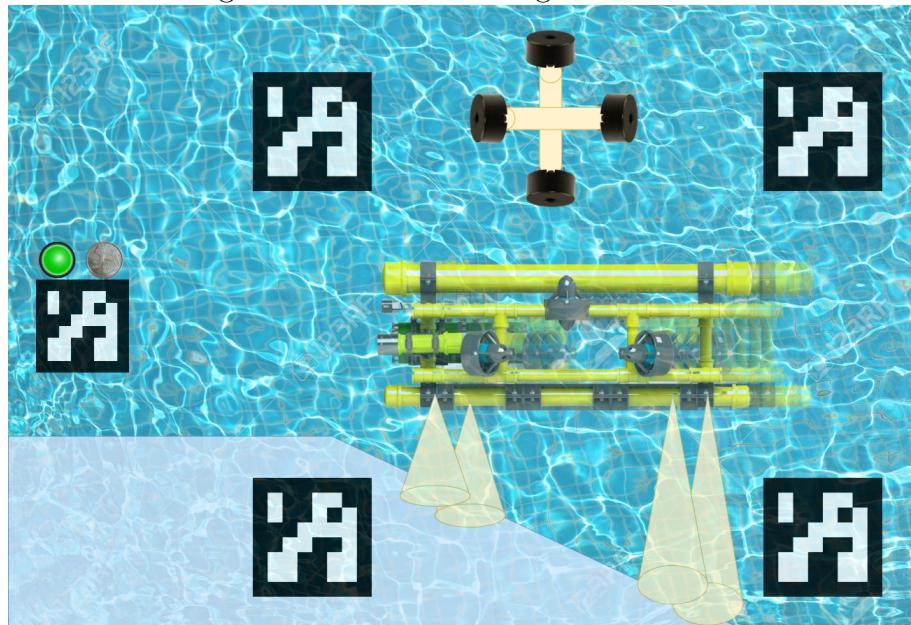
Fonte: Autores

### Resgate da Moeda

O requisito 8 determina que o ROV deve ser capaz de atender um pedido de socorro. Para a validação desse requisito, o BROV deve localizar a caixa de resgate, representada pelo aruco mais à esquerda da Figura 5.5. Além disso, deve esperar o

led presente na caixa acender, para, a partir daí, se aproximar e capturar a moeda com seu imã e retornar a superfície. Esse teste não só valida o requisito 8, mas como todos os citados anteriormente. Para esse teste, tanto a localização por Aruco como a por SBL serão utilizados.

Figura 5.5: Missão de resgate da moeda



Fonte: Autores

## Referências

- [1] Liam Paull, Sajad Saeedi, Mae Seto, and Howard Li. AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1):131–149, 2014.
- [2] Obaid Ur-Rehman and Natasa Zivic. Wireless communications. *Signals and Communication Technology*, 19(1):7–21, 2018.
- [3] Carlos R Rocha, Rogério M Branco, Lais A Cruz, Marcos V Scholl, Matheus M Cezar, and Felipe D Bicca. Design Aspects Of An Open Platform For Underwater Robotics Experimental Research. (June 2016), 2014.
- [4] Blue Robotics. BlueROV2.
- [5] Tigre. Ficha Técnica - Linha Roscável, 2009.
- [6] Gianluca Antonelli. *Underwater Robots Fourth Edition*. Springer International Publishing AG, 4th edition, 2018.
- [7] Thor I Fossen. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons, 2011.
- [8] T.I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, 1994.
- [9] J. Vervoort, Nijmeijer, and Wang. Modeling and control of an unmanned underwater vehicle title: Modeling and control of an unmanned underwater vehicle.
- [10] Matthieu Ancellin and Frédéric Dias. Capytaine: a Python-based linear potential flow solver. *Journal of Open Source Software*, 4(36):1341, apr 2019.
- [11] J. Garus. Optimization of thrust allocation in the propulsion system of an underwater vehicle. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 14:461–467, 2004.

- [12] Nathan Koenig and Andrew Howard. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(IEEE Cat. No. 04CH37566), volume 3, pages 2149–2154. IEEE.
- [13] Jack Collins, Shelvin Chand, Anthony Vanderkop, and David Howard. A review of physics simulators for robotic applications. *IEEE Access*, 9:51416–514131, 2021.
- [14] Josep Miquel Jornet Montana. Auvnetsim: A simulator for underwater acoustics networks. Technical report, Massachusetts Institute of Technology. Sea Grant College Program, 2008.
- [15] Geeta Godi et al. Survey on simulators for underwater sensor networks. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(13):1719–1728, 2021.