



# **Projeto e Prototipagem de um Barco Controlado Remotamente**

**Ana Carolina Rodrigues Ferreira**

**Bragança, Portugal  
Dezembro de 2020**



# **Projeto e Prototipagem de um Barco Controlado Remotamente**

**Ana Carolina Rodrigues Ferreira**

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de  
Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Industrial  
No âmbito da dupla diplomação com o CEFET-RJ*

Orientada por

**Paulo Victor Gomes dos Santos**

**José Alexandre de Carvalho Gonçalves**

**José Luís Sousa de Magalhães Lima**

**Bragança, Portugal**

**Dezembro de 2020**

## **Agradecimentos**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio e confiança depositados em mim durante minha vida. Sem vocês eu não seria capaz de conquistar e viver tudo que pude até hoje.

Agradeço às duas instituições que me acolheram e me deram a oportunidade de realizar o programa de Dupla Diplomação, além de desenvolver esse projeto, CEFET/RJ Campus Angra dos Reis e Instituto Politécnico de Bragança.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Paulo Victor que tem acompanhado minha trajetória há anos no CEFET. Sempre empático e paciente, me motivou e auxiliou em diversos momentos, tanto neste trabalho quanto durante toda minha vida acadêmica.

Agradeço aos meus orientadores José Gonçalves e José Lima por terem aceito prontamente a participar desse projeto e por toda ajuda fornecida durante esse processo.

Gostaria de agradecer ao João Rocha e ao Jorge Henrique pelos conselhos valiosos me fornecidos durante o processo de construção do molde e do modelo do barco.

Ao meu querido Aleksander pelo carinho, atenção, paciência e confiança. Sua parceria me motiva a continuar lutando pelos meus sonhos. Ich liebe dich.

Por fim, gostaria de agradecer à Adriana Gesualdi, que tem me ajudado a enxergar a vida de forma mais leve e colorida. Você foi parte essencial na realização desse trabalho e continua sendo em minha vida.

## Resumo

A utilização de impressão 3D como método de fabricação tem crescido nos últimos anos por conta da grande redução de tempo e custo quando comparada aos métodos tradicionais, além da liberdade na alteração do design e possibilidade de simulação dos modelos desenvolvidos. O objetivo deste trabalho foi fabricar um protótipo de um barco controlado remotamente e calcular as equações do movimento do mesmo. Foram realizadas a modelagem 3D e dimensionamento de um molde para posterior impressão em PLA, que foi utilizado para construir o protótipo por laminação em fibra de vidro. Com o auxílio do dimensionamento gerou-se as equações de movimento através do Método de Kane, utilizadas posteriormente para simular a trajetória de movimento do modelo ao longo do tempo. Foram ainda desenvolvidos algoritmos para efetuar o controle remoto e de movimento do protótipo utilizando módulos de comunicação por rádio frequência e outros componentes eletrônicos. Os componentes eletrônicos foram montados no protótipo construído e foi possível estabelecer a comunicação e movimento entre os elementos. O processo de laminação em fibra de vidro foi bem sucedido, porém devido instabilidades durante a transmissão de dados entre os módulos de comunicação, não foi possível colocar o protótipo na água para validação do projeto.

**Palavras chave:** Prototipagem; Barco controlado remotamente; Método de Kane; Fibra de vidro.

## **Abstract**

The application of 3D printing as manufacturing method increased in the last years motivated by the loss of time and money when compared with the traditional manufacturing methods, as well as the freedom in the design modifications. The goal of this work was to build a remote-controlled boat prototype and to calculate its equations of motion. The 3D modelling and dimensioning were conducted in order to manufacture a 3D printed PLA mould, which was used to make a fiberglass model. The data provided by the dimensioning was used to calculate the equations of motion through the Kane's Method, with which was possible to simulate its trajectories of movement through time. Algorithms were develop to perform the remote and movement control of the prototype with a radio-frequency module and electronic components. The electronic components where assembled inside the prototype and became possible to establish the communication between the elements. The lamination process was successful, but due to instability during data transmission between the communication modules, it was not possible to put the prototype in the water for validation of the project.

**Keywords:** Prototyping, Remote-controlled boat; Kane's Method; Fiberglass.

# Índice

Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivações e Objetivos .....	2
1.2. Estrutura do Trabalho .....	2
2. Referencial Teórico .....	4
2.1. Fibra de Vidro e Impressão 3D.....	4
2.2. Modelagem .....	6
2.3. Classificação dos Barcos .....	8
2.3.1. Hidroplanos .....	8
2.3.2. Monocascos .....	9
2.3.3. Multicascos.....	11
2.4. Nomenclatura.....	11
2.5. Estabilidade.....	13
2.5.1. Estabilidade Transversal.....	15
2.6. Equações do Movimento .....	17
2.6.1. Obtenção das Equações .....	18
2.7. Controle de Direção e Movimento.....	19
2.7.1. Hélice.....	19
2.7.2. Leme .....	20
2.8. Componentes Elétricos .....	20
2.8.1. Motor DC e Ponte H.....	20
2.8.2. Servomotor .....	22
3. Materiais e Métodos .....	23
3.1. Estabilidade inicial.....	23

3.1.1.	Centro de Gravidade .....	23
3.1.2.	Centro de Flutuação .....	25
3.1.3.	Raio Metacêntrico.....	31
3.2.	Fabricação do Modelo .....	32
3.2.1.	Impressão do Molde .....	32
3.2.2.	Preparação do Molde .....	35
3.2.3.	Laminação com Fibra de Vidro .....	37
4.	Simulação Dinâmica.....	47
4.1.	Análise Cinemática .....	47
4.2.	Análise Cinética .....	49
5.	Controle Remoto do Protótipo.....	54
5.1.	Circuito Eletrônico.....	54
5.1.1.	Microcontrolador .....	54
5.1.2.	Motor e Servomotor .....	54
5.1.3.	Comunicação por Rádio Frequência.....	55
5.2.	Programação Preliminar .....	56
5.3.	Programação da Comunicação por Rádio Frequência .....	57
6.	Montagem do Barco .....	61
7.	Conclusões e Sugestões .....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
	ANEXOS .....	68

## Lista de Figuras

Figura 1 – Otimização de uma peça através da aplicação do método de impressão 3D. Adaptado de: (Wang, 2016, apud Kang & Ma, 2017, p. 164).....	5
Figura 2 – Fabricação e montagem do molde em ABS reforçado com fibra de carbono. Fonte: Post et al., 2018. ....	6
Figura 3 – Curvas hidrostáticas. Fonte: Tupper, 2004. ....	7
Figura 4 – Casco gerado pela criação de planos. Fonte: Autoria própria.....	8
Figura 5 – Casco hidropiano. Fonte: <a href="http://www.rcboatcompany.com/SG121H.html">http://www.rcboatcompany.com/SG121H.html</a> . Acesso em 15/05/2020. ....	9
Figura 6 – Modelo monocasco. Fonte: (Sweet, 2007, apud Varghese, 2010, p. 36.....	10
Figura 7 – Vista transversal de monocascos (“V” moderado acima e “V” profundo abaixo). Fonte: (Mohammad, 2004, apud Eugene et al., 2019, p. 5) .....	10
Figura 8 – Trimarã à vela. Fonte: <a href="https://www.catsailingnews.com/2016/01/masters-of-rc-foiling-mini-40s.html">https://www.catsailingnews.com/2016/01/masters-of-rc-foiling-mini-40s.html</a> .....	11
Figura 9 – Movimento em seis graus de liberdade de uma embarcação. Fonte: (Fossen, 2011).....	12
Figura 10 – Termos das principais partes de uma embarcação. Adaptado de: (Rawson & Tupper, 2001) .....	12
Figura 11 – Representação dos planos de linha média, transverso e de linha d’água. Adaptado de: (Rawson & Tupper, 2001, p. 8).....	13
Figura 12 – Representação gráfica da ação do peso e do empuxo na embarcação. Adaptado de:(Rawson & Tupper, 2001).....	14
Figura 13 - Estabilidade a pequenos ângulos (Molland, 2008). ....	15
Figura 14 – Condição de equilíbrio: (a) estável; (b) neutro; (c) instável. Adaptado de: (Rawson & Tupper, 2001, p. 94).....	17
Figura 15 – Representação do funcionamento da ponte H. Fonte: Patsko, 2006.....	21
Figura 16 – Ponte H em curto-circuito. Fonte:Patsko, 2006 .....	21
Figura 17 – Servomotor utilizado no trabalho. Fonte: Autoria própria.....	22
Figura 18 - Montagem inicial. Fonte: Autoria própria. ....	24
Figura 19 - Projeções longitudinais. Fonte: Autoria própria. ....	26
Figura 20 – Representação da altura dos seguintes pontos (em mm): Metacentro (Mt), centro de gravidade (CG), centro de flutuação (CF) e Linha d’água. Fonte: Autoria própria.....	32

Figura 21 - Impressora do Laboratório de Controlo, Automação e Robótica (LCAR). Fonte: Autoria própria. ....	33
Figura 22 – Arquivo .stl no software de impressão 3D. Fonte: Autoria própria. ....	34
Figura 23 - Proa e popa impressos. Fonte: Autoria própria.....	35
Figura 24 - Molde após primeira lixagem. Fonte: Autoria própria. ....	36
Figura 25 - Modelo após primeira camada de spray primário. Fonte: Autoria própria. .	36
Figura 26 - Modelo após utilização do spray acrílico. Fonte: Autoria própria. ....	37
Figura 27 – Rolete tira bolhas improvisado com um rolo para pintura e anilhas. Fonte: Autoria própria. ....	38
Figura 28 - Molde na base de madeira vedado com plastilina. Fonte: Autoria própria. .	38
Figura 29 - Molde laminado com duas camadas de fibra de vidro. Fonte: Autoria própria.....	40
Figura 30 - Molde laminado e exaustor. Fonte: Autoria própria. ....	40
Figura 31 - Remoção da fibra durante pós processamento do modelo. Fonte: Autoria própria.....	41
Figura 32 – Modelo após segunda 3ª e 4ª camadas de fibra de vidro. Fonte: Autoria própria.....	41
Figura 33 – Acabamento superficial à esquerda antes da lixagem e após a lixagem à direita. Fonte: Autoria própria. ....	42
Figura 34 – Molde e modelo separados. Fonte: Autoria própria. ....	42
Figura 35 – Modelo após serragem e lixagem das bordas. Fonte: Autoria própria.....	43
Figura 36 – Popa do casco com descontinuidades. Fonte: Autoria própria. ....	43
Figura 37 – Popa após aplicação da cola epóxi. Fonte: Autoria própria. ....	44
Figura 38 – Modelo após secagem da última aplicação de resina catalisada e pigmentada. Fonte: Autoria própria.....	44
Figura 39 – Casco furado e lixado para fixação do eixo. Fonte: Autoria própria. ....	45
Figura 40 – Selagem externa para aplicação da resina poliéster na parte interior. Fonte: Autoria própria. ....	46
Figura 41 – Representação gráfica dos sistemas de referência inercial (N) e fixo no barco (B), assim como das coordenadas generalizadas com origem no centro de massa. Fonte: Autoria própria. ....	48
Figura 42 – Trajetória descrita pelo barco simulada através do Método de Kane. Fonte: Autoria própria. ....	52

Figura 43 – Variação das coordenadas generalizadas ao longo do tempo. Fonte: Autoria própria.....	53
Figura 44 – DFRduino Uno utilizado no trabalho. Fonte: Autoria própria.....	54
Figura 45 – Controle e acionamento do motor DC (alimentado por uma fonte de tensão de 12V), módulo L298N, servomotor e joystick utilizando um microcontrolador (alimentado por um notebook). Fonte Autoria própria.....	57
Figura 46 – Montagem da transmissão de dados do controle remoto. Fonte: Autoria própria.....	58
Figura 47 – Circuito a ser montado dentro do barco (recepção de dados do controle remoto). Fonte: Autoria própria. ....	58
Figura 48 – Componentes impressos em PLA para auxílio na montagem dos componentes. Fonte: Autoria própria. ....	61
Figura 49 – Vista superior da montagem do barco. Fonte: Autoria própria.....	62
Figura 50 – Vista lateral do protótipo sobre suporte conectado à fonte de tensão. Fonte: Autoria própria. ....	63

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Dimensionamento inicial centro de gravidade. Fonte: Autoria própria. ....	24
Tabela 2 - Cálculo deslocamento volumétrico. Fonte: Autoria própria. ....	27
Tabela 3 – Multiplicação do braço endireitante vertical pela área da linha d'água e multiplicador de Simpson. Fonte: Autoria própria. ....	28
Tabela 4 - Cálculo deslocamento volumétrico longitudinal. Fonte: Autoria própria. ....	29
Tabela 5 - Multiplicação do braço endireitante horizontal pela área da seção transversal e multiplicador de Simpson. Fonte: Autoria própria. ....	30
Tabela 6 – Tempo aproximado de impressão do casco e outros componentes. ....	34

# 1. Introdução

O estudo a respeito de veículos de superfície não tripulados (*Unmanned Surface Vehicles* – USV) tem crescido continuamente, principalmente motivado pelo aumento da demanda em transações comerciais, estudos científicos e operações militares realizados em águas rasas e profundas (Liu, Zhang, Yu, & Yuan, 2016). Tal fato é impulsionado principalmente pelo setor de segurança nacional e por conta de anormalidades ambientais e mudanças climáticas que carecem ser estudadas (Liu, Zhang, Yu, & Yuan, 2016). USVs são veículos capazes de, sem nenhuma ou quase nenhuma intervenção humana, desempenhar inúmeras tarefas em diversos tipos de ambientes, sejam eles perigosos, tranquilos, em águas calmas ou turbulentas (Breivik, 2010, apud Liu et al., 2016, p.1).

Devido às dificuldades encontradas na operação, controle e navegação em diferentes condições ambientais, como possíveis falhas na comunicação e nos sensores durante o serviço, veículos não tripulados de superfície semi-autônomos ainda são opções mais viáveis frente aos completamente autônomos (Campbell et al., 2012, apud Liu et al., 2016, p. 2). Parte dos USVs existentes são controlados remotamente, possuindo autonomia e duração de carga limitadas, sendo modelos de pequena escala e restritos a experimentos em plataformas laboratoriais. Muitos dos modelos utilizados são barcos comercialmente disponíveis modificados (Liu et al., 2016). Barcos controlados remotamente são bastante usados por exemplo para hobby, em corridas, recolha de amostras e monitoramento (Eugene, Lim, Nirmal, & Lau, 2019). São também utilizados para coleta de dados batimétricos, que fornecem informações sobre a topografia do fundo dos mares, lagos e rios, essenciais ao estudo da vida marinha e garantia da segurança dos navios durante a navegação.

A viabilidade da manufatura aditiva (impressão 3D) de cascos e moldes para fabricação de modelos em fibra de vidro também tem sido abordada em estudos recentes. Barcos em fibra de vidro e de carbono são extensamente utilizados atualmente na fabricação de modelos de até 40 metros de comprimento. Isso deve-se essencialmente ao baixo custo, às propriedades mecânicas e eficiência de tais materiais (Musio-Sale, Nazzaro, & Peterson, 2019).

Ao aliar o uso de softwares de modelagem 3D à manufatura aditiva é possível desenvolver e modificar barcos facilmente, obtendo-se assim modelos com maior precisão geométrica e otimizados de acordo com os critérios de operação exigidos. É possível fazer testes de validação para diferentes materiais, geometrias e espessuras.

(Musio-Sale et al., 2019). Processos convencionais de fabricação de barcos podem levar semanas a meses para serem concluídos (Post, Chesser, Lind, Sallas, & Love, 2018). A construção de moldes reutilizáveis reduz o tempo e dinheiro gastos na fabricação dos barcos (Musio-Sale et al., 2019).

## **1.1. Motivações e Objetivos**

O presente trabalho tem a intenção de unir conhecimentos da área da mecânica e da eletrônica através da construção de um barco controlado remotamente. Para isso, serão realizados um estudo dinâmico, a impressão 3D de um molde em PLA, a laminação deste em fibra de vidro e finalmente o controle remoto por rádio frequência do protótipo.

Tem como objetivo obter as equações de movimento de um modelo 3D, afim de gerar trajetórias do movimento do barco ao longo do tempo, e construir o protótipo com auxílio do modelo dimensionado. Tais equações serão obtidas através do método de Kane utilizando a linguagem de programação Python. Serão apresentados o processo de impressão 3D do molde, a laminação do modelo em fibra de vidro, o desenvolvimento dos algoritmos para controle por rádio frequência do barco e a montagem dos equipamento eletrônicos.

Além disso tem como propósito despertar o interesse dos alunos do IPB e do CEFET/RJ em áreas ainda não exploradas nos respectivos campus, permitindo com que tomem como base o trabalho aqui reportado. Será possível usar o protótipo construído em trabalhos futuros para analisar sua dinâmica, integrar sensores para análises como temperatura, humidade ou observação do leito de rios, ou ainda o efeito da inclusão de hélices e lemes de diferentes geometrias. As equações de movimento calculadas permitirá ainda controlar o barco autonomamente.

## **1.2. Estrutura do Trabalho**

O trabalho está estruturado em sete capítulos. No Capítulo 1 foi apresentado uma breve introdução dos assuntos a serem tratados, motivação e objetivos do estudo desenvolvido.

No Capítulo 2 serão apontados conceitos básicos necessários para que haja a compreensão geral do que foi desenvolvido ao longo da realização do projeto. Tais fundamentações teóricas buscam fazer uma abordagem geral a respeito da utilização da

fibra de vidro e manufatura aditiva, classificação dos barcos controlados remotamente, tipos de movimento, suas características construtivas e componentes eletrônicos, princípios básicos de estabilidade e das equações de movimento.

No Capítulo 3 é feita a descrição pormenorizada de todas as etapas percorridas durante a construção do modelo, passando pelo dimensionamento inicial, impressão e preparo do molde em PLA e laminação deste em fibra de vidro.

No Capítulo 4 é descrito o estudo dinâmico do modelo teórico e a obtenção das equações do movimento através do Método de Kane.

No Capítulo 5 será mostrado o desenvolvimento dos algoritmos responsáveis pelo controle de direção e movimento dos componentes eletrônicos, assim como o controle por rádio frequência destes.

No Capítulo 6 a montagem dos componentes elétricos dentro do protótipo é demonstrada.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentados os resultados, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Referencial Teórico**

### **2.1.Fibra de Vidro e Impressão 3D**

A construção de um barco de navegação eficiente exige conhecimento em campos como estabilidade, hidrostática, dinâmica, resistência e materiais. São necessários diversos dimensionamentos e análises para se obter um modelo que opere e corresponda ao objetivo desejado. Conhecimentos aplicados da engenharia naval permitem dimensionar barcos de forma precisa a partir do estudo de fatores como a influência de determinados designs na velocidade, estabilidade e resistência do barco quando submetido a variadas condições. Busca-se então, a partir de diversas iterações, otimizá-lo de forma a satisfazer as condições iniciais impostas, conforme a performance final desejada.

Muitos barcos existentes são feitos a partir de modelos já existentes ou a partir de pequenas alterações dimensionais visando a adequação à necessidade do usuário (Nasseh, 2010). Por milênios os barcos foram contruídos em madeira a partir da junção de diferentes partes para criar um único casco sólido, através da utilização de materiais como cordas, colas e pregos. A maior dificuldade encontrada era como manter as partes em movimento unidas, além da corrosão e degradação dos materiais utilizados. Com a revolução industrial no século XIX, o metal passou a ser utilizado na construção de cascos. Apesar do grande avanço na resistência e durabilidade do material, a construção dos barcos era realizada de forma semelhante aos feitos de madeira, enfrentando problemas parecidos (Musio-Sale et al., 2019).

No século XX, com a adoção da soldadura de metais, os barcos puderam então ser construídos sem nenhuma descontinuidade estrutural em suas superfícies. Foi também quando surgiu a aplicação da fibra de vidro em moldes reutilizáveis de madeira na produção de barco de pequena escala, em resposta à grande demanda para produção de baixo custo. Tais tecnologias foram primordiais na solução de problemas da construção naval da época, como fragilidade das montagens, altos custos de produção, isolamento do casco para evitar a entrada de água e a necessidade de manutenção periódica (Musio-Sale et al., 2019).

Apesar das novas possibilidades que a soldadura e a fibra de vidro trouxeram para a fabricação de barcos, o tempo de fabricação dos modelos através das técnicas convencionais pode durar de semanas até meses (Post et al., 2018). Como resposta à

necessidade de fabricar moldes mais rapidamente, mais eficientes e com custos relativamente bem menores (Musio-Sale et al., 2019), a utilização da manufatura aditiva tem sido estudada por diversos autores, mostrando-se inclusive como um potencial substituto dos atuais métodos de fabricação, como a fundição (Kang & Ma, 2017).

A impressão 3D permite criar protótipos, estruturas interiores, carcaças e moldes em diversos tipos de materiais, como ceras, plásticos, cerâmica e metal (Kang & Ma, 2017). Através dos softwares simulação e modelagem 3D é possível otimizar projetos a partir de simulações computacionais, realizando análises estruturais, mecânicas, dinâmicas, entre outras. Pode-se então averiguar, por exemplo, se o protótipo construído representa o design desejado, ou ainda prever se o molde a ser fabricado será capaz de suportar as solicitações a que estará submetido durante operação. A Figura 1 exemplifica um processo de otimização da fabricação de uma peça pelo método de manufatura aditiva. Como será mostrado no Capítulo 3, um molde de barco de pequenas dimensões foi desenhado e impresso em PLA para laminação em fibra de vidro.

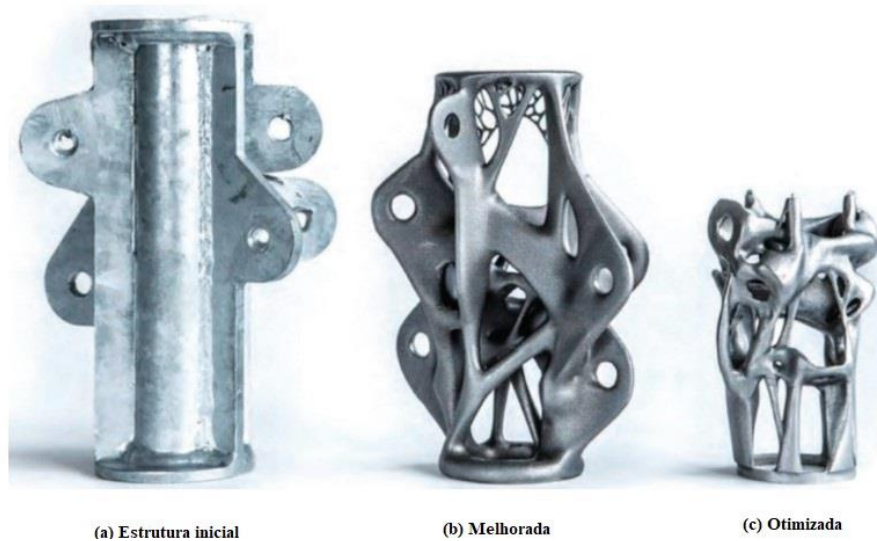


Figura 1 – Otimização de uma peça através da aplicação do método de impressão 3D. Adaptado de: (Wang, 2016, apud Kang & Ma, 2017, p. 164).

Em 2018 um projeto desenvolvido no Laboratório Nacional de Oak Ridge analisou a viabilidade da construção de moldes para fabricação de barcos através da manufatura aditiva. Um molde foi então modelado, fabricado, usinado e montado (Figura 2). O material utilizado foi ABS reforçado com fibra de carbono, e foi fabricado com uma

espessura extra para que este pudesse passar por um acabamento superficial (Post et al., 2018).



Figura 2 – Fabricação e montagem do molde em ABS reforçado com fibra de carbono. Fonte: Post et al., 2018.

O processo de impressão do molde durou cerca de cinco dias e o custo foi de 27.500 dólares. Para validar o trabalho feito, o molde foi usado na fabricação de um casco através da aplicação de fibra de vidro com um núcleo de espuma. No fim da construção perceberam que houve algumas fissuras e imperfeições transferidas do modelo para o molde devido a aplicação incorreta da fibra, o que não causou impactos na integridade do barco (Post et al., 2018). No subcapítulo 3.2. deste trabalho, que descreve a impressão, tratamento e laminação em fibra de vidro de um molde feito em PLA, uma situação parecida é observada. O modelo final apresentou algumas discontinuidades na popa por conta da geometria dessa região, que dificultou o processo de laminação nessa área.

## 2.2. Modelagem

A modelagem 3D permite a criação de diferentes objetos para impressão 3D. Geralmente o acesso às linhas de construção de um barco é restrito ou de difícil acesso pela falta de documentação eletrônica (Nasseh, 2010). A partir obtenção das linhas de casco e de softwares especializados, é possível estabelecer a curvas hidrostáticas do

modelo (Figura 3), através do cálculo da posição do centro de massa e do centro de flutuação para diversas alturas de linha d'água (Tupper, 2004).

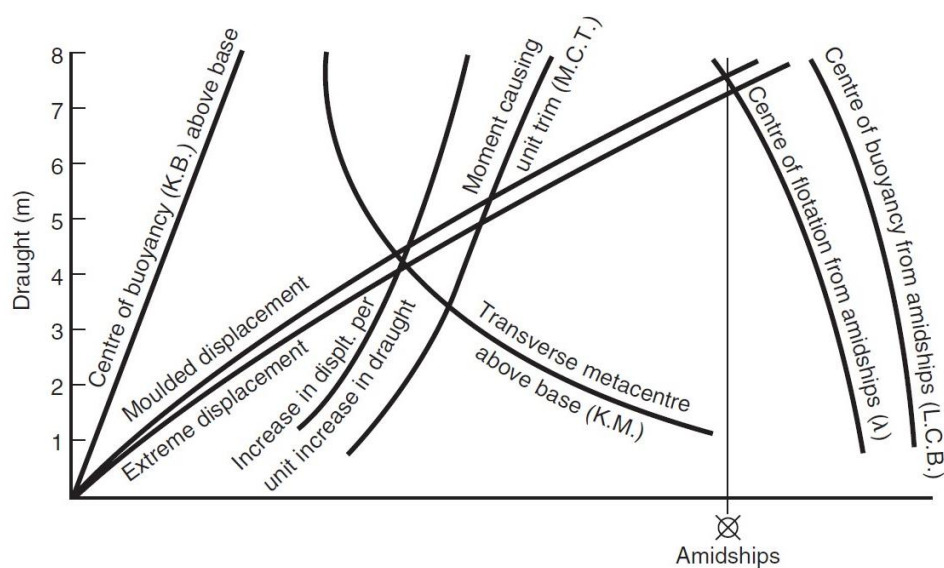


Figura 3 – Curvas hidrostáticas. Fonte: Tupper, 2004.

Softwares de modelagem 3D permitem desenhar cascos com precisão respeitando os critérios e parâmetros exigidos pela indústria naval, além de permitir uma visualização do modelo final (Musio-Sale et al., 2019). Uma das formas de modelagem de cascos é a geração de superfícies a partir de polinômios matemáticos. É possível desenhar planos a partir de informações iniciais básicas e realizar posteriores alterações no projeto facilmente sem que seja necessário reiniciar o processo de modelagem (Nasseh, 2010).

Pode-se ainda ajustar o modelo e realizar testes estruturais variando diversos critérios, como materiais, densidade, escala, espessuras e diferentes alterações no design (Musio-Sale et al., 2019). Uma grande vantagem desses softwares é a possibilidade de salvar o desenho em formato IGES (Initial Graphic Exchange Specification), um tipo de arquivo no qual as informações podem ser lidas posteriormente por diversos outros programas (Nasseh, 2010).

Com softwares específicos utilizados na indústria naval, como *MAXSURF* e *Rhino*, é possível gerar cálculos de hidrostática, estabilidade, navegabilidade e desempenho para diferentes condições marítimas com facilidade. Ao contrário dos programas específicos da indústria naval, que costumam ter preços mais elevados por conta da vasta gama de operações (*Rhino*: licença aproximadamente entre € 500 e € 1000),

existem softwares de uso geral que são mais acessíveis ou até de graça, como o *FreeCAD*. Estes são baseados em computação gráfica, e a partir de um esboço 2D ou 3D, criam-se sólidos e superfícies através de formas geométricas elementares (Nasseh, 2010), como mostrado na Figura 4.

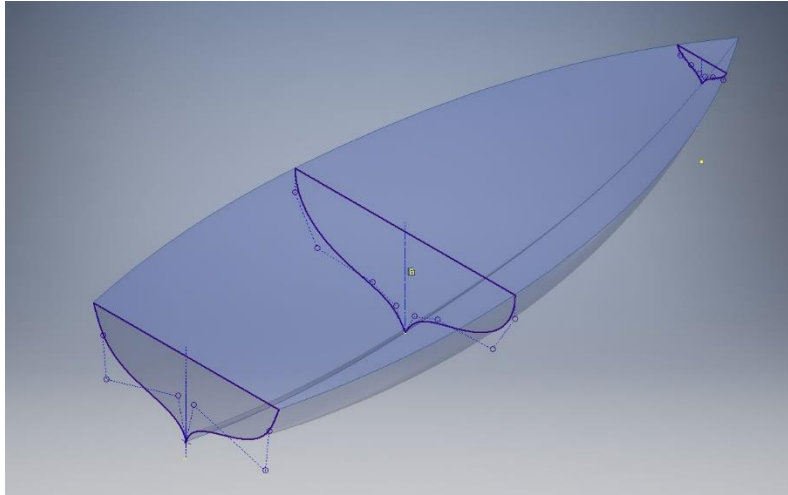


Figura 4 – Casco gerado pela criação de planos. Fonte: Autoria própria.

## 2.3. Classificação dos Barcos

Os barcos controlados remotamente de alta velocidade, segundo Eugene et al., 2019, podem ser classificados da seguinte forma: hidroplanos, monocascos e multicascos. Esses modelos serão apresentados brevemente a seguir.

### 2.3.1. Hidroplanos

São modelos em escala, ou seja, são reproduções de modelos reais existentes. Possuem projeções laterais no casco do barco e uma parte da área central inferior é plana, permitindo que uma camada de ar entre o casco e a água fique confinada. São muito utilizados em competições por ser um dos modelos de casco que conseguem atingir maiores velocidades, já que apenas parte do casco toca a água em altas velocidades, diminuindo assim a resistência do barco na água (Adams, 201, apud Eugene et al., 2019, p. 1).



Figura 5 – Casco hidroplano. Fonte: <http://www.rcboatcompany.com/SG121H.html>. Acesso em 15/05/2020.

Os hidroplanos, como o nome sugere, são modelos planantes. Quando a força de sustentação dinâmica equipara-se ao valor do peso total do barco, a parte frontal do barco sai da água, e este passa a planar (Marshall, 2012, apud Varghese, 2010, p. 35). Uma das grandes desvantagens desse tipo de barco é a facilidade de emborcamento conforme este ganha velocidade ou quando está sujeito a condições climáticas adversas (Eugene et al., 2019).

Existe ainda hidroplanos que, ao invés de projeções laterais saídas do próprio casco, possuem cascos flutuantes adicionais conectados às laterais do modelo (Suwasono et al., 2017, apud Eugene et al., 2019, p. 12). Estes barcos atingem velocidades ainda maiores e apresentam menor chance de virar visto que os cascos laterais estão bastante espaçados, fornecendo maior estabilidade.

### 2.3.2. *Monocascos*

Os monocascos possuem maior espaço interno do que a maioria dos outros modelos, possibilitando melhor e mais fácil distribuição e instalação dos equipamentos dentro do barco. Diferentemente dos hidroplanos, ao invés de confinar o ar entre o casco e a água, conforme ganham velocidade, o ar tende a escoar pelas laterais do barco (Howard, Doane, 2000, apud Eugene et al., 2019, p. 4). Muitos modelos possuem vincos que facilitam a expulsão da água pelas laterais do mesmo. Isso cria uma força vertical que faz com que o casco saia levemente da água, melhorando sua hidrodinâmica.

O design do casco pode variar de acordo com o emprego do mesmo. Os de secção transversal quadrada são muito estáveis em águas rasas e calmas, sendo geralmente, quando em escala real, utilizados para pesca (Sweet, 2007, apud Varghese, 2010, p. 36).

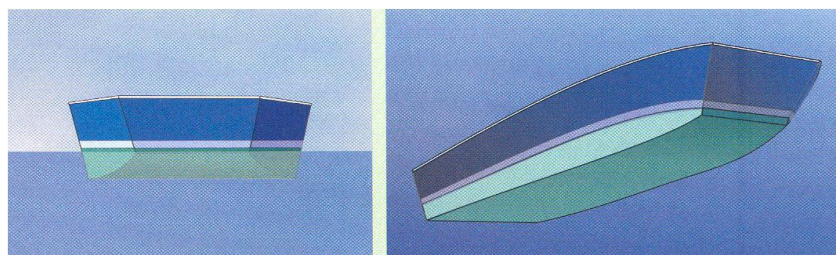


Figura 6 – Modelo monocasco. Fonte: (Sweet, 2007, apud Varghese, 2010, p. 36

Existem ainda os que possuem uma secção transversal em “V” (Figura 7). Quando o ângulo entre o plano horizontal e o casco varia entre 16 e 28°, este é denominado “V” profundo, ou *deep vee*. Este modelo é conhecido por promover uma boa navegabilidade, mesmo em águas turbulentas. Os que possuem ângulo menor que 16° são chamados de “V” moderado, ou *shallow vee*. São capazes de atingir maiores velocidade que os anteriores, mas em contrapartida possuem uma navegabilidade mais complicada que os em “V” profundo (Mohammed, 2004, apud Eugene et al., 2019, p. 3).

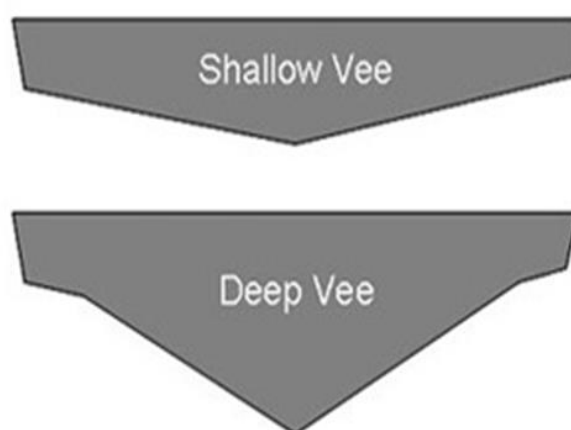


Figura 7 – Vista transversal de monocascos (“V” moderado acima e “V” profundo abaixo). Fonte: (Mohammad, 2004, apud Eugene et al., 2019, p. 5)

### 2.3.3. Multicascos

São modelos que possuem de dois a cinco cascos, variando formas e montagens. Devido à complexidade do modelo quando comparado aos outros tipos de casco, este é o mais difícil de navegar e de construir. O mais conhecido é o catamarã, um híbrido entre o hidroplano e o monocasco em “V” profundo.



Figura 8 – Trimarã à vela. Fonte: <https://www.catsailingnews.com/2016/01/masters-of-rc-foiling-mini-40s.html>

O catamarã possui cascos laterais flutuantes conectados por uma estrutura central mais elevada, criando uma espécie de túnel que permite que o ar que flua pela região central. Uma força de elevação é criada nesta região do barco, diminuindo a força de arrasto atuante e melhorando sua performance (Eugene et al., 2019).

## 2.4.Nomenclatura

Durante a navegação as embarcações movimentam-se com seis graus de liberdade, conjunto de deslocamentos e rotações que definem completamente a posição e rotação do mesmo. A modelagem de tais graus de liberdade resulta num grupo de equações de movimento acopladas que são usadas para simulação e predição do movimento de veículos aquáticos, assim como o controle de sistemas de veículos subaquáticos (Fossen, 2011).

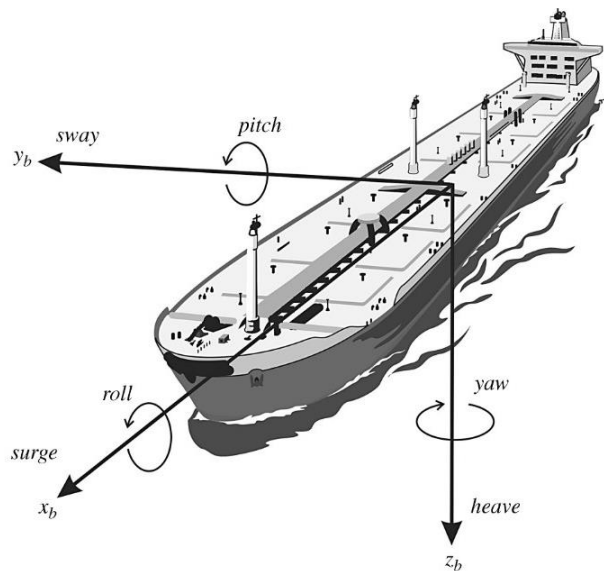


Figura 9 – Movimento em seis graus de liberdade de uma embarcação. Fonte: (Fossen, 2011)

Conforme representado na Figura 9, o movimento no plano horizontal é denominado *surge* quando na direção longitudinal ( $x_b$ ) e *sway* quando na direção lateral ( $y_b$ ). Já *heave* e *yaw* referem-se ao movimento vertical ( $z_b$ ) e a rotação em torno deste eixo, respectivamente. *Roll* é a rotação em torno do eixo  $x_b$  e *pitch* a rotação em torno de  $y_b$ . Algumas das principais partes de uma embarcação e sua nomenclatura estão representados na Figura 10.

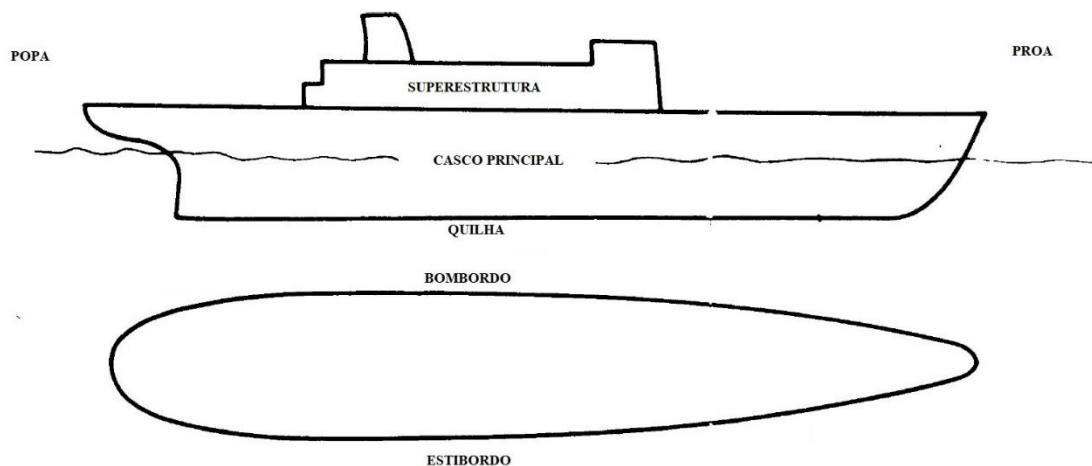


Figura 10 – Termos das principais partes de uma embarcação. Adaptado de: (Rawson & Tupper, 2001)

A maioria das embarcações possui apenas um plano de simetria, sendo este o principal plano de referência, chamado de plano de linha média, ou ainda plano longitudinal. O plano da linha d'água de design ou plano de flutuação é perpendicular ao

plano longitudinal, e pode ou não ser paralelo à quilha. O plano transverso é perpendicular aos plano de linha média e de linha d'água de design. Já os planos de linha d'água são paralelos aos de linha dágua de design e formam ângulos retos com o plano de linha média (Rawson & Tupper, 2001). Tais planos são representados na Figura 11.

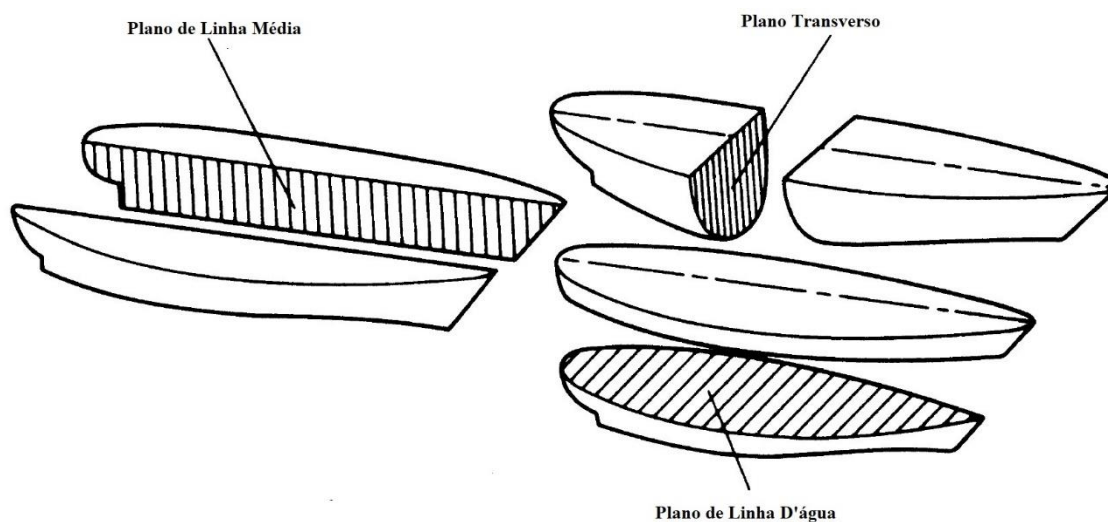


Figura 11 – Representação dos planos de linha média, transverso e de linha d'água. Adaptado de:  
(Rawson & Tupper, 2001, p. 8)

## 2.5. Estabilidade

Assim como todos os corpos no plano terrestre, um corpo livre pairando sobre a superfície da água sofre uma força vertical para baixo por conta da gravidade atuante, denominada peso. Para que o corpo permaneça em equilíbrio na água, é necessário que haja uma força contrária, na mesma linha de ação, e de mesma magnitude ao peso do corpo. Tal força é gerada pelas pressões hidrostáticas agindo normalmente a toda superfície submersa do corpo, e a soma das componentes verticais e horizontais destas igualam-se ao peso, fazendo que o corpo permaneça em equilíbrio (Tupper, 2004).

O centro de massa da embarcação nada mais é do que a representação imaginária da força gravitacional sofrida por toda estrutura concentrada em um único ponto relativamente a um ponto fixo. Analogamente, a força vertical para cima resultante da soma das pressões hidrostáticas, também chamada de empuxo, pode ser representada por um único ponto no barco. Tal ponto denomina-se como centro de flutuação, e localiza-se no centroide do volume de água deslocada (Tupper, 2004). A força gravitacional e o empuxo são consideradas forças restauradoras, e são equivalentes à força elástica em um

sistema massa-amortecedor-mola (Fossen, 2011). A Figura 12 ilustra a posição do centro de gravidade (G) e o centro de flutuação (ponto B) numa embarcação.

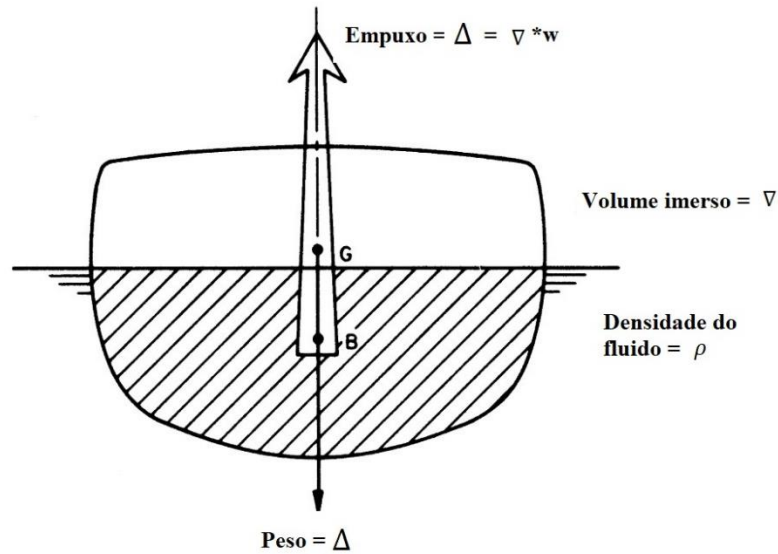


Figura 12 – Representação gráfica da ação do peso e do empuxo na embarcação. Adaptado de: (Rawson & Tupper, 2001)

O empuxo pode ser calculado através da equação 1:

$$B = \rho * g * \nabla \quad (1)$$

Onde  $\nabla$  representa o volume deslocado ou imerso do corpo e  $\rho$  a densidade da água. Nota-se que o centro de flutuação nos dá o peso da água deslocada. Sendo assim, como definido anteriormente, o peso do corpo ( $\Delta = m * g$ ) é igual à massa da água deslocada pelo corpo.

Logo, o volume imerso do corpo é:

$$\nabla = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

Caso os pesos inseridos em um navio sejam movidos, o centro de gravidade, apesar de ser relativo a uma localização fixa, poderá mudar de posição. Diferentemente, a localização do centro de flutuação move-se a todo instante com o movimento do barco. Quanto mais baixa a localização do centro de massa, mais estável a embarcação será. (Sweet, 2007, apud Varghese, 2010, p. 32,33)

As forças atuantes no casco de uma embarcação podem ser divididas em (Fossen, 2011):

- Empuxo, devido à pressão hidrostática, sendo proporcional ao deslocamento gerado pela embarcação;
- Forças hidrodinâmicas, devido à pressão hidrodinâmica, aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade relativa à água.

### 2.5.1. Estabilidade Transversal

Um barco será considerado estável quando, após sofrer perturbações, este for capaz de permanecer ou retornar à sua posição de equilíbrio (Rawson, 2001 apud Varghese, 2010). Quando uma embarcação não está inclinada, ou seja, o ângulo de inclinação é igual a  $0^\circ$ , os centros de gravidade e de flutuação localizam-se na mesma linha de ação vertical. Conforme a embarcação começa a inclinar, este possui um novo centro de flutuação, já que parte do barco passa a estar fora da água, enquanto parte move-se para dentro da água. O ponto de coincidência entre a linha de ação quando o barco está a  $0^\circ$  e a nova linha de ação para quando o barco está inclinado é denominado metacentro, representado pela letra M na Figura 13 (Tupper, 2004).

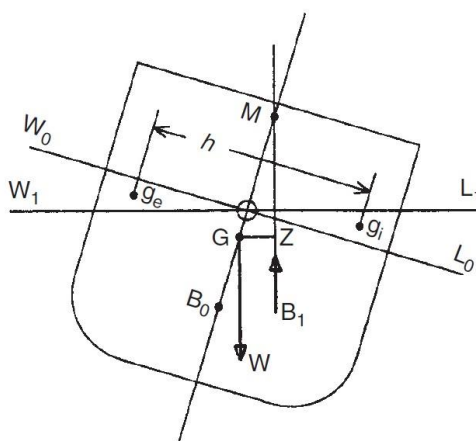


Figura 13 - Estabilidade a pequenos ângulos (Molland, 2008).

O conhecimento da altura do metacentro de um veículo de superfície parcialmente submerso possibilita a realização de cálculos para a determinação da estabilidade inicial do mesmo, permitindo enquadrá-lo em diferentes situações: estável, neutro e instável. Na Figura 13,  $W_0L_0$  e  $W_1L_1$  representam as linhas d'água de um barco antes e após uma determinada inclinação, respectivamente. O centro de flutuação também irá se mover de

$B_0$  para  $B_1$ , devido ao volume  $W_0OW_1$  deslocado para fora da água e ao igual volume  $L_0OL_1$  deslocado para dentro da água (Tupper, 2004).

Caso considere-se  $g_e$  e  $g_i$  os centroides dos volumes fora da água e imerso, respectivamente, e adotando  $g_e g_i = h$ , então:

$$B_0 B_1 = \frac{v * h}{\nabla} \quad (3)$$

Caso  $\nabla$  seja considerado o volume total da embarcação.

Para pequenas inclinações, o metacentro pode ser considerado fixo. Conforme o veículo é inclinado, um braço de alavanca é gerado, representado por  $GZ$  na Figura 13, reta perpendicular à linha de ação do centro de flutuação após a inclinação. Desta forma, o peso do barco, representado por  $W$ , continua fixo (caso não haja movimentação de cargas) e agindo para baixo. Em contrapartida, o centro de flutuação age verticalmente para cima de forma a tentar restaurar a posição original do barco. Nesta situação, o barco está em equilíbrio estável (Tupper, 2004).

Conforme o barco continua a inclinar, o braço endireitante  $GZ$  continua aumentando, fazendo com que o momento restaurador gerado pelo empuxo seja também cada vez maior, até que se atinja o ponto em que o centro de flutuação localiza-se imediatamente abaixo do centro de gravidade ( $GZ = 0$ ). Nesta situação o barco está no que é chamado de equilíbrio neutro, e a mínima perturbação fará com que este vire ou retorne à posição inicial, dependendo do lado em que a perturbação agirá (Tupper, 2004).

O equilíbrio instável ocorrerá quando, ao aumentar ainda mais a inclinação do barco, o centro de flutuação passa a localizar-se à esquerda do centro de gravidade. Nesta situação  $GZ$  torna-se negativo, e as forças restauradoras passam a atuar de forma a virar o barco.  $GM$  é então a altura do metacentro, e assim como  $GZ$ , terá um valor positivo quando o equilíbrio é estável, zero quando o equilíbrio é neutro e negativo quando há um equilíbrio instável (Tupper, 2004). As três condições de equilíbrio estão representadas na Figura 14.

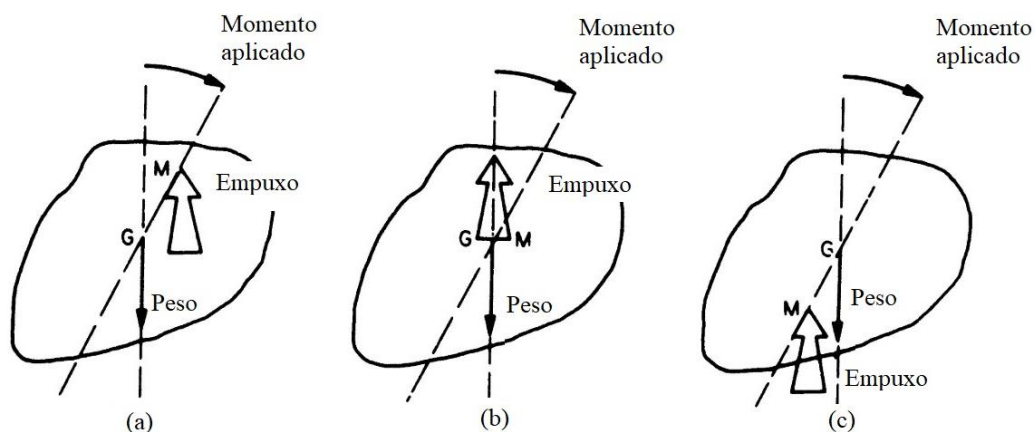


Figura 14 – Condição de equilíbrio: (a) estável; (b) neutro; (c) instável. Adaptado de: (Rawson & Tupper, 2001, p. 94)

## 2.6. Equações do Movimento

A mecânica clássica, apesar de ter surgido no século 17, com Galileu em 1638 e Newton em 1687, apenas no século seguinte foi traga à tona por Euler através do Princípio do Momento Linear (1752) e do Princípio do Momento Angular (1775). Nasceu então a primeira teoria dinâmica da história, sendo o que conhecemos hoje como Método de Newton-Euler (Papastavridis, 2014).

O segundo grande desenvolvimento na área da dinâmica iniciou-se ainda no século 17 através dos estudos de Huygens e Jakob Bernoulli, continuados por Johann Bernoulli, d’Alambert e Lagrange no século 18. Mas foi apenas através das conclusões e desenvolvimentos de tais estudos por Lagrange que surgiu a base do que hoje conhece-se como Mecânica Analítica, ou ainda Mecânica Lagrangiana (Papastavridis, 2014).

Ainda que o Método de Newton-Euler e a Mecânica Lagrangiana sejam considerados, parcialmente, teorias equivalentes, a segunda abordagem mostrou-se muito mais produtiva e promissora não apenas na área da mecânica, mas também da física. Isso deve-se pela capacidade de formulação de um sistema de equações de movimento com pouquíssimas equações, além de fornecer ferramentas teóricas e práticas para a solução de tais sistema, como teoremas de conservação e métodos de aproximação (Papastavridis, 2014).

No presente estudo, as equações dinâmicas do movimento foram obtidas pelo Método de Kane, também conhecido como Formulação Lagrangiana do Princípio de D’Alambert. Tal método permite solucionar equações dinâmicas para sistemas

complexos através de operações simples, tornando-se mais fácil e sistemático de usar quando comparado aos métodos de Newton-Euler e Lagrange (Liu, 2005, apud Santos, 2015, p. 41). Para auxílio na obtenção de tais equações, foi utilizado o software Python.

### 2.6.1. Obtenção das Equações

De acordo com o Método de Kane (Kane, Levinson, 1985, apud Santos, 2015, pp. 39–41), a equação de movimento de um sistema pode ser obtida através da soma das forças ativas generalizadas ( $F_r$ ) com as forças de inércia generalizadas ( $F_r^*$ ):

$$F_r + F_r^* = 0 \quad (4)$$

Kane define então as forças ativas generalizadas de acordo com a equação 5:

$$F_r = \sum_{i=1}^{\vartheta} \mathbf{v}_r^{P_i} \cdot \mathbf{R}_i + {}^N \boldsymbol{\omega}_r^{N_k} \cdot \mathbf{T}_i, \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Em que  $\vartheta$  é o número de corpos do sistema mecânico,  $\mathbf{v}_r^{P_i}$  é a velocidade parcial do corpo  $i$  (sendo  $P_i$  uma partícula do  $i$ -ésimo corpo do sistema),  $\mathbf{R}_i$  é a resultante das forças atuantes em  $P_i$ ,  ${}^N \boldsymbol{\omega}_r^{N_k}$  é a velocidade angular parcial do sistema de referência fixo no corpo  $N_k$  em relação ao sistema de referência inercial  $N$ , e  $\mathbf{T}_i$  a resultante dos torques atuantes em  $P_i$ . Analogamente, as forças de inércia generalizadas são dadas pela equação 6.

$$F_r^* = \sum_i^v \mathbf{v}_r^{P_i} * (-m_i \cdot \mathbf{a}_i) - {}^N \boldsymbol{\omega}_r^{N_k} * (I_i \cdot {}^N \boldsymbol{\alpha}^{N_k} + {}^N \boldsymbol{\omega}_r^{N_k} \dots \times I_i \cdot {}^N \boldsymbol{\omega}_r^{N_k}) \quad (6)$$

Em que  $I_i$  é o tensor de inércia e  ${}^N \boldsymbol{\alpha}^{N_k}$  a aceleração angular de  $N_k$  em relação a  $N$ .

De acordo com Kane e Levinson (1985, apud Santos, 2015, p. 42), velocidades generalizadas são extremamente úteis no cálculo das expressões de velocidade angular de um corpo rígido. Coordenadas generalizadas são um conjunto de  $n$  valores capazes de determinar a configuração de um sistema em um tempo qualquer  $[q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ . As coordenadas podem ser distâncias, comprimentos ou ângulos.

Na realização da simulação dinâmica do trabalho aqui reportado considerou-se um modelo com os seguintes graus de liberdade:  $q_1, q_2$  e  $q_3$ , que determinam a posição do centro de massa do sistema em relação ao referencial inercial, e  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5$  e  $\dot{q}_6$ , que são as velocidades generalizadas, sendo as três últimas o ângulo que o barco faz com

cada orientação  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . As equações de restrições cinemáticas, ou equações de vínculo são:

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, t) = 0 \quad (7)$$

Sendo assim, caso as velocidades generalizadas sejam definidas como:

$$u_r = \dot{q}_r \quad (8)$$

As velocidades parciais são encontradas através da equação 9:

$$\mathbf{v}_r = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{q}} \quad (9)$$

Utilizando tal abordagem é possível obter com rapidez as equações de movimento de um corpo. As equações serão calculadas e derivadas com o auxílio do *Python* para gerar as curvas de trajetória do barco ao longo do tempo, assim como a variação das coordenadas generalizadas ao longo do tempo. Como será observado no Capítulo 4, é possível então variar alguns parâmetros como ângulo do leme e forças aplicadas para então analisar a variação das curvas criadas.

## 2.7. Controle de Direção e Movimento

### 2.7.1. Hélice

A movimentação de qualquer embarcação ou veículo aquático dá-se pela transformação da energia mecânica convertida no motor em propulsão. Tal impulso é transmitido através de algum tipo de equipamento, que no caso dos barcos, é a hélice. Quanto maior a face da pá da hélice, mais água ela é capaz de movimentar. Em contrapartida, gera-se mais atrito (Caterpillar, 2001).

Ao combinarmos determinados fatores, cria-se um impulso no eixo da hélice que é transmitido ao rolamento do mesmo, onde concentram-se todas as forças geradas, causando o movimento do barco. Tais fatores afetam a eficiência das hélices, que pode ser aprimorada se os analisarmos cuidadosamente, sendo eles (Caterpillar, 2001):

- A velocidade de rotação da hélice;
- O ângulo ou passo das pás da hélice;
- O diâmetro e a área das pás.

O ângulo da pá é o ângulo que esta faz em relação à linha de centro do cubo ou núcleo da hélice. Já o passo é a distância necessária para que a pá percorra uma revolução completa em torno do eixo. Uma relação de variação do passo pode ser estabelecida ao dividirmos o passo pelo diâmetro da hélice, parâmetro chave que muitas vezes podem ser

encontrados em catálogos para classificar hélices. Já o diâmetro da hélice nada mais é do que o diâmetro descrito pelas extremidades das pás durante a movimentação. A escolha da hélice pode afetar por exemplo o consumo do barco, a realização de manobras e a eficiência do modelo (Caterpillar, 2001).

### 2.7.2. *Leme*

Estabilidade direcional é o nome dado à facilidade com que o barco tem de se manter em um caminho reto. Fatores como vento, ondas e correntes marítimas são importantes e devem ser levados em conta quanto se trata de grandes embarcações e/ou quando estão sujeitas a altas cargas. Afim de controlar a velocidade e direção de um barco de forma precisa, este deve ser capaz de produzir impulso na proa e popa do casco, que podem ser obtidos através do sistema de propulsão principal (no caso do presente trabalho, motor, eixo e hélice), além de momento rotacional e impulso, obtidos pela inclusão de um leme (Tupper, 2004).

## **2.8. Componentes Elétricos**

### 2.8.1. *Motor DC e Ponte H*

O motor DC é responsável por fornecer o impulso necessário à hélice e promover o movimento do barco. Com o auxílio de uma junta universal, o motor é acoplado ao eixo, que por sua vez conecta-se à hélice. A força mecânica gerada pelo motor transmite torque ao eixo, que é convertido em impulso na hélice.

Para acionar o motor é necessário utilizar um driver ponte H. Este componente permite que se controle a velocidade e sentido de rotação do motor de corrente contínua a partir de sinais elétricos gerados pelo microcontrolador. Assim como o nome sugere, a configuração da ponte H é formada através de quatro chaves mecânicas ou eletrônicas que formam a letra “H”, sendo que o motor está no meio e cada extremo é uma das chaves. Ao acionar duas chaves diagonalmente opostas o motor passa a girar (Figura 15). Isso ocorre pois a corrente flui do pólo positivo para o negativo através do motor. Ao desligar tais chaves e acionar as outras duas chaves, o motor muda o sentido de rotação (Patsko, 2006).

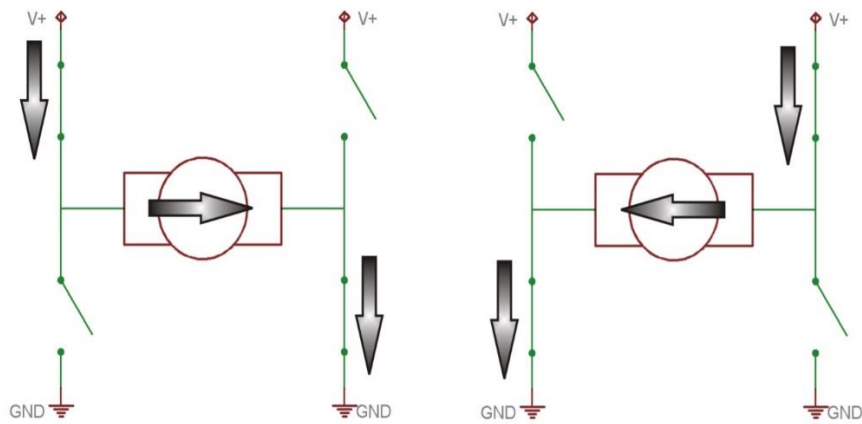


Figura 15 – Representação do funcionamento da ponte H. Fonte: Patsko, 2006

Caso duas chaves paralelamente opostas sejam acionadas, uma tensão entre os terminais é gerada, fazendo com que o componente funcione como freio. Ao desligar todas as chaves o circuito é desligado e o motor para suavemente. Porém, caso duas chaves do mesmo lado sejam acionadas, um curto-circuito é gerado, forçando o motor a girar na direção oposta e a parar imediatamente. Tal ação pode acarretar a queima da fonte de alimentação e qualquer componente conectado ao módulo (Patsko, 2006). A representação da ponte H em curto circuito está na Figura 16.

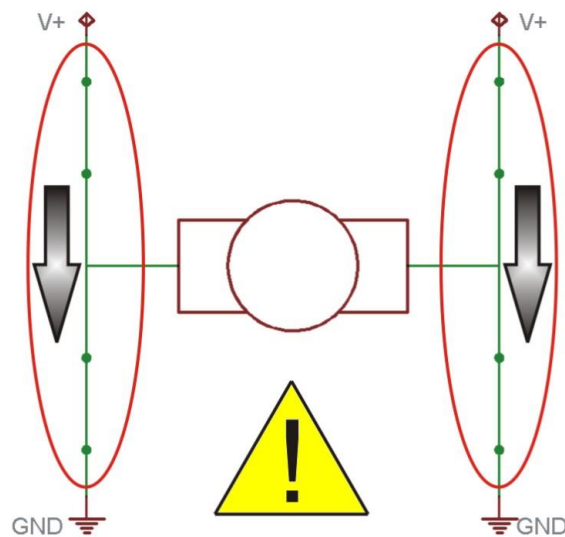


Figura 16 – Ponte H em curto-circuito. Fonte:Patsko, 2006

### 2.8.2. Servomotor

Servomotores são motores bastante utilizados em projetos eletrônicos, como em braços robóticos e modelos controlados remotamente para acionamento de eixos de direção e direcionamento de lemes, por exemplo (Oliveira & Zanetti, 2015, p. 206). Sua rotação pode variar entre 0° e 180° quando for um motor de posição, ou 0° e 360° quando for de rotação contínua. Seu funcionamento ocorre através do envio de um sinal pulsado como entrada de referência chamado PWM (*pulse-width modulation* – modulação por largura de pulso) e normalmente trabalha por corrente contínua (Afonso & Filoni, 2011, p. 274).

Estes componentes são constituídos por um motor DC e engrenagens responsáveis por manterem um torque constante e rotação suave e uniforme em diversas velocidades, além de oferecerem uma boa resistência à sobrecarga. Possuem ainda, em sua maioria, um potenciômetro interno que garante o posicionamento preciso do mesmo, sendo possível movimentá-lo facilmente até o ângulo desejado através de códigos compilados em microcontroladores (Figura 17). Tal potenciômetro (que, em alguns modelos, pode ser um sensor óptico) fornece pulsos que podem ser interpretados como movimento, posição ou direção (Afonso & Filoni, 2011).



Figura 17 – Servomotor utilizado no trabalho. Fonte: Autoria própria.

## 3. Materiais e Métodos

### 3.1. Estabilidade inicial

O presente trabalho tem como objetivo a construção de um protótipo e na obtenção das equações de movimento deste. Foi então desenvolvido um modelo simples, desconsiderando diversos parâmetros para facilitar os cálculos e análise.

Para o dimensionamento inicial do casco é necessário saber o peso aproximado deste quando está em sua carga total máxima, ou seja, quando carregado com todos os componentes a serem montados no barco. Cálculos matemáticos permitem prever a posição da linha d'água do barco e ter noção do posicionamento do centro de massa da montagem, assim como do centro de flutuação e do metacentro. Dessa forma, encontra-se a estabilidade inicial do barco.

#### 3.1.1. Centro de Gravidade

A partir da observação e análise de manuais detalhando as principais dimensões de barcos controlados remotamente, um design 3D foi desenvolvido no software *Inventor* na intenção de se obter um modelo de aproximadamente 60 centímetros de comprimento e 20 centímetros de largura da boca. Dessa forma foi possível calcular um valor aproximado do peso deste caso fosse construído em fibra de vidro através das propriedades do modelo dentro do software CAD.

Para o dimensionamento inicial do centro de gravidade foram considerados o peso dos componentes com valor significativo no cálculo: casco, bateria e motor. Criou-se então uma montagem dos componentes mencionados com a localização hipotética destes, sendo possível obter a posição longitudinal e transversal do centro de gravidade de cada um desses componentes em relação à origem do modelo desenhado, conforme observa-se na Figura 18.

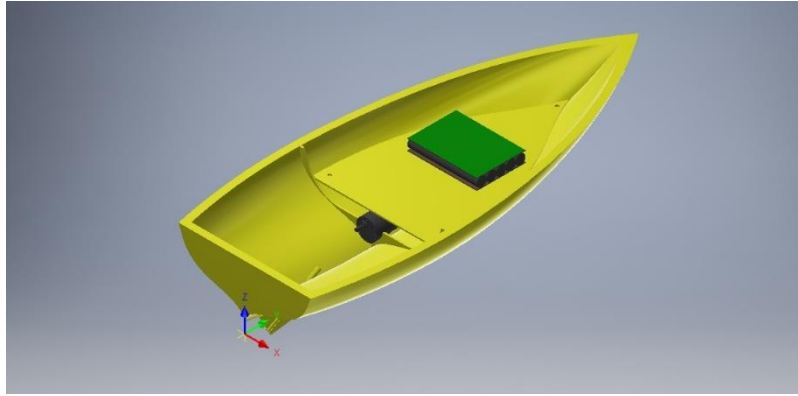


Figura 18 - Montagem inicial. Fonte: Autoria própria.

Os valores obtidos foram transferidos para a Tabela 1, onde  $CG_y$  é a posição do centro de gravidade longitudinal e  $CG_z$  a posição vertical. Como tais componentes estão alinhados na transversal (eixo x), as posições do CG nesse eixo foram desconsideradas no cálculo. Multiplicando a massa pelas posições  $CG_y$  e  $CG_z$  de cada componentes encontra-se os momentos respectivos, e conseqüentemente, a posição final do centro de gravidade da montagem.

Componente	Massa (ton)	$CG_y$ (m)	Momento Longitudinal (My)	$CG_z$ (m)	Momento Vertical (Mz)
Casco	$4,78 * 10^{-4}$	$2,24 * 10^{-1}$	$1,07 * 10^{-4}$	$5,10 * 10^{-2}$	$2,44 * 10^{-5}$
Bateria	$2,07 * 10^{-4}$	$2,97 * 10^{-1}$	$6,15 * 10^{-5}$	$4,23 * 10^{-2}$	$8,74 * 10^{-6}$
Motor	$1,60 * 10^{-4}$	$4,23 * 10^{-2}$	$6,78 * 10^{-6}$	$5,53 * 10^{-2}$	$9,97 * 10^{-6}$
<b>Massa total</b>	$8,45 * 10^{-4}$	$\sum My$	$1,75 * 10^{-4}$	$\sum Mz$	$4,2 * 10^{-5}$

Tabela 1 - Dimensionamento inicial centro de gravidade. Fonte: Autoria própria.

Dividindo o momento longitudinal e vertical pela massa total, encontra-se então a posição longitudinal e vertical do centro de gravidade, respectivamente. Portanto, convertendo os resultados encontrados para milímetros, a posição inicial calculada do

centro de massa é: (0, 207,75 mm, 49,66 mm). O volume submerso do barco ( $\nabla$ ) pode então ser calculado da seguinte forma:

$$\nabla = \frac{m}{\rho} = \frac{8,45 * 10^{-4}}{1} = 8,45 * 10^{-4} m^3 \quad (10)$$

Considerando a densidade da água igual a 1 ton/m<sup>3</sup>. Em seguida é necessário calcular o centro de flutuação e o raio metacêntrico para garantir a estabilidade do modelo.

### 3.1.2. Centro de Flutuação

Para o cálculo do centro de flutuação utilizou-se o Método de Simpson aliado aos softwares *Inventor* e *Excel*. O método de Simpson baseia-se numa integração numérica que busca estimar a curva de determinada região, e através da integração da função quadrática gerada, encontrar a área sob a curva. Dessa maneira é possível encontrar o deslocamento volumétrico do barco. A equação geral do Método de Simpson é dada pela equação 11:

$$\int_a^b f(x) dx \cong \frac{1}{3} * \left( \frac{b-a}{n} \right) (f(a) + 4 * f * (a+h) + 2 * f * (a+2 * h) + 4 * f * (a+3 * h) + \dots + f(b)) \quad (11)$$

Onde:

$$n = \text{número de subintervalos}$$

$$h = \frac{b-a}{n} = \text{distância entre linhas d'água}$$

Simplificando,

$$\nabla = \frac{h}{3} * \sum ALD * MS \quad (12)$$

Onde:

$$ALD = \text{área do plano da linha d'água}$$

$$MS = \text{multiplicador de Simpson}$$

Inicialmente, foi gerado um modelo sólido no *Inventor* e determinou-se um valor hipotético da linha d'água de 54,9 mm, visto que a distância da quilha até a parte superior do barco há aproximadamente 90 mm. O método exige que o número de subintervalos

seja par. Então, dividiu-se a região abaixo da linha d'água em 7 intervalos, ou 6 subintervalos. No *Inventor*, tais divisões representam-se pela criação de planos paralelos em intervalos igualmente espaçados (Figura 19), sendo a distância entre as linhas d'água escolhida igual a 9,15 mm.

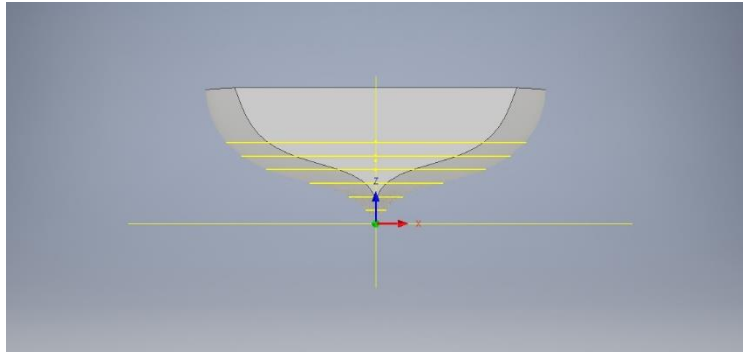


Figura 19 - Projeções longitudinais. Fonte: Autoria própria.

Em seguida, através das funções *Inspecionar > Propriedades da Região*, é possível obter a área de cada seção projetada no plano criado. Tais dados foram transferidos para tabelas do Excel, onde foi possível calcular o deslocamento volumétrico do barco. Ao fim dos cálculos obteve-se o valor de  $1,65 * 10^{-3} m^3$ , bem maior do que o calculado na equação 10, de  $8,45 * 10^{-4} m^3$ . Sendo assim, o processo foi refeito para uma linha d'água de 36,6 mm e distância entre as seções de 6,1 mm. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 2:

Tabela 2 - Cálculo deslocamento volumétrico. Fonte: Aatoria própria.

<b>Deslocamento</b>			
<b>Linha d'água h (mm)</b>	<b>Área linha d'água(ALD) (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Multiplicador de Simpson (MS)</b>	<b>ALD*MS</b>
			<b>(mm<sup>2</sup>)</b>
0		1	0
6,1	1307,733	4	5230,932
12,2	3877,765	2	7755,53
18,3	8517,637	4	34070,548
24,4	17079,856	2	34159,712
30,5	30843,655	4	123374,62
36,6	45580,695	1	45580,695
$\sum ALD * MS$			<b>250172,04</b>

Utilizando novamente a equação 10, o novo deslocamento volumétrico é igual a:

$$\nabla' = 7,63 * 10^{-4} m^3 \quad (13)$$

Considerou-se então uma linha d'água de 36,6 mm uma aproximação aceitável devido à proximidade dos valores dos deslocamentos volumétricos calculados. Seguiu-se então para o cálculo da posição vertical do centro de flutuação (CFV). Para isso, primeiro multiplicou-se os dados calculados anteriormente pelo braço endireitante vertical correspondente, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 –Multiplicação do braço endireitante vertical pela área da linha d'água e multiplicador de Simpson. Fonte: Autoria própria.

Braço endireitante vertical (Ni)	ALD*MS*Ni
	(mm <sup>2</sup> )
0	0
1	5230,932
2	15511,06
3	102211,644
4	136638,848
5	616873,1
6	273484,17
$\sum ALD * MS * N_i$	<b>1149949,754</b>

Logo,

$$CFV = \frac{h * \sum ALD * MS * N_i}{\sum ALD * MS} \quad (14)$$

$$CFV = \frac{9,15 * 1149949,754}{250172,04} \cong 42,06 \text{ mm} \quad (15)$$

Analogamente, os cálculos foram repetidos para encontrar a posição longitudinal do centro de flutuação, que estão demonstrados nas tabelas Tabela 4 e Tabela 5. Dessa vez o critério utilizado foi dividir o comprimento total do barco em 13 intervalos, considerado um valor conveniente para se obter uma boa aproximação. A distância entre as seções transversais é de 47,325 mm.

Tabela 4 - Cálculo deslocamento volumétrico longitudinal. Fonte: Autoria própria.

<b>Distância seção transversal (h')</b>	<b>Área da seção transversal (AST) (<math>mm^2</math>)</b>	<b>Multiplicador de Simpson (MS)</b>	<b>ST*SM (<math>mm^2</math>)</b>
0	8635,426	1	8635,426
47,325	10608,119	4	42432,476
94,65	12016,106	2	24032,212
141,975	12803,748	4	51214,992
189,3	12962,459	2	25924,918
236,625	12518,914	4	50075,656
283,95	11460,672	2	22921,344
331,275	9823,202	4	39292,808
378,6	7710,058	2	15420,116
425,925	5295,175	4	21180,7
473,25	2857,319	2	5714,638
520,575	845,954	4	3383,816
567,9	0	1	0
		<b><math>\sum AST * MS</math></b>	<b>310229,1</b>

Tabela 5 - Multiplicação do braço endireitante horizontal pela área da seção transversal e multiplicador de Simpson. Fonte: Autoria própria.

Braço endireitante horizontal	AST*MS*Ni'
0	0
1	42432,476
2	48064,424
3	153644,976
4	103699,672
5	250378,28
6	137528,064
7	275049,656
8	123360,928
9	190626,3
10	57146,38
11	37221,976
12	0
$\sum AST * MS * N_i'$	<b>1419153,132</b>

$$CFL = \frac{h' * \sum AST * MS * N_i}{\sum AST * MS} \quad (16)$$

$$CFL = \frac{47,325 * 1419153,132}{310229,1} \cong 216,49 \text{ mm} \quad (17)$$

Sendo assim, o dimensionamento inicial gerou os seguintes valores:

$$\text{Centro de Gravidade: } (0 \text{ mm}, 207,75 \text{ mm}, 49,66 \text{ mm}) \quad (18)$$

$$\text{Centro de Flutuação } (0 \text{ mm}, 216,49 \text{ mm}, 42,059 \text{ mm}) \quad (19)$$

### 3.1.3. Raio Metacêntrico

Para finalizar o dimensionamento e garantir a estabilidade inicial do modelo é necessário calcular o raio metacêntrico ( $BM_t$ ), ou seja, a distância entre o centro de flutuação e o metacentro. Para isso utiliza-se a equação 20:

$$BM_t = \frac{I_t}{\nabla} \quad (20)$$

Onde  $I_t$  é o momento de inércia transversal e  $\nabla$  o deslocamento volumétrico. O momento de inércia transversal foi obtido através do software *Inventor*. Primeiramente criou-se um sistema de coordenadas na altura da linha d'água. Em seguida, um plano e um esboço a partir do novo sistema de coordenadas foram gerados. Projetou-se então a geometria do barco neste plano, e as propriedades da região projetada foram calculadas através da aba *Inspecionar*. O momento de inércia da área calculado pelo software em relação aos eixos principais foram:

$$I_x = 472330753,887 \text{ mm}^4 \quad (21)$$

$$I_y = 59412211,259 \text{ mm}^4 \quad (22)$$

Substituindo os valores na Equação 20, tem-se:

$$BM_t = \frac{59412211,259}{845080} = 70,3 \text{ mm} \quad (23)$$

Portanto, para saber a distância da quilha ao metacentro ( $KM_t$ ), basta somar a distância vertical do centro de flutuação calculado anteriormente (CFV) ao raio metacêntrico. Logo,

$$KM_t = 42,06 + 70,33 = 112,39 \text{ mm} \quad (24)$$

A Figura 20 mostra a altura de todos os pontos calculados anteriormente em relação à origem do desenho: metacentro, centro de gravidade, centro de flutuação e altura do plano da linha d'água.

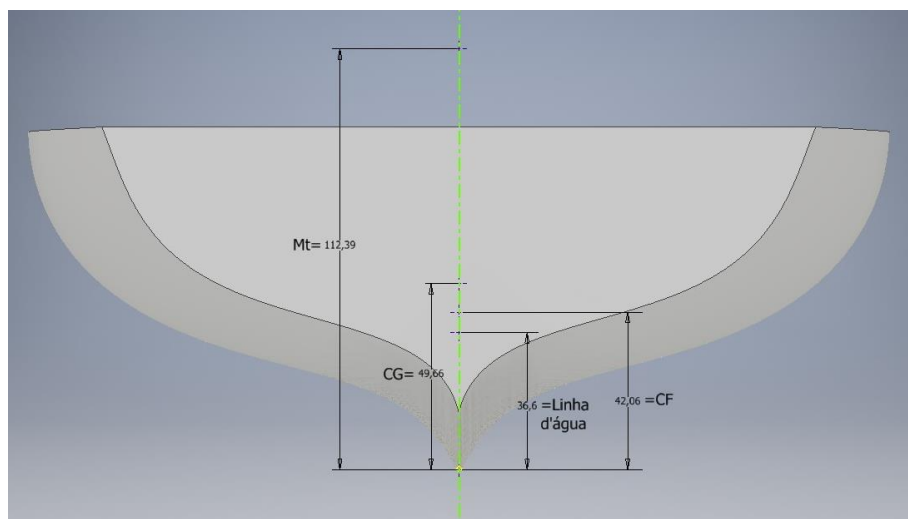


Figura 20 – Representação da altura dos seguintes pontos (em mm): Metacentro (Mt), centro de gravidade (CG), centro de flutuação (CF) e Linha d'água. Fonte: Autoria própria.

Como o centro de flutuação do barco está abaixo do centro de gravidade, este está em equilíbrio neutro. Como este modelo é teórico e a posição real dos componentes e peso do casco vão variar após a construção e inserção de todos os componentes eletrônicos, considerou-se o modelo aceitável para prosseguir o trabalho.

## 3.2.Fabricação do Modelo

### 3.2.1. Impressão do Molde

O casco desenhado na plataforma *Inventor* foi exportado no formato *.stl* para que pudesse ser reconhecido pelo software de impressão *Simplify3D*. A impressora utilizada (Figura 21) foi a disponível no Laboratório de Controlo, Automação e Robótica (LCAR) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG). O modelo desta é Fusion3 f400-s e a cama de impressão possui 355 mm x 355 mm x 320 mm. Devido às limitações nas dimensões da cama de impressão, o modelo 3D do casco foi dividido em duas partes (popa e proa) para que pudesse ser impresso.



Figura 21 - Impressora do Laboratório de Controlo, Automação e Robótica (LCAR). Fonte: Autoria própria.

Por conta da restrição de uso dos laboratórios na época em que a impressão foi realizada não foi possível acompanhar o processo de impressão para intervenção em possíveis irregularidades durante o procedimento. Portanto, tanto a escolha dos parâmetros utilizados quanto o acompanhamento da impressão foram feitas pelo técnico do laboratório em questão, Filipe Fernandes.

Na primeira tentativa de simulação dos parâmetros de impressão o barco foi colocado na posição horizontal. Tal orientação geraria um enorme gasto de filamento e tempo por conta da necessidade da impressão de um suporte para sustentação do mesmo durante a impressão, tanto com a abertura virada para cima quanto para baixo. Foi então sugerido ao técnico que a impressão fosse realizada na posição vertical (Figura 22), o que reduziu o tempo de impressão e o gasto com filamento quase pela metade.

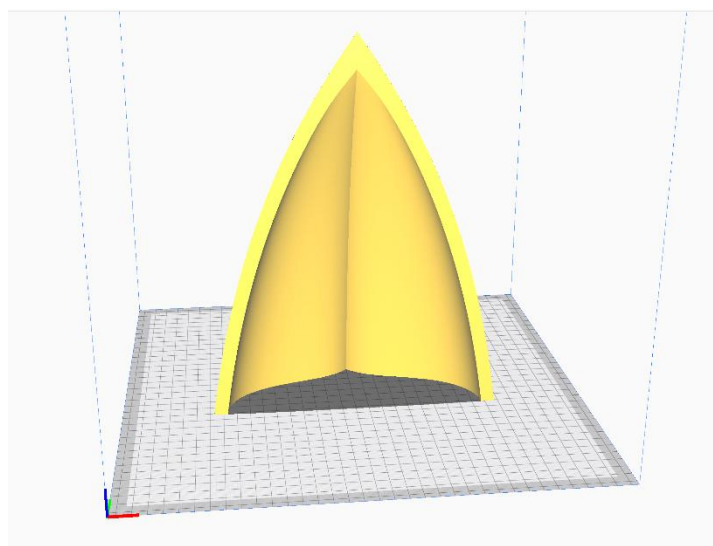


Figura 22 – Arquivo .stl no software de impressão 3D. Fonte: Autoria própria.

Iniciou-se a impressão com um material já disponível no laboratório, porém não houve aderência suficiente nas primeiras camadas de impressão, sendo necessária a compra de outro material. Foi então utilizado um filamento de PLA da marca Flashforge de 1,75 mm de espessura, que suporta temperaturas de impressão entre 190 e 220 °C. A temperatura da cama de impressão e da impressão foram de 65°C e 220°C, respectivamente.

Tabela 6 – Tempo aproximado de impressão do casco e outros componentes.

<b>Componente</b>	<b>Tempo Aproximado de Impressão (horas)</b>
<b>Popa</b>	19
<b>Proa</b>	10

Algumas imprecisões foram geradas após a impressão, causando pequenos desvios geométricos que puderam ser percebidos ao juntar as duas partes do casco. Além disso, a parte externa do casco apresentou linhas de impressão proeminentes (Figura 23) que podem estar relacionadas a diversas causas, como a temperatura de fusão do filamento, problemas mecânicos da impressora ou ainda a escolha dos parâmetros de impressão. Para contornar tais situações, foi realizado um preparo do molde, relatado no subcapítulo a seguir.



Figura 23 - Proa e popa impressos. Fonte: Aatoria própria.

### 3.2.2. *Preparação do Molde*

A proposta inicial era utilizar a impressão 3D já como a versão final do casco, porém decidiu-se mudar a estratégia e utilizá-lo como molde para laminação em fibra de vidro. Para que o processo fosse bem sucedido e o casco pudesse ser usado como molde, alguns processos tiveram de ser realizados para que este tivesse um melhor acabamento superficial e houvesse ajuste dos erros de precisão gerados pela impressão. Para isso, as duas partes do casco que seriam coladas foram desbastadas com uma lixa afim de reduzir ao máximo a diferença dimensional, porém ainda assim pode-se perceber que as duas faces não ficaram completamente em contato.

Em seguida, as partes foram coladas com a cola instantânea Rapid Glue da marca Axton, e a área de contato foi vedada com pasta para modelar endurecida ao ar. Esperou-se aproximadamente 24 horas para garantir a secagem completa da pasta aplicada e o processo de lixagem foi iniciado. Por conta do baixo ponto de fusão do PLA, a lixagem teve de ser realizada com o auxílio de lixas d'água. O procedimento foi então iniciado com a utilização de uma lixa d'água com tamanho de grão 220 e água (Figura 24).



Figura 24 - Molde após primeira lixagem. Fonte: Autoria própria.

O molde foi então enxaguado com água e seco após a lixagem para garantir a remoção de todas as partículas que possam ter ficado na superfície do mesmo. Aguardou-se aproximadamente uma hora para garantir a secagem total, e então aplicou-se uma camada do spray primário de alto enchimento (Figura 25). Tal spray tem a finalidade de tapar os poros e as linhas de impressão para obter-se uma superfície polida e brilhante após subsequentes lixagens e pintura. O modelo foi então novamente lixado com lixa d'água 240 e enxaguado.



Figura 25 - Modelo após primeira camada de spray primário. Fonte: Autoria própria.

Após uma hora o processo de aplicação do spray, lixagem e enxágue foram repetidos mais duas vezes, dessa vez utilizando as lixas 600 e 800 após cada aplicação. Ao fim de 24 horas foi então aplicado um spray acrílico vermelho para obter-se uma superfície ainda mais lisa e polida, afim de garantir um bom acabamento superficial e facilitar a utilização da cera no processo a seguir. Foram aplicadas três camadas do spray, com um intervalo de 30 minutos entre cada aplicação. O resultado final pode ser

observado na Figura 26. O molde estava então pronto para a realização da laminação com fibra de vidro.



Figura 26 - Modelo após utilização do spray acrílico. Fonte: Autoria própria.

### 3.2.3. *Laminação com Fibra de Vidro*

Após a preparação do molde, iniciou-se o processo de laminação com fibra de vidro. Para tal, os materiais a seguir tiveram de ser comprados:

- Base de madeira;
- Plastilina;
- Cera de abelha;
- Pano de microfibra;
- Desmoldante líquido PVA;
- Resina líquida poliéster pré-acelerada;
- Catalisador para resina;
- Tecido de fibra de vidro ( $300g/m^2$ );
- Pigmento branco;

- Trincha;
- Rolete tira bolhas;
- Luvas descartáveis;
- Lixa de ferro 600.

Não foi possível comprar o rolete tira bolhas por conta do alto valor, portanto um rolete foi improvisado com um rolo para pintura e anilhas (Figura 27).

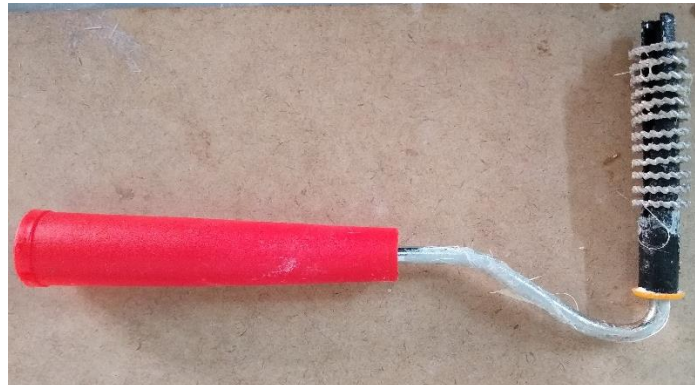


Figura 27 – Rolete tira bolhas improvisado com um rolo para pintura e anilhas. Fonte: Autoria própria.

O molde foi posicionado em cima da base de madeira e, para a fixação e vedagem do espaço entre o molde e a base, foi utilizada a plastilina ao redor de todo o casco (Figura 28).

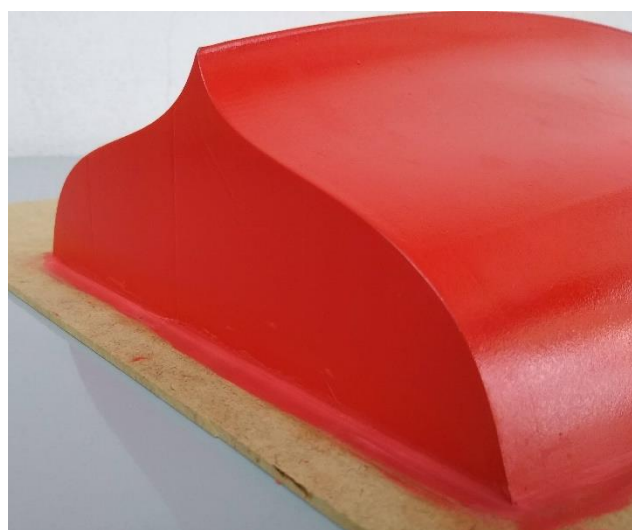


Figura 28 - Molde na base de madeira vedado com plastilina. Fonte: Autoria própria.

Como o molde é novo e nunca foi utilizado para laminação, foi necessário aplicar sete camadas da cera de abelha com o auxílio do pano de microfibras, sempre removendo o excesso após cada processo e aguardando cerca de 15 minutos para a camada seguinte. Ao fim da execução, o mesmo processo foi realizado para o desmoldante líquido com o auxílio de uma esponja. Tomou-se cuidado para aplicar uma camada fina e uniforme, cujo tempo de espera para secagem foi de 30 minutos. Tanto a cera quanto o desmoldante têm a função de evitar que a fibra de vidro fique impregnada no molde e para facilitar a retirada deste ao fim do processo. Ambos foram utilizados no molde e na base de madeira.

A resina líquida catalisada começa a endurecer a partir de 15 minutos. Portanto, antes de misturar o catalisador à resina realizou-se o corte da manta de fibra de vidro no tamanho e formatos desejados de forma a facilitar o procedimento seguinte. Como a manta possui  $300 \text{ g/m}^2$  e a superfície do barco é de aproximadamente 0,2 metros, cortou-se 60 gramas de manta para cada camada a ser realizada. De acordo com o fornecedor da manta, a quantidade de resina a ser utilizada deve ser três vezes o peso da manta a ser empregado, e 2% de tal valor de catalisador deveria ser adicionado. Sendo assim, foram utilizados 180 gramas de resina e 3,6 gramas de catalisador para cada camada.

Cada camada geraria aproximadamente 1 *cm* de espessura após a cura. Então, para atingir os 4 *cm* desejados, o processo de laminação foi realizado quatro vezes, sendo duas camadas por vez para evitar que a manta esquentasse em excesso, o que poderia gerar grandes distorções no modelo final. Misturou-se então o catalisador à resina e, com o auxílio da trincha, iniciou-se a laminação.

Posicionou-se a manta sobre o molde e, com movimentos rápidos, a mistura foi aplicada. Ao realizar o processo em todo molde, o rolete foi usado sobre toda a superfície deste. Tal rolete tem a finalidade de remover todas as bolhas que possam ter surgido durante a laminação. O procedimento foi repetido para criar a segunda camada de fibra (Figura 29).



Figura 29 - Molde laminado com duas camadas de fibra de vidro. Fonte: Autorial própria.

O tempo total de cura é de aproximadamente 6 horas, porém por conta da disponibilidade de horário do laboratório, o tempo de espera foi de 16 horas. Durante a cura gases tóxicos são eliminados, e, portanto, um exaustor foi posicionado próximo do molde para evitar a dispersão de tais gases (Figura 30).

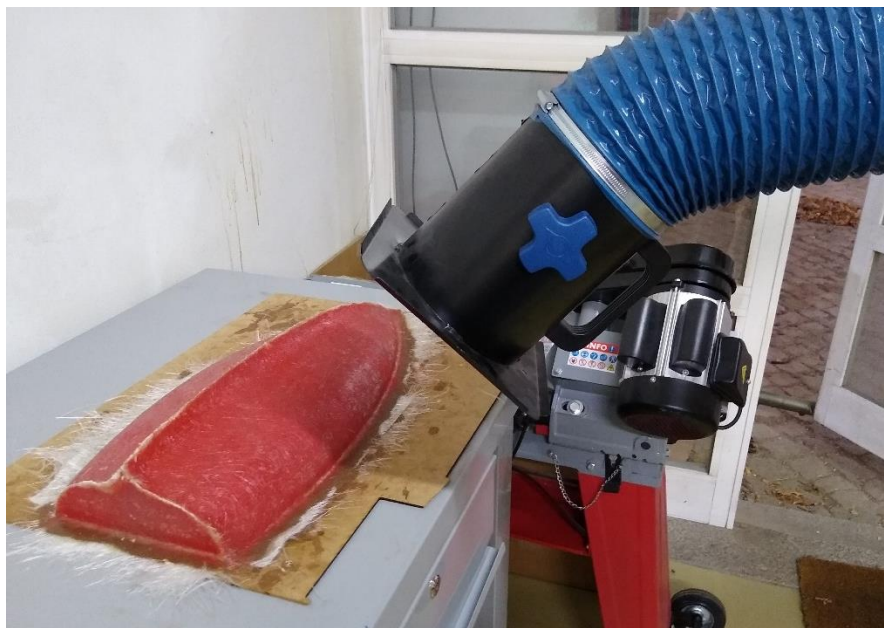


Figura 30 - Molde laminado e exaustor. Fonte: Autorial própria.

No dia seguinte verificou-se a existência de algumas bolhas no modelo. Essas foram removidas com o auxílio de um estilete. Durante tal processo, parte da fibra acabou sendo removida (Figura 31), então optou-se apenas por estourar as bolhas e utilizar lixa de ferro 60. A mesma lixa foi utilizada em todo o modelo para deixá-lo liso e remover

algumas imperfeições superficiais e excessos de fibra nas pontas. Com um pano limpo o pó proveniente da lixagem foi removido.

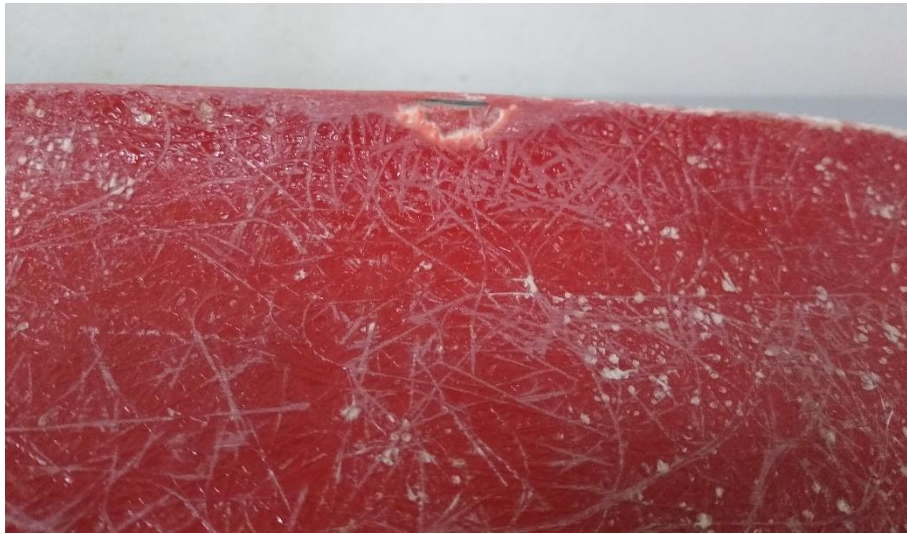


Figura 31 - Remoção da fibra durante pós processamento do modelo. Fonte: Autoria própria.

Após 24 horas todo o processo de corte da manta, preparação da resina e laminação foi então repetido para criar mais duas camadas de fibra, porém desta vez um pigmento foi adicionado à mistura de resina com catalisador para deixar o modelo final na cor branca (Figura 32). O processo da impregnação da fibra foi então realizado mais duas vezes consecutivas.



Figura 32 – Modelo após segunda 3ª e 4ª camadas de fibra de vidro. Fonte: Autoria própria.

Após a secagem do modelo este foi novamente lixado com a lixa 60 para ferro, melhorando assim o aspecto do mesmo (Figura 33).



Figura 33 – Acabamento superficial à esquerda antes da lixagem e após a lixagem à direita. Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio de uma espátula e de pedaços de ferro que serviram com calço, a desmoldagem foi realizada facilmente, separando-se então o molde do modelo (Figura 34).



Figura 34 – Molde e modelo separados. Fonte: Autoria própria.

O modelo foi então levado para o Laboratório de Tecnologia Mecânica para que, com o auxílio de uma serra de corte manual, a borda excedente de fibra de vidro fosse removida. Novamente a lixa de ferro foi utilizada para dar o acabamento final na região de serragem (Figura 35).



Figura 35 – Modelo após serragem e lixagem das bordas. Fonte: Autoria própria.

Verificou-se então que, por conta dos ângulos e geometria complexa da popa, a laminação não foi tão bem-sucedida quanto no resto do barco. Não houve a impregnação da fibra em algumas partes gerando alguns espaços livres, e o resultado final desta parte não ficou tão fiel ao molde quanto deveria (Figura 36). Apesar disso, o barco ficou completamente selado e não havia furos que permitissem a entrada de água.



Figura 36 – Popa do casco com descontinuidades. Fonte: Autoria própria.

Para solucionar o problema e melhorar o aspecto final, uma cola epóxi transparente para reparo de secagem rápida foi aplicada nas regiões de descontinuidades (Figura 37). Novamente a lixagem foi realizada na área de aplicação da cola.



Figura 37 – Popa após aplicação da cola epóxi. Fonte: Autoria própria.

Afim de preencher os poros entre as fibras e cobrir a região de descontinuidade da popa, a mistura resina, catalisador e pigmento foi aplicada mais uma vez, melhorando assim o aspecto visual do barco (Figura 38). O modelo estava então pronto para a fase da montagem dos componentes.



Figura 38 – Modelo após secagem da última aplicação de resina catalisada e pigmentada. Fonte: Autoria própria.

Após três dias verificou-se que a cola aplicada nas regiões não seladas completamente pela fibra de vidro ainda não havia secado. O modelo foi então colocado dentro do forno do Laboratório de Mecânica a 180° por meia hora na tentativa de elevar à temperatura suficiente para que a cola pudesse secar, porém após a retirada do forno verificou-se que ela ainda não estava completamente sólida. Optou-se por deixar da forma que estava.

Para finalizar, ainda no Laboratório de Mecânica realizou-se um furo na popa do protótipo para fixar o eixo. Após efetuar o furo, como o eixo estaria levemente inclinado, foi necessário limar e lixar a região (Figura 39) até que fosse atingida a angulação exata para que a hélice ficasse próximo o suficiente do casco, sem enconstar no mesmo.



Figura 39 – Casco furado e lixado para fixação do eixo. Fonte: Autoria própria.

O eixo foi então colado ao casco com super cola e, em seguida, a parte externa do furo foi selada com uma fita isolante, como mostrado na Figura 40. Para vedar e garantir que não entrasse água através do furo foi então despejada a resina poliéster na parte de dentro do casco. O eixo, a hélice e a junta universal utilizados foram comprados pela internet, e os critérios de escolha foram a disponibilidade no mercado, o valor e se os componentes possuíam dimensões aceitáveis e compatíveis com o projeto.



Figura 40 – Selagem externa para aplicação da resina poliéster na parte interior. Fonte: Autoria própria.

O modelo foi considerado pronto para montagem dos componentes em seu interior. Ao fim do processo percorrido neste capítulo constatou-se que a escolha da geometria do casco influenciou o processo de aplicação e secagem da fibra de vidro. A curva criada na popa dificultou o processo. Como a solidificação da resina poliéster começava cerca de quinze minutos após a mistura com o catalisador, o tecido de fibra de vidro foi cortado antes da aplicação para facilitar o processo já no formato desejado.

Após o início da aplicação da fibra já não era possível remover excessos e cortá-la com a mesma facilidade, pois como o tecido é composto por um entrelaçamento de diversos fios, ao tentar puxá-lo ou cortá-lo com tesoura, este se desfazia e dessaranjava o tecido ao redor. Além disso, por ter sujado as mãos com resina e a trincha estar cheia de fiapos de tecido, não era possível impregnar pedaços pequenos do mesmo.

## 4. Simulação Dinâmica

Neste capítulo a simulação dinâmica será caracterizada, assim como uma breve análise dos resultados observados. O objetivo foi obter as equações de movimento do protótipo e simular o comportamento do mesmo nas condições ambientais pressupostas, ou seja, descobrir se o modelo dimensionado é manobrável. As equações foram obtidas através da resolução de um sistema de equações diferenciais de segunda ordem utilizando o Método de Kane, tema abordado na seção 2.6. Com o auxílio da linguagem de programação *Python*, valores hipotéticos das forças atuantes no barco durante o funcionamento e valores obtidos após o dimensionamento do modelo foram introduzidos.

Para realizar a simulação foi utilizada a biblioteca *sympy.physics.mechanics*. Ela é particularmente vantajosa para esse trabalho pois facilita a aplicação do Método de Kane para obtenção das equações de movimento, o que torna o processo menos trabalhoso e mais rápido ao ser resolvido computacionalmente. Primeiramente foi necessário descrever a geometria do objeto e a configuração do sistema. Em seguida especificou-se os graus de liberdade e restrições ao movimento do sistema, assim como as forças externas e momentos existentes. A programação numérica rearranja as informações inseridas de acordo com a segunda Lei de Newton, formula as equações obtidas e as reescreve de forma que possam ser integradas para obtenção da trajetória do corpo ao longo do tempo.

### 4.1. Análise Cinemática

Primeiramente estabeleceu-se a cinemática do sistema do barco. Para tal foi necessário criar um objeto (representando o barco) e introduzir informações básicas como as coordenadas generalizadas com origem no centro de massa do barco ( $q_1, q_2, q_3$ ), assim como as derivadas dessas coordenadas ( $q_{1d}, q_{2d}, q_{3d}$ ), além das velocidades generalizadas ( $u_1, u_2, u_3$ ). As equações diferenciais cinemáticas ficaram então da seguinte forma, como demonstrado na equação (8):

$$u_1 = \dot{q}_1$$

$$u_2 = \dot{q}_2$$

$$u_3 = \dot{q}_3$$

Tendo declarado tais parâmetros, é possível reescrevê-los para que se possa aplicar o Método de Kane na programação, que são declarados da seguinte forma:

$$kde = [q1d - u1, q2d - u2, q3d - u3] \quad (25)$$

$$kde\_dic = \{q1d:u1, q2d:u2, q3d:u3\} \quad (26)$$

Em seguida foram criados os seguintes referenciais, assim como suas orientações: sistema de referência inercial (N), sua origem (ponto O) e os sistemas de referencia fixos, sendo um no barco (B) e um no leme (L). Considerou-se que o centro de massa e o centro de flutuação estão alinhados na vertical. A representação gráfica do sistema pode ser observada na Figura 41.

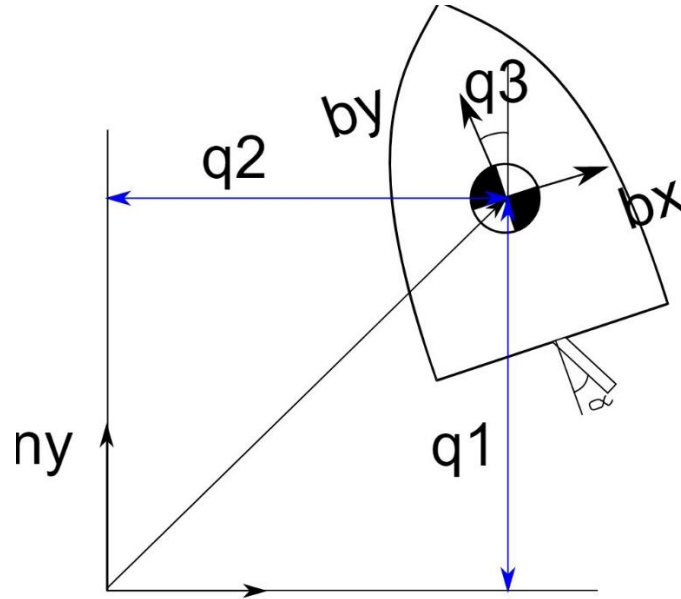


Figura 41 – Representação gráfica dos sistemas de referência inercial (N) e fixo no barco (B), assim como das coordenadas generalizadas com origem no centro de massa. Fonte: Autoria própria.

As velocidades do centro de massa (equação 27) e do referencial do barco (equação 28) ficam da seguinte maneira, expressos no referencial inercial e referencial do barco, respectivamente:

$$u_2 \widehat{n}_x + u_1 \widehat{n}_y \quad (27)$$

$$(u_1 (\sin(q_3) + u_2 \cos(q_3)) \widehat{b}_x + (u_1 \cos(q_3) - u_2 \sin(q_3)) \widehat{b}_y) \quad (28)$$

Para finalizar a obtenção das equações cinemáticas necessárias para a geração das equações de movimento, dois pontos foram criados:  $P_1$ , localizado na junção do leme com o casco e distante  $L_1$  do centro de massa, e  $P_2$ , localizado no meio do leme e distante  $L_2$  de  $P_1$ . A velocidade do ponto  $P_1$  é expressa então por:

$$u_2 \widehat{n}_x + u_1 \widehat{n}_y + L_1 u_3 \widehat{b}_x \quad (29)$$

Enquanto a velocidade do ponto  $P_2$  é:

$$u_2 \widehat{n}_x + u_1 \widehat{n}_y + L_1 u_3 \widehat{b}_x - L_2 u_3 \widehat{I}_x \quad (30)$$

## 4.2. Análise Cinética

Como mencionado no subcapítulo 2.6.1., para realizar o cálculo das equações de movimento de acordo com o Método de Kane é necessário realizar a soma das forças ativas generalizadas ( $F_r$ ) com as forças de inércia generalizadas ( $F_r^*$ ). Deve-se então declarar uma lista com os corpos, partículas, forças e toques aplicados.

Para definir as forças ativas generalizadas (equação 5) são necessários conhecer a velocidade parcial ( $v_r^{Pi}$ ) do centro de massa do corpo, a velocidade angular parcial ( ${}^N \omega_r^{Nk}$ ) do referencial no corpo  $N$  em relação ao referencial inercial  $N_k$ , e as resultantes das forças ( $R_i$ ) e dos torques ( $I_i$ ) atuantes no centro de massa.

Para o cálculo das forças de inércia generalizadas são necessários a velocidade, massa e aceleração do corpo, a velocidade angular parcial de  $N_k$  em relação a  $N$ , o tensor de inércia ( $I_i$ ) e a aceleração angular ( ${}^N \alpha^{Nk}$ ).

Para criar o corpo rígido na simulação deve-se incluir centro de massa, o seu correspondente eixo de referência, a massa e o tensor de inércia, da seguinte forma:

$$I = me.inertia(B, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) \quad (31)$$

$$Barco = me.RigidBody('Barco', Cm, B, m, (I, Cm)) \quad (32)$$

As forças atuantes no barco consideradas foram a força de arrasto ( $F_d$ ) gerada no leme ( $P_2$ ), a força de empuxo ( $F_p$ ) na junção do leme com o casco do barco ( $P_1$ ), e a força de amortecimento dinâmico ( $FD$ ) que a água produz no centro de massa ( $CM$ ) do casco quando esse se movimenta. A lista das forças e pontos é declarada da seguinte forma:

$$Fl = [(P_2, F_d), (P_1, F_p), (C_m, FD)] \quad (33)$$

A força de arrasto é calculada da seguinte forma:

$$F_d = \left( -C_d * \rho * v_n^2 * \frac{A_{proj}}{2} \right) \quad (34)$$

Onde  $C_d$  é o coeficiente de arrasto do barco, que para o estudo foi considerado como sendo um prisma quadrado,  $\rho$  a densidade da água,  $v_n$  a velocidade do centro de massa no eixo de referência do barco e  $A_{proj}$  a projeção da área do leme na direção da movimentação do barco ( $B_y$ ). A equação da força de arrasto gerada pelo *Python* pode ser verificada no Anexo A na linha *Out[23]*.

A força de amortecimento dinâmico da água (FD) foi calculada da seguinte forma:

$$FD = -C_{d2} * v_n * \mathbf{B.y} - C_{d3} * (CM.vel(N)).dot(\mathbf{B.x}) * \mathbf{B.x} \quad (35)$$

Em que  $C_{d2}$  e  $C_{d3}$  são os coeficientes de amortecimento dinâmico da água no casco e  $\mathbf{B.y}$  e  $\mathbf{B.x}$  representam o vetor nas direções  $y$  e  $x$  no eixo referencial do barco, respectivamente. Já a força de empuxo foi considerada como sendo:

$$F_p = p_E * E * \mathbf{B.y} \quad (36)$$

A velocidade do centro de massa ( $v_n$ ), coeficiente de arrasto ( $C_d$ ), os coeficientes de amortecimento dinâmico ( $C_{d2}$  e  $C_{d3}$ ), a porcentagem da força do motor utilizada ( $p_E$ ) e o empuxo máximo do motor ( $E$ ) escolhidos para realizar a simulação foram valores hipotéticos. Para futuros trabalhos, tais valores devem ser obtidos de forma experimental ou computacional para gerar a trajetória do barco com precisão.

Valores como a massa do barco e os momentos de inércia são conhecidos e foram extraídos do modelo criado no *Inventor*. Para que isso fosse possível, criou-se um novo material para cada componente da montagem com a sua densidade real correspondente.

Após inserir as forças e seus pontos de aplicação, o objeto foi declarado como:

$$Bl = [Barco] \quad (37)$$

Foi necessário então incluir as velocidades e acelerações generalizadas, assim como as equações diferenciais cinemáticas, que deu-se da seguinte forma:

$$KM = me.KanesMethod(N, q_{ind} = [q_1, q_2, q_3], u_{ind} = [u_1, u_2, u_3], \quad (38) \\ kd_{eqs} = kde)$$

Tem-se agora todos os valores necessários para realizar o cálculo das equações de movimento, que é introduzida da seguinte forma no algoritmo:

$$(F_r, F_r^*) = KM.kanes\_equations(B_l, F_l) \quad (39)$$

$$Eq_{Movimento} = F_r - F_r^* \quad (40)$$

As equações do movimento obtidas foram:

$E_{q_{Movimento}}[0]$

$$\begin{aligned}
&= -C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots \\
&\quad - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 (\sin(\alpha) \cos(q_3(t)) \\
&\quad + \sin(q_3(t)) \cos(\alpha)) \dots \\
&\quad - C_{d2} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))) \cos(q_3(t)) \dots \\
&\quad - C_{d3} (u_1(t) \sin(q_3(t)) + u_2(t) \cos(q_3(t))) \sin(q_3(t)) \dots \\
&\quad + E_{pE} \cos(q_3(t)) + m \frac{d}{dt} u_1(t)
\end{aligned} \tag{41}$$

$E_{q_{Movimento}}[1]$

$$\begin{aligned}
&= -C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots \\
&\quad - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 (-\sin(\alpha) \sin(q_3(t)) \dots \\
&\quad + \cos(\alpha) \cos(q_3(t))) \dots \\
&\quad + C_{d2} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))) \sin(q_3(t)) \dots \\
&\quad - C_{d3} (u_1(t) \sin(q_3(t)) + u_2(t) \cos(q_3(t))) \cos(q_3(t)) \dots \\
&\quad - E_{pE} \sin(q_3(t)) + m \frac{d}{dt} u_2(t)
\end{aligned} \tag{42}$$

$E_{q_{Movimento}}[2]$

$$\begin{aligned}
&= -C_d L_1 \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots \\
&\quad - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 \cos(\alpha) \dots \\
&\quad + C_d L_2 \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots \\
&\quad - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 + I_{zz} \frac{d}{dt} u_3(t)
\end{aligned} \tag{43}$$

É possível então gerar o gráfico da trajetória de movimento do barco ao longo do tempo ao substituir as constantes necessárias nas equações obtidas e integrando-as em seguida. Os valores adotados foram os seguintes:

$$m = 0,936; I_{zz} = 0,01631; \rho = 1000; L_1 = 0,24; L_2 = 0,024; C_d = 2,05;$$

$$p_E = 0,8; h = 0,05, \alpha = \frac{30 * np. pi}{180}; E = 0,2; C_{d2} = 5; C_{d3} = 500.$$

A massa ( $m$ ), momento de inércia ( $I_{zz}$ ),  $L_1$  e  $L_2$  (distâncias entre o centro de massa e o ponto  $P_1$ , e entre o ponto localizado no meio do leme e  $P_2$ , respectivamente) foram valores obtidos do modelo 3D dimensionado no capítulo 3. Adotou-se um ângulo o leme de  $30^\circ$ , porém é possível introduzir qualquer outro valor desejado. As condições iniciais definidas foram:

$$condi_{ini} = \{q_1: 0, q_2: 0, q_3: 0, u_1: 0.1, u_2: 0, u_3: 0\}$$

A trajetória gerada está representada na Figura 42:

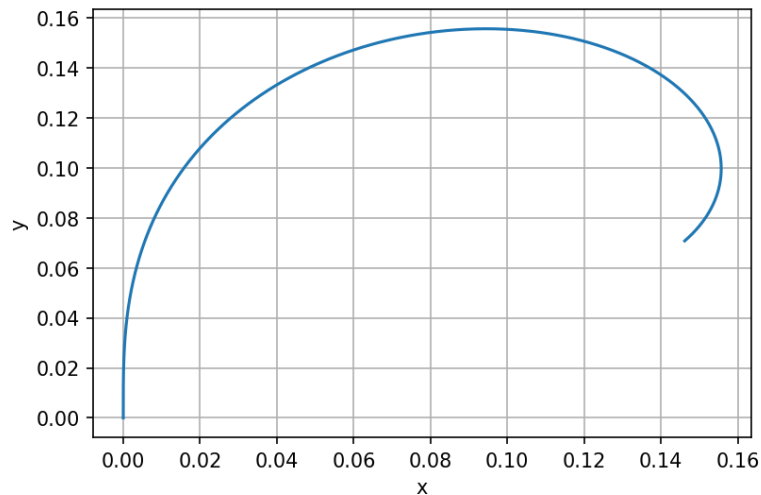


Figura 42 – Trajetória descrita pelo barco simulada através do Método de Kane. Fonte: Autoria própria.

O gráfico descreve a curva realizada pelo barco ao longo do tempo quando este tem o leme inclinado numa posição de  $30^\circ$ , se comportando da forma esperada. Como mencionado anteriormente, diversos parâmetros foram adotados apenas para que fosse possível criar o algoritmo e gerar a simulação, e futuramente devem ser calculados. Foi também gerado um gráfico para verificar a variação das coordenadas generalizadas ao longo do tempo (Figura 43).

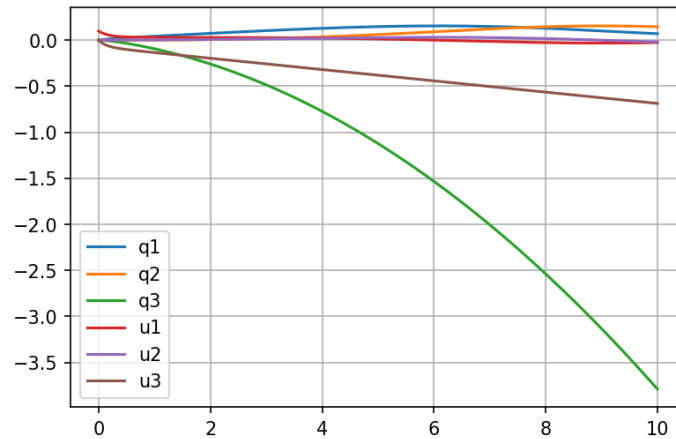


Figura 43 – Variação das coordenadas generalizadas ao longo do tempo. Fonte: Autoria própria.

A força de arrasto no leme (que varia com projeção da área deste na direção do movimento do barco), o coeficiente de amortecimento dinâmico da água no casco, o empuxo do motor (variável com a porcentagem da força consumida) e o novo centro de massa do barco após a montagem são alguns exemplos de valores que devem ser calculados experimentalmente e reintroduzidos na simulação. Somente então serão produzidos resultados condizentes com a realidade e mais confiáveis.

Obtidas as equações do movimento, é possível agora utilizá-las para efetuar o controle autônomo do barco. Pode-se ainda realizar simulações para comparar os resultados obtidos computacionalmente e experimentalmente, como a trajetória percorrida em diferentes ângulo do leme, velocidade da água ou forças aplicadas no barco. O algoritmo detalhado da simulação encontra-se no ANEXO A.

## 5. Controle Remoto do Protótipo

Neste capítulo será apresentado o processo de desenvolvimento do controle direcional e de movimento do barco. Paralelamente ao desenvolvimento da estabilidade inicial do barco, iniciou-se o desenvolvimento dos códigos de controle dos motores e dos outros componentes elétricos, assim como os para promover a comunicação entre o barco e o joystick. Tal processo foi realizado através da programação de algoritmos em um microcontrolador.

### 5.1. Circuito Eletrônico

O circuito foi realizado utilizando os seguintes componentes: um servomotor para rotação do leme, um motor DC e um módulo ponte H L298N para acionamento da hélice, dois microcontroladores, um joystick, uma bateria recarregável de hidreto metálico de níquel (Ni-MH) de 12 V (10 células) e um módulo de comunicação sem fio MX05V.

#### 5.1.1. Microcontrolador

Os microcontroladores utilizados foram os DFRduino UNO R3 disponíveis no Laboratório de Controle, Automação e Robótica. São modelos paralelos compatíveis com o Arduino Uno R3, sendo possível utilizar o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE.

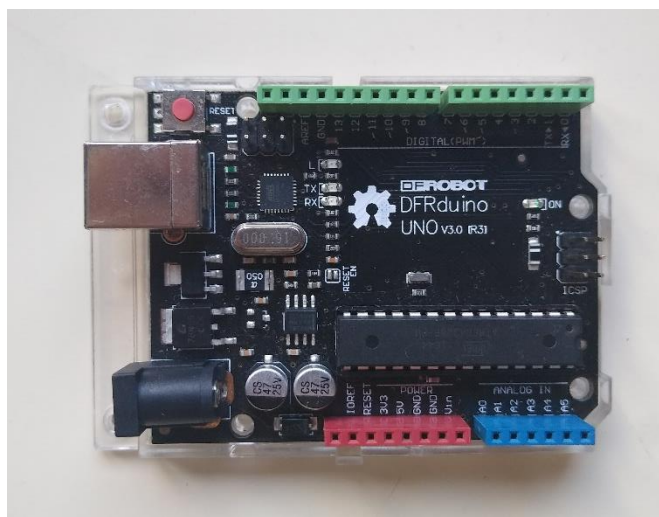


Figura 44 – DFRduino Uno utilizado no trabalho. Fonte: Autoria própria.

#### 5.1.2. Motor e Servomotor

O motor DC utilizado (modelo EMG30) é empregado em aplicações robóticas de pequeno e médio porte, e é provido de encoders que permitem por exemplo controle de

rotações e velocidade, porém estes não foram integrados ao trabalho. Ele foi utilizado juntamente com o módulo ponte H L298N, e possui as seguintes características:

- Tensão nominal: 12 V;
- Torque nominal: 1,5 *kg/cm*;
- Velocidade nominal: 170 rpm;
- Tensão nominal: 530 mA
- Diâmetro do eixo: 5 cm;
- Caixa de redução 30:1.

O servomotor utilizado é um microservo modelo GS-9025MG, com as seguintes especificações:

- Torque: 2,5 *kg.cm* a 6V;
- Velocidade: 0,1 s/60 a 6V;
- Dimensões: 23 \* 12,1 \* 28,8 *mm*.

### 5.1.3. Comunicação por Rádio Frequência

A comunicação entre o barco e o joystick será realizada utilizando um módulo de comunicação por rádio frequência de 433 Mhz (frequência de transmissão) com alcance de até 100 metros sem obstáculos (variável conforme a voltagem fornecida), com modulação AM. O módulo é composto por um transmissor, que será conectado ao joystick através do microcontrolador, e um receptor, que ficará ligado ao circuito eletrônico dentro do barco. As especificações do transmissor são as seguintes:

- Modelo: FS1000A;
- Tensão de operação: 3,5-12 V;
- Taxa de transferência: 4 KB/s

As especificações do receptor são:

- Modelo: MX-RM-05V
- Tensão de operação: 5 V;
- Corrente de operação: 4 mA;
- Sensibilidade: -105 dB

Todos os componentes eletrônicos foram disponibilizados pelo Laboratório de Eletrônica (LE) e pelo Laboratório de Controle, Automação e Robótica (LCAR) do IPB.

## 5.2. Programação Preliminar

Tendo posse de todos os componentes eletrônicos necessários, foi possível então prosseguir para a programação da comunicação por rádio frequência. Primeiramente foram criados algoritmos no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE para perceber o funcionamento dos componentes e ser capaz de controlar o motor e servomotor separadamente com o auxílio do DFRduino e um potenciômetro.

Em seguida os circuitos foram integrados através da reestruturação de cada algoritmo para controlar os dois motores ao mesmo tempo utilizando um joystick. Este algoritmo será discutido brevemente nessa seção.

Inicialmente foi necessário incluir a biblioteca *Servo.h* para permitir o controle do ângulo do servomotor. Foram então definidas duas funções de controle, uma para o motor e outra para o servo. O processo ocorre basicamente através da leitura dos pins analógicos do DFRduino (*analogRead (pin)*) em que o joystick está conectado. Em seguida, através das funções criadas é possível realizar o mapeamento da leitura analógica, que nada mais é do que a conversão de um intervalo de valores em outro intervalo de valores mais apropriados de acordo com o componente a ser comandado. Com o novo intervalo de valores é possível enviá-los ao motor e ao servo e controlar os componentes de forma adequada. A sintaxe do mapeamento é:

$$map = (value, fromLow, fromHigh, toLow, toHigh) \quad (44)$$

Sendo *value* a leitura a ser mapeada, *fromLow* e *fromHigh* o intervalo de valores a que o valor lido opera e *toLow* e *toHigh* o novo intervalo a serem convertidos.

A leitura analógica é realizada através do mapeamento da tensão de operação (5V ou 3,3V) do componente ligado ao pin analógico (neste caso, o joystick) em valores inteiros entre 0 e 1023. Para que seja possível comandar o motor é necessário converter tais valores para um intervalo entre 0 e 255, enquanto que para movimentar o servo o intervalo de valores deve ser entre 0 e 180, que são os ângulos que o servo utilizado alcança.

Em seguida, os valores lidos no joystick e mapeados são reenviados ao componentes utilizando as funções de controle criadas. O motor comunica-se com o microcontrolador através do módulo L298N. Tal módulo deve ser conectado ao microcontrolador através de um pin digital PWM, que envia ao motor a informação de que este está ligado ou desligado, e outros dois pins digitais, responsáveis por enviar o sentido de rotação do motor através da ponte H. Sendo assim, através da sintaxe

*analogWrite(pin, valor)* é possível realizar a comunicação com o pin PWM. Esta sintaxe permite o envio de valores inteiros e entre 0 e 255, por isso o mapeamento anterior foi feito nesse intervalo de valores.

Já para o servomotor, a sintaxe utilizada para o controle da rotação do eixo é:

*servo.write(angle)* (45)

Em que *servo* é o nome do objeto declarado associado ao servo e *angle* é o angulo de rotação do mesmo, daí o mapeamento ter sido feito entre 0 e 180.

A Figura 45 mostra a montagem dos circuito nessa primeira fase de programação

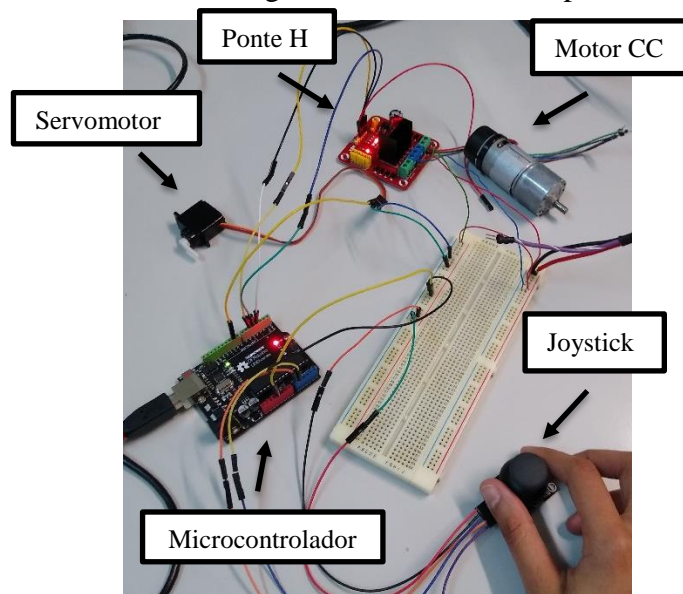


Figura 45 – Controle e acionamento do motor DC (alimentado por uma fonte de tensão de 12V), módulo L298N, servomotor e joystick utilizando um microcontrolador (alimentado por um notebook). Fonte Autoria própria.

### 5.3. Programação da Comunicação por Rádio Frequência

Finalizada a primeira parte da programação, partiu-se então para a integração do circuito com os módulos de comunicação por rádio frequência, sendo necessária a modificação do algoritmo criado anteriormente. O novo circuito ficou da seguinte forma: uma placa DFRduino conectada ao transmissor (433 MHz) e ao joystick (Figura 46) e outro DFRduino ligado ao receptor, servomotor, motor e módulo L298N (Figura 47).

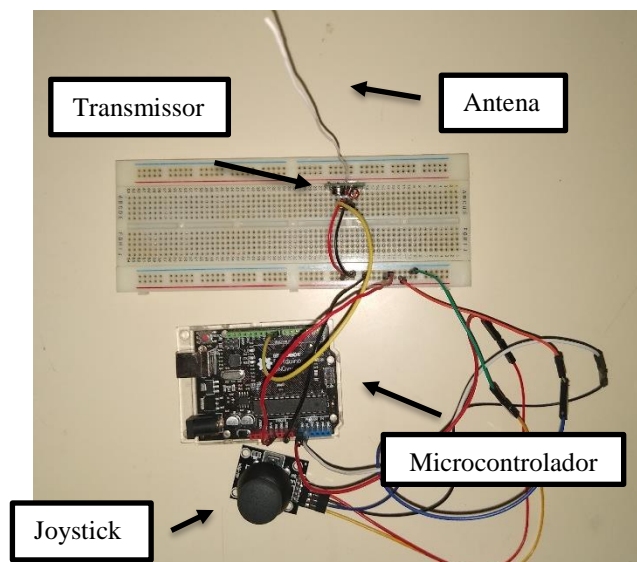


Figura 46 – Montagem da transmissão de dados do controle remoto. Fonte: Autoria própria.

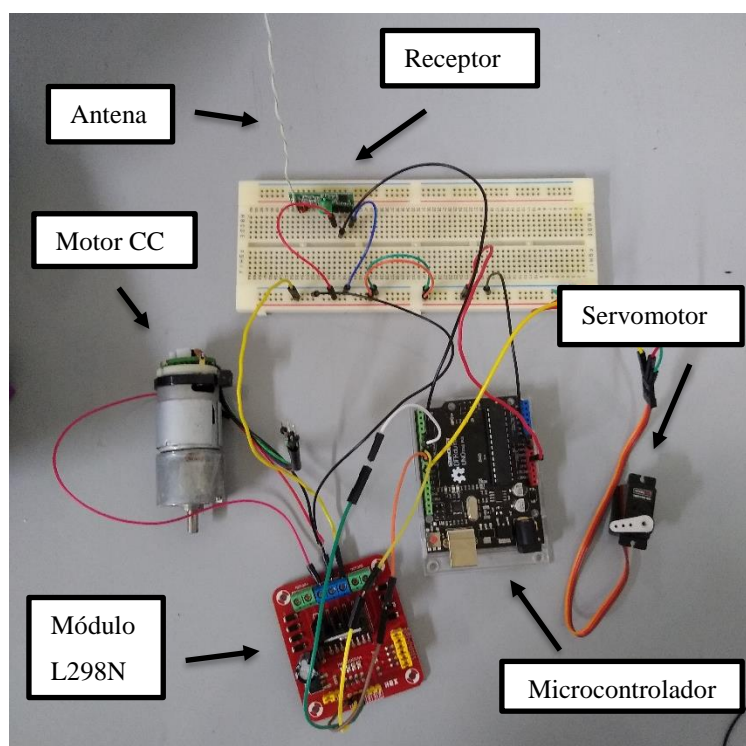


Figura 47 – Circuito a ser montado dentro do barco (recepção de dados do controle remoto). Fonte: Autoria própria.

Foram compilados alguns códigos disponíveis na internet para verificar o funcionamento do módulo de comunicação e conhecer as funções e linguagem própria antes de prosseguir para programação do mesmo. Foram soldadas antenas feitas de fio rígido de cobre, porém eram muito grossas e pesadas para os componentes e após alguns

dias acabou cedendo. Como o circuito estava em ambiente laboral e havia uma pequena distância entre o transmissor e receptor, a primeiro momento não foram soldadas novas antenas. Porém, ao longo do processo de programação, falhas na comunicação passaram a ocorrer e foi necessário soldar novas antenas de fio metálico de menor espessura na expectativa de melhorar a comunicação.

Foi preciso criar um novo algoritmo incluindo a biblioteca *VirtualWire.h*, que realiza a comunicação wireless entre módulos deste tipo e permite o envio e recebimento de dados entre dois microcontroladores. Durante os testes do algoritmo percebeu-se que a comunicação não ocorria, e após buscas em fóruns de discussão e nas documentações das bibliotecas descobriu-se que há incompatibilidade entre as bibliotecas *VirtualWire.h* e *Servo.h*, utilizada no algoritmo criado previamente. Isso ocorre pois cada uma delas utilizam um timer de 16 bits. O chip microcontrolador ATmega328 possui apenas três timers, sendo dois de 8 bits (TIMER0 e TIMER2) e um de 16 bits (TIMER1), que são responsáveis pela geração de sinais PWM, medida de intervalo de pulsos e interrupções periódicas, por exemplo. Tanto a biblioteca *VirtualWire.h* quanto a *Servo.h* usam o temporizador TIMER1. Na biblioteca *Servo.h* o TIMER1 é extremamente importante para permitir a geração de sinal no mesmo, e como todos os registros de 16 bits podem ser acessados apenas um por vez, cria-se um conflito, causando o não funcionamento do servo e de alguns pins PWM. Desta forma, optou-se por utilizar *ServoTimer2.h*, uma biblioteca não oficial que não utiliza o TIMER1 no caso de um conflito e permite o controle de até oito servomotores juntamente com a biblioteca *VirtualWire.h*.

Foram então criados dois algoritmos: um para o comando do receptor e outro para o transmissor. Nos dois algoritmos foi necessário incluir funções específicas da biblioteca *VirtualWire.h* para configurar os pins de envio e recebimento dos dados e estabelecer a transmissão das mensagens entre os módulos.

No algoritmo do transmissor foram também acopladas as leituras e mapeamentos dos dados lidos no joystick, atribuídas a duas variáveis, uma para o servomotor (*angleServoPos*) e outra para o motor (*velMotor*). Esses valores puderam então ser enviados para o receptor. Em seguida criou-se um algoritmo utilizando as funções específicas para o receptor e adaptou-se as funções de controle dos motores, porém desta vez utilizando os dados recebidos como variáveis para o acionamento dos componentes.

O algoritmo precisou ser modificado várias vezes até que a atuação do servo e do motor ocorresse de forma satisfatória. O código desenvolvido para o transmissor e para o receptor encontram-se no ANEXO B e ANEXO C, respectivamente.

## 6. Montagem do Barco

Neste capítulo será apresentado o processo de montagem dos componentes no barco. Para realizar a montagem foi necessário a impressão de algumas peças, como o leme, um suporte para o motor e outro suporte para o leme e servomotor. A Figura 48 ilustra os componentes utilizados na montagem. Foi também desenhado e impresso um suporte para manter o barco paralelo ao chão.

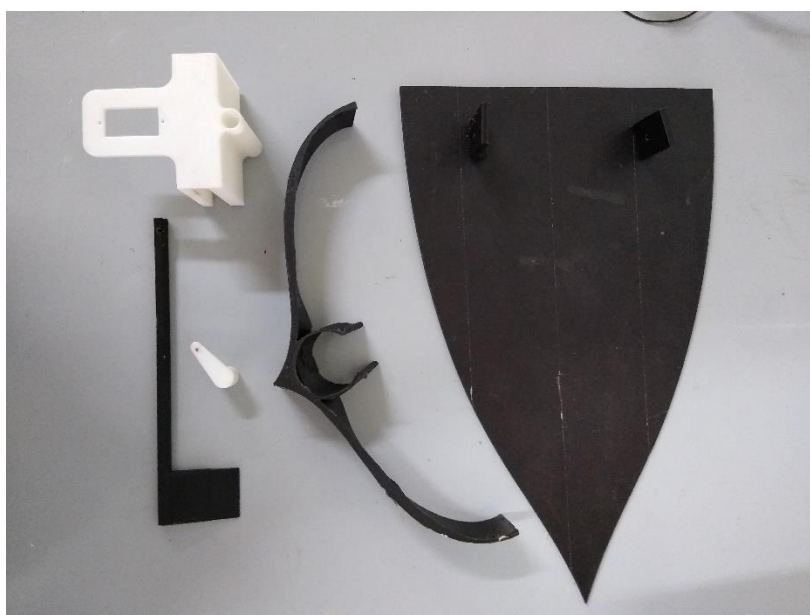


Figura 48 – Componentes impressos em PLA para auxílio na montagem dos componentes. Fonte: Autoria própria.

Por não haver tempo suficiente para realizar o dimensionamento do leme, este foi desenhado considerando uma geometria padrão e dimensões de forma com que a pá do leme ficasse localizada rente à hélice. O processo de montagem foi realizado baseando-se na posição dos componentes na montagem do modelo 3D durante a fase de dimensionamento inicial, tentando manter a posição do centro de gravidade o mais próximo da calculada possível. Para isso os componentes foram posicionados sobre a plataforma, que foi furada utilizando a ponta de um fio metálico aquecido com um isqueiro. Os componentes foram então fixos à base com o auxílio de parafusos, e dois suportes foram também parafusados à base para que essa ficasse posicionada um pouco

acima do motor. A base foi então colada com super cola ao casco, assim como a base do motor.

Para facilitar a remoção do componente para posterior modificação, a base de sustentação do servo e do leme foi mantida fixa apenas com a força de compressão causada pela introdução de uma peça retangular de pequena espessura no vão entre o componente e o casco. Para a fixação do leme foi realizado um furo passante no topo do leme e no componente que permite a conexão do eixo do sermotor com o leme. Este ficou então preso com a introdução de um fio metálico nesse furo. As Figura 49 e Figura 50 ilustram a montagem do protótipo.

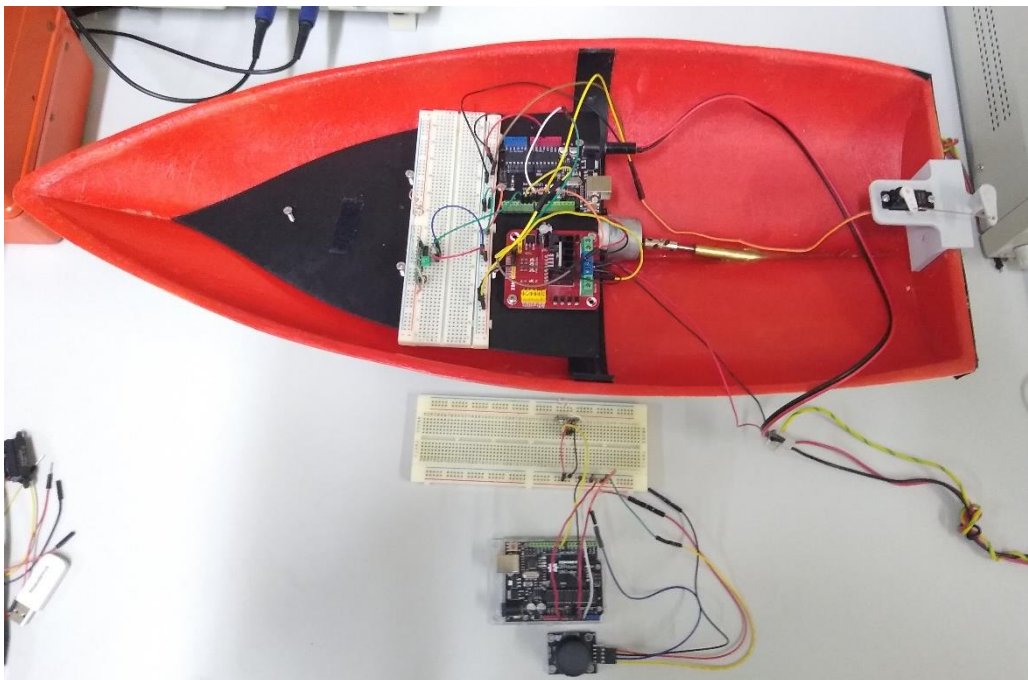


Figura 49 – Vista superior da montagem do barco. Fonte: Autoria própria.

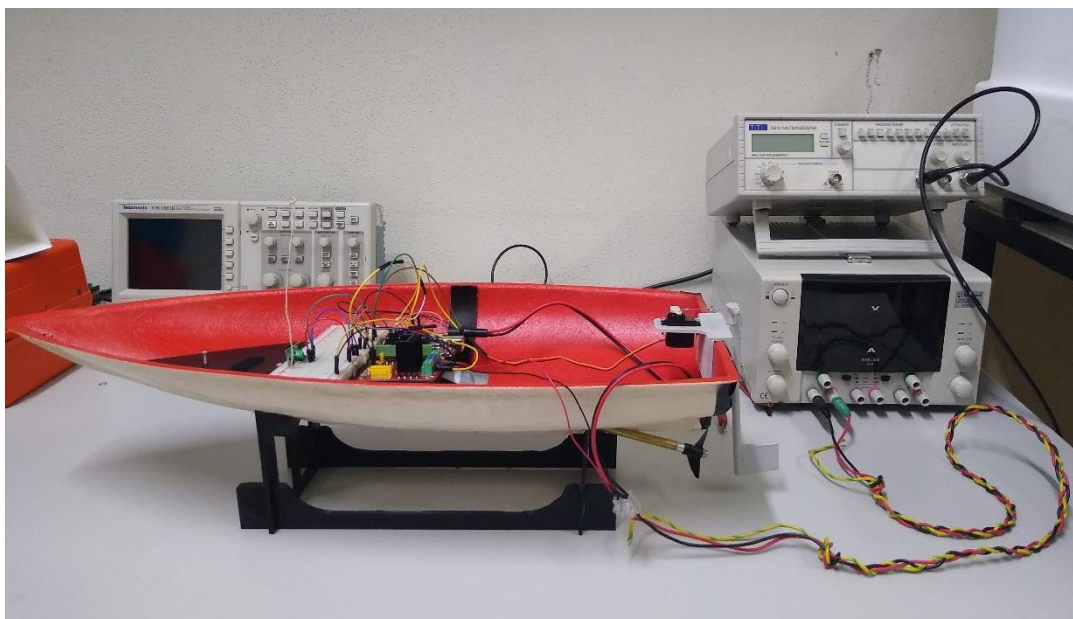


Figura 50 – Vista lateral do protótipo sobre suporte conectado à fonte de tensão. Fonte: Autoria própria.

## 7. Conclusões e Sugestões

A utilização da biblioteca *sympy.physics.mechanics* permitiu a aplicação direta do Método de Kane, o que tornou o processo do cálculo das variáveis necessárias mais rápido e a determinação das equações do movimento mais simples. Coube ao usuário apenas definir os corpos, pontos de aplicação de força e a configuração dos eixos de referência do sistema. A obtenção das equações do movimento foi útil para simular a manobrabilidade do modelo, o que mostrou-se aceitável e aparentemente condizente com a trajetória de um barco ao fazer uma curva de 30°.

Alguns valores adotados na simulação dinâmica do barco foram retirados do dimensionamento inicial do modelo ou escolhidos por suposição, não condizentes com os dados reais. Sugere-se então que em trabalhos futuros sejam realizados experimentos para obter valores como a força de amortecimento lateral no sistema, arrasto e o consumo do motor para que se possa simular o sistema com maior precisão e tomar decisões de projeto.

As equações de movimento obtidas podem agora ser utilizadas para controle autônomo do barco. Permite-se então, por exemplo, a análise da trajetória para diferentes ângulos do leme, para diferentes modelos de hélices ou ainda condições ambientais.

A geometria escolhida para o casco não favoreceu o processo de laminação. Sugere-se que em trabalhos futuros sejam fabricados outros tipos de casco, como por exemplo um catamarã, afim de analisar não só o processo de laminação mas também o impacto de outras geometrias no desempenho no barco.

Na fase da programação preliminar dos componentes eletrônicos o aprendizado em relação ao funcionamento e ao controle destes utilizando o DFRduino foi bastante fluida e fácil. Existem diversos sites e fóruns na internet, inclusive na plataforma Arduino, que auxiliam no aprendizado de vários projetos envolvendo microcontroladores.

Porém na programação integrada com os módulos de comunicação via rádio sentiu-se uma grande dificuldade, em parte pela linguagem mais específica utilizada em tal módulo. Ao fim do projeto a comunicação entre o receptor e o transmissor e atuação dos componentes ocorreram, porém o algoritmo precisou ser modificado várias vezes até que a atuação do servo e do motor ocorresse de forma satisfatória. Em diversos momentos

a comunicação entre o transmissor e o receptor cessava e não foi possível descobrir a razão.

Após a montagem dos componentes no barco, o circuito eletrônico passou a apresentar curto circuito e os motores pararam de funcionar adequadamente. Trabalhos desenvolvidos no CEFET/RJ também utilizando o microcontrolador Arduino e módulos de comunicação por rádio apresentavam o mesmo problema. É preciso analisar o circuito com mais cuidado para entender a origem dos problemas para que se possa tornar o projeto viável e o barco funcione corretamente. A bateria introduzida no protótipo foi substituída por uma fonte de alimentação, que foi utilizada para alimentar tanto o microcontrolador quanto o servomotor. Notou-se uma grande melhora na movimentação do leme e hélice e da comunicação, porém ainda com certo atraso na comunicação. O protótipo deve agora ter sua parte eletrônica testada e modificada para poder colocá-lo com segurança na água e realizar a validação experimental do projeto.

Tendo feito isso, pode-se realizar testes do consumo do motor ou força de arrasto do leme por exemplo para ter dados reais e substituí-los na simulação dinâmica, já que esses valores influenciam diretamente nos resultados. Somente então será viável a utilização das equações de movimento para gerar trajetórias e torná-lo autônomo. Poderão ser realizadas análises a respeito da proximidade entre as trajetórias simuladas e o caminho real percorrido, ou ainda imprimir vários tipos de leme e hélices e analisar o comportamento e influência na movimentação do barco.

Por fim sugere-se ainda que seja realizada uma análise do impacto e interferência da do formato da antena utilizada e da frequência dos módulos de comunicação por rádio na capacidade de direção do modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, A. P., & Filoni, E. (2011). *Eletrônica: Circuitos Elétricos*.
- Caterpillar. (2001). *Marine Analyst Service Handbook*.
- Eugene, C. Z., Lim, J. J., Nirmal, U., & Lau, S. T. W. (2019). Battery Powered RC Boats: A Review of Its Developments for Various Applications. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 33(5), 1–29.  
<https://doi.org/10.9734/cjast/2019/v33i530098>
- Faltinsen, O. M. (2005). *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. New York: Cambridge University Press.
- Fossen, T. I. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. In *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*.  
<https://doi.org/10.1002/9781119994138>
- Kang, J. wu, & Ma, Q. xian. (2017). The role and impact of 3D printing technologies in casting. *China Foundry*, 14(3), 157–168. <https://doi.org/10.1007/s41230-017-6109-z>
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). *Unmanned surface vehicles : An overview of developments and challenges Unmanned surface vehicles : An overview of developments and challenges*. (May).  
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>
- Molland, A. F. (2008). *The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design ...* Retrieved from  
<http://books.google.com/books?id=TsBZMAAACA AJ&pgis=1>
- Musio-Sale, M., Nazzaro, P. L., & Peterson, E. (2019). Visions, Concepts, and Applications in Additive Manufacturing for Yacht Design. In M. Di Nicolantonio, E. Rossi, & B. Alexander (Eds.), *Advances in Additive Manufacturing , Modeling Systems and 3D Prototyping* (975th ed., pp. 401–410).  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3\\_37](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_37)
- Nasseh, J. (2010). Gerando as Linhas do Casco. *Boat Shopping*, 90–92.
- Oliveira, C. L. V., & Zanetti, H. A. P. (2015). *Arduino Descomplicado como Elaborar Projetos de Eletrônica* (1ª edição; B. M. Carneiro, Ed.). Saraiva Educação.

- Papastavridis, J. G. (2014). *Analytical Mechanics - A Comprehensive Treatise on the Dynamics of Constrained Systems*. In *World Scientific Publishing Company*.
- Patsko, L. F. (2006). Tutorial De Montagem Da Ponte H. *Maxwell Bohr*, pp. 1–6.  
Retrieved from [https://www.robocore.net/upload/attachments/ponte\\_h\\_590.pdf](https://www.robocore.net/upload/attachments/ponte_h_590.pdf)
- Post, B., Chesser, P., Lind, R., Sallas, M., & Love, L. J. (2018). Feasibility of using big area additive manufacturing to directly manufacture boat molds. *Oakridge National Laboratory*, (Advanced Manufacturing Office Energy and Transportation Sciences Division), ORNL/TM-2017/709 NN-17-1062. Retrieved from ORNL/TM-2017/709 NN-17-1062
- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory Vol 1 - Hydrostatics and Strength*. In *Spine* (Vol. 1). Retrieved from [http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kZlIVZJczXwC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Basic+Ship+Theory&ots=QaHhR86p0H&sig=vHFEHAYP4bGsNu6jZYEozY\\_mmTQ](http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kZlIVZJczXwC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Basic+Ship+Theory&ots=QaHhR86p0H&sig=vHFEHAYP4bGsNu6jZYEozY_mmTQ)
- Santos, P. V. G. (2015). *Projeto Conceitual de um Manipulador Híbrido para Simulação de Transferência de Carga Offshore*.
- Tupper, E. C. (2004). *Naval Architecture*. In *Scientific American* (4th ed.).
- Varghese, P. P. (2010). *The Application of Advanced Product Development Techniques to a 1st Year Engineering Student Boat Design Project*. University of Waikato.

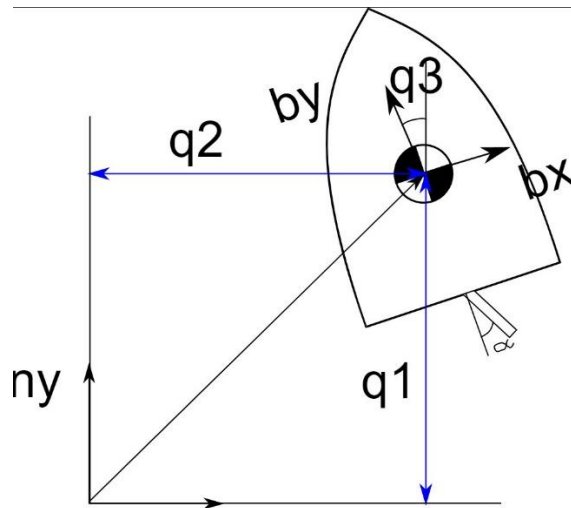
## **ANEXOS**

# ANEXO A - Cálculo das equações de movimento através da aplicação do Método de Kane

## #Dinâmica de um Barco

```
In [1]: from IPython.core.display import SVG
        SVG(filename='barco01.svg')
```

Out[1]:



```
In [2]: import sympy.physics.mechanics as me
        import sympy as sy
```

## Cinemática

```
In [3]: #Coordenadas generalizadas do barco
        q1,q2,q3 = me.dynamicsymbols('q1 q2 q3')
        q1d,q2d,q3d = me.dynamicsymbols('q1 q2 q3',1) #derivada das
        coordenadas generalizadas do barco
        alpha = sy.symbols('alpha')
        # Velocidades generalizadas
        u1,u2,u3 = me.dynamicsymbols('u1 u2 u3')
```

Equações Diferenciais cinemáticas:

$$u_1 = \dot{q}_1$$

$$u_2 = \dot{q}_2$$

$$u_3 = \dot{q}_3$$

In [4]: # *Equações Diferenciais Cinemáticas:*

```
kde = [q1d-u1,q2d-u2,q3d-u3]
```

```
kde_dic = {q1d:u1,q2d:u2,q3d:u3}
```

In [5]: # *Sistema de Referência Inercial:*

```
N = me.ReferenceFrame('N')
```

```
# Sistema de Referência fixo no barco:
```

```
B = me.ReferenceFrame('B')
```

```
# Sistema de Referência fixo no leme:
```

```
L = me.ReferenceFrame('L')
```

In [6]: B.orient(N,'Axis',[q3,N.z])

```
B.set_ang_vel(N,u3*N.z)
```

```
L.orient(B,'Axis',[alpha,B.z])
```

In [7]: # *Origem do sistema de coordenadas inercial:*

```
O = me.Point('O')
```

```
O.set_vel(N,0)
```

In [8]: # *Criação do ponto Cm no centro de massa do barco (foi considerado que o centro de massa e o centro de flutuação estão alinhados na vertical)*

```
Cm = me.Point('Cm')
```

```
# Posição do Centro de Massa:
```

```
Cm.set_pos(O,q1*N.y + q2*N.x)
```

```
# Velocidade do Centro de Massa:
```

```
Cm.set_vel(N,u1*N.y + u2*N.x)
```

```
Cm.vel(N)
```

Out[8]:  $u_2 \hat{n}_x + u_1 \hat{n}_y$

In [9]: # *Velocidade no Referencial do Barco:*

```
Cm.vel(N).express(B)
```

Out[9]:  $(u_1 \sin(q_3) + u_2 \cos(q_3)) \hat{b}_x + (u_1 \cos(q_3) - u_2 \sin(q_3)) \hat{b}_y$

In [10]: # *Criação do ponto P1, ponto que se encontra na junção do leme com o casco do barco*

```

P1 = me.Point('P1')
L1 = sy.symbols('L1') # Distância do centro de massa ao ponto P1
P1.set_pos(O,Cm.pos_from(O) + L1*(-B.y))
# Velocidade do ponto P1
P1.set_vel(N,((P1.pos_from(O)).dt(N)).subs(kde_dic))P1.vel(N)

```

Out[10]:  $u_2 \hat{n}_x + u_1 \hat{n}_y + L_1 u_3 \hat{b}_x$

In [11]: # Criação do ponto P2, ponto que se encontra no meio do leme

```

P2 = me.Point('P2')
L2 = sy.symbols('L2') # Distância do ponto P1 ao ponto P2
P2.set_pos(O,P1.pos_from(O) + L2*L.y)
# Velocidade do ponto P2
P2.set_vel(N,((P2.pos_from(O)).dt(N)).subs(kde_dic))
P2.vel(N)

```

Out[11]:  $u_2 \hat{n}_x + u_1 \hat{n}_y + L_1 u_3 \hat{b}_x - L_2 u_3 \hat{I}_x$

## Cinética

In [12]:  $m = \text{sy.symbols('m')}$  # massa do barco

$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} = \text{sy.symbols('Ixx Iyy Izz')}$  # Momentos de Inércia

In [13]:  $I = \text{me.inertia}(B, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})$

$\text{Barco} = \text{me.RigidBody}(\text{'Barco'}, \text{Cm}, B, m, (I, \text{Cm}))$

In [14]:  $h = \text{sy.symbols('h')}$  # altura do leme

In [15]:  $A_{\text{proj}} = \text{sy.sqrt}(h*((2*L2*L.x).\text{dot}(B.y))**2)$  # Projeção da área do leme com a direção da movimentação do barco

In [16]:  $\rho, v, D, \mu = \text{sy.symbols('rho v D mu')}$  # Massa específica, velocidade, Comprimento característico, viscosidade

$Re = \rho * v * D / \mu$

Re

Out[16]:  $\frac{\rho v D}{\mu}$

In [17]:  $\text{ParamsReynolds} = \{D:0.3, \rho:1000, v:0.5, \mu:1.0020*10**(-3)\}$

In [18]:  $Re.\text{subs}(\text{ParamsReynolds})$

Out[18]: 149700.598802395

In [19]:  $Re.\text{subs}(\text{ParamsReynolds})/(10**3)$

Out[19]: 149.700598802395

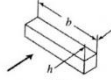






In [20]: `from IPython.display`

`import ImageImage("tabFox.jpg")`

Out[20]:

Out[20]:

**Tabela 9.3** Dados de Coeficiente de Arrasto para Objetos Selecionados ( $Re \geq 10^3$ )<sup>a</sup>

Objeto	Diagrama	$C_d (Re \geq 10^3)$
Prisma quadrado		$b/h = \infty$ 2.05
		$b/h = 1$ 1.05
Disco		1.17
Anel		1.20 <sup>b</sup>
Hemisfério (extremidade aberta faceando o escoamento)		1.42
Hemisfério (extremidade aberta faceando a jusante)		0.38
Seção C (lado aberto faceando o escoamento)		2.30
Seção C (lado aberto faceando a jusante)		1.20

<sup>a</sup>Dados de [16].  
<sup>b</sup>Revisado.

In [21]: `C_d = sy.symbols('C_d')`

`#Cd = 2.05`

In [22]: `vn = (Cm.vel(N)).dot(B.y)`

`vn`

Out[22]:  $u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))$

In [23]: `Fd = -C_d*rho*vn**2*A_proj/2*L.x # Força de arrasto do leme`

`Fd`

Out[23]:  $-C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1 \cos(q_3) - u_2 \sin(q_3))^2 \hat{\mathbf{i}}_x$

In [24]: `C_d2 = sy.symbols('C_d2') # Coeficiente de amortecimento dinâmico da água no casco (poderia ser feito como arrasto)`

`C_d3 = sy.symbols('C_d3')`

`FD = -C_d2*vn*B.y - C_d3*(Cm.vel(N)).dot(B.x)*B.x`

`FD`

Out[24]:  $-C_{d3}(u_1 \sin(q_3) + u_2 \cos(q_3)) \hat{\mathbf{b}}_x - C_{d2}(u_1 \cos(q_3) - u_2 \sin(q_3)) \hat{\mathbf{b}}_y$

In [25]: `t = me.dynamicsymbols._t`

`p_E = sy.symbols('p_E') # porcentagem da força do motor utilizada`

`E = sy.symbols('E') # Empuxo máximo do motor`

`Fp = p_E*E*B.yFp`

Out[25]:  $E_{pE} \widehat{\mathbf{b}}_y$

In [26]:  $\text{Fl} = [(\text{P2}, \text{Fd}), (\text{P1}, \text{Fp}), (\text{Cm}, \text{FD})]$

In [27]:  $\text{Bl} = [\text{Barco}]$

In [28]:  $\text{KM} = \text{me.KanesMethod}(\text{N}, \text{q\_ind}=[\text{q1}, \text{q2}, \text{q3}], \text{u\_ind}=[\text{u1}, \text{u2}, \text{u3}], \dots$

$\text{kd\_eqs}=\text{kde})$

In [29]:  $(\text{Fr}, \text{Frstar}) = \text{KM.kanes\_equations}(\text{Bl}, \text{Fl})$

In [30]:  $\text{Eq\_Movimento} = \text{Fr} - \text{Frstar}$

$\text{Eq\_Movimento}$

Out[30]:

$$\begin{bmatrix} -C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 (\sin(\alpha) \cos(q_3(t)) + \sin(q_3(t)) \cos(\alpha)) \\ -C_{d2} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))) \cos(q_3(t)) - C_{d3} (u_1(t) \sin(q_3(t)) + u_2(t) \cos(q_3(t))) \sin(q_3(t)) + E_{pE} \cos(q_3(t)) + m \frac{d}{dt} u_1(t) \\ -C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 (-\sin(\alpha) \sin(q_3(t)) + \cos(\alpha) \cos(q_3(t))) \\ + C_{d2} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))) \sin(q_3(t)) - C_{d3} (u_1(t) \sin(q_3(t)) + u_2(t) \cos(q_3(t))) \cos(q_3(t)) - E_{pE} \sin(q_3(t)) + m \frac{d}{dt} u_2(t) \\ -C_d L_1 \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 \cos(\alpha) + C_d L_2 \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 + I_{zz} \frac{d}{dt} u_3(t) \end{bmatrix}$$

In [31]:  $\text{Eq\_Movimento}[0]$

Out[31]:

$$\begin{aligned} & -C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots \\ & \quad - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 (\sin(\alpha) \cos(q_3(t)) \\ & \quad + \sin(q_3(t)) \cos(\alpha)) \dots \\ & \quad - C_{d2} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))) \cos(q_3(t)) \dots \\ & \quad - C_{d3} (u_1(t) \sin(q_3(t)) + u_2(t) \cos(q_3(t))) \sin(q_3(t)) \dots \\ & \quad + E_{pE} \cos(q_3(t)) + m \frac{d}{dt} u_1(t) \end{aligned}$$

In [32]:  $\text{Eq\_Movimento}[1]$

Out[32]:

$$\begin{aligned}
& -C_d \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots \\
& \quad - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 (-\sin(\alpha) \sin(q_3(t)) \dots \\
& \quad + \cos(\alpha) \cos(q_3(t))) \dots \\
& \quad + C_{d2} (u_1(t) \cos(q_3(t)) - u_2(t) \sin(q_3(t))) \sin(q_3(t)) \dots \\
& \quad - C_{d3} (u_1(t) \sin(q_3(t)) + u_2(t) \cos(q_3(t))) \cos(q_3(t)) \dots \\
& \quad - E_{pE} \sin(q_3(t)) + m \frac{d}{dt} u_2(t)
\end{aligned} \tag{46}$$

In [33]: Eq\_Movimento[2]

Out[33]:

$$\begin{aligned}
& -C_d L_1 \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 \cos(\alpha) \dots \\
& \quad + C_d L_2 \rho \sqrt{L_2^2 h \sin^2(\alpha)} (u_1(t) \cos(q_3(t)) \dots - u_2(t) \sin(q_3(t)))^2 \\
& \quad + I_{zz} \frac{d}{dt} u_3(t)
\end{aligned}$$

In [34]: `#KM.mass_matrix_full`

In [35]: `#KM.forcing_full`

In [36]: `import numpy as np`

`constantes = {m:0.936, Izz:0.01631, rho:1000, L1:0.24, L2:0.024, C_d:2.05, p_E:0.8, h:0.05, alpha:30*np.pi/180, E:0.2, C_d2:5, C_d3:500}`

In [37]: `import numpy as np`

`import pydy.system as dy`

`import matplotlib.pyplot as plt`

In [38]: `condi_ini = {q1:0,q2:0,q3:0,u1:0.1,u2:0,u3:0}`

In [39]: `num = 1000`

`t0 = 0`

`tf = 10`

`tn = np.linspace(t0,tf,num)`

`fps = num/(tf-t0)`

In [40]: `sistema = dy.System(KM, constants = constantes, initial_conditions = condi_ini, times = tn)`

```
In [41]: Q = sistema.integrate()
```

```
In [42]: %matplotlib inline
```

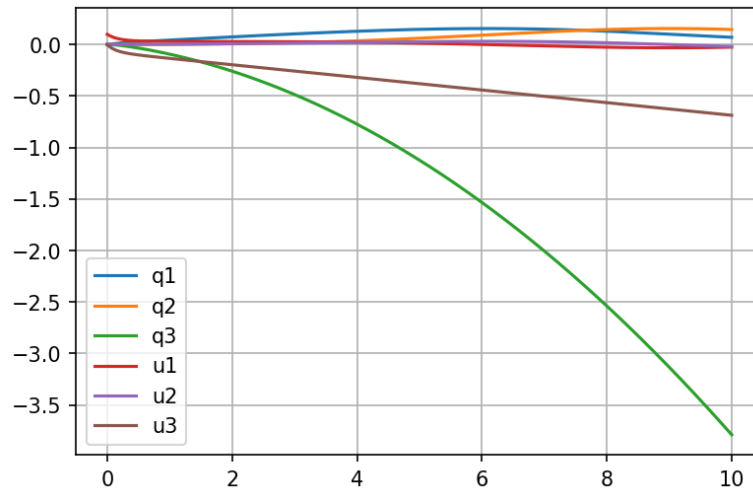
```
plt.rcParams['figure.figsize']=(6,4)
```

```
plt.rcParams['figure.dpi']=150
```

```
plt.figure()plt.plot(sistema.times, Q)
```

```
plt.grid(True)plt.legend(['q1','q2','q3','u1','u2','u3'])
```

```
Out[42]: <matplotlib.legend.Legend at 0x13f32448>
```



```
In [43]: plt.figure()
```

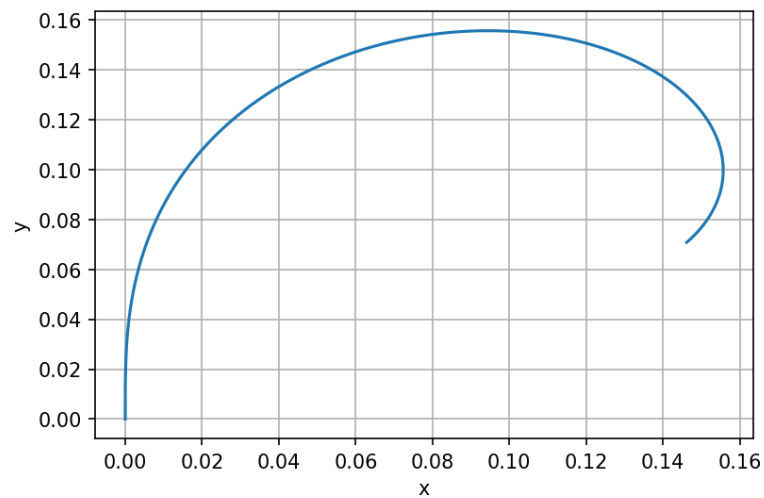
```
plt.plot(Q[:,1],Q[:,0])
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.xlabel('x')
```

```
plt.ylabel('y')
```

```
Out[43]: Text(0, 0.5, 'y')
```



In [44]: *#Criação de animação para observar a evolução dos parâmetros ao longo do tempo*

```
#from matplotlib import animation, rc
#from IPython.display import HTML
#%%matplotlib inline
#plt.rcParams['figure.figsize']=(5,5)
#plt.rcParams['figure.dpi']=150
#fig, ax = plt.subplots()
#ax.set_xlim((-6, 7))
#ax.set_ylim((-2, 12))
#ax.grid(True)
#line, = ax.plot([], [], '-')
In [45]:#v1 = Cm.pos_from(O) + 0.2*B.y
#v2 = Cm.pos_from(O) + 0.1*B.x - 0.1*B.y
#v3 = Cm.pos_from(O) -0.1*B.x - 0.1*B.y
#v1x = v1.dot(N.x)
#v1y = v1.dot(N.y)
#v2x = v2.dot(N.x)
#v2y = v2.dot(N.y)
#v3x = v3.dot(N.x)
#v3y = v3.dot(N.y)
#def animate(i):
# qn = {q1:Q[i,0],q2:Q[i,1],q3:Q[i,2]}
# v1xn = v1x.subs(qn)
# v1yn = v1y.subs(qn)
# v2xn = v2x.subs(qn)
# v2yn = v2y.subs(qn)
# v3xn = v3x.subs(qn)
# v3yn = v3y.subs(qn)
# line.set_data([v1xn,v2xn,v3xn,v1xn],[v1yn,v2yn,v3yn,v1yn])
# return (line,)
In [46]: #def init():
# line.set_data([], [])
```

```
# return (line,)  
In [47]: #anim = animation.FuncAnimation(fig, animate, init_func=init,  
#frames=1000, interval=20, blit=True)  
In [48]:#HTML(anim.to_html5_video())
```

## **ANEXO B. Algoritmo para controle e transmissão de dados do protótipo.**

```
#include <VirtualWire.h>

#define joyServo A0
#define joyMotor A1

String msg;

int valueServo, valueMotor;
char angleServoPos, velMotor;

void send(char *msg) //Função de envio da mensagem
{
  vw_send((uint8_t *)msg, strlen(msg));
  vw_wait_tx(); // Espera até que toda mensagem desapareça
  delay(200);
}
void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  // Inicializando

  vw_setup(2000); // Bits por seg
  vw_set_tx_pin(8);
}
void loop()
{
  valueServo = analogRead(joyServo);
  angleServoPos = map(valueServo, 0, 1023, 1, 255);

  valueMotor = analogRead(joyMotor);
  velMotor = map(valueMotor, 0, 1023, 1, 255);

  char data[2] = {angleServoPos, velMotor};
  data[3]=0;
  send(data);
}
```

## ANEXO C. Algoritmo para controle e recebimento de dados do protótipo.

```
#include <VirtualWire.h>
#include <ServoTimer2.h>

#define pinSpeed 6 // ~PWM Pin / enA
#define pin1 7 //in1
#define pin2 8 //in2

ServoTimer2 myServo;

int angleServoPos = 0; // Ajusta o ângulo inicial do servo

const int minPulse = 544; // Pulso para rotacionar o servo para 0°
const int maxPulse = 2400; // Pulso para rotacionar o servo para 180°

uint8_t msg[VW_MAX_MESSAGE_LEN]; // Armazena as mensagens recebidas
uint8_t msgLength = VW_MAX_MESSAGE_LEN; // Armazena o tamanho das
mensagens
int velMotor;

void setup()
{
  Serial.begin (9600); // Somente depuração
  // Inicialização
  vw_set_rx_pin(5);
  vw_setup(2000); // Bits por segundo
  vw_rx_start(); // Inicie o PLL do receptor em execução

  myServo.attach(10);
  pinMode(pin1, OUTPUT);
  pinMode(pin2, OUTPUT);
  pinMode(pinSpeed, OUTPUT);
}

void loop()
{
  if(vw_get_message(msg, &msgLength)) // Sem bloqueio

  {
    angleServoPos = map(msg[0], 1, 255, minPulse, maxPulse);
    myServo.write(angleServoPos);

    velMotor=(int) msg[1];

    if(velMotor >= 128)
    {
      digitalWrite(pin1, LOW);
    }
  }
}
```

```
    digitalWrite(pin2, HIGH);
    analogWrite(pinSpeed, (3*(-128-velMotor)));
}
else
{
    digitalWrite(pin1, HIGH);
    digitalWrite(pin2, LOW);
    analogWrite(pinSpeed, 3*(127-velMotor));
}

Serial.print(msg[0]);
Serial.print(",");
Serial.println(msg[1]);
}
}
```