

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

VICTOR GOMES SILVA

ESTUDO PRELIMINAR DO CONTROLE DE DISPOSITIVOS DE
ESTABILIZAÇÃO DE MOVIMENTO VISANDO IMPLEMENTAÇÃO EM
EMBARCAÇÕES DA REGIÃO AMAZÔNICA

MANAUS/AM
2021

VICTOR GOMES SILVA

ESTUDO PRELIMINAR DO CONTROLE DE DISPOSITIVOS DE
ESTABILIZAÇÃO DE MOVIMENTO VISANDO IMPLEMENTAÇÃO EM
EMBARCAÇÕES DA REGIÃO AMAZÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Naval
na Universidade do Estado do Amazonas,
como requisito final para obtenção do título de
Engenheiro Naval.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes.

Orientador/Presidente

Prof. M.Sc. Harlysson Wheiny Silva Maia

Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. José Ramón Hechavarría Pérez

Universidade do Estado do Amazonas

Prof. M.Sc. Jose Luiz Sansone

Universidade do Estado do Amazonas

Dr. Irving David Hernández

Universidade Federal do Rio de Janeiro

MANAUS/AM

2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este trabalho à muitas pessoas que de alguma forma me ajudaram e incentivaram, mas por não poder manter uma lista que cresceria a cada dia, serei bastante seletiva e dedicá-lo às pessoas diretamente envolvidas.

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida e por ter me proporcionado chegar até aqui.

Ao Prof. MSc. José Luiz Sansone, coordenador acadêmico deste curso, pelas suas atribuições e diretrizes, e ao Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernandez Fontes, orientador deste projeto de TCC, pelas suas sugestões, observações, conselhos e apoio.

Aos demais professores do curso de Engenharia Naval, que com todo o apoio, profissionalismo e dedicação nos proporcionaram a aquisição de novos ensinamentos.

A Universidade do Estado do Amazonas pela oportunidade de conhecimento.

A minha família, cujos agradecimentos sempre serão poucos. Especialmente a minha mãe, Luzia Gomes de Freitas, que em diversos momentos de minha vida se dedicou incansavelmente em meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A minha namorada, Thábita Pêgas, por me acompanhar e apoiar minha jornada além de constituir junto a minha mãe o meu maior incentivo de florescer como profissional.

A todos os colegas de trabalho, em especial a Anderson Silva e Denilson de Moraes pelo apoio, disponibilidade e apresentação de informações técnicas que permitiram os meus primeiros passos em minha jornada profissional.

Reiteramos aqui nossas palavras, sendo este um trabalho de que não se pode empreendê-lo sem a ajuda dos que nos cercam e querem bem.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

Existe uma grande quantidade de embarcações de deslocamento, semi-deslocamento e planeio realizando viagens cotidianas na região amazônica. As tecnologias de estabilização de movimento em sistemas navais seguem indicando benefícios em performance e vivência a bordo, dois indicadores de produto altamente desejáveis aos consumidores e devido às características competitivas do setor. Os benefícios no uso de equipamentos estabilizadores navais, tais como os equipamentos *trim tab* e *interceptor*, que nos experimentos conduzidos por Song et. al. (2018) alcançaram reduções na resistência ao avanço na ordem de 8,61%, poderiam contribuir na viabilidade econômica de uma embarcação, bem como a sua competitividade e dominância no mercado naval regional amazônico. É desejável que existam sistemas de controle adequado nas manobras de embarcações. Com esta aplicação abrir-se-iam oportunidades para aumento de velocidade de cruzeiro, redução de custos de operação, otimização de conforto e segurança a bordo. Para contribuir com esse objetivo, o presente trabalho visa revisar as tecnologias e equipamentos existentes no setor de estabilizadores de movimento naval, que possam ser instalados nas embarcações, com foco em equipamentos com sistemas de controle, como *trim tabs* ou *interceptor*. Além disso, para demonstrar o funcionamento dos sistemas de controle, foi construído um modelo simplificado de uma estrutura-viga oscilante. Os movimentos da estrutura foram minimizados através de um sistema controlado por algoritmo PID, cujo método de implementação e código foram disponibilizados. Por meio de testes simples, assemelhando o movimento de uma embarcação representado por um sistema massa-mola-amortecedor, as oscilações do modelo foram reduzidas, seguindo várias configurações do controlador. O presente trabalho é pode ser considerado como um passo preliminar no desenvolvimento de sistemas de controle de baixo custo aplicáveis a embarcações da região amazônica.

Palavras-chave: Estabilizadores. Movimentos. Embarcações. Controle. PID. Região Amazônica.

ABSTRACT

In the Amazon region, there are several, displacement, semi-displacement and planning vessels operating in typical activities. Motion stabilization technologies in naval systems may provide benefits in performance and onboard experiences, two highly desirable product indicators for consumers due to the competitive characteristics of the sector. The benefits of using naval stabilizer equipment, such as trim tab and interceptor equipment, which in the experiments conducted by Song et al. (2018) achieved a reduction in total resistance of the hull of approximately 8.61%, could contribute to the economic viability of ship, such as its competitiveness and establishment in the Amazon naval industry. Adequate control systems regarding vessel movements are desirable. This application will bring up prospects for boosting cruising speed, lowering operational costs, and enhancing comfort and safety on board. To contribute to this goal, this work aims to review existing technologies and equipment in the naval motion stabilizer sector that can be installed on vessels, focusing on equipment with control systems, such as trim tabs or interceptor systems. Moreover, to demonstrate the functioning of such control systems, a simplified model of an oscillating beam structure was built. The movement of the structure was controlled by a PID controller and, whose implementation technique and code were made available. Through simplified experiments, resembling the ship motion represented by a mass-damper-spring system, the oscillations of the model were reduced through various controller setup. This work can be considered as a preliminary step toward the development of low-cost control systems for vessels employed in the Amazon region.

Key words: Stabilizing devices. Ships. Motion stabilization. Control. PID.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Principais vias navegáveis do estado do Amazonas.....	11
Figura 2. Rios, trechos e extensões.....	11
Figura 3. Localização dos terminais hidroviários estaduais do Amazonas, identificada por pinos vermelhos, (2017).....	12
Figura 4. Recorte da revista “ <i>Popular Mechanics</i> ”, abril de 1933.	15
Figura 5. Classificação de embarcações de superfície quanto ao tipo de sustentação.....	19
Figura 6. Movimentos da Embarcação	19
Figura 7. Curva de Estabilidade com representação dos momentos restauradores e emborcadores.	24
Figura 8. Resposta ao impulso para um oscilador simples amortecido.	26
Figura 9. Hidrofólio do tipo: completamente submerso e hidrofólios que perfuram a superfície, respectivamente. Em evidência pela caixa vermelha: o equipamento hidrofólio.	29
Figura 10. Configurações de hidrofólios.	30
Figura 11. Perfil de hidrofólio.	31
Figura 12 Embarcação equipada com Hidrofólio.....	36
Figura 13. Embarcação equipada com leme.	36
Figura 14. Embarcação equipada com Estabilizadores Barbatana e Bilge Keel.	37
Figura 15. Embarcação equipada com trim tabs e power trim.	37
Figura 16. Embarcação equipada com estabilizador giroscópico.....	38
Figura 17. Ilustração de equipamento <i>Interceptor</i>	38
Figura 18. Embarcação equipada com <i>Airkeel</i>	39
Figura 19. Redução de resistência ao avanço em relação ao número de Froude.....	40
Figura 20. Como o uso de <i>Trim Tabs</i> e <i>Interceptor</i> atua para a redução na resistência ao avanço total.	41
Figura 21. Parâmetros significantes da geometria do <i>Trim Tab</i>	42
Figura 22. Ilustração do fenômeno físico associado ao <i>interceptor</i> (a) e ao <i>trim tab</i> (b).	43
Figura 23. Ilustração da vista lateral de uma embarcação equipada com <i>interceptor</i> (detalhe em azul: espelho de popa).....	43

Figura 24. Conjunto completo de equipamento <i>Interceptor</i> Volvo 450FWV para embarcações de 22 a 34 pés.....	44
Figura 25. Lancha rápida "A Noiva", derrabada, realizando o transporte de passageiros na rota Manaus-Coari.....	46
Figura 26. Diagrama de bloco de controle do algoritmo PID.....	49
Figura 27. Embarcação de alta velocidade equipada com <i>trim tabs</i>	50
Figura 28. Relação Força de Sustentação versus Ângulo de Ataque em perfis.	51
Figura 29. Esboço técnico do perfil NACA 0012.....	52
Figura 30. Gráfico do comportamento do coeficiente de sustentação, em relação ao ângulo de ataque do perfil NACA 0012.	52
Figura 31. Evolução da força de sustentação de motores sem escova, em relação a voltagem (para hélices livre).	54
Figura 32. Evolução da força de sustentação de motores sem escova, em relação a voltagem (com e sem tubulão).....	55
Figura 33. Evolução da força de sustentação de motores sem escova, em relação a voltagem (equipado com diferentes tubulões).....	56
Figura 34. Modelo Experimental.....	63
Figura 35. Diagrama elétrico simplificado do modelo experimental.	64
Figura 36. Detalhe das peças da estrutura do modelo com suas respectivas medidas (em verde: base do modelo; vermelho: peça central; e azul: peça de apoio.....	65
Figura 37. Mancais com rolamento PK08.	66
Figura 38. Vista lateral com detalhe, em verde, na linha de centro do eixo de suporte.	67
Figura 39. Detalhe lateral, com visão dos conjuntos de porcas e arruelas no eixo de suporte (em vermelho: porcas e arruelas, tipo 1; verde: porcas e arruelas, tipo 2)....	68
Figura 40. Detalhe do <i>pillow block</i> instalado no modelo (em verde: o <i>pillow block</i> ; e em laranja: detalhe da passagem das abraçadeiras plásticas).	69
Figura 41. Módulo giroscópio GY-521, com chip InvenSense MPU6050 ao centro.	70
Figura 42. Detalhe do motor EMAX MT2204 no modelo.	70
Figura 43. Recorte com algumas especificações e recomendações do motor EMAX MT2204 no site da fabricante.	71
Figura 44. Hélice KingKong 5040 utilizado no experimento.....	72
Figura 45. Detalhe do ESC instalado no modelo.....	72

Figura 46. Detalhe da instalação das fitas de chumbo no modelo.....	73
Figura 47. Detalhe do microcontrolador Espressif ESP-32 utilizado.....	74
Figura 48. Detalhe do erro ao compilar o código no microcontrolador ESP32 com os dizeres: “This library only supports boards with na AVR, SAM, SAMD, NRF52 or STM32F4.”.....	75
Figura 49. Detalhe do Arduino UNO utilizado no modelo experimental.....	75
Figura 50. Snapshot do vídeo de realização do Experimento 1.....	79
Figura 51. Snapshot da realização do experimento 2.	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Experimento 1-T1, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.	80
Gráfico 2. Experimento 1-T2, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.	81
Gráfico 3. Experimento 1-T3, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.	81
Gráfico 4. Experimento 2 - Teste A, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.	83
Gráfico 5. Experimento 2 - Teste B, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.	84
Gráfico 6. Experimento 2 - Teste C, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns equipamentos capazes de controlar eixos de movimentação de sistemas navais.	35
Tabela 2. Especificações e quantidade de cada material.	65
Tabela 3. Especificações e quantidade dos mancais de rolamento.....	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	13
1.3. BREVE REVISÃO DE ESTUDOS RELACIONADOS.....	15
1.4. Justificativa	16
1.5. OBJETIVOS	17
1.5.1. Objetivo Geral.....	17
1.5.2. Objetivos Específicos	17
2. EMBASAMENTO TEORICO	18
2.1. DEFINIÇÕES BÁSICAS DE ARQUITETURA NAVAL E DA GEOMETRIA DO CASCO.....	18
2.2. MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO	19
2.3. COEFICIENTES DE FORMA DO CASCO.....	20
2.4. DEFINIÇÕES DE ESTABILIDADE ESTÁTICA.....	23
2.5. SISTEMA MASSA MOLA AMORTECIDO E DECREMENTO LOGARÍTMICO	25
2.6. EQUAÇÃO DE BERNOULLI.....	27
2.7. O EQUIPAMENTO HIDROFÓLIO	28
2.8. OS EQUIPAMENTOS NAVAIS ESTABILIZADORES.....	34
2.9. O EQUIPAMENTO <i>FLAPE / TRIM TABS</i>	41
2.10. O EQUIPAMENTO <i>INTERCEPTOR</i>	43
2.11. BENEFÍCIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE <i>TRIM TABS</i> E <i>INTERCEPTOR</i> NA REGIÃO AMAZÔNICA.....	45
2.12. BENEFICIOS DA IMPLEMENTAÇÃO AUTOMATIZADA DE <i>TRIM TABS</i> E <i>INTERCEPTORS</i>	46
2.13. O CONTROLADOR PID	48
2.14. Característica da Força de Sustentação gerada por <i>Trim Tabs</i>	50

2.15. Característica da Força de Sustentação de hélices.....	53
3. METODOLOGIA.....	58
3.1. MÉTODOS	58
3.2. TÉCNICAS	58
3.3. PROCEDIMENTOS	58
3.4. MODELO EXPERIMENTAL.....	60
3.4.1. Estrutura física do modelo experimental	64
3.4.1.1. Estrutura de Sustentação	64
3.4.1.2. Mancais com Rolamento.....	66
3.4.1.3. Eixo de suporte.....	67
3.4.1.4. Eixo do experimento	67
3.4.1.5. Porcas e Arruelas	67
3.4.1.6. Pillow Block.....	68
3.4.1.7. Sensor Giroscópio	69
3.4.1.8. Motores não escovados	70
3.4.1.9. Hélices.....	71
3.4.1.10. Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC).....	72
3.4.1.11. Fitas de Chumbo	73
3.4.1.12. Abraçadeiras Plásticas.....	73
3.4.1.13. Microcontrolador	74
3.4.2. O Código do modelo experimental.....	76
4. RESULTADOS DO MODELO.....	79
4.1. EXPERIMENTO 1	79
4.2. EXPERIMENTO 2	82
5. DISCUSSÃO	86
5.1. TENDÊNCIA DOS RESULTADOS.....	86
5.1.1. Experimento 1 – Oscilação Livre	86

5.1.2. Experimento 2 – Oscilação com controle	88
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTURO	90
7. REFERÊNCIAS	92
8. APÊNDICES	99
8.1. APÊNDICE A.....	99
8.2. APÊNDICE B.....	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O estado do Amazonas possui a maior malha hidroviária do país, composta por rios conhecidos por suas vastas extensões (figura 1). Destes podem-se destacar como principais, em potencial de navegação, os rios: Amazonas-Solimões, Negro, Madeira, Juruá, Acre, Purus e Japurá (DIAS; MACIEL, 2018), como pode ser visto na figura 2.

Figura 1. Principais vias navegáveis do estado do Amazonas.



Fonte: Dias; Maciel, 2018.

Figura 2. Rios, trechos e extensões.

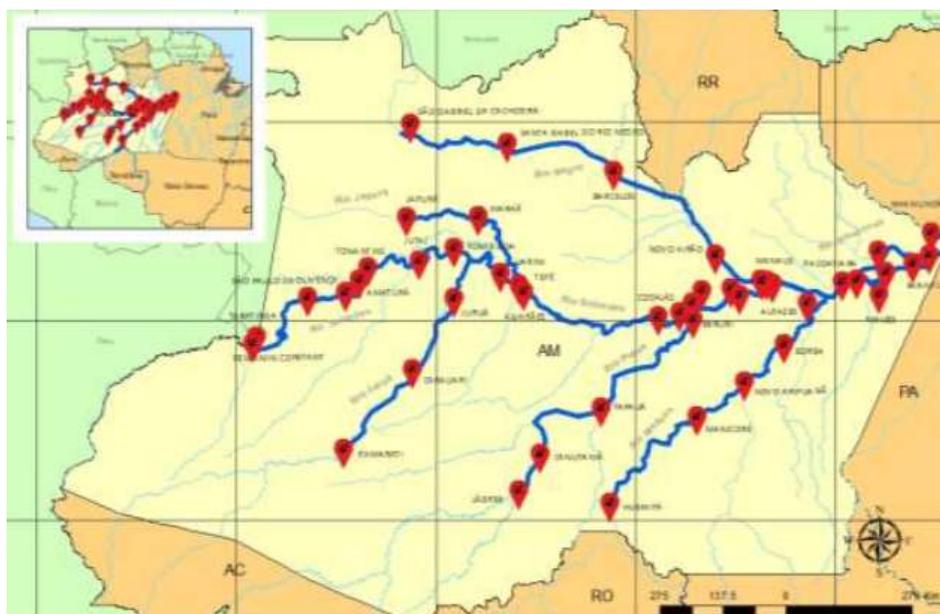
Rio	Extensão Aproximada (km)
Amazonas	3.108
Negro	1.210
Juruá	3.489
Japurá	721
Içá	368
Purus	2.846
Acre	796
Madeira	1.546

Fonte: Dias; Maciel, 2018.

Considerando o fator histórico, devido à tradição da navegação como principal meio de locomoção na região e somando-se ao difícil acesso a diversos municípios, inviabilizando a presença do modal rodoviário, e ainda a rica disponibilidade natural, temos como resultado um conjunto de fatores que torna o transporte hidroviário vital para o deslocamento de passageiros e cargas no estado (DUARTE, 2017).

Vale destacar que, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2021), as características naturais, a boa profundidade da calha dos rios amazônicos e a inexistência de corredeiras na planície amazônica, os tornam bastante propícios à navegação, diferentemente de grande parte dos rios localizados no centro-sul do território nacional. Tais características também contribuem para a sua elevada demanda de transporte de pessoas, mercadorias, produtos, animais, entre outros. O exposto resulta na circulação de aproximadamente 1,7 milhão de passageiros e 1 milhão de toneladas de cargas transportadas, nos principais trechos de conexão entre a capital Manaus e municípios do estado, no ano de 2017, conforme estimativas dadas pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2018, p. 33-34), figura 3.

Figura 3. Localização dos terminais hidroviários estaduais do Amazonas, identificada por pinos vermelhos, (2017).



Fonte: ANTAQ, 2018.

Ainda segundo a ANTAQ, (2018, p. 82) o escoamento dessas embarcações se faz em uma rede de 57 terminais hidroviários distribuídos em 47 municípios, sendo desses 9 localizados na capital Manaus, como pode ser visto na figura 3.

Dentro desta complexa rede hidroviária, a navegação fluvial amazonense conta com um arsenal de múltiplos modelos de embarcações, que variam desde uma pequena canoa, até barcos com mais de 30 metros de comprimento (STACCIARINI; FELDMANN, 2020).

Com ênfase para os chamados “expressos”, ou lanchas “ajato” como também são chamadas, este é um segmento de embarcações destinadas ao transporte de passageiros que “vêm apresentando um crescimento de quantidade e qualidade na última década” (DAVID, 2010, p. 93), devido ao constante aumento de sua procura dentro da navegação fluvial amazônica. Fato este que se deve, principalmente, pela significativa redução na duração da viagem. Uma viagem que antes demorava dias, com o aparecimento dessa nova classe de embarcações, passou a demorar horas (DAVID, 2010). Essas mudanças na maneira amazônica de transportar pelos rios, está rompendo com os meios considerados fora dos padrões do mercado em termos de temporalidade como o autor Santos (1999) chama de “tempo lento”, ou seja, tempos que funcionam fora da lógica capitalista.

Contudo, de acordo com Moraes e Moraes (2008), a construção desses novos barcos se dá por um projeto ainda rudimentar, feito de forma artesanal com conhecimentos adquiridos de forma empírica, realizado entre os estaleiros e os armadores regionais. Dessa forma, esse projeto ainda apresenta muito espaço para inovações tecnológicas, visando maiores benefícios para os passageiros e armadores. Com relação às embarcações regionais, seria possível implementar tecnologias de estabilização de movimentos, baseadas no controle de diversos tipos de mecanismos de interação com a água.

1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os primeiros registros de projetos de embarcações que operam em regimes de semi-deslocamento e de planeio datam do fim do século XIX (MUNROE, 1985). Atualmente a sua aplicação vem abrangendo cada vez mais classes de embarcações, como

por exemplo, embarcações de transporte de passageiros, apoio marítimo, resgate, aplicações militares, esporte e lazer.

Projetos de embarcações de semi-deslocamento e planeio visam atingir maiores velocidades em relação às embarcações de deslocamento. Em consequência do aumento da velocidade, há o aparecimento de uma força de sustentação e as embarcações “decolam” da água, reduzindo consideravelmente sua área de superfície molhada e, portanto, sua resistência ao avanço. Este princípio de funcionamento caracteriza a sustentação destas embarcações de forma predominantemente hidrodinâmica (AGUIAR, 2018).

Verifica-se que cascos de planeio tendem a experimentar excessivas acelerações e oscilações quando em operação devido suas reações de estabilidade, especialmente em ondas. Este comportamento aflige sobretudo a tripulação devido ao desconforto causado pelas altas acelerações e deslocamentos irregulares que por fim afetam a performance, segurança e integridade da tripulação.

Segundo Barros (2006), um balanço rápido de rolamento indica boa estabilidade da embarcação já um balanço lento, com menores acelerações, indica estabilidade deficiente e pode vir a ser extremamente perigoso em mares agitados.

Já Sakaki et. al. (2018) mostra que por estudos e resultados reais, a instalação de equipamentos do tipo fôlio estabilizador, em específico *flapes*, também conhecido por *trim tabs*, instalados na popa de embarcações, trazem aperfeiçoamentos significativos na performance da embarcação, pela possibilidade de controle de seus movimentos e subsequentemente da redução da resistência ao avanço total.

Sabendo que a engenharia naval se encontra em uma busca incessante da redução da resistência ao avanço das embarcações projetadas, minimizando a potência necessária para a navegação, o consumo de combustível do sistema propulsivo e, conseqüentemente, os custos de operação da embarcação (MELLO, 2015).

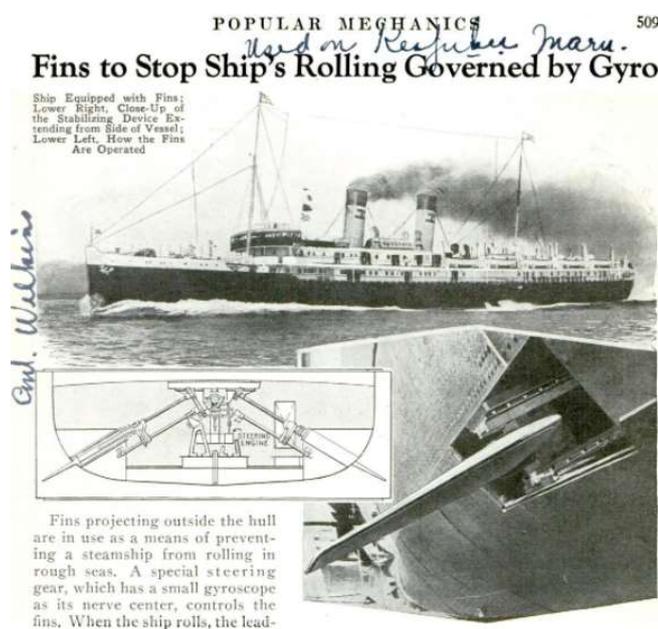
Este trabalho de conclusão de curso de graduação tem por objetivo apresentar os dispositivos de estabilização de movimentos mais comuns que poderiam ser implementados de maneira prática em embarcações da região amazônica, incluindo alguns aspectos básicos da teoria de controle que possa ser utilizada. Além disso, foi realizado um caso de estudo de controle de movimentos de uma viga oscilante para

assemelhar um sistema massa mola amortecido, implementando um código de controle para reduzir os movimentos sob diversas condições de oscilação. Espera-se que o código possa ser estendido posteriormente e utilizado em equipamentos do tipo fólio estabilizador de baixo custo voltado a pequenas e médias embarcações da região amazônica.

1.3. REVISÃO DE ESTUDOS RELACIONADOS

Apesar de os estudos e ensaios relacionados a equipamentos estabilizadores navais, hidrofólios e semelhantes, terem iniciado no século XIX, evidenciada pela patente registrada em 1869 por Emmanuel Denis Farcot, onde o inventor descreve em sua patente um equipamento que, em suas palavras, “adapta o costado e o fundo do casco da embarcação com planos inclinados ou quinas que geram efeito de sustentação na água” (tradução livre de HAYWARD, 1965 – 1967). A primeira embarcação a utilizar equipamento fólio estabilizador surge apenas em 1933 em um navio de cruzeiro japonês, como publicado na revista de tecnologia “*Popular Mechanics*”, relatado em edição de mesmo ano (figura 4).

Figura 4. Recorte da revista “*Popular Mechanics*”, abril de 1933.



Fonte: *Popular Mechanics*, 1933.

Já a primeira embarcação comercial a utilizar equipamento hidrofólio, objetivando erguer a embarcação sobre as águas surgiu somente em 1952, com a criação da

embarcação PT10 *freccia d'oro* pelo estaleiro Supramar, uma lancha rápida de transporte de até 32 passageiros.

Na atualidade, a utilização de equipamento folio estabilizador do tipo barbatana, como apresentado na figura anterior, segue em alta em navios de cruzeiro e em embarcações com equipamentos de alta tecnologia embarcada. De acordo com Babicz (2015), o uso de equipamento estabilizador é aplicado em embarcações de cruzeiro e transporte de passageiros a muitos anos como método para redução do movimento de rolamento e para melhorar as performances da embarcação quanto ao consumo de combustível, velocidade e ainda aprimorar a segurança e o conforto a bordo.

Ainda segundo Babicz (2015), a busca de armadores para equipar suas embarcações com equipamento fôlio estabilizador, em específico os do tipo barbatana, vem se alastrando para outros segmentos.

O estudo, a avaliação e a comparação de equipamentos hidrofólios, de forma geral, seguem três linhas de concepção com objetivos ímpares e, apesar de os estudos focarem na otimização de seu objetivo em específico, a utilização do equipamento hidrofólio influencia em características voltadas as demais linhas de pesquisa. São estas: estudos de hidrofólio voltados a máxima performance, máximo conforto, ou ainda, é evidente a existência de estudos voltados à busca da otimização energética da embarcação.

1.4. Justificativa

Com os recentes avanços da ciência e tecnologia tornando equipamentos eletrônicos e computacionais mais acessíveis, abre-se uma janela de oportunidade para verificar as vantagens e desvantagens da aplicação de dispositivos estabilizadores para embarcações regionais da Amazônia. Tais dispositivos podem ser de pouca complexidade, implementação prática, acessíveis e de custo reduzido. Estas características podem viabilizar a aplicabilidade desses equipamentos em regiões onde o conhecimento a respeito destes equipamentos é reduzido, como a região Amazônica.

Neste cenário, o presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica de assuntos relacionados aos dispositivos de controle de oscilação das embarcações, com ênfase nos relacionados a fólios estabilizadores, para então desenvolver um código baseado em algoritmo PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e empregá-lo num modelo

experimental, simplificado, a fim de realizar análises preliminares quanto à empregabilidade deste equipamento.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo Geral

Revisar e apresentar as tecnologias mais comuns para estabilizar movimentos de embarcações, desenvolvendo e implementando um sistema simplificado de estabilização de movimentos automatizado de baixo custo, com capacidade de ser estendido para utilização em pequenas e médias embarcações do mercado local amazônico.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Apresentar as tecnologias mais comuns para estabilizar movimentos de embarcações.
- Estudar os fundamentos de utilização de estabilizadores de movimento de embarcações, com ênfase nos dispositivos folio estabilizadores;
- Desenvolver e implementar um código PID que possa ser utilizado para controlar um equipamento de estabilização de movimentos para embarcações;
- Elaborar um modelo experimental simplificado, tendo o ar como meio fluido, para verificar o código desenvolvido; e
- Propor a utilização dos equipamentos de estabilização em embarcações no mercado regional amazônico.

2. EMBASAMENTO TEORICO

Em harmonia com o objetivo de fundamentar este trabalho, o embasamento teórico aqui apresentado traz conteúdos pertinentes a estabilizadores de movimentos, incluindo o estudo de hidrofólios, que são comumente utilizados para tal propósito.

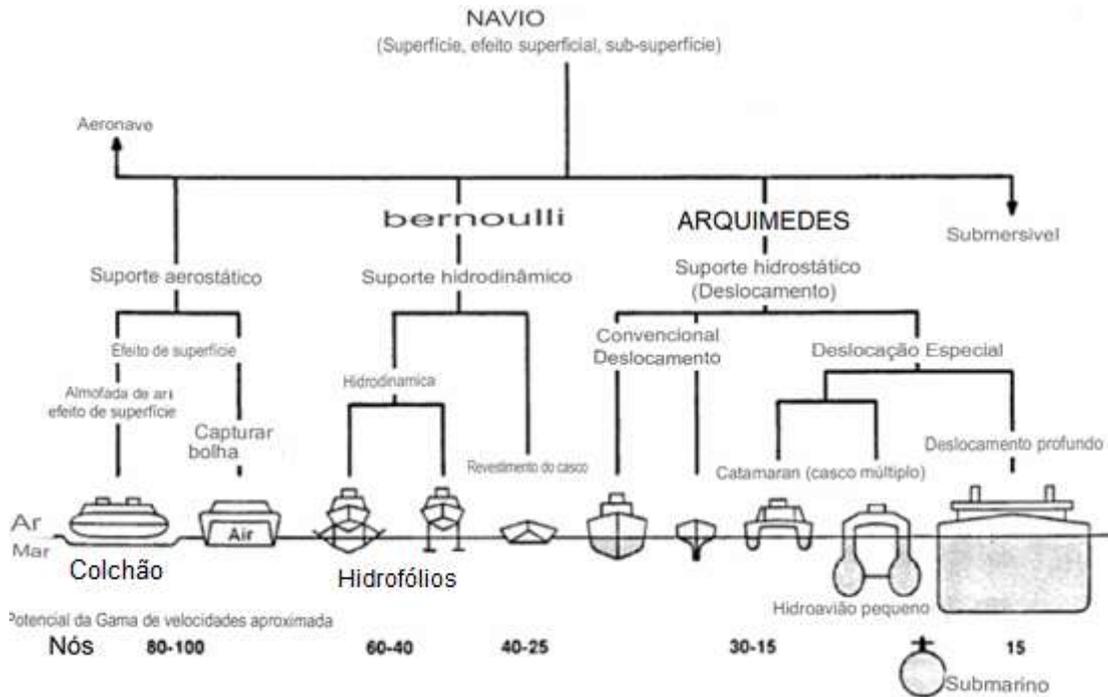
2.1. DEFINIÇÕES BÁSICAS DE ARQUITETURA NAVAL E DA GEOMETRIA DO CASCO

De acordo com Lewis (1988), podemos classificar as embarcações de acordo com o tipo de sustentação responsável pela sua operação na superfície. Esta classificação distribui as embarcações de superfície em três grandes grupos (figura 5), são estes:

- Embarcações com suporte Aerostático: São as embarcações onde os efeitos de sustentação ocorrem acima da superfície, como as embarcações Aerodeslizadoras;
- Embarcações com suporte Hidrodinâmico: São onde estão classificadas as embarcações dotadas da capacidade de utilizar o princípio de Bernoulli para sua sustentação, a exemplo das lanchas rápidas e embarcações com equipamento hidrofólio;
- Embarcações com suporte Hidrostático (ou embarcações de deslocamento): São as embarcações que utilizam do princípio de Arquimedes através de um deslocamento de líquido, água do mar ou rio, para gerar sustentação.

O fluxograma a seguir, extraído do conteúdo de Lewis (1988), detalha a classificação do autor quanto a sustentação em superfície.

Figura 5. Classificação de embarcações de superfície quanto ao tipo de sustentação.

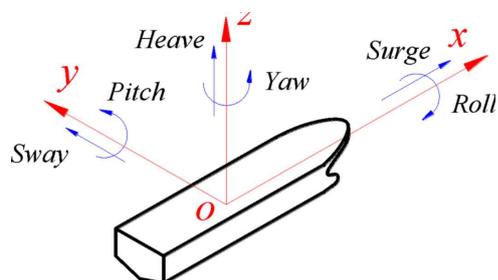


Fonte: Lewis, 1988, tradução livre.

2.2. MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO

As embarcações possuem movimentos rotativos e movimentos lineares (figura 6) que isoladamente podem ser reconhecidos para auxiliar na forma de descrição do movimento realizado.

Figura 6. Movimentos da Embarcação



Fonte: Researchgate (2006).

Ao tratar os movimentos lineares de uma embarcação, Barros (2006) os classifica em três movimentos distintos, são estes:

- Deslizamento Lateral (Sway): Movimento Lateral da embarcação com o mar de través;
- Deslizamento para vante (Surge): Movimento para vante; e
- Queda (Heave): Movimento para cima ou para baixo.

Já a respeito dos movimentos rotativos desempenhado pelas embarcações, Barros (2006) os classifica da seguinte maneira:

- Balanço ou Rolamento (Roll): Movimento de oscilação de um bordo ao outro;
- Caturro ou Arfagem (Pitch): Movimento de oscilação no sentido proa-popa; e
- Cabeceio ou Guinada (Yaw): Rotação da embarcação que altera a direção do seu curso.

Com a classificação dos movimentos da embarcação, Barros (2006) traz importantes observações a respeito da natureza dos movimentos. O autor afirma que os movimentos rotativos e lineares estarão sempre associados entre si e, ainda, associados ao estado de mar, fato tal que se verifica em estudos aprofundados do movimento das embarcações.

2.3. COEFICIENTES DE FORMA DO CASCO

Os coeficientes de forma do casco, de acordo com Lewis (1988), são coeficientes adimensionais que expressam as formas do casco e permitem analisar e estimar as formas das embarcações, além de comparar suas formas em relação a outras embarcações.

Em geral, tratamos a respeito de quatro coeficientes de forma: Coeficiente de Bloco, Coeficiente da Seção Mestra, Coeficiente Prismático e, por fim, Coeficiente de Linha D'água.

O primeiro, o Coeficiente de Bloco, denominado C_b , de acordo com Fajarra (2006), informa quão cheia são as formas do casco abaixo da linha d'água, em relação a uma caixa de dimensões iguais ao comprimento boca e calado do navio.

Já Lewis (1988), define o Coeficiente de Bloco formalmente como a razão do volume deslocado da embarcação, em relação a um prisma retangular de dimensões iguais

ao comprimento de linha d'água, boca e altura em um referido calado. Lewis (1988) ainda apresenta a seguinte definição matemática:

$$C_b = \frac{\nabla}{L B T} \quad (1)$$

Onde:

C_b : Coeficiente de Bloco;

∇ : volume deslocado;

L: comprimento da linha d'água;

B: boca moldada; e

T: calado de projeto.

Conforme Fajarra (2006), pode-se afirmar que o Coeficiente de Bloco está diretamente relacionado com a velocidade e capacidade de carga das embarcações. De uma maneira geral, o autor declara que quanto maior o C_b , maior a capacidade de carga e menor a velocidade da embarcação, por implicar em uma maior resistência ao avanço da forma submersa.

Ainda em relação ao Coeficiente de Bloco, Lewis (1988) indica que os valores usuais de C_b costumam variar entre 0.36, para uma embarcação de alta velocidade afilada, e 0.92, para cargueiros lentos e de alto deslocamento.

A respeito do Coeficiente de Seção Mestra, definido C_{SM} , Lewis (1988) define matematicamente como a razão da área imersa da seção mestra, pela área do calado e boca da embarcação no calado referido.

$$C_{SM} = \frac{A_m}{B T} \quad (2)$$

Onde:

C_{SM} : Coeficiente de Seção Mestra;

A_m : área da seção mestra, imersa no calado referido;

B: boca moldada; e

T: calado de projeto.

De forma geral este coeficiente, segundo Fajarra (2006), apresenta valores entre 0.750 e 0.995. Exceto em casos de navios muito esbeltos, onde os valores de C_{SM} são reduzidos e podem atingir a ordem de 0.620.

Já o Coeficiente Prismático, C_p , é definido por Fajarra (2006) como um coeficiente que estabelece a razão entre o deslocamento e o volume de um prisma imaginário, dado pelo produto entre a área da seção mestra submersa (A_m) e pelo comprimento da embarcação.

$$C_p = \frac{\nabla}{L A_m} \quad (3)$$

Onde:

C_p : Coeficiente Prismático;

∇ : volume deslocado;

L: comprimento da linha d'água; e

A_m : área da seção mestra, imersa no calado referido.

Ainda segundo Fajarra (2006, p. 44), “o coeficiente prismático dá uma ideia da distribuição longitudinal da flutuação do navio”. O autor conclui que, se duas embarcações de coeficientes prismático diferentes possuírem os mesmos comprimentos e deslocamentos, a embarcação com menor coeficiente prismático terá uma maior área de seção mestra imersa e, portanto, uma maior concentração de volume de deslocamento à meia nau.

É possível, através de álgebra simples relacionar os três coeficientes representados acima da seguinte maneira:

$$C_p = \frac{C_b}{C_{SM}} \quad (4)$$

Por fim, o Coeficiente de Linha D'água, C_{wp} , é definido por Fajarra (2006) como a razão entre a área de flutuação no calado de projeto e a área do retângulo dado pelo comprimento e boca na linha d'água referida.

$$C_{WL} = \frac{A_{WP}}{L B} \quad (5)$$

Onde:

C_{WL} : Coeficiente de Linha D'água; e

A_{WP} : área da seção cortada pela linha d'água.

2.4. DEFINIÇÕES DE ESTABILIDADE ESTÁTICA

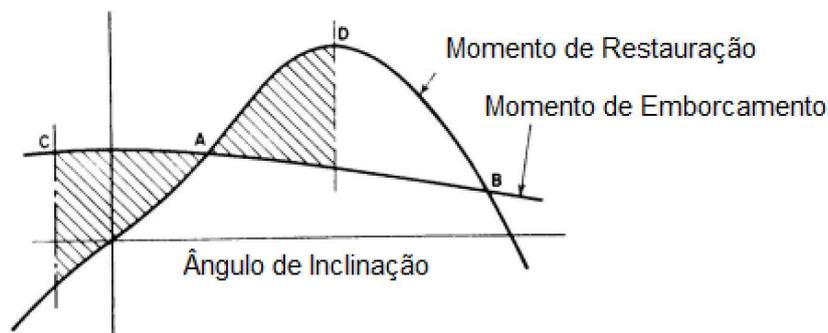
Fajarra (2006, p. 52), define estabilidade estática como “a capacidade que a embarcação tem de retornar à condição de equilíbrio inicial quando lhe é imposto um pequeno deslocamento”. Ainda segundo Fajarra (2006), entende-se como uma embarcação estável, isto é, dotada de estabilidade estática positiva se, dado um pequeno deslocamento, esta apresentar uma força hidrostática restauradora que tende a retorná-la à situação inicial, caso contrário a embarcação é dita instável.

A estabilidade estática de uma embarcação é geralmente avaliada através da sua altura metacêntrica, de acordo com Fajarra (2006), considera-se para cálculos de estabilidade:

$$GZ = GM \text{ sen}(\theta) \quad (6)$$

Lewis (1988), por sua vez, apresenta uma análise mais técnica sobre o assunto e indica que a estabilidade da embarcação deve ser avaliada através de suas curvas de estabilidade, como demonstrado na figura 6, na qual se avalia as curvas dos momentos restauradores, em relação aos momentos emborcadores, momentos que atuam na embarcação causando ângulo de banda.

Figura 7. Curva de Estabilidade com representação dos momentos restauradores e emborcadores.



Fonte: Lewis, 1988.

Estas análises são comparadas a critérios que estão vinculados ao tipo de embarcação e condições operacionais. Os critérios de comparação são apresentados por organizações voltadas à segurança da embarcação, certificadoras e classificadoras, como por exemplo: A *International Maritime Organization* (IMO), *American Bureau of Shipping* (ABS), Registro Brasileiro de Navios e Aeronaves (RBNA).

Segundo a NORMAM-02/DPC (2011), pode-se realizar uma estimativa do peso inclinante, peso tal que gera um momento de emborcamento, conhecendo a altura metacêntrica, o deslocamento da embarcação e a distância do peso a linha de centro através de:

$$P = \frac{\Delta GM \tan \phi}{d} \quad (7)$$

Onde:

P: peso inclinante;

\emptyset : ângulo de emborcamento;

d : distância do peso à linha de centro;

Δ : deslocamento da embarcação; e

GM: Altura Metacêntrica.

Analisando a equação acima podemos, por matemática simples, identificar o ângulo de emborcamento através das demais variáveis. Este novo arranjo da equação permite avaliar o ângulo inclinante, através do momento inclinante, ou emborcador.

Segue que:

$$P d = M \quad (8)$$

E, portanto:

$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{M}{\Delta GM}\right) \quad (9)$$

Onde:

\emptyset : ângulo de emborcamento;

M: momento inclinante, ou emborcador;

Δ : deslocamento da embarcação; e

GM: Altura Metacêntrica.

2.5. SISTEMA MASSA MOLA AMORTECIDO E DECREMENTO LOGARÍTMICO

A análise da dinâmica de uma embarcação pode ser realizada seguindo a abordagem de um sistema massa-mola-amortecedor (JOURNÉE, 2001).

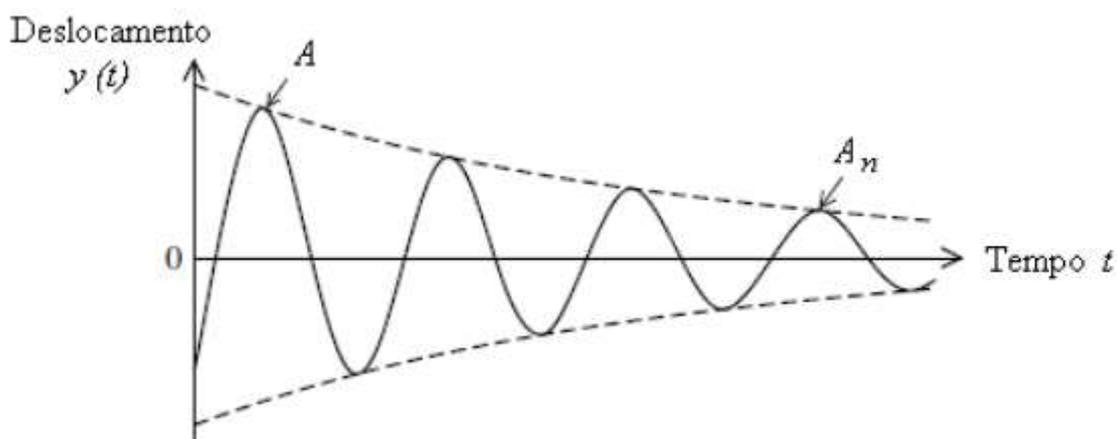
Uma importante consideração inicial a respeito do sistema massa mola amortecido está na inclusão de uma vibração livre ao conjunto objeto de estudo. Esse reconhecimento,

de acordo com Soeiro (2008), indica que a análise do sistema é composta por condições iniciais de movimento (deslocamento inicial e/ ou velocidade inicial), não havendo nenhuma excitação externa persistente.

Passadas as considerações iniciais, segue-se para a análise das amplitudes de movimento do sistema massa mola amortecido. Uma estratégia interessante para realizar este estudo é utilizar da ferramenta do decaimento logarítmico, método que estuda a taxa de redução da amplitude do movimento livremente amortecido. Isso permite uma solução para determinar o amortecimento no sistema por meios experimentais medindo quaisquer dois deslocamentos consecutivos (RAO, 2008).

Segundo Cossolino e Pereira (2010), quando um sistema oscilatório com um grau de liberdade com amortecimento é excitado por um impulso, sua resposta vem na forma de decaimento logarítmico (figura 8).

Figura 8. Resposta ao impulso para um oscilador simples amortecido.



Fonte: Cossolino; Pereira, 2010.

Os mesmos autores definem o método do decaimento logarítmico a partir da seguinte equação:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A}{A_n}\right) \quad (10)$$

Onde:

δ : decremento logarítmico, adimensional;

n : número de picos, adimensional;

A : amplitude do primeiro pico; e

A_n : amplitude do último pico.

Os autores ainda demonstram que, a partir do decremento logarítmico δ , podemos definir o índice de amortecimento do sistema relacionando o decremento logarítmico como:

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (11)$$

Onde ζ é o índice de amortecimento, adimensional, definido por:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (12)$$

2.6.EQUAÇÃO DE BERNOULLI

A equação de Bernoulli (1738) é a forma matemática do princípio de Bernoulli, que consiste em uma confirmação da conservação de energia na movimentação de fluidos e possui firmes fundações físicas, como as definições de pressão, energia cinética e potencial, para avaliação de linhas de corrente. Levando em consideração que este somente possui capacidades para avaliar fluidos em regimes laminares (HYPERPHYSICS, 2005).

A equação matemática de Bernoulli (1738) leva em consideração os efeitos que as variações de velocidade e de energia potencial gravitacional tem sobre a pressão em uma linha de fluido (HYPERPHYSICS, [2005?]). E é, geralmente, apresentada através da equação a seguir.

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g H_1 = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g H_2 \quad (13)$$

Ou ainda através da equação:

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g H_1 = \text{Constante} \quad (14)$$

Onde:

P : pressão no ponto de medição;

ρ : Massa Específica do fluido;

V : velocidade do fluido;

g : gravidade;

H : altura de medição; e

Os subscritos 1 e 2 indicam os locais na linha de corrente de aferição das medidas.

Ainda, de acordo do Fox et. al. (2014), para a aplicação da equação, verifica-se a necessidade das seguintes restrições:

1. Não há atrito interno no fluido, fluido não viscoso;
2. A vazão é constante;
3. A densidade do fluido é constante, o fluido é incompressível; e
4. Não há adição de calor no fluido.

2.7. O EQUIPAMENTO HIDROFÓLIO

Um hidrofólio é um equipamento ou estrutura, de superfície plana ou curva, destinada a obter reação da água à medida que a embarcação se move. Essa interação fornece uma força de sustentação, devido ao seu ângulo de ataque frente ao escoamento de um fluido, resultando em estabilidade, ou ainda na elevação da embarcação sobre as águas. (MEYER JR., 1990).

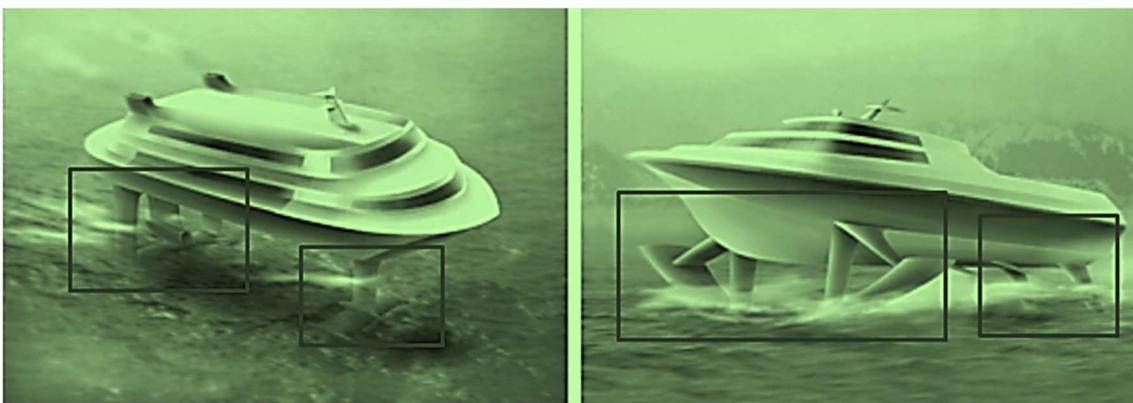
Conforme Faltisen (2005), as embarcações que atingem condição de sustentação por hidrofólio, *foilborn condition*, como as apresentadas na figura 8, possuem, de forma

geral, boas características de condução e manobrabilidade, além de perderem pouca velocidade devido à interação com as ondas.

Johnston (1985), por sua vez, apontou como importantes aspectos relacionados a utilização de hidrofólios em embarcações:

- Melhor manutenção de estabilidade direcional e rolamento;
- Recuperação estável de *broaches*;
- Menor deterioração da performance em mares agitados; e
- Segurança.

Figura 9. Hidrofólio do tipo: completamente submerso e hidrofólios que perfuram a superfície, respectivamente. Em evidência pela caixa vermelha: o equipamento hidrofólio.



Fonte: Faltinsen, 2005.

De acordo com Faltisen (2005), existem duas principais configurações de hidrofólio, ilustradas na figura 9: completamente submersos e fólios que perfuram a superfície. Os hidrofólios do tipo que perfuram a superfície, *surface piercing* “são projetados de forma que fiquem parcialmente fora d’água durante a operação” (ARTMANN JUNIOR, 2015, p. 32).

Meyer Jr. (1990) afirma que a sustentação da embarcação moderadamente acima da superfície d’água é possível devido a sua estrutura, que conecta o fólio com o casco da embarcação. De modo que, quando esse hidrofólio encontra uma onda, quantidades diferentes da superfície do fólio são submersas, a fim de manter a sustentação igual ao peso da embarcação. Para tanto, a embarcação deve oscilar em *pitch*, *roll* ou *heave* (ou uma combinação de todos os três), mudanças que ocorrem automaticamente e, portanto,

o sistema de *fólios que perfuram a superfície* é dito auto estabilizador (MEYER JR., 1990).

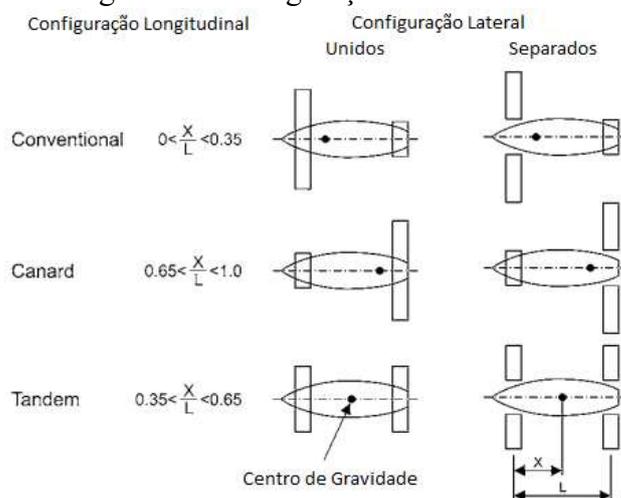
Por outro lado, os hidrofólios completamente submersos (*fully-submerged*), como o próprio nome indica, operam o tempo todo abaixo da superfície d'água. O principal atributo desse hidrofólio é que o sistema fornece uma capacidade operacional única em que o navio perde totalmente o contato com a superfície d'água e com os efeitos de onda (MEYER JR., 1990).

Por se tratar de um sistema com estrutura essencialmente vertical, não contribuindo com qualquer elevação da embarcação, esse hidrofólio necessita “de alguns mecanismos para proporcionar força de sustentação da embarcação” (ARTMANN JUNIOR, 2015, p. 32).

Ainda segundo Meyer Jr. (1990), este mecanismo deve ajustar constantemente o ângulo de ataque do fólio, seja por meio da inclinação do fólio, ou pelo uso de *flapes* para que a sustentação seja obtida de acordo com a velocidade da embarcação, seu peso e o estado do fluido.

Além disso, Faltisen (2005) e Johnston (1985) como descrito na imagem 9, demonstram que se 65% do peso da embarcação é suportado pelo hidrofólio de proa ou de popa o conjunto hidrofólio é então classificado como convencional ou *canard*, respectivamente, como pode ser visto na Figura9, a qual mostra a classificação de embarcações tipo hidrofólio, dependendo da posição do centro de gravidade.

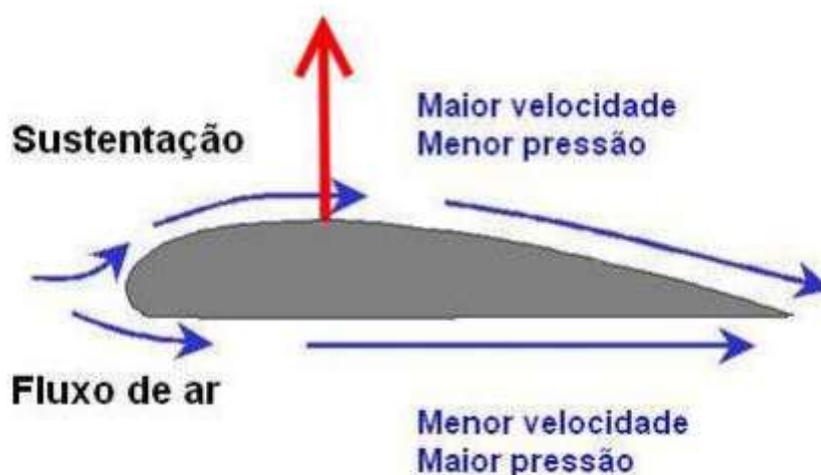
Figura 10. Configurações de hidrofólios.



Fonte: Johnston, 1985.

Faltisen (2005, p 165, tradução livre) ainda reforça que “a teoria e a física que envolvem estas configurações de hidrofólios, ilustrada pela figura 10, são relevantes para outros equipamentos da indústria naval, como por exemplo: os próprios lemes e *Trim Tabs* ou *Flapes*.”

Figura 11. Perfil de hidrofólio.



Fonte: Luiz, 2014.

Segundo Faltisen (2005), a capacidade de um perfil gerar sustentação pode ser representada através da análise de equilíbrio estático da embarcação, descrito pela seguinte equação:

$$F_s = C_l \frac{\rho}{2} V_{emb}^2 A_h \quad (13)$$

Onde:

C_l : Coeficiente de Sustentação;

F_s : Força de Sustentação;

V_{emb} : velocidade da embarcação; e

A_p : área do hidrofólio.

O Coeficiente de Sustentação C_l , de acordo com Faltinsen (2005), é o definido por:

$$C_l = \frac{F_s}{\frac{\rho}{2} V_{emb}^2 A_h} \quad (14)$$

E ainda segundo o mesmo autor, a força de sustentação F_s em uma embarcação erguida sobre os hidrofólios é igual ao peso da embarcação:

$$F_s = m g \quad (15)$$

Por sua vez, Hilton [s.d.], afirma que podemos determinar a potência a ser consumida pelo hidrofólio, devido a esse equipamento ir de encontro ao fluxo e, portanto, gerar arrasto, através do Coeficiente de Resistência C_d . Que é descrito pela seguinte equação:

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V^2 A_h} \quad (16)$$

Onde:

C_D : Coeficiente de Resistência;

D : resistência dinâmica;

ρ : massa específica do fluido;

V : velocidade do fluxo sobre o hidrofólio; e

A_h : área do hidrofólio.

Ainda existem coeficientes do hidrofólio relacionados aos momentos, estes são: C_r , C_m e C_n que são respectivamente Coeficiente de Rolamento (*Roll*), Coeficiente de Arfagem (*Pitch*) e, finalmente, Coeficiente de guinada (*Yaw*).

Estes coeficientes explicitam a capacidade do fólio em gerar momento que, associado à sua posição de instalação, é capaz de gera um braço de momento, que atua

no eixo correspondente evidenciando a capacidade do hidrofólio em alterar as características de oscilação do casco em *roll*, *pitch* e *yaw*.

Estes coeficientes, de acordo com Hansen (2008), podem ser descritos pelas seguintes equações:

$$C_p = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V^2 A_p} \quad (17)$$

$$C_r = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V^2 A_r} \quad (18)$$

$$C_y = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V^2 A_y} \quad (19)$$

Onde:

C_p : Coeficiente de Resistência para o eixo de pitch;

C_r : Coeficiente de Resistência para o eixo de roll;

C_y : Coeficiente de Resistência para o eixo de yaw;

A_p : Area do folio correspondente ao eixo de pitch;

A_r : Area do folio correspondente ao eixo de roll;

A_y : Area do folio correspondente ao eixo de yaw;

D : Força relacionada ao eixo correspondente ;

ρ : massa específica do fluido; e

V : velocidade do fluxo sobre o hidrofólio no eixo correspondente

Os perfis utilizados em hidrofólios são inúmeros, segundo Faltisen (2005) são amplamente utilizados perfis do tipo NACA (exemplo em figura 22). Os hidrofólios são normalmente utilizados com o intuito permitir controle das condições de *trim*, *roll* e *heave* dinamicamente.

A vista desta capacidade de controle é possível verificar três linhas de pesquisa voltadas a hidrofólio, com objetivos específicos:

1. Otimização da Performance: Os estudos voltados a esta linha de pesquisa buscam aprimorar o posicionamento de *trim*, *roll* e *heave* da embarcação, com a finalidade de incrementar a performance, normalmente está ligada a alcançar maiores velocidades;
2. Menor Consumo Energético: As pesquisas nesta linha de estudo estão associadas a alcançar a maior eficiência energética possível do sistema, usualmente associada a obter maior alcance operacional, ou menores custos de operação; e
3. Otimização do Conforto a Bordo: Os estudos relacionados a este objetivo, de forma geral, buscam reduzir as acelerações e movimentos oscilatórios, causados pelas reações hidrodinâmicas da embarcação sobre as águas.

Embora os estudos relacionados a hidrofólios normalmente estejam associados a uma destas linhas de pesquisa, a utilização do equipamento exerce influência nos parâmetros das demais. Ou seja, equipar uma embarcação com um equipamento hidrofólio otimizado ao conforto a bordo, também, interfere em critérios qualificativos de performance e consumo energético da embarcação.

2.8. OS EQUIPAMENTOS NAVAIS ESTABILIZADORES

Os equipamentos desenvolvidos com o intuito de controlar os movimentos dos sistemas navais vem sendo aperfeiçoados ao longo dos anos. Algumas soluções obtiveram pequenos êxitos e possuíam aplicação relativamente difícil, como apresentado por Burger e Corbet (1966) em seu livro, *Ship Stabilizers*. A Tabela 1 relaciona um conjunto de equipamentos navais habilitados para o controle de um, ou mais, eixos de movimentação das embarcações e evidencia a capacidade do equipamento em atuar sob baixas velocidades.

Tabela 1. Alguns equipamentos capazes de controlar eixos de movimentação de sistemas navais.

Equipamento	Principais Eixos de controle	Efetivo em baixas Velocidades?
Hidrofólio	<i>Roll, Yaw, Pitch e Heave.</i>	Não
Leme	<i>Yaw</i>	Não
Estabilizadores Barbatana	<i>Roll</i>	Não
<i>Power Tabs</i>	<i>Pitch</i>	Não
<i>Trim Tab / Flapes</i>	<i>Pitch e Roll</i>	Não
<i>Interceptor</i>	<i>Pitch e Roll</i>	Não
<i>Bilge Keel</i>	<i>Roll</i>	Sim
Tanques Anti Rolamento	<i>Roll</i>	Sim
Estabilizadores Giroscópicos	<i>Roll</i>	Sim
<i>Airkeel</i> (Patenteado Dacoma)	<i>Roll</i>	Sim

Fonte: adaptado de Burger; Corbet, 1966 – Sinha, 2021 – Dacoma, 2021.

Na figura abaixo (figura 12), ilustra-se uma embarcação equipada com equipamento hidrofólio. A aplicação do hidrofólio é feita através de hidrofólios do tipo perfuradores de superfície, *surface piercing*. Isto faz com que o equipamento seja completamente fixo no casco, não há mecanismos de controle ativo, o equipamento é capaz de ajustar sua atuação através da diferença de densidade entre a água através do formato do dispositivo.

Figura 12 Embarcação equipada com Hidrofólio.



Fonte: Adaptado de Pierre Bouras, 2020.

Em sequência observa-se embarcações equipadas com leme (figura 13), estabilizadores barbatana e bilge keel (figura 14). O leme é um clássico folio de estabilização de movimento naval para o eixo de *yaw*, já os estabilizadores barbatana e bilge keel atuam no eixo de *roll* da embarcação.

Figura 13. Embarcação equipada com leme.



Fonte: Adaptado de MarineInsight, 2012.

Figura 14. Embarcação equipada com Estabilizadores Barbatana e *Bilge Keel*.



Fonte: Adaptado de Alaniaris, 2006.

Abaixo vê-se uma embarcação equipada de equipamento *trim tab* e *power trim* (figura 15). Os trim tabs são pranchas instaladas na popa da embarcação que desviam as linhas de fluxo da água do fundo do casco quando a embarcação está em movimento, este equipamento é capaz de atuar nos eixos de *roll* e *pitch* da embarcação. Já o equipamento *power trim* ajusta o ângulo do propulsor na água e é capaz de ajudar o ângulo de *pitch* da embarcação.

Figura 15. Embarcação equipada com *trim tabs* e *power trim*.



Fonte: Adaptado de Vataro, 2015.

Na imagem seguinte (figura 16) vê-se uma pequena embarcação equipada com um equipamento de estabilização de movimentos giroscópico. Este tipo de aplicação utiliza-se dos fundamentos de conservação momento angular para gerar a força que atua na compensação de rolamento da embarcação.

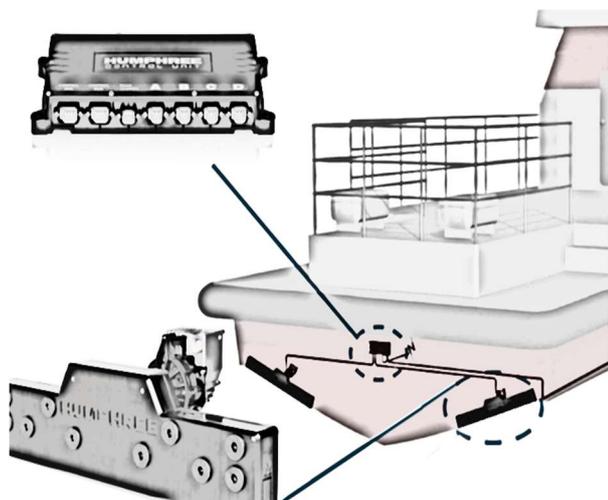
Figura 16. Embarcação equipada com estabilizador giroscópico.



Fonte: Adaptado de Lenny, 2016.

Na figura abaixo (figura 17) vê-se uma ilustração do equipamento *Interceptor* e seu posicionamento no casco de uma embarcação.

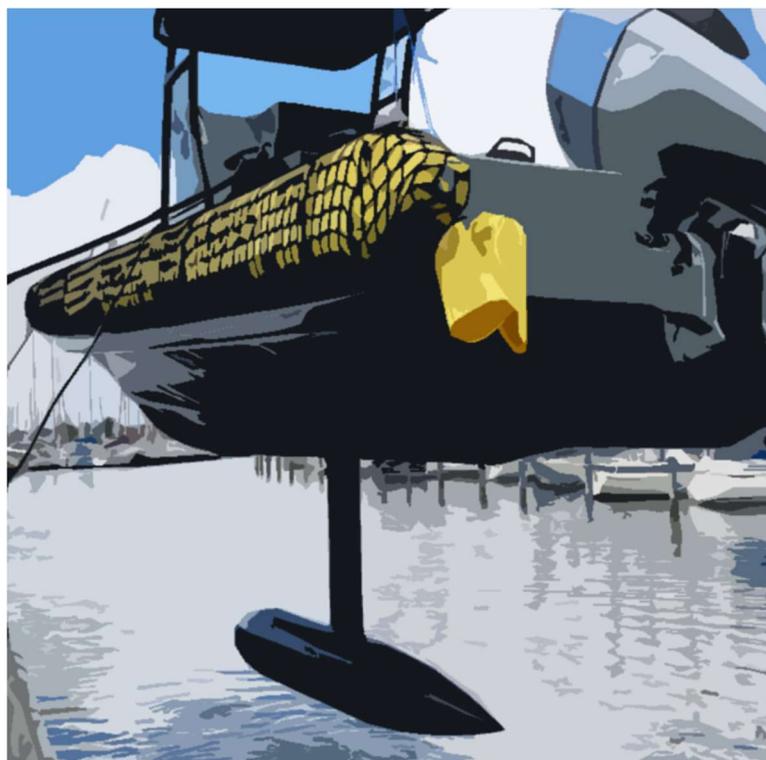
Figura 17. Ilustração de equipamento *Interceptor*.



Fonte: Adaptado de Humphree, 2021.

Uma das tecnologias mais recentes de estabilização de movimentos navais pode-se ver na imagem a seguir (figura 18). Esta aplicação utiliza-se de um tanque de ar controlado abaixo da quilha para controlar as movimentações de rolamento da embarcação.

Figura 18. Embarcação equipada com *Airkeel*.



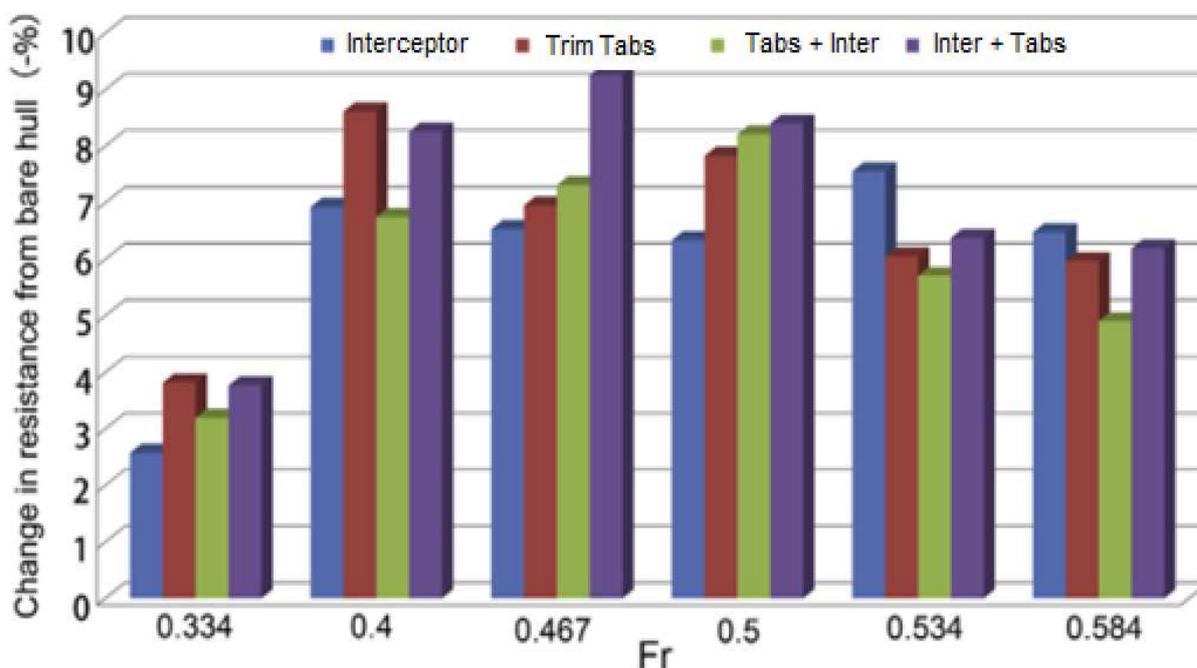
Fonte: Adaptado de Dacoma, 2021.

Considerando o uso potencial de embarcações de pequeno e médio porte na região amazônica, foram selecionados para análise os equipamentos do tipo *trim tab* e *interceptor*, devido ao local de instalação dos equipamentos ser vantajosa para o controle e atuação no movimento das embarcações. Uma vez que, segundo Song et. al. (2018), estes equipamentos, se posicionados no espelho de popa da embarcação, estão na posição mais vantajosa para controlar os movimentos da embarcação.

Além disso, Song et. al. (2018) salienta que o uso de equipamento estabilizadores *trim tabs* e *interceptors*, nos últimos anos, vem apresentando uma alta em demanda, principalmente o equipamento *interceptor* por possuir um tamanho reduzido e maior viabilidade econômica.

Atualmente, no cenário naval, os estudos relacionados á eficácia de atuação dos equipamentos *trim tabs* e *interceptors* vem sendo muito discutida. Song et. al. (2018) evidencia em seus estudos (figura 19) a capacidade de ambos os equipamentos serem capazes de atuar na performance de embarcações significativamente bem, sendo utilizados de maneira independente, mas com melhor performance quando utilizados em conjunto, oferecendo uma redução de resistência ao avanço média de 7.04%.

Figura 19. Redução de resistência ao avanço em relação ao número de Froude.



Fonte: Adaptado de Song et. al., 2018.

Esta redução de resistência ao avanço é descrita pelo autor através do diagrama demonstrado na figura 20 onde a redução da resistência ao avanço ocorre, segundo o autor, pela redução na resistência friccional, causada pela mudança de atitude da embarcação, que resulta na redução da superfície molhada; e pela redução da resistência residual, causada pelo aumento efetivo da linha d'água da embarcação, elevando a embarcação e reduzindo a altura efetiva de ondas. Estes fatores devem-se ao fato de que os equipamentos permitem o ajuste de *trim* e *heave* da embarcação (SONG et. al., 2018).

Figura 20. Como o uso de *Trim Tabs* e *Interceptor* atua para a redução na resistência ao avanço total.



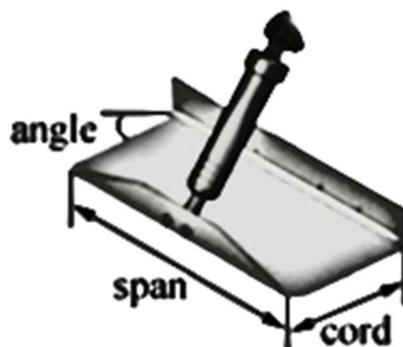
Fonte: adaptado de Song et. al., 2018.

2.9. O EQUIPAMENTO *FLAPE* / *TRIM TABS*

O equipamento *Flape* ou *Trim Tab*, de acordo com Sakaki et. al. (2018, p. 133, tradução livre), “são apêndices no casco com tamanho relativamente pequeno e são constituídos de um plano protuberante na popa da embarcação e com um ângulo que o faz se estender além da superfície do casco”. Ainda segundo o autor, os parâmetros dimensionais mais importantes deste equipamento são (figura 21):

1. O comprimento do equipamento (*span*);
2. Profundidade (*cord*); e
3. Ângulo em relação ao casco.

Figura 21. Parâmetros significantes da geometria do *Trim Tab*.



Fonte: Adaptado de Sakaki; Ghassemi; Keyvani, 2018.

O ângulo do *trim tab* faz com que o equipamento se estenda sobre o fluxo, desviando as linhas de fluxo do fluido e gerando uma zona de alta pressão que, por sua vez, gera a força de sustentação do equipamento que atua o casco. Esta força de sustentação gera um momento, que atua principalmente nos eixos nos quais acontecem os movimentos de *pitch* e *roll*, momento que depende da posição de instalação do equipamento em relação a boca da embarcação (SONG et. al., 2018).

Ainda de acordo com Sakaki et. al. (2018), este equipamento é amplamente utilizado com os objetivos de:

1. Reduzir os custos operacionais das embarcações, através do aumento do ciclo de vida dos equipamentos;
2. Aumento da economia de combustível;
3. Aumento da velocidade da embarcação; e
4. Redução da quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera.

Além desta categoria de hidrofólio, normalmente, apresentar perfil fino, do tipo laminar, como apresentado na Figura 13, este equipamento, ainda, apresenta benefícios práticos na atitude da embarcação, conforme Náutica (2015), como:

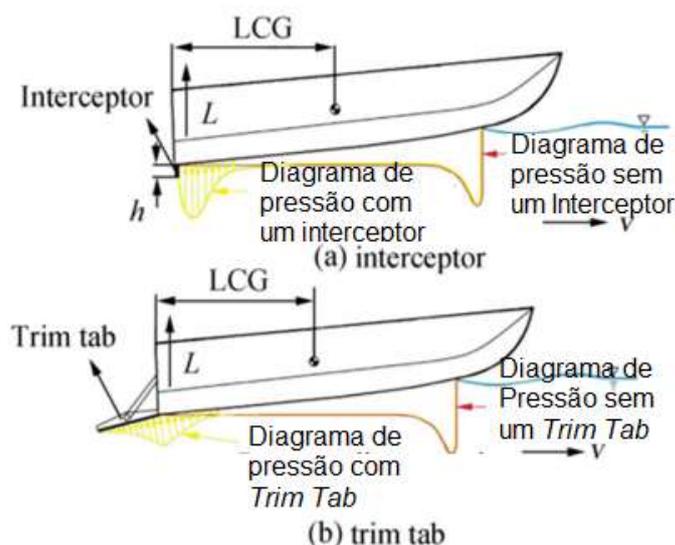
1. Permite corrigir os efeitos de *Pitch* e *Roll*, causados pela distribuição irregular de pesos no casco;
2. Permite realizar curvas com menores ângulos de *Roll*;
3. Permite um posicionamento arbitrário de *Pitch* e *Roll*; e
4. O melhor posicionamento e controle de *pitch* permite significante melhor visibilidade a vante, melhorando a segurança de pilotagem.

2.10. O EQUIPAMENTO *INTERCEPTOR*

Conforme Sakaki et. al. (2018, p. 134, tradução livre), “*Interceptors* são lâminas verticais instaladas simetricamente a ré da embarcação” (figura 22a). Este equipamento se assemelha ao *trim tab* em local de instalação (figura 22b), o espelho de popa, porém atuando de forma diferente.

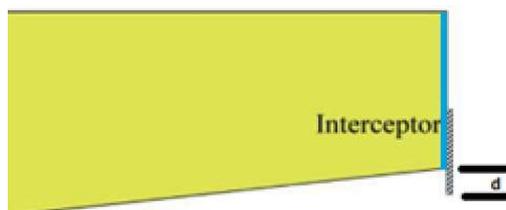
Enquanto o *trim tab* atua no fluxo do fluido através de um ângulo que avança sobre o fluido através do espelho de popa, o *interceptor* avança sobre o fluido sempre com o ângulo de instalação no espelho de popa em relação ao fluido. Além disso, sua atuação é feita através da distância, ou área estendida sobre o fluido, para além do espelho de popa, como pode ser visto na figura abaixo (figura 23).

Figura 22. Ilustração do fenômeno físico associado ao *interceptor* (a) e ao *trim tab* (b).



Fonte: Sakaki; Ghassemi; Keyvani, 2018.

Figura 23. Ilustração da vista lateral de uma embarcação equipada com *interceptor* (detalhe em azul: espelho de popa).



Fonte: Própria, 2021.

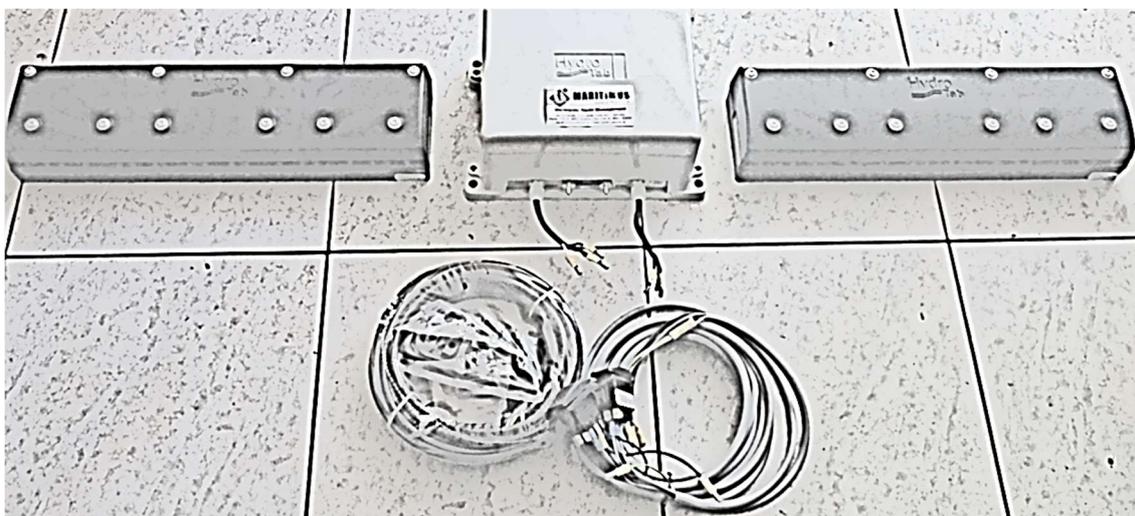
A região do *interceptor* que se estende sobre o fluxo, d , interrompe as linhas de fluxo do fluido. Esse obstáculo resulta em vórtices que, conseqüentemente, “geram uma zona de alta pressão na região de instalação do equipamento que geram a força de sustentação do equipamento que atua no casco pela popa, permitindo interferir nas condições de *pitch* e afundamento da embarcação”. Song et. Al. (2018, p. 319, tradução livre).

Avcı e Barlas (2019), com base em seus estudos experimentais nos *interceptors*, evidenciam a capacidade do equipamento para controlar o ângulo de *trim* em velocidade, permitindo melhor visibilidade de pilotagem, reduzir o arrasto e aumentar sua velocidade.

Apesar de os benefícios de utilização do equipamento *interceptor* serem semelhantes aos do *trim tabs*, algumas fabricantes de equipamentos *interceptors* automatizados, como a *Humphree*, afirmam que os modelos de *interceptors* disponibilizados pela empresa possuem 25% maior eficiência do que *trim tabs* tradicionais.

A figura 24 apresenta um kit de instalação de *Interceptor* automatizado produzido pela Volvo. O modelo apresentado é descrito pela fabricante como apto a equipar embarcações de 22 a 34 pés e pode ser facilmente adquirido por pequenos consumidores. O custo de aquisição do equipamento abaixo citado varia de 1000 a 1700 euros.

Figura 24. Conjunto completo de equipamento *Interceptor* Volvo 450FWV para embarcações de 22 a 34 pés.



Fonte: Adaptado de Maritimus, 2021.

2.11. BENEFÍCIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE *TRIM TABS* E *INTERCEPTOR* NA REGIÃO AMAZÔNICA

A instalação de equipamento *trim tab* ou *interceptor*, como evidenciado por Faltisen (2005); Song et. al. (2018); e Avci e Barlas (2019), está em alta no mercado naval. As tecnologias de estabilização de movimento em sistemas navais seguem indicando benefícios em performance e vivência a bordo, dois indicadores de produto altamente desejáveis aos consumidores. Além disso, a maturidade dessas tecnologias vem proporcionando aplicações cada vez mais economicamente viáveis, principalmente, conforme Song et. al. (2018), no que se diz a respeito na instalação e uso de equipamentos do tipo *interceptor*.

Consequentemente, o uso desses equipamentos além de continuar crescendo no mercado de médias e grandes embarcações, com perfis econômicos robustos, começa a adentrar um mercado de embarcações com perfil econômico cada vez mais reduzidos, oportunizando a entrada desses equipamentos em mercados como os da região amazônica.

A acirrada disputa econômica no setor naval, os benefícios no uso do equipamento *trim tab*, *interceptor*, ou ainda um conjunto dos mesmos, que nos experimentos conduzidos por Song et. al. (2018) alcançam redução na resistência ao avanço na ordem de 8,61%, poderia definir a viabilidade econômica de uma embarcação, sua competitividade e dominância no mercado naval regional amazônico.

Além disso, devido à tradição da navegação como principal meio de locomoção na região, somando-se ao difícil acesso a diversos municípios, que inviabiliza a presença do modal rodoviário, e ainda a rica disponibilidade natural. Temos como resultado um conjunto de fatores que torna o transporte hidroviário vital para o deslocamento de passageiros e cargas no estado (DUARTE, 2017).

O que resulta na circulação de, aproximadamente, 1,7 milhão de passageiros, em embarcações como a da figura 25, e 1 milhão de toneladas de cargas transportadas, nos principais trechos de conexão entre a capital Manaus e municípios do estado, no ano de 2017, conforme estimativas dadas pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2018, p. 33-34).

A utilização de equipamento *interceptor* ou *trim tab* traria diversos benefícios ao transporte aquaviário regional como, por exemplo: redução do tempo de transporte das viagens e menor custo de transporte, podendo ser convertidos em menores tarifas ao consumidor final.

Já a automatização desses equipamentos, dá a possibilidade de ganhos significativos em controle de rolagem e *pitch* dinâmicos, otimizando o conforto a bordo e o consumo para condições além da velocidade de cruzeiro da embarcação.

Figura 25. Lancha rápida "A Noiva", derrabada, realizando o transporte de passageiros na rota Manaus-Coari.



Fonte: Novo Aliança, 2013.

2.12. BENEFÍCIOS DA IMPLEMENTAÇÃO AUTOMATIZADA DE *TRIM TABS* E *INTERCEPTORS*

Avci e Barlas (2019) em seus estudos investigativos na avaliação de *interceptors*, indicam que:

“o equipamento *interceptor* resulta em uma clara redução da resistência ao avanço total, com uma variação da qual os *interceptors* com lâminas mais profundas são mais efetivos entre os números de Froude $0,40 < Fr < 0,60$; *interceptors* com lâminas intermediárias foram mais efetivos em $0,60 < Fr < 0,85$; e *interceptors* com lâminas curtas foram os mais efetivos para $Fr > 0,85$ ” (AVCI; BARLAS, 2019, p. 272, tradução livre)

Por outro lado, os autores sugerem que, para velocidades extremamente altas, o equipamento *interceptor* se torna inapropriado e necessita ser removido.

Para realizar um design eficiente de um sistema *interceptor*, Avci e Barlas (2019, p. 273, tradução livre) indicam que “as lâminas do equipamento deveriam ser controladas cada uma em pelo menos três partes por um sistema de controle inteligente para adequar o comprimento das mesmas em relação às diferentes performances”.

Já Song et. al. (2018), em seus estudos de *trim tabs*, *interceptors* e suas combinações, em acordo com Avci e Barlas (2019), indica que a redução de resistência ao avanço ocorre somente a médias e altas velocidades, relativas ao número de Froude da embarcação. E, ainda, apresenta que os equipamentos *trim tabs*, estudados com ângulo de ataque fixo, foram observados em melhor performance entre números de Froude, Fr , de $0,334 < Fr < 0,5$ em suas análises em escala.

Os autores apontam que, para um uso eficiente dos equipamentos, a utilização de um sistema inteligente de controle traria benefícios para otimizar o uso do equipamento para diferentes velocidades.

Levando em consideração que, segundo Ertogan et. al. (2017), esses dispositivos até podem ser mantidos fixos, ou seu sistema pode ser controlado manualmente, e a posição dos *trim tabs* e/ou *interceptors* alterada pelo capitão da embarcação, com base na experiência. Isso em velocidades razoáveis e, se, aceitando significativas perdas de eficiência.

Agora, é particularmente difícil, senão inviável, controlar a movimentação da embarcação em alta velocidade e, ainda, manipular manualmente a posição dos *trim tabs* e/ou *interceptors*, principalmente operando em águas agitadas (ERTOGAN et. al., 2017).

Essas embarcações, portanto, dependem de um sistema de controle automático, que ajusta constantemente o ângulo de ataque do fólio, seja por meio de mudanças na inclinação do fólio, ou o ângulo de flap (MEYER JR., 1990).

Além disso, um sistema de controle automatizado seria capaz de remover o equipamento da água, quando necessário, para que o equipamento não influísse negativamente nas condições de navegação da embarcação em muito baixas ou altas velocidades, onde, como indicado por Avci e Barlas (2019), o equipamento se torna inapropriado e necessita ser removido.

A utilização destes equipamentos automatizados, também, viabiliza a utilização dos mesmos para o controle dinâmico de rolamento e guinada da embarcação, possibilitando a utilização do equipamento *trim tab* ou *interceptor* como equipamento de estabilização e de reposicionamento de arfagem e rolamento dinâmico.

2.13. O CONTROLADOR PID

O controlador PID, sigla para Proporcional, Integral e Derivativo (*Proportional - Integral - Derivative controller*), é um algoritmo de controle utilizado a mais de um século e aplicado de diversas maneiras na indústria e nos equipamentos domésticos. Este tipo de controlador obteve popularidade ao se tornar uma alternativa de mecanismo confiável, capaz de ser aplicado de forma puramente mecânica, em tempos pré-eletrônicos. Hoje, este tipo de controle vem sendo utilizado de forma digital, em microprocessadores, e é utilizado para controlar uma grande quantidade de processos (WESCOTT, 2018).

Quanto à popularidade deste equipamento, atualmente, pode ser atribuída ao desempenho robusto para uma ampla gama de funções, aliados à sua simplicidade funcional, que permite uma operação e configuração significativamente simples (NI, 2020).

Segundo Ang, Chong e Li (2005), o controlador PID, também conhecido como controlador de “três termos”, possui três coeficientes de ganho que devem ser ajustados para que o controlador atue no sistema, são estes:

1. K_p : Coeficiente Proporcional;
2. K_i : Coeficiente Integral; e
3. K_d : Coeficiente Derivativo.

O nome de cada coeficiente é o que produz o nome do próprio controlador PID. No caso da ausência de umas das variáveis K_p , K_i ou K_d , o controlador passa a ser identificado apenas pelas letras das variáveis atuantes.

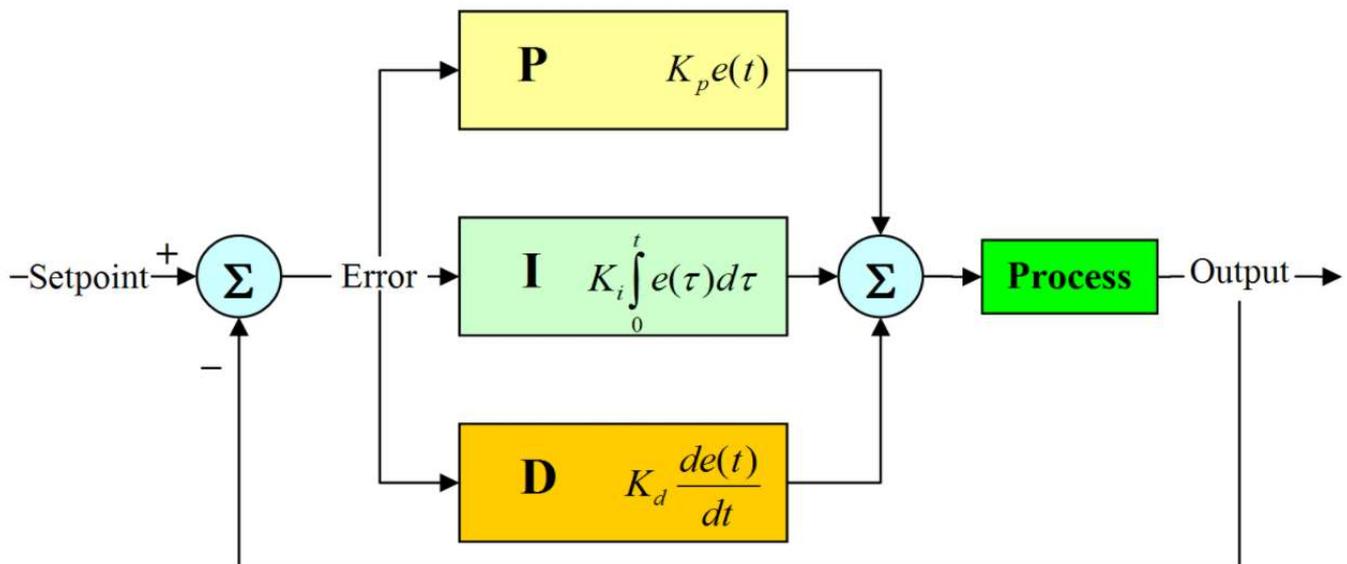
Ademais, o controlador necessita ser informado do valor “*set point*”, valor desejado do sistema, que ao ser subtraído do valor de leitura do sensor gera a variável *error*, definida por $e(t)$, que por sua vez, tem seu comportamento analisado pelo controlador em função do tempo e provê os parâmetros PID. Esses parâmetros e suas influências no sistema, de modo simplificado, estão listados abaixo, de acordo com *National Instruments* (2020):

1. Parâmetro Proporcional: $_P = K_p e(t)$. Esse parâmetro produz um sinal que é proporcional à magnitude atual do erro, $e(t)$;

2. Parâmetro Integral: $I = K_i \int_0^t e(t) dt$. O parâmetro integral produz uma saída proporcional ao erro acumulado no passado. Este parâmetro acelera a ação do controlador, permitindo que o mesmo chegue no valor de referência, *set point*, mais rapidamente; e
3. Parâmetro Derivativo: $D = K_d \frac{de(t)}{dt}$. O parâmetro derivativo produz uma saída proporcional à variação do erro em relação ao tempo. Esse parâmetro é capaz de corrigir o erro de maneira antecipada, o que causa uma diminuição no tempo de resposta e melhora a estabilidade do sistema.

Após definidos os valores de P, I e D os valores são, então, somados e formam o sinal de saída que é utilizado na Planta ou Processo, que atua diretamente na condição da variável em que o *set point* se relaciona e o sensor do controlador verifica. Com o exposto podemos verificar, de maneira visual, através do diagrama a seguir (figura 26), o funcionamento de um controlador PID básico.

Figura 26. Diagrama de bloco de controle do algoritmo PID.



Fonte: Bojorge, [s.d.].

Já matematicamente, conforme apresenta Zhong (2006), o controlador PID pode ser descrito pela atuação de seu algoritmo, definido por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Onde, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador PID e as demais variáveis foram definidas acima.

2.14. Característica da Força de Sustentação gerada por *Trim Tabs*

Atuando na embarcação através de princípios fluidodinâmicos, o equipamento *Trim Tab*, instalado no espelho de popa da embarcação (figura 27), gera uma força de sustentação que tem capacidade de influenciar os três movimentos rotacionais da embarcação: *Roll*, *Yaw* e *Pitch*, que são os movimentos angulares com relação aos eixos x , z , and y , respectivamente. No entanto o presente trabalho, realizará o estudo em apenas um eixo. Além disso, devido às restrições do modelo, considera-se o estudo dos efeitos no eixo de rolamento da embarcação.

Figura 27. Embarcação de alta velocidade equipada com *trim tabs*.



Fonte: Adaptado de Vatararo, 2015.

De acordo com estudos desenvolvidos pelo *Glenn Research Center of NASA* (2021), em um folio de perfil fino, o Coeficiente de Sustentação, C_l , está relacionado a mudança de ângulo de ataque do perfil em relação ao fluido e pode ser descrito através da equação abaixo.

$$C_l = 2 * \pi * a \quad (18)$$

Onde:

C_l : Coeficiente de Sustentação;

π : 3,1415; e

a : ângulo do *trim tab* em relação ao fluido, em radianos.

Glenn Research Center of NASA (2021) afirma que outros perfis, além do perfil fino, devem ser analisados e classificados através de testes em túnel de vento, fazendo uso de análises sofisticadas para determinar as características do Coeficiente de Sustentação em relação ao ângulo de ataque.

Além disso, a força de sustentação gerada pelo perfil fino sobre o fluido em relação ao ângulo de ataque do perfil é linear (figura 28), até o momento que o ângulo de ataque atinge o ângulo limite de *stall* (momento em que o fluxo do fluido se descola da superfície do folio). Onde, conforme o autor, a relação de força de sustentação com o ângulo de ataque passa a ter solução complexa, devido o descolamento da camada limite do fluido sobre o perfil gerar turbulência e vórtices, caso os efeitos viscosos sejam considerados. Essa relação linear entre o Coeficiente de Sustentação e o ângulo de ataque também pode ser verificada através da equação acima (GLENN RESEARCH CENTER OF NASA, 2021).

Figura 28. Relação Força de Sustentação versus Ângulo de Ataque em perfis.

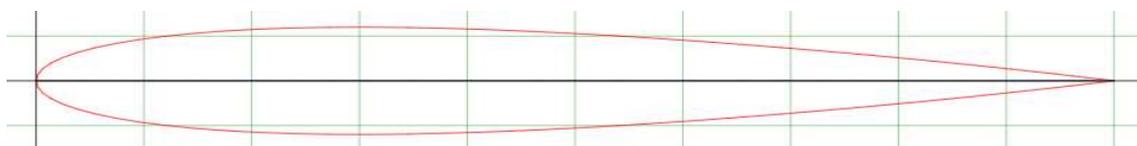


Fonte: Glenn Research Center of NASA, 2021.

Quanto a escolha de perfis, Faltisen (2005) afirma que perfis NACA são amplamente utilizados no mercado naval. E, ainda, Jespersen, Pulliam e Childs (2021) realizaram estudos sobre o perfil NACA 0012 em condições essencialmente incompressíveis, validando a sua semelhança quanto as condições de aplicação naval.

O perfil NACA 0012 é um perfil simétrico (figura 21), indicado pelos dois dígitos zero iniciais, e com 12% de espessura em relação ao comprimento do perfil, indicado pelos dois últimos dígitos. Utilizando a ferramenta de geração de perfis NACA, disponibilizada em *airfoiltools.com*, podemos verificar a forma desse perfil na figura 29.

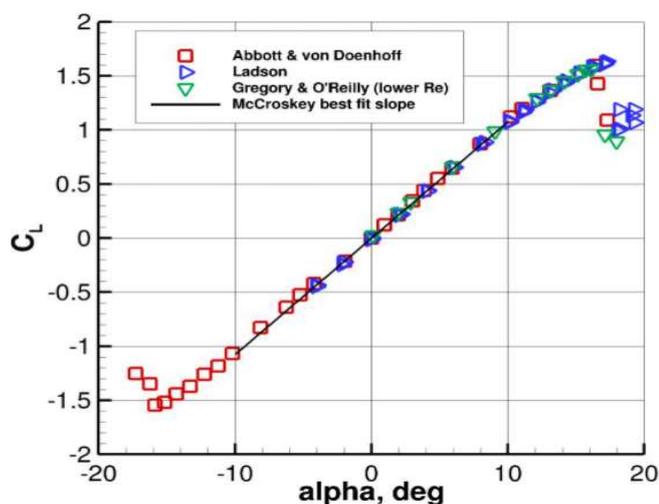
Figura 29. Esboço técnico do perfil NACA 0012.



Fonte: Própria, 2021.

Jespersen, Pulliam e Childs (2021) utilizaram quatro diferentes métodos de análise de *Computational Fluid Dynamics* (CFD): Abbott & von Doenhoff (1959), Ladson (1988), Gregory & O'Reilly (1970) e McCroskey (1987). Os autores chegaram aos seguintes resultados, apresentados na figura 30, quanto a relação do Coeficiente de Sustentação e ângulo de ataque.

Figura 30. Gráfico do comportamento do coeficiente de sustentação, em relação ao ângulo de ataque do perfil NACA 0012.



Fonte: Jespersen; Pulliam; Childs, 2021.

No gráfico acima, resultado dos estudos de Jespersen, Pulliam e Childs (2021), verifica-se que, para condições essencialmente incompressíveis, os quatro diferentes métodos convergem para o mesmo resultado linear e o descolamento da camada limite ocorre por volta de 17 graus, nestas condições e para este perfil. Onde, então, os métodos começam a divergir resultados, devido a solução complexa da interação. Os autores do estudo afirmam que o método Ladson (1988) aparenta ser um método confiável para análise do sistema, após o descolamento da camada limite.

Já Faltisen (2005), relaciona a capacidade de um perfil gerar sustentação com o coeficiente de sustentação, C_l , que pode ser representada através da análise de equilíbrio estático da embarcação, descrito pela equação já apresentada anteriormente:

$$F_s = C_l \frac{\rho}{2} V_{emb}^2 A_h \quad (19)$$

Vê-se, então, que a força de sustentação gerada pelo *trim tab* depende de quatro variáveis, sendo que duas delas serão aproximadamente constantes no caso naval: a massa específica do fluido e a área do hidrofólio. E as outras duas variáveis possuem dependências físicas com a embarcação: O Coeficiente de Sustentação, C_l , que depende, principalmente, do perfil do hidrofólio e do ângulo de ataque; e a velocidade da embarcação ao quadrado.

2.15. Característica da Força de Sustentação de hélices

Os motores não escovados com hélices operam seus sistemas através de fenômenos fluidodinâmicos. Este equipamento utiliza bobinas e imãs para rotacionar um eixo ligado a uma hélice, que ao girar move o fluido ao seu redor, gerando uma Força de Sustentação.

Estudos realizados pela *Glenn Research Center of NASA* (2021) especificam que a Força de Sustentação, gerada por motores com hélices, pode ser conhecida através da seguinte equação:

$$F_{sm} = \frac{\rho}{2} A (V_s^2 - V_e^2) \quad (20)$$

Onde:

F_{sm} : Força de Sustentação do motor;

ρ : massa específica do fluido (Ar: 1,225 kg/m³);

A: área do círculo de diâmetro igual ao da hélice;

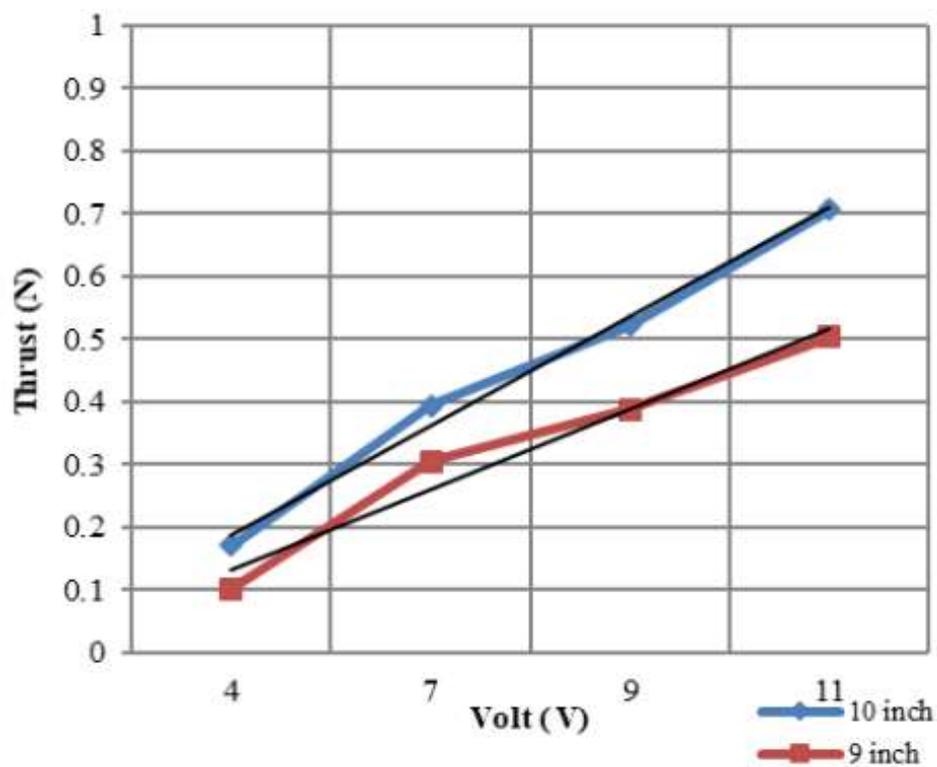
V_s : velocidade de saída do fluido da hélice; e

V_e : velocidade de entrada do fluido na hélice.

Considerando a velocidade de entrada do fluido na hélice como zero, obtemos:

$$F_{sm} = \frac{\rho}{2} AV_s^2 \quad (21)$$

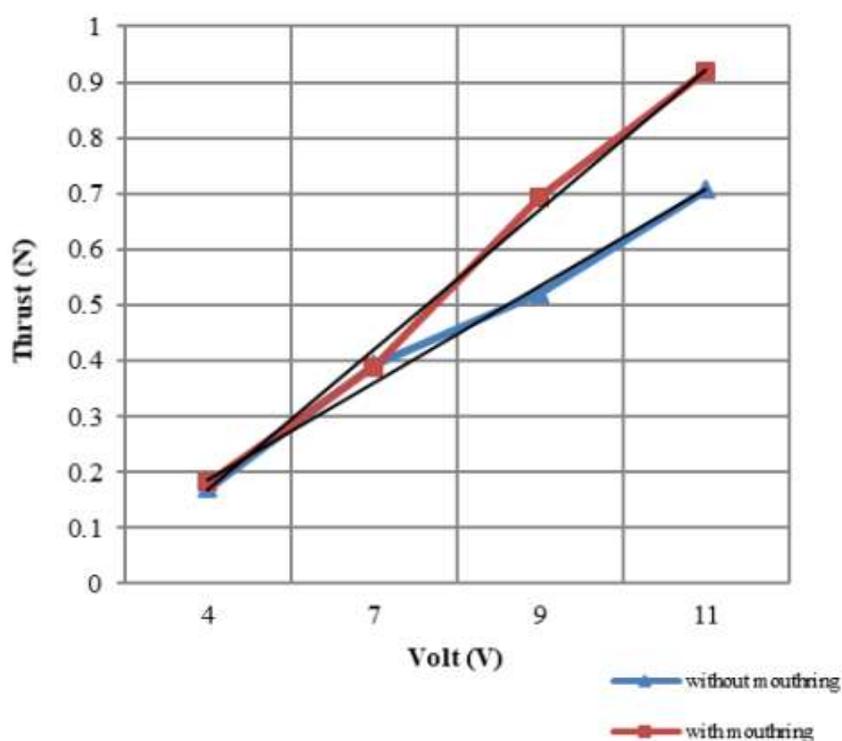
Figura 31. Evolução da força de sustentação de motores sem escova, em relação a voltagem (para hélices livre).



Fonte: Othman et. al., 2019.

Othman et. al. (2019) realizou estudos para verificar a Força de Sustentação gerada por este equipamento. No seu experimento foi utilizado um motor não escovado de 1000kv, um controlador eletrônico de velocidade (ESC) e duas hélices de diâmetros diferentes: um de 9 polegadas e outro de 10 polegadas. Othman et. al. (2019) verificou que a Força de Sustentação gerada pelo conjunto de sua bancada, se relaciona com a voltagem da maneira como mostra a figura 32.

Figura 32. Evolução da força de sustentação de motores sem escova, em relação a voltagem (com e sem tubulão).

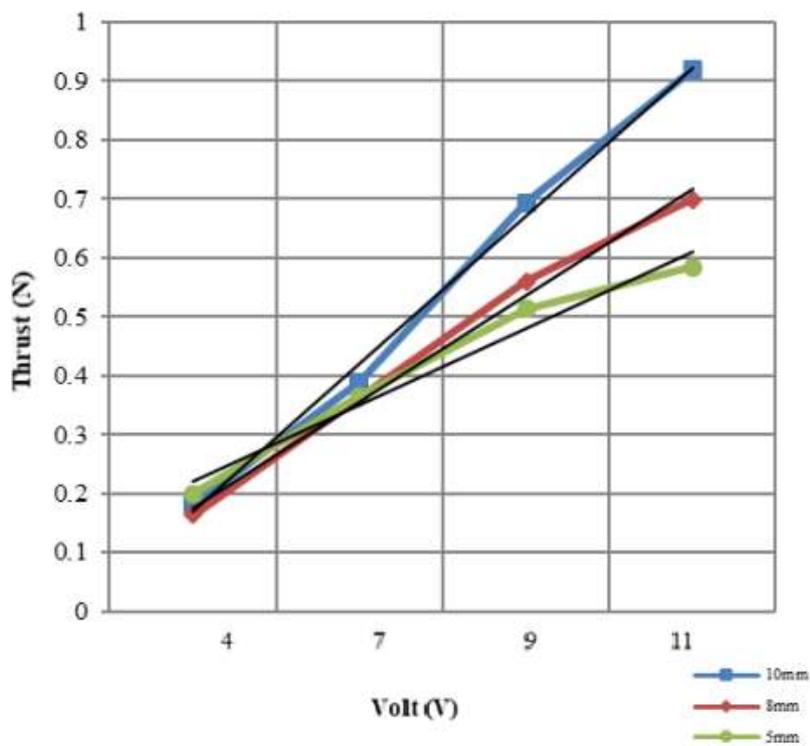


Fonte: Othman et. al., 2019.

O autor, ainda, verificou as mudanças que ocorrem na Força de Sustentação da sua bancada equipada com a hélice de 10 polegadas, em relação a instalação de tubulão, chegando ao resultado da figura 32.

Diante da evidente melhora na força de sustentação gerada pela bancada, Othman et. al. (2019), buscando verificar as mudanças que diferentes tubulões poderiam causar na força de sustentação, analisou e comparou três diferentes conjuntos, cujos resultados podem ser vistos na figura 33.

Figura 33. Evolução da força de sustentação de motores sem escova, em relação a voltagem (equipado com diferentes tubulões).



Fonte: Othman et. al., 2019.

Em motores elétricos desta natureza, as rotações por minuto do motor estão relacionadas com a voltagem, através da seguinte formulação:

$$n = kv v \quad (22)$$

Onde:

n : RPM, rotações por minuto;

kv : constante de rotação do motor; e

v : voltagem;

Pela dificuldade em estudar a velocidade de saída do fluido da hélice, pode-se utilizar das mesmas estratégias utilizados para aerofólios, em hidrofólio. Onde, conforme *Glenn Research Center of NASA* (2021), a Força de sustentação Gerada, se dá por:

$$F_{folio} = C_{lfolio} \frac{\rho}{2} V_{max}^2 A_{folio} \quad (23)$$

Na qual o coeficiente de sustentação C_{lfolio} deve ser obtido através de análises experimentais. No entanto, conforme Deters, Ananda e Selig (2014) e Li et. al. (2015), para hélices de pequenos tamanhos, a equação acima pode ser descrita em função do Coeficiente de Sustentação da hélice, C_{lm} , dada por:

$$C_{lm} = \frac{F_{sm}}{\rho n^2 D^4} \quad (24)$$

Onde:

C_{lm} : Coeficiente de Sustentação do conjunto motor / hélice;

F_{sm} : Força de Sustentação do conjunto motor / hélice;

ρ : densidade do fluido no sistema;

n : RPM, rotações por minuto da hélice; e

D : diâmetro da hélice.

Rearranjando a solução apresentada acima, para demonstração em função da Força de Sustentação do conjunto motor / hélice, temos que:

$$F_{sm} = C_{lm} \rho n^2 D^4 \quad (25)$$

Em sequência, aplicando as definições propostas por Deters, Ananda e Selig (2014) na equação acima, temos:

$$nD = V \quad (26)$$

$$D^2 = A \quad (27)$$

3. METODOLOGIA

3.1. MÉTODOS

Para o presente trabalho usufrui-se do método dedutivo, este é, conforme Gil (2008, p. 9) “o método que parte do geral e, a seguir, desce ao particular.” E que, de acordo com o mesmo, parte de princípios reconhecidos como verdadeiros e indiscutíveis. É o método proposto pelos racionalistas. Este método, segundo Vianello [ca. 2013], utiliza da razão como caminho para chegar a uma conclusão de determinado fenômeno estudado. Ao final do trabalho, durante a realização do modelo utiliza-se essencialmente do método experimental, que consiste, segundo Gil (2008), essencialmente em submeter objetos de estudo a condições controladas e conhecidas pelo investigador para observar seus resultados.

3.2. TÉCNICAS

Com o objetivo de recolher informações para análise sobre o assunto abordado, foi utilizada a técnica da pesquisa exploratória. Conforme Gil (2008 p.27), a pesquisa exploratória é desenvolvida com o objetivo de proporcionar visão geral acerca de determinado fato pouco explorado, que exige revisão da literatura. O produto final deste tipo de pesquisa passa a ser mais esclarecido e passível de uma investigação mais aprofundada (GIL, 2008). Sendo assim, o estudo foi feito a partir de material já elaborado, constituída de bibliografia já publicada em relação ao tema de estudo, principalmente de livros, artigos de periódicos, revistas e material disponibilizado na Internet.

3.3. PROCEDIMENTOS

Partindo do princípio de que “a ordenação dos procedimentos demonstra a lógica, a coerência processual na pesquisa e a possibilidade da reprodutibilidade. Permite, enfim, compreender não apenas os resultados, mas o processo da própria investigação” (VIANELLO, [ca. 2013], p. 44).

Nas seções prévias, foram apresentados os conceitos mais relevantes relacionados com dispositivos de estabilização de movimentos e teoria de controle. Com o intuito de demonstrar a aplicação de um método de controle de uso prático, que possa ser implementado a qualquer dispositivo de estabilização, foi definido um caso de estudo. Neste caso de estudo, os conceitos da teoria de hidrofólio são revisados e é proposto um

estudo experimental para demonstrar, de maneira simplificada, o funcionamento de um sistema de controle PID. O experimento consiste de um sistema de viga oscilante, tendo o ar como meio externo. Assume-se que o movimento da viga assemelha o movimento de rolagem de uma embarcação. Com o uso de ventiladores nos extremos e com alguns instrumentos de controle, os movimentos da viga são controlados, tentando manter a posição de equilíbrio quando submetida a deslocamentos angulares iniciais. Assume-se que os ventiladores assemelham dispositivos de estabilização de movimentos de embarcações (tipo *trim tab*). A seguir são apresentadas as etapas principais desta análise:

1. Estudo conceitual sobre a atuação de *trim tabs*, quanto a evolução da força de sustentação versus ângulo de ataque, e relacionar a hélices com motores elétricos não escovados, quanto ao desempenho de força de sustentação versus voltagem. É possível que a análise entre os dois equipamentos possibilite a correlação do modelo de bancada com uma embarcação, que possua as mesmas características oscilatórias do modelo de bancada;
2. Elaboração de um modelo experimental para bancada, consistindo em uma viga oscilante em relação a um eixo central, instrumentada, que assemelhe a movimentação de rolamento de uma embarcação;
3. Construção do código PID capaz de controlar o sistema, minimizando os movimentos, e possibilite a extração de dados para análises posteriores; e
4. Aplicação de testes e análise de resultados no modelo experimental, visando verificar se o código PID utilizado permite o controle de movimento.

O experimento desenvolvido no trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consiste da realização do experimento 1, neste experimento o eixo do experimento foi inclinado a 20 graus e libertado para oscilar até sua completa parada, este procedimento será realizado três vezes, a fim de verificar repetitividade.

Durante o experimento 1 o eixo de rotação do modelo se encontrava a 57 cm da trena; a posição horizontal no modelo, zero graus, marca a altura 34,3 cm; e a inclinação de 20 graus no eixo do experimento aponta para uma altura de 14,3 cm na trena.

Na realização do Experimento 2, realizou-se a oscilação com o equipamento acionado, utilizando três diferentes configurações de código no controlador. A fim de

extrair resultados do código de controle do modelo, sobre sua configuração de oscilação massa mola amortecido.

Neste experimento, inicialmente, o equipamento de controle foi acionado e, posteriormente, o eixo do experimento foi novamente inclinado a também 20 graus e libertado para oscilar.

Devido à falta de equipamentos de laboratório para realizar a aplicação de ambos os experimentos, momento inicial de oscilação o equipamento é posicionado manualmente a 20 graus e libertado. Com o código de controle ativado (experimento 2) este procedimento, por durar um certo período de tempo não possui repetitividade e insere erros no sistema.

Em ambos experimentos, o eixo de rotação do modelo se encontrava a 57 cm de uma trena onde um apontador laser equipado na extremidade do modelo indicava uma altura que pela geometria da instalação se retirou o ângulo de inclinação do eixo do experimento; a posição horizontal no modelo, zero graus, marcava a altura 34,3 cm; e a inclinação de 20 graus no eixo do experimento apontava para uma altura de 14,3 cm na trena.

A oscilação do modelo foi gravada através do apontador laser sobre a trena por uma câmera a 60 quadros por segundo. O vídeo demonstrando as oscilações do modelo forão então analisados visualmente a cada 15 frames, totalizando 4 medições por segundo até a total parada da oscilação. Estas medidas são organizadas de modo a formar o gráfico de oscilação do sistema massa mola amortecido do experimento.

3.4. MODELO EXPERIMENTAL

Com o intuito de assemelhar o movimento de balanço de uma embarcação, no presente estudo foi projetado um dispositivo de viga oscilante no ar, controlado com um sistema de instrumentação feito com software e hardware livre, assumindo o comportamento de ventiladores como o dos estabilizadores reais. É importante mencionar que a análise foi simplificada, visando testar o procedimento de controle de movimentos proposto no presente estudo. O experimento desenvolvido neste trabalho visa simular um sistema massa mola amortecido naval, tipicamente subamortecido, em um equipamento de bancada que permita a visualização e análise de parâmetros de sistemas navais por comparação, através de estudos em escala.

Desejando viabilizar o modelo experimental para demonstrar a capacidade do controlador desenvolvido para controlar movimentos, decidiu-se por assumir a força de sustentação dos *trim tabs* (força de sustentação hidrodinâmica) através de motores não escovados com hélices (força de sustentação aerodinâmica), pois, como mencionado nos estudos da Seção 2.14 e 2.15 / Apêndice B, ambos os equipamentos funcionam através dos mesmos princípios físicos, de um corpo submerso em um escoamento gerado por um fluido, e possuem algumas semelhanças, quanto ao desenvolvimento da força de Sustentação gerada.

No entanto, a utilização do experimento no ar é um obstáculo, devido as diferenças físicas entre os fluidos em que os dois sistemas atuam e inviabilizam uma comparação direta, uma vez que possuem distinções que necessitam avaliação, principalmente, no que se diz respeito a:

1. Compressibilidade do ar e a incompressibilidade da água;
2. Diferença do número de Reynolds entre os dispositivos; e
3. Diferença de viscosidade entre os fluidos.

Portanto, existe a necessidade de realizar estudos para verificar as correções necessárias, como as correções propostas pelos sistemas desenvolvidos pelo ITTC de 1957 ou até mesmo os mais atuais e elaborados desenvolvidos pelo mesmo instituto em 1978, a fim de elaborar um modelo matemático que permita um cálculo para comparação.

Contudo, a natureza de ambos os sistemas são semelhantes e são obtidas a partir da mesma ferramenta física, o estudo tem o intuito de provar a capacidade do código de controlar os movimentos do experimento. Uma aplicação bem-sucedida no modelo, através dos motores não escovados com hélices, indicaria que o código de controle pode ser utilizado em um sistema naval e obter êxito.

Porém, relacionar matematicamente os equipamentos seria útil para extrapolar a configuração bem-sucedida do experimento para a embarcação semelhante.

Uma forma de reduzir as dificuldades matemáticas de comparação entre os dispositivos seria realizar os estudos do modelo submerso em água, podendo ainda equipar os motores sem escova com duto e eixo *jet thurster*.

A utilização deste equipamento imerso em água reduziria a dificuldade matemática de comparação entre o modelo experimental e o sistema naval, porém é um impasse significativo para a construção do experimento.

Em vista do exposto e dadas as considerações que possibilitam a construção de um modelo, optou-se pela utilização dos motores com hélice no ar e, portanto, até o presente estudo, o êxito do sistema indica apenas que há condições de controlar sistemas navais a partir das mesmas estratégias utilizadas no código do modelo experimental deste.

Quanto à estrutura do modelo experimental, esta comporta-se segundo os fundamentos de sistemas massa mola amortecidos e pode ser alterada para estudar as oscilações de *roll* ou *pitch* de embarcações através de estudos em escala

O experimento atual abrange os seguintes objetivos:

1. Demonstrar que sistemas físicos massa mola amortecidos podem ser controlados por algoritmo do tipo PID;
2. Oferecer um meio de baixo custo para verificação experimental de sistemas massa-mola-amortecidos do tipo subamortecidos, com a possibilidade de extração e verificação de dados;
3. Demonstrar que a oscilação do modelo pode ser adaptada e ajustada as condições de oscilação de sistemas navais;
4. Indicar que a atuação do modelo possui relação com embarcações equipadas com fólios estabilizadores; e
5. Oferecer diretrizes para o desenvolvimento de código PID, para o controle de um sistema semelhante.

Com a apresentação de um modelo matemático que permita a comparação entre o modelo experimental e o sistema naval, através de estudos em escala, os resultados do modelo experimental poderão ser extrapolados para o sistema naval e, portanto, existirá a possibilidade de as configurações do código de controle também serem extrapoladas.

O modelo experimental apresentado é constituído de dois sistemas principais: a estrutura física e o código.

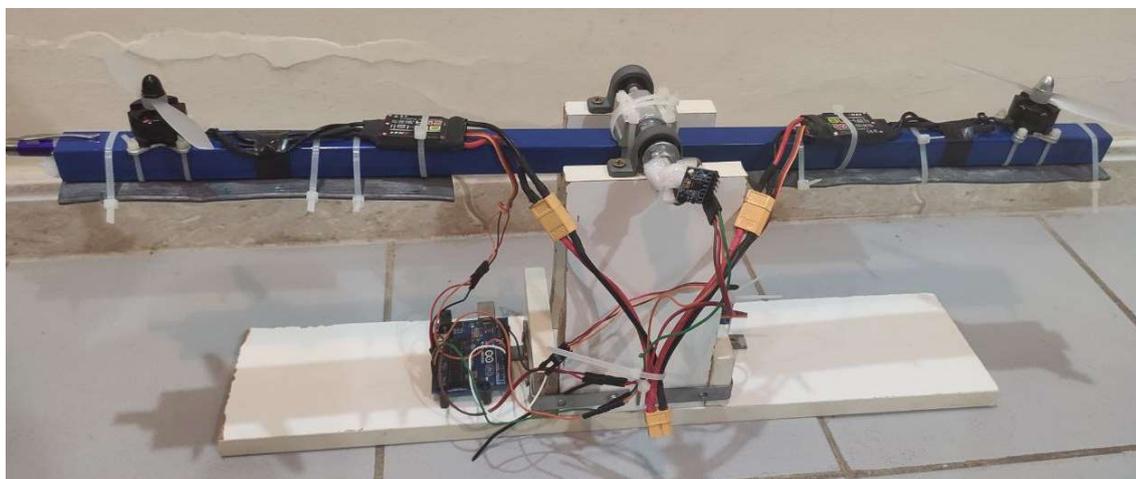
A estrutura física do modelo foi construída com os seguintes componentes:

1. Estrutura de Sustentação;

2. Mancais de Rolamento;
3. Eixo de atuação;
4. Eixo Fixo;
5. Porcas e Arruelas;
6. *Pillow Block*;
7. Sensor Giroscópio;
8. Microcontrolador;
9. Motores *Brushless*;
10. Hélices;
11. Controlador eletrônico de velocidade (ESC);
12. Fitas de chumbo; e
13. Abraçadeiras Plásticas.

Um breve detalhamento da estrutura física completa do modelo (figura 34) e do código desenvolvido para reger o mesmo encontra-se a seguir.

Figura 34. Modelo Experimental.

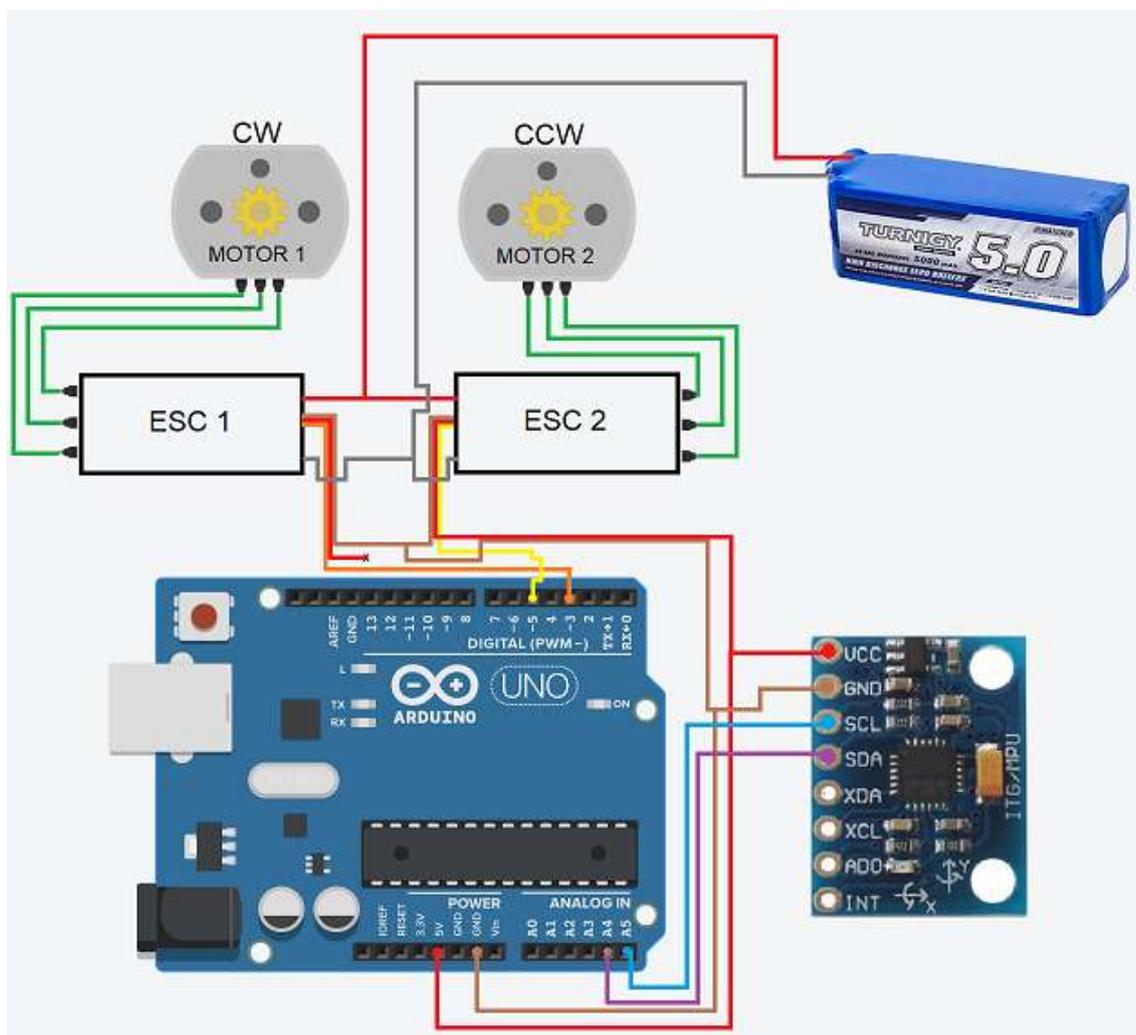


Fonte: Própria, 2021.

Um diagrama de ligação elétrica simplificado do modelo experimental é apresentado a seguir na figura 35 detalhando a forma com que os componentes eletrônicos estão conectados entre si. A alimentação elétrica do modelo experimental pode ser realizada diretamente pela bateria e pelo conector USB (*Universal Serial Bus*) disponibilizado pelo controlador embora somente a bateria seja capaz de atuar o

dispositivo devido o consumo energético dos motores serem superiores que o suprimento de energia disposto pelo conector.

Figura 35. Diagrama elétrico simplificado do modelo experimental.



Fonte: Própria, 2021.

3.4.1. Estrutura física do modelo experimental

3.4.1.1. Estrutura de Sustentação

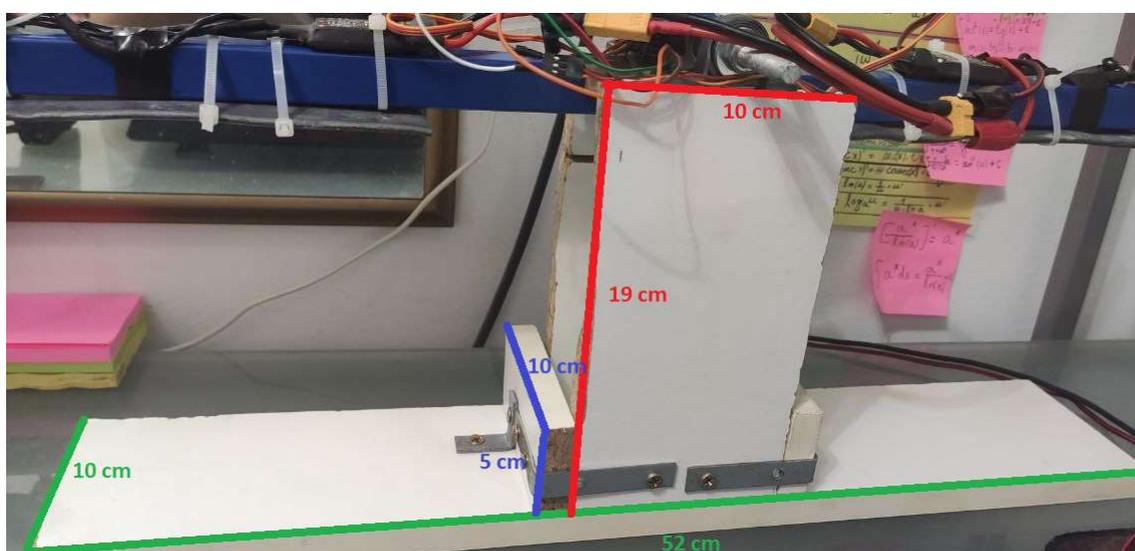
A estrutura do modelo foi construída em MDP, *Medium Density Particle Board*. O material foi escolhido por ser mais robusto e mais bem estruturado em relação ao MDF, *Medium density Fiber Board*, apesar do material apresentar maior dificuldade de corte e apresentar menor qualidade de acabamento.

A prancha de MDP escolhida possui 16 milímetros de espessura e foi reutilizada de um antigo móvel guardado desmontado de um estoque. Os cortes foram feitos

utilizando um arco de serra e o acabamento foi feito com o uso de uma micro retífica, equipada com uma lixa média.

A prancha de base do modelo possui 52 centímetros de comprimento por 10 centímetros de largura. A estrutura central de MDP possui duas peças de 10 centímetros de comprimento e 19 centímetros de altura e recebe o apoio de fixação de duas peças menores pela lateral de 10 centímetros de comprimento por 5 centímetros de altura estas medidas podem ser observadas na figura 36.

Figura 36. Detalhe das peças da estrutura do modelo com suas respectivas medidas (em verde: base do modelo; vermelho: peça central; e azul: peça de apoio).



Fonte: Própria, 2021.

A estrutura é fixada entre si através de cantoneiras de uma e de duas polegadas com parafusos para madeira de meia polegada. A tabela 2, especifica os elementos, dimensões, material e quantidade das peças desta estrutura.

Tabela 2. Especificações e quantidade de cada material.

Nome	Medidas (cm)	Material	Quantidade
Peça de Base	52x10	MDP	1
Peça central	19x10	MDP	2
Peça de Apoio	10x5	MDP	2
Cantoneiras L - 1	2x2	Alumínio	3

Cantoneira L - 2	6,5x6,5	Alumínio	2
Parafuso de Madeira	12,5mm	Latão	20

Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.2. Mancais com Rolamento

O modelo é equipado com dois mancais de rolamento que permitem a livre rotação com mínimo atrito do eixo de oscilação do experimento.

Figura 37. Mancais com rolamento PK08.



Fonte: Smartkits, 2021.

Os mancais de rolamentos escolhidos (figura 37) são identificados pelo seu modelo – KP08, são instalados na vertical e utilizam dois parafusos de madeira de 12,5 milímetros, que fazem sua fixação no topo da peça central, com as mesmas especificações do citado acima. No interior do mancal com rolamento está instalado o eixo de suporte.

Os mancais são construídos em liga de zinco e possuem furo de base de 5 milímetros, enquanto, o rolamento instalado em seu interior possui aproximadamente 20 milímetros de diâmetro externo e diâmetro interno do furo para eixo de 8 milímetros.

Este mancal de rolamento possui travas para unir o eixo ao rolamento através de parafusos *allen* 1,5 milímetros.

A tabela 3, especifica o elemento, dimensões do furo interno e quantidade das peças.

Tabela 3. Especificações e quantidade dos mancais de rolamento.

Nome	Medidas (cm)	Quantidade
Mancais com Rolamento	Furo interno 8mm	2

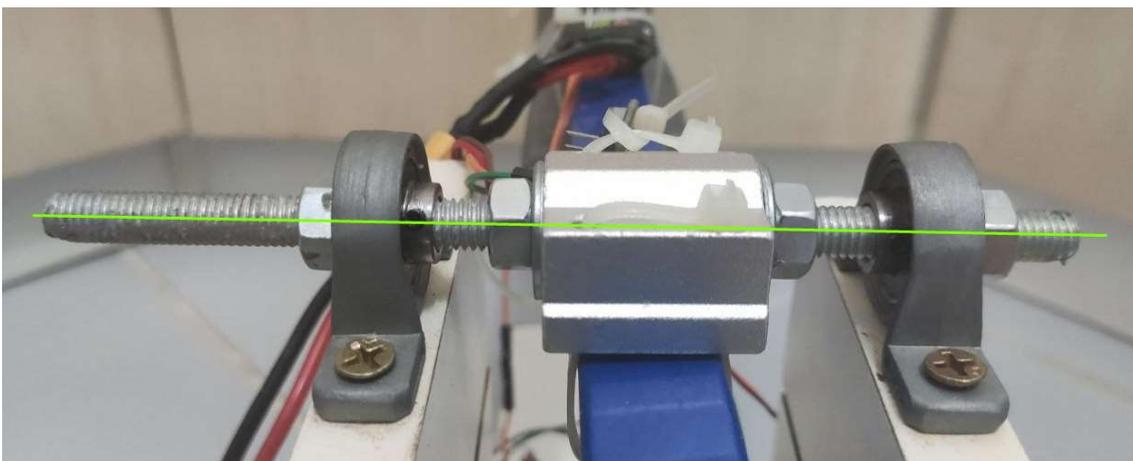
Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.3. Eixo de suporte

O Eixo de suporte do experimento está instalado nos mancais de rolamento.

Foi utilizado para o eixo de suporte uma barra roscada de liga de zinco de 8 milímetros (figura 38), devido a necessidade da utilização de porcas para unir o *pillow block* (figura 40) ao eixo do experimento.

Figura 38. Vista lateral com detalhe, em verde, na linha de centro do eixo de suporte.



Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.4. Eixo do experimento

O estudo da movimentação deste eixo é onde estão concentrados os esforços do experimento. Este é constituído por um tubo de alumínio de seção quadrada de 20x20 milímetros e foi pintado em azul com tinta spray para melhor acabamento e visualização de imagem em vídeo.

O eixo de experimento é instalado na estrutura do modelo através dos furos do *Pillow Block*. Sob o eixo são instalados os motores não escovados, os controladores de velocidade dos motores e o giroscópio do sistema.

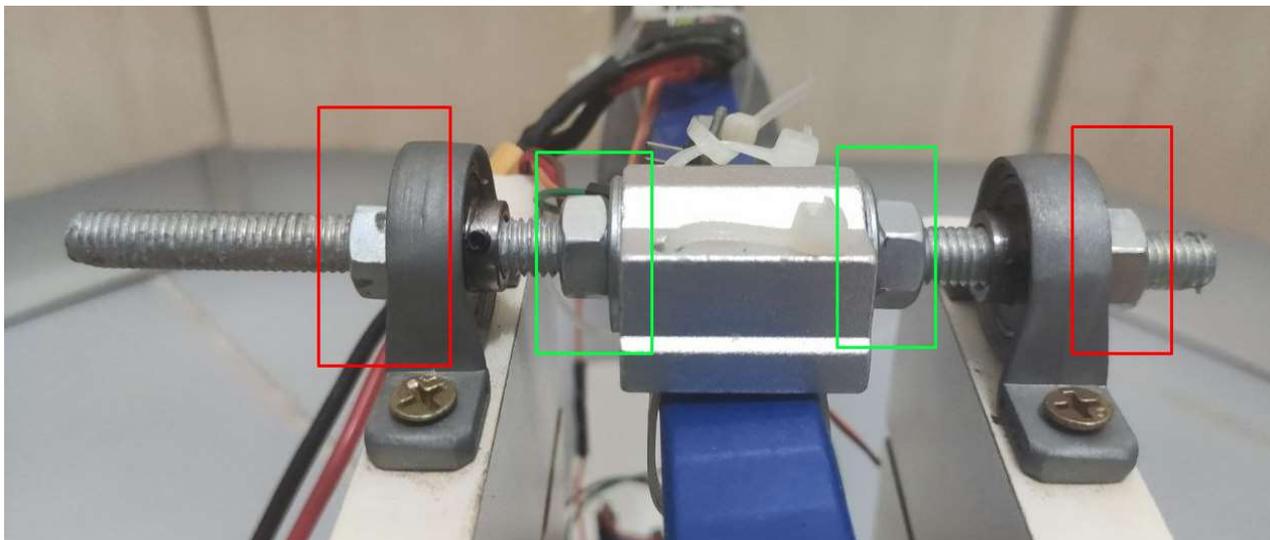
3.4.1.5. Porcas e Arruelas

O conjunto de porcas e arruelas no modelo experimental possuem diferentes funções, a depender do local de instalação (figura 39).

O conjunto de porcas e arruelas instalados em contato com os mancais de rolamento (tipo 1) atuam como freio no sistema, alterando as características de amortecimento sistema massa-mola-amortecido do experimento. Já o conjunto de porcas

e arruelas instalados com o *pillow block* (tipo 2), tem por função impedir a movimentação do *pillow block* sob o eixo de suporte do experimento.

Figura 39. Detalhe lateral, com visão dos conjuntos de porcas e arruelas no eixo de suporte (em vermelho: porcas e arruelas, tipo 1; verde: porcas e arruelas, tipo 2).



Fonte: Própria, 2021.

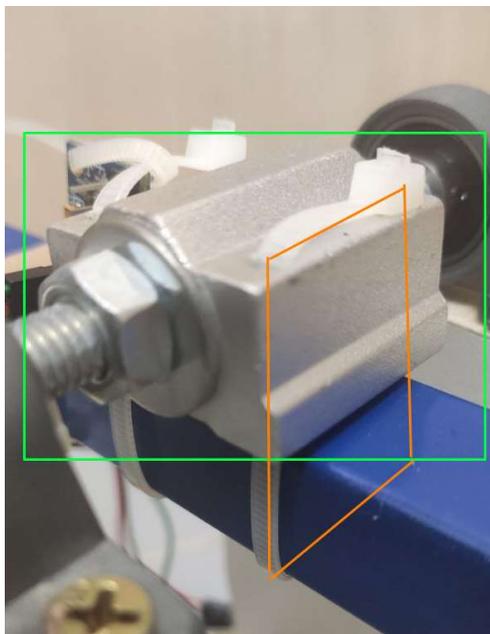
3.4.1.6. Pillow Block

O *pillow block* é um berço de acoplamento para ser instalado em eixos. Este equipamento possui no seu interior rolamentos lineares.

O rolamento linear do *pillow block* usado no experimento (figura 40) possui diâmetro do furo de 8 milímetros, próprio para ser utilizado com eixos de 8 milímetros. É do tipo de esferas e não possui trava de posição. No interior do rolamento linear está instalado o eixo de suporte do experimento.

Já a estrutura do *pillow block* é de alumínio e possui 4 furos roscados para parafusos de 3 milímetros de diâmetro, onde, no modelo, estão instaladas abraçadeiras plásticas que unem o eixo do experimento ao *pillow block*.

Figura 40. Detalhe do *pillow block* instalado no modelo (em verde: o *pillow block*; e em laranja: detalhe da passagem das abraçadeiras plásticas).



Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.7. Sensor Giroscópio

O sensor giroscópio utilizado no experimento é do modelo GY-521 (figura 41), equipado com uma MPU6050 produzido pela empresa InvenSense.

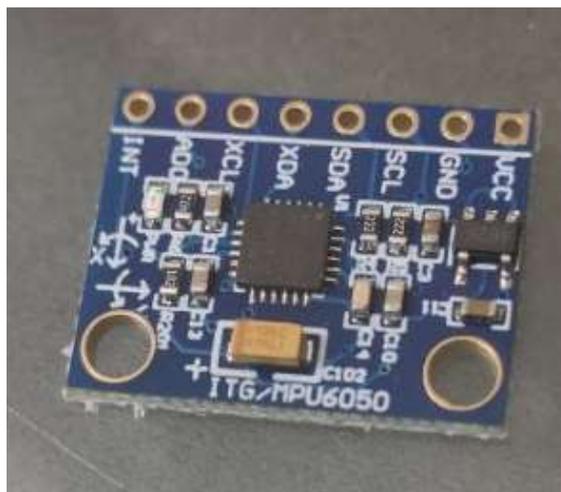
Este sensor possui 3 eixos de giroscópio e 3 eixos de acelerômetro, o que a torna uma unidade 6 DOF IMU, *6 degrees of freedom inertial measurement unit*. O módulo é alimentado por 3,3 volts, mas possui um regulador de voltagem que permite a alimentação de 5 volts, voltagem utilizada no experimento.

O módulo GY-521 é altamente conhecido no mundo da prototipagem, já o circuito impresso MPU6050 é um sensor que pode ser empregado para o desenvolvimento de circuitos impressos e produtos para além da prototipagem.

Ainda sobre o GY-521, a placa do circuito possui 2 furos de 3 milímetros, dedicados para a instalação em *stack*. O projeto inicial do modelo experimental previa que este módulo fosse instalado sobre o *pillow block*, através do furo de 3 milímetros de ambas as peças, com a utilização de *standoffs* de nylon, porém a superfície rosqueável no *pillow block* não é completa e os *standoffs* de nylon disponíveis não alcançam a rosca do mesmo, impossibilitando a instalação do GY-521 com o material disponível.

Diante do problema, a solução empregada foi a de utilizar ambos os furos do *pillow block* para instalação do eixo do experimento, com o uso de abraçadeiras, e utilizar abraçadeiras plásticas menores para instalar o GY-521 (figura 41) no equipamento na lateral, da melhor maneira que fosse possível. É necessário encontrar uma forma de instalação mais confiável.

Figura 41. Módulo giroscópio GY-521, com chip InvenSense MPU6050 ao centro.

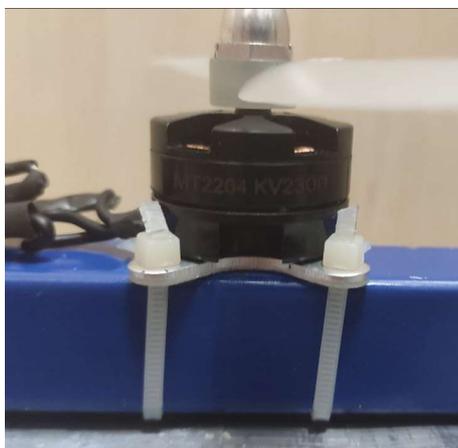


Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.8. Motores não escovados

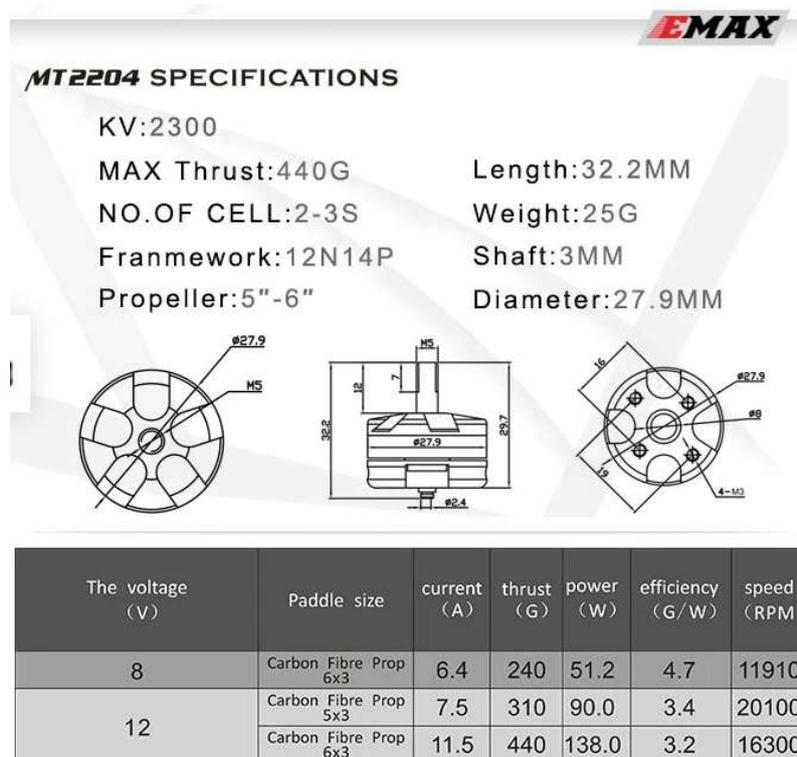
Os motores não escovados, *brushless motors*, utilizados no experimento foram os motores EMAX MT 2204 2300kv (figura 42 e 43), sendo que um motor está em configuração horário, *ClockWise*, e o outro anti-horário, *Counter Clock Wise*.

Figura 42. Detalhe do motor EMAX MT2204 no modelo.



Fonte: Própria, 2021.

Figura 43. Recorte com algumas especificações e recomendações do motor EMAX MT2204 no site da fabricante.



Fonte: EMAX, 2021.

A utilização de um motor CW e outro CCW é importante para que o sistema do modelo esteja o mais próximo de balanceado quanto possível nos demais eixos, além do eixo do experimento. Fisicamente, a diferença entre os modelos está apenas em seu eixo: as rosca de instalação da hélice possuem passo contrários. Isso permite que ao acionar, no designado sentido, o torque gerado na porca que prende a hélice aperte contra a hélice.

Estes motores são recomendados para alimentação de 6 a 12,7 volts, mínimo de 2S a máximo de 3S, e serem utilizados com hélices de 5 a 6 polegadas.

3.4.1.9. Hélices

O modelo de hélice escolhido foi o KingKong 5x40 (figura 44). Este modelo possui 5 polegadas de diâmetro, 40 milímetros de passo e duas pás.

Figura 44. Hélice KingKong 5040 utilizado no experimento.



Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.10. Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC)

O controlador eletrônico de velocidade, ESC, é o equipamento usado para gerenciar a velocidade dos motores através do comando PWM do microcontrolador. O ESC possui configurações que adaptam o controle das condições de construção do motor.

O ESC utilizado no experimento é o modelo EMAX BLHeli 20A (figura 45), um ESC programável capaz de fornecer, com segurança, até 20 amperes ao motor e possui compatibilidade com a interface BLHeli de configuração.

Figura 45. Detalhe do ESC instalado no modelo.



Fonte: Própria, 2021.

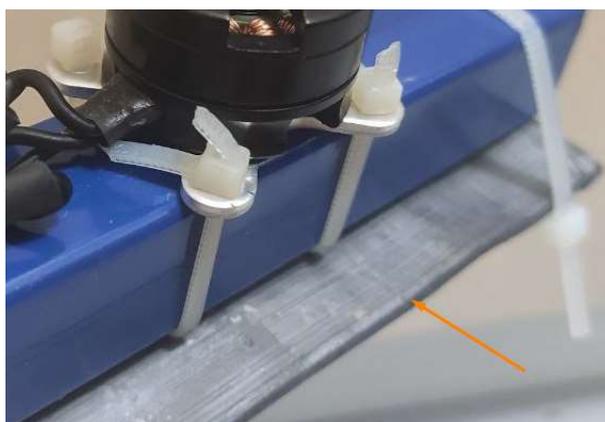
Este ESC, ainda, possui uma unidade BEC, *Battery Elimination Circuit*, de 5 volts e 2 amperes de capacidade, que será o circuito utilizado para alimentação do microcontrolador e do sensor giroscópio GY-521.

3.4.1.11. Fitas de Chumbo

Como método para alterar a massa do sistema, a fim de modificar as características de oscilação do sistema massa mola amortecido do modelo experimental, utilizou-se fitas de chumbo instaladas sob o eixo do experimento. As fitas utilizadas possuem 45 milímetros de largura e 3,5 milímetros de espessura.

A última configuração de chumbo no modelo conta com 500 gramas de chumbo, instaladas sob o eixo do experimento (figura 46), sendo que 250 gramas estão sob o lado esquerdo e 250 gramas sob o lado direito.

Figura 46. Detalhe da instalação das fitas de chumbo no modelo.



Fonte: Própria, 2021.

3.4.1.12. Abraçadeiras Plásticas

As abraçadeiras plásticas foram utilizadas como método de permitir uma maneira rápida, simples e com confiabilidade aceitável de fixação dos materiais no modelo.

A fixação dos equipamentos no modelo foi feita com o uso de abraçadeiras plásticas, a fim de permitir uma maneira rápida de reposicionar, ou substituir, os equipamentos e, ainda assim, oferecendo a resistência e firmeza necessária para manter as peças nos locais escolhidos. Essa movimentação dos equipamentos tem como finalidade alterar as condições de oscilação do modelo, variando os coeficientes do sistema massa mola amortecido do sistema.

Dois modelos de abraçadeiras foram utilizados, ambas de nylon: Foxlux 100x2,5 milímetros; e Benjamix 200x3,6 milímetros.

3.4.1.13. Microcontrolador

No início, optou-se por utilizar o microcontrolador Espressif ESP-32 (figura 47). Os motivos que levaram a essa escolha foram principalmente a alta capacidade de processamento, conexão *Bluetooth Low Energy* e *Wi-Fi*, que permitiriam a extração e manipulação dos dados de configuração do código do modelo de maneira rápida e descomplicada. Além de ser uma placa que extrapola os limites de prototipagem, sendo utilizada em diversos produtos e equipamentos industriais, e permitir conexões nativas do sistema semelhantes a concorrentes da indústria naval, como as da indústria de automóveis com conexão *Bluetooth* em carros.

Figura 47. Detalhe do microcontrolador Espressif ESP-32 utilizado.



Fonte: Própria, 2021.

Porém, ao adentrar a fase de desenvolvimento do código, foram detectados problemas de programação que inviabilizariam o desenvolvimento do código no momento (figura 48). Estes problemas foram:

1. O código necessita da utilização de uma biblioteca, *Servo.h*, que viabiliza a constituição de um sinal PWM como saída nos pinos. A biblioteca *Servo.h* não está disponível para utilização na arquitetura de processamento utilizada pelo ESP-32; e
2. A biblioteca *esc.h* possui estruturas de código que não são suportadas pela arquitetura de processamento do ESC-32.

Para solucionar estes problemas seria necessário um profundo entendimento de programação e sobre as limitações da arquitetura dos controladores ESP-32 e AVR.

Soluções alternativas para a programação do ESP-32 estão em desenvolvimento, porém com o pouco tempo no mercado, menor comunidade e as diferenças de arquitetura em relação aos modelos mais populares, as soluções se tornam mais complexas de serem implementadas e são muito menos documentadas.

Figura 48. Detalhe do erro ao compilar o código no microcontrolador ESP32 com os dizeres: “This library only supports boards with na AVR, SAM, SAMD, NRF52 or STM32F4.”.



```

Erro compilando para a placa ESP32 Dev Module
Copiar mensagem de erro

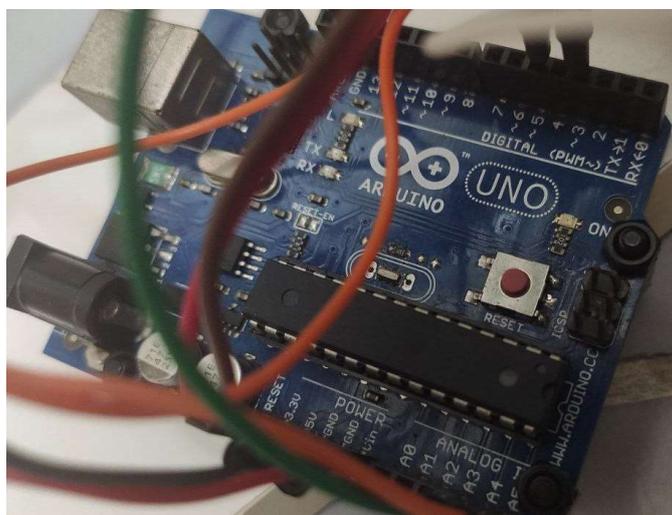
AVR50: a biblioteca Servo alega rodar em arquitetura(s) avr, megaavr, sam, samd, nrf52, stm32f4, mbed, mbed_nano, mbed_portenta, mbed_rp2040 e pode ser incompatível com sua placa atual, que roda em arquitetura(s)
in file included from C:\Users\victor\OneDrive\Área de Trabalho\Meus Arquivos\ESP32\VCC_CODIGO\VCC_CODIGO_MAR1\VCC_CODIGO_MAR1.ino:2:
C:\Program Files (x86)\Arduino\libraries\Servo\src\Servo.h:77:2: error: 'this library only supports boards with an AVR, SAM, SAMD, NRF52 or STM32F4 processor.'"
~~~~~
exit status 1
Erro compilando para a placa ESP32 Dev Module

```

Fonte: Própria, 2021.

Com o impasse de programação, decidiu-se por utilizar um popular controlador AVR. O modelo utilizado foi o Arduino UNO (figura 49), que possui um processador com arquitetura AVR e está a muitos anos no mercado, possuindo todas as bibliotecas nativas ao sistema e bem relacionadas com a utilização da placa.

Figura 49. Detalhe do Arduino UNO utilizado no modelo experimental.



Fonte: Própria, 2021.

3.4.2. O Código do modelo experimental

O código do modelo experimental foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE. O modelo final do código utilizado no modelo experimental encontra-se nos apêndices (apêndice A), a seguir, será realizada uma breve explicação do processo de execução do código de controle de movimento no modelo experimental.

O código descrito no apêndice A foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE para o controlador Arduino UNO utilizando a linguagem C++ de programação e pode ser utilizado diretamente em equipamentos semelhantes com processador AVR e compatíveis.

Talvez a mais importante variável do código seja o próprio tempo. A menor quantidade de tempo que o controlador é capaz de medir é o seu *cycle time*, porém, com a carga dos processos do código, o controlador leva tempo para a realização dos procedimentos.

Caso a carga dos processos mude a cada interação, demandando mais tempo para que sejam resolvidos, o tempo de ciclo perde a sua previsibilidade. Diante desse problema, é utilizada uma variável que contabiliza o tempo entre um ciclo e outro, denominada *elapsedTime* e definida por:

$$elapsedTime = (time - timePrev)/1000 \quad (28)$$

Que é utilizada como a unidade de tempo para análise da variável *error*, definida pela diferença entre ângulo almejado e a leitura de ângulo do sensor giroscópio, corrigida para a unidade graus com informações do *datasheet* da fabricante do sensor.

$$error = read\ angle - desired\ angle \quad (29)$$

O código do modelo utiliza o algoritmo matemático dos controladores PID, possuindo os componentes proporcional, integral e derivativo, que são calculados pelo controlador da seguinte forma:

1. Parâmetro Proporcional do controle é calculado através de:

$$P = K_p e(t) \quad (30)$$

Onde:

K_p : constante proporcional informada pelo usuário; e

$e(t)$: última leitura do erro no tempo.

No código, essa formulação equivale a mostrada abaixo.

$$pid_p = kp \ error \quad (31)$$

O parâmetro Integral é definido por:

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (32)$$

O cálculo é realizado através da variável K_i , multiplicada pela integral do erro em relação ao tempo. A integral definida pelo algoritmo na equação acima não é realizada em sua definição, mas sim pela aproximação numérica através do método dos trapézios, onde a variável *error* é $F(y)$ e o tempo é gerenciado pelo próprio *cycle time* do controlador, ou seja, não há necessidade de referenciá-lo.

Este parâmetro tem como função contabilizar o erro acumulado em função do tempo, para utilização na tomada de decisão no PWM enviado ao motor. Com estas informações pode-se compreender o código que define o parâmetro integral no modelo experimental, como:

$$pid_i = pid_i + (ki \ error \ elapsedtime) \quad (33)$$

O cálculo do Parâmetro Derivativo no código é dado por:

$$D = K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (34)$$

O parâmetro derivativo é calculado pela multiplicação do coeficiente K_d , que é fornecido pelo usuário, pela derivada do erro no tempo que é calculada, a partir da definição matemática de derivada, através do limite:

$$f'(x) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x+t) - f(x)}{t} \quad (35)$$

Que no código é apresentado como:

$$pid_d = K_d \left(\frac{error - previous\ error}{elapsedtime} \right) \quad (36)$$

Ao final, todos os parâmetros de PID são somados para formar o sinal PWM enviado para interagir com os ESC's, aparecendo no código como:

$$PID = pid_p + pid_i + pid_d \quad (37)$$

O sinal PWM enviado aos ESCs é formado pelo sinal do motor esquerdo e pelo sinal do motor direito, pela construção física do modelo, o momento aplicado em um motor possui sinal contrário e, portanto, o valor de PID deve ser invertido em um dos motores formando no código as seguintes linhas do código:

$$pwmleft = throttle + PID \quad (38)$$

$$pwmright = throttle - PID \quad (39)$$

As linhas de código abaixo destas são para limitar a potência dos motores dentro de uma determinada faixa. Usualmente os motores aceitam sinais PWM entre 1000 e 2000, onde 1000 seria 0% de potência e 2000 seria 100%.

4. RESULTADOS

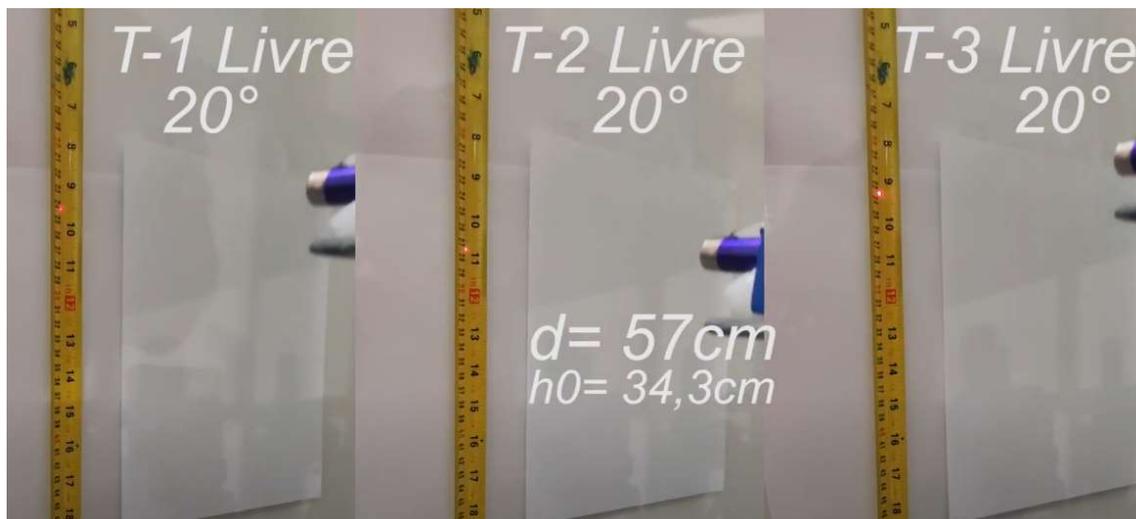
4.1. EXPERIMENTO 1

Para extrair resultados do modelo sobre sua configuração de oscilação do sistema massa mola amortecido realizou-se um experimento de oscilação livre, sem controle, para avaliar suas condições de oscilação (gráficos de 1 a 3).

Neste experimento o eixo do experimento foi inclinado a 20 graus e libertado para oscilar até sua completa parada, este procedimento foi realizado três vezes, a fim de verificar sua repetibilidade.

Durante o experimento 1 (figura 50) o eixo de rotação do modelo se encontrava a 57 cm da trena; a posição horizontal no modelo, zero graus, marca a altura 34,3 cm; e a inclinação de 20 graus no eixo do experimento aponta para uma altura de 14,3 cm na trena.

Figura 50. Snapshot do vídeo de realização do Experimento 1.



Fonte: Própria, 2021.

Um vídeo da realização do experimento está disponível para visualização em:

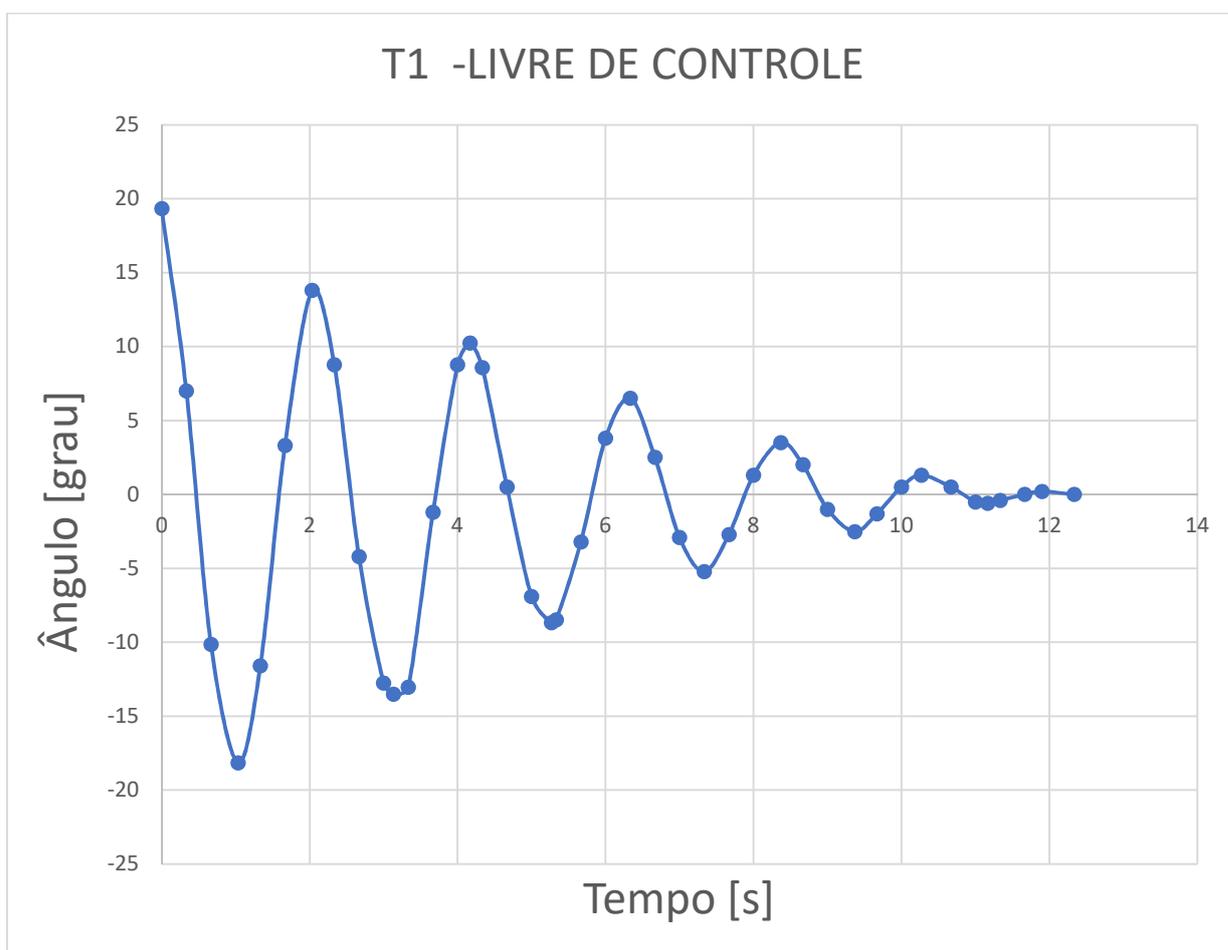
<https://shortest.link/1FjC>

Já as ilustrações dos dados do resultado do experimento se apresentam a seguir.

A oscilação do modelo é gravada através do apontador laser sobre a trena por uma câmera gravando a 60 quadros por segundo. O vídeo demonstrando as oscilações do modelo são então analisados visualmente a cada 15 frames, totalizando 4 medições por

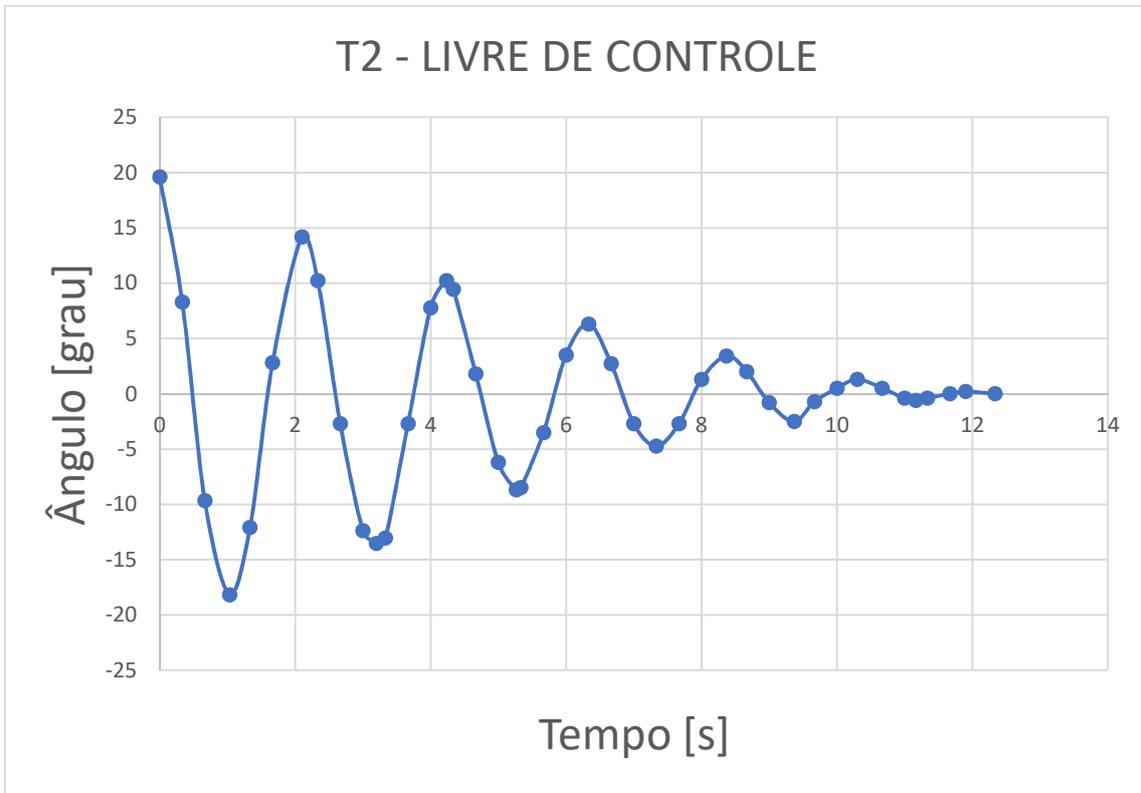
segundo até a total parada da oscilação. Estas medidas são organizadas de modo a formar o gráfico de oscilação do sistema massa mola amortecido do experimento demonstradas a seguir.

Gráfico 1. Experimento 1-T1, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.



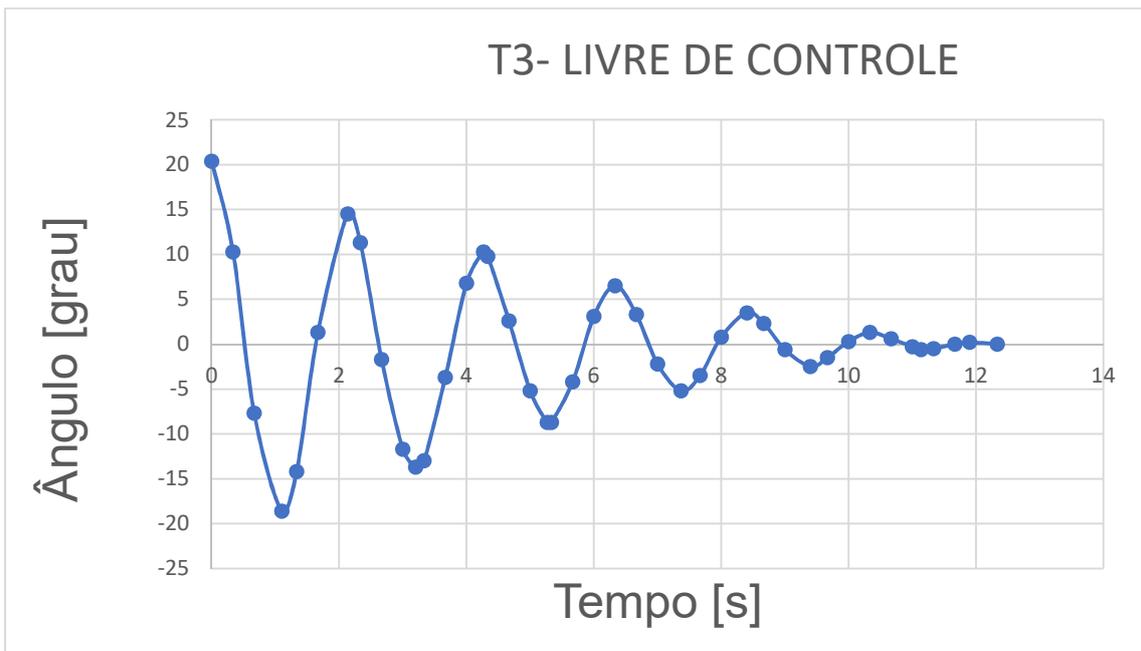
Fonte: Própria, 2021.

Gráfico 2. Experimento 1-T2, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.



Fonte: Própria, 2021.

Gráfico 3. Experimento 1-T3, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.



Fonte: Própria, 2021.

4.2. EXPERIMENTO 2

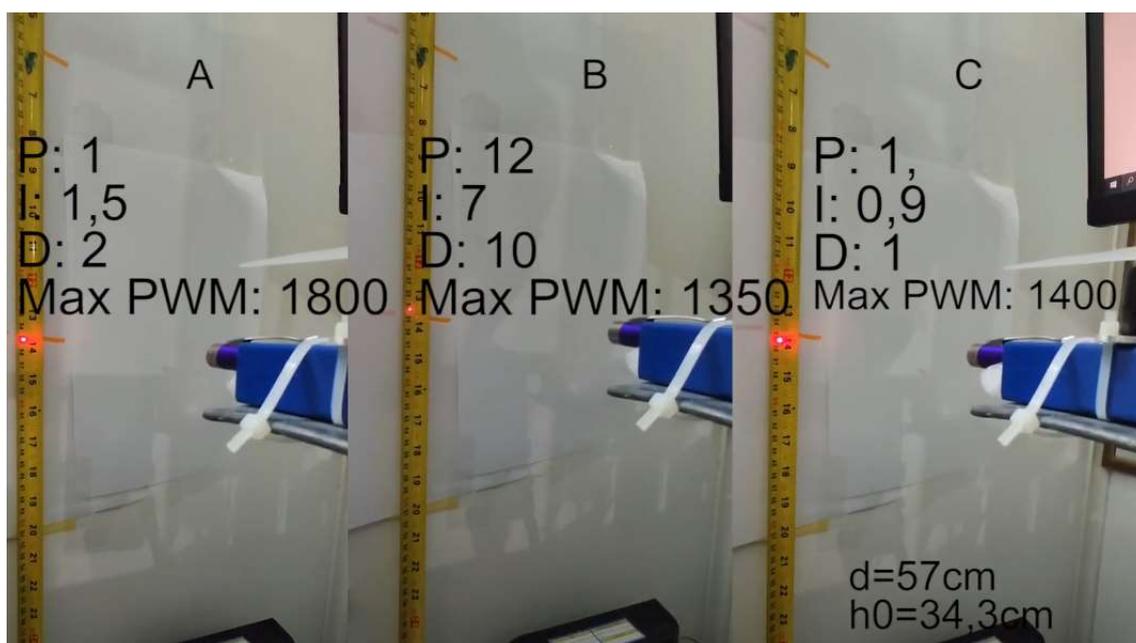
Para o segundo experimento, realizou-se um experimento de oscilação utilizando diversas configurações do código de controle. A fim de extrair resultados do código de controle do modelo, sobre sua configuração de oscilação massa mola amortecido (gráficos de 4 a 6).

Neste caso, inicialmente, o equipamento de controle foi acionado e, posteriormente, o eixo do experimento foi novamente inclinado a 20 graus e libertado para oscilar.

Devido à falta de equipamentos de laboratório para realizar a aplicação do momento inicial de oscilação, o equipamento foi posicionado manualmente a 20 graus e libertado. Com o código de controle ativado, este procedimento, por durar um certo período de tempo e não possuir repetitividade, insere erros no sistema e impede o mesmo de possuir repetitividade.

Uma segunda vez, durante a realização do experimento (figura 51), o eixo de rotação do modelo se encontrava a 57 cm da trena; a posição horizontal no modelo, zero graus, marca a altura 34,3 cm; e a inclinação de 20 graus no eixo do experimento aponta para uma altura de 14,3 cm na trena.

Figura 51. Snapshot da realização do experimento 2.



Fonte: Própria, 2021.

Este procedimento foi realizado três vezes com diferentes configurações de código. E pode ser visto em vídeo da realização do experimento, disponível em:

<https://shortest.link/1B4H>.

Novamente a oscilação do modelo é gravada através do apontador laser sobre a trena por uma câmera a 60 quadros por segundo. O vídeo demonstrando as oscilações do modelo são então analisados visualmente a cada 15 frames, totalizando 4 medições por segundo até a total parada da oscilação. Estas medidas são organizadas de modo a formar o gráfico de oscilação do sistema massa mola amortecido do experimento.

Os gráficos com os dados dos resultados do experimento se apresentam a seguir.

Gráfico 4. Experimento 2 - Teste A, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.



Fonte: Própria, 2021.

Configurações do experimento 2 – Teste A:

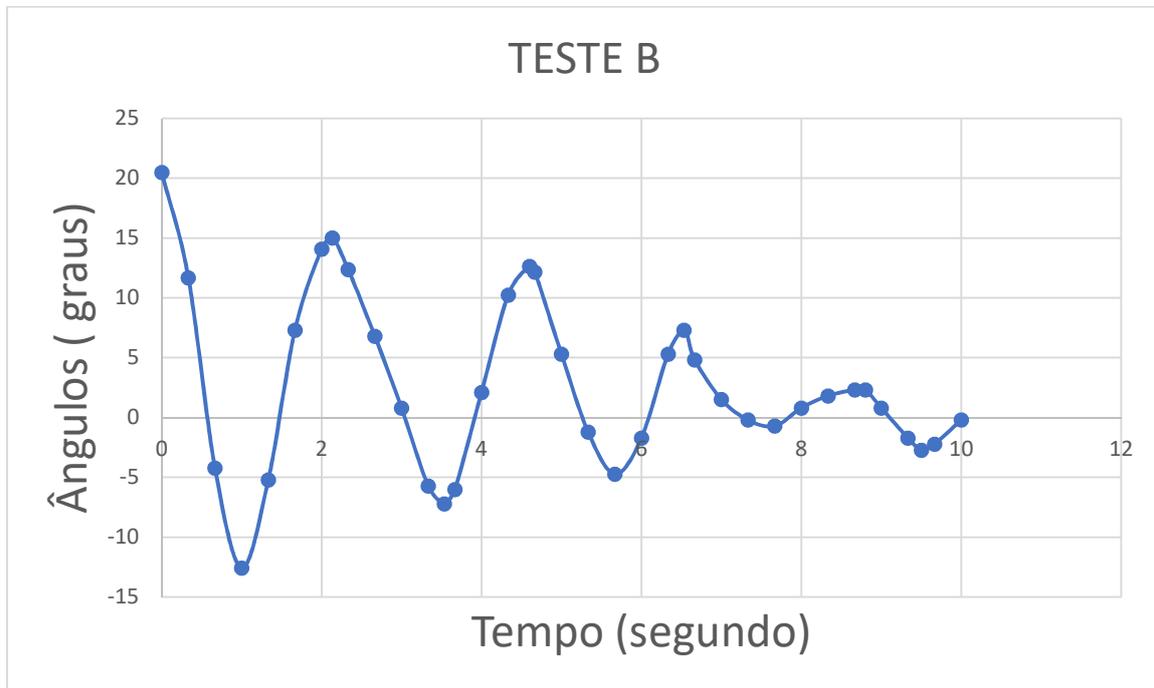
$$pid_p = 1$$

$$pid_i = 1,5$$

$$pid_d = 2$$

Com a limitação de sinal PWM em 1800 microssegundos.

Gráfico 5. Experimento 2 - Teste B, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.



Fonte: Própria, 2021.

Configurações do experimento 2 Teste B:

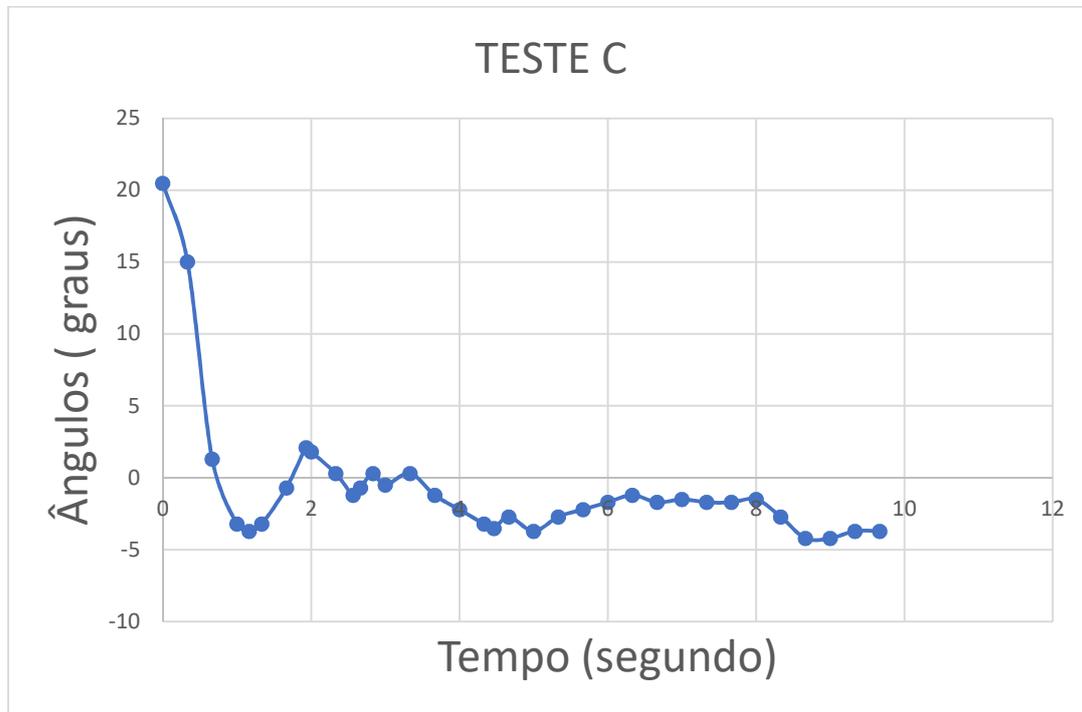
$$pid_p = 12$$

$$pid_i = 7$$

$$pid_d = 10$$

Com a limitação de sinal PWM em 1350 microssegundos.

Gráfico 6. Experimento 2 - Teste C, ângulo de rotação do eixo do experimento vs tempo.



Fonte: Própria, 2021.

Configurações do experimento 2 Teste C:

$$pid_p = 1$$

$$pid_i = 0,9$$

$$pid_d = 1$$

Com a limitação de sinal PWM em 1400 microssegundos.

5. DISCUSSÃO

5.1. TENDÊNCIA DOS RESULTADOS

5.1.1. Experimento 1

Assumindo que o experimento pode ser modelado como um sistema massa-mola-amortecedor, no qual o amortecimento por atrito (no ar) é assumido como amortecimento viscoso caso se estivesse na água, pode-se analisar a oscilação da configuração atual do modelo através do decaimento logarítmico:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A}{A_n}\right) \quad (40)$$

Onde, utilizando os dados do experimento de oscilação de 1 a 20 graus entre os picos que ocorrem nos frames 281 e 345, obtêm-se:

$$\delta = 03069134344$$

Pode-se então verificar o amortecimento do sistema, a partir de:

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (41)$$

Que alimentado do valor calculado de δ pode-se conhecer ζ , o fator de amortecimento:

$$\zeta = 0,157$$

Extrai-se, novamente das tabelas do mesmo experimento, o período de oscilação do modelo que, entre os dois picos de máximo analisados, demonstrou-se ser de:

$$\tau_d = 2,133 \text{ segundos}$$

E através de:

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (42)$$

Podemos extrair o valor de ω_n , a frequência natural de vibração do modelo:

$$\omega_n = 2,982341601 \text{ rad/s}$$

Com este valor e conhecendo o valor de J_0 do modelo, podemos encontrar a constante de amortecimento crítico:

$$c_c = 2 J_0 \omega_n \quad (43)$$

Que nos permite verificar a constante de amortecimento do sistema através de:

$$c = \xi c_c \quad (44)$$

E, por fim, a rigidez do sistema por:

$$k = J_0 \omega_n^2 \quad (45)$$

Desta forma obtém-se os coeficientes necessários para verificar a equação que rege o sistema massa mola amortecedor do modelo experimental.

Conhecer estes coeficientes e alterá-los diretamente com a aplicação e reposicionamento dos componentes que interferem nos mesmos, permite a adequação do modelo à uma grande variedade de sistemas massa mola amortecido navais, dado as considerações e os estudos de escala.

Combinada da adequação do equipamento do modelo ao equipamento *trim tabs*, o modelo experimental possui potencial para avaliar em bancada os sistemas navais equipados com *trim tabs*.

Dado o modelo do experimento, adequado ao estudo em escala, estabilizado pelo código PID, as configurações de PID do modelo poderiam ser exportadas para estabilização no sistema naval equiparado ao experimento.

5.1.2. Experimento 2 – Oscilação com controle

Devido ao uso de diferentes configurações no uso do algoritmo de controle, a oscilação com controle do dispositivo apresentou grande variação entre os testes do experimento.

Durante a realização do teste A, a configuração PID foi instalada com: $pid_p = 1$; $pid_i = 1,5$; e $pid_d = 2$. E, ainda, o sinal PWM foi limitado em 1800 microssegundos. A limitação PWM resultou no equipamento a utilização da voltagem nos motores em 80%.

Analisando a movimentação do eixo do experimento do teste A, pode-se verificar a tendência do dispositivo em se estabilizar entre -1 e -2 graus e pequenos picos que ocorrem em momentos em que o sistema já se encontrava aparentemente estabilizado. A estabilização em ângulos diferentes do esperado, zero, se dá pelo fato da instalação do sensor giroscópio não estar totalmente horizontal.

A inclinação física do sensor alimentou o sistema fazendo com que a estabilização ocorresse entre -1 e -2 graus após três segundos, mesmo com o ângulo inicial inferido no dispositivo ter sido maior que 20 graus, o que resultaria em uma oscilação sem controle de maior amplitude e tempo de estabilização do que a apresentada pelo experimento 1.

Os picos na movimentação do eixo do experimento podem ser decorrentes da própria configuração PID utilizada e da vibração na qual o sensor giroscópio se encontrava no modelo, devido o acionamento dos motores. Acredita-se, no entanto, que os picos de movimentação observados sejam consequência predominantemente da vibração do sensor.

Já no experimento 2 teste B, as configurações PID utilizadas no experimento, influenciaram negativamente na oscilação do modelo. Durante os picos 2 e 3 no teste B pode-se verificar, respectivamente, ângulos 15 graus e 12,6 graus, com período entre os picos de 2,46 segundos.

Comparando estes resultados com a oscilação do sistema sem controle realizada no experimento 1, durante os mesmos picos encontram-se, respectivamente, ângulos máximos da ordem de 14 e 10 graus, com período de oscilação entre os picos de 2,13 segundos.

O aumento na amplitude de movimento indica que a atuação do código PID no sistema interferiu negativamente na oscilação do mesmo. O resultado no experimento 2 teste B indica que, mesmo equipado de um sistema de controle, as configurações do mesmo são cruciais para obter-se o resultado esperado. Podendo o sistema estabilizador interferir negativamente no sistema, caso utilize coeficientes inapropriados para o controle do sistema equipado.

O experimento 2 teste C, foi o experimento com configuração que mais se aproximou de um controle criticamente amortecido. Ainda assim, as condições discutidas a respeito do experimento 2 teste A se aplicam.

Durante a realização deste experimento, nas configurações do código, o valor de PWM máximo foi limitado em 1400 microssegundos, isso implica em limitar os motores a 40% da voltagem máxima. Esta limitação foi uma tentativa de reduzir a vibração gerada pelos motores, permitindo um melhor funcionamento do sensor giroscópio e a supressão dos picos observados durante a realização do experimento teste A.

Os picos observados durante a realização do experimento 2 teste C foram menos frequentes e agressivos, do que os observados no experimento 2 teste A, porém, ainda são presentes. O sistema novamente estabilizou-se entre -1 e -2 graus, demorando aproximadamente 3 segundos para alcançar um comportamento consideravelmente estabilizado, semelhante ao teste A.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma breve introdução às tecnologias mais comuns para controlar movimentos de embarcações, incluindo alguns tipos de dispositivos de estabilização de movimentos, visando uma possível implementação para contribuir com uma navegação mais segura e eficiente na região amazônica. Além disso, foi apresentado um caso de estudo, no qual foi implementado um algoritmo de controle de movimentos baseado na metodologia PID, utilizando um experimento de bancada simplificado para exemplificar os movimentos de balanço de uma embarcação.

O procedimento e código utilizados para implementar o sistema de controle são disponibilizados neste trabalho, visando uma possível extensão e implementação em aplicações de baixo custo no futuro, pois foram considerados software e hardware de livre acesso.

Com o uso do algoritmo desenvolvido foi possível observar que as amplitudes de movimento e o tempo necessário para obter a estabilização do sistema são alteradas conforme a configuração utilizada no algoritmo PID. Estes parâmetros com a melhor configuração encontrada para o sistema do modelo (experimento 2 Teste C), indicam redução no tempo necessário para estabilização do movimento em aproximadamente 50% e redução da amplitude do primeiro pico positivo da oscilação na ordem de 85%.

Foi verificado que o controlador de movimentos apresentado possui potencial para controlar movimentos rotacionais de estruturas oscilantes de maneira simplificada. Com os experimentos realizados através da instalação de bancada, foi assumido que o algoritmo poderia ser implementado para controlar movimentos em sistemas navais equipados com dispositivos de estabilização de movimentos, tais como *trim tabs*.

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir os seguintes pontos:

Adequar a equação massa mola amortecida de embarcações com a do modelo, considerando as escalas nos quais se submetem a oscilação entre o modelo e a embarcação e os equipamentos que causam momento no eixo do experimento e no rolamento da embarcação, pode permitir que o código PID utilizado para controle no modelo seja estendido para o controle da embarcação semelhante, dada as considerações das escalas de Froude e Reynolds.

O algoritmo de controle de movimentos foi implementado em uma instalação simplificado fora da água. A realização dos experimentos em laboratórios hidrodinâmicos, com procedimentos e equipamentos mais adequados, aumentaria significativamente as possibilidades de análise, bem como confiança nos resultados do modelo. Mesmo com essas limitações, foi possível demonstrar que o mecanismo de controle funciona, conseguindo estabilizar os movimentos.

É importante mencionar que o código utilizado no modelo e que tende a ser aplicado em protótipos de embarcações semelhantes possuirá disparidades, devido a necessidade de desenvolver ou/e aplicar um algoritmo que atue como filtro que tenha capacidade de adaptar-se as condições de ruído e incerteza navais. A aplicação do filtro de Kalman pode ser adequado a essas necessidades, mas não foi implementada, devido a necessidade de processamento avançado. Trabalhos futuros poderão ser realizados com relação a esse tópico.

É necessário realizar aprimoramentos no código para incluir o controle de movimentos acoplados.

7. REFERÊNCIAS

ABBOTT, Ira H.; VON DOENHOFF, Albert E. *Theory of Wing Sections. Including a Summary of Airfoil Data*. New York: Dover Publications, 1959.

AGUIAR, Thalles Carvalho G. R. de. **Análise do Comportamento Dinâmico de uma Embarcação de Planeio Via CFD**. Dissertação de graduação apresentado ao curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2018.

ANG, Kiam H; CHONG, Gregory C.Y; LI, Yun. *PID Control System Analysis, Design, and Technology*. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**: v. 13, n. 4, p. 559 – 576, 2005.

ANTAQ – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Caracterização da Oferta e da Demanda do Transporte Fluvial de Passageiros e Cargas na Região Amazônica**. Em parceria com a universidade Federal do Pará – UFPA, 2018.

ARTMANN JUNIOR. **Estudo sobre a Aplicação de um Hidrofólio em uma Embarcação de Apoio Offshore**: Abordagem Experimental Simplificada. Dissertação de graduação apresentado ao curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Joinville, 2015.

AVCI, Ahmet Gultekin; BARLAS, Baris. *An Experimental Investigation of Interceptors for a High Speed Hull*. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**: v. 11, cap. 1, p. 256 – 273, 2019.

BABICZ, Jan. *Encyclopedia of Marine Technology*. Helsinki: Wärtsilä, Ed. 2, 2015.

BARROS, Geraldo Luiz Miranda de. **Navegar é fácil**. Petrópolis, RJ: Catedral das Letras, ed. 12, 2006.

BERNOULLI, Danielis. *Hydrodynamica*, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii: opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum. Argentorati: Johannis Reinholdi Dulseckeri, 1738.

BOJORGE, Ninoska. **Sintonia de Malhas de Controle**. Conteúdo programático da disciplina de Controle de Processos, do Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, da Universidade Federal Fluminense – UFF, [s.d.].

BURGER, W.; CORBET, A. G. *Ship Stabilizers. Their Design and Operation in Correcting the Rolling of Ships. A Handbook for Merchant Navy Officers*. Pergamon Press: London, 1966.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A.H.A. **Amortecimento: classificação e métodos de determinação**. Informativo Técnico-Científico - ITC04. ATPC Engenharia Física, 2010.

DACOMA. *Airkeel* (2021). Disponível em: <https://www.dacoma.dk/airkeel> > Acesso em: ago/2021.

DAVID, Robert C. de Azevedo. **A dinâmica do Transporte Fluvial de Passageiros no Estado do Amazonas**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, apresentado a Universidade Federal do Amazonas – UFAM, 2010.

DETERS, Robert W.; ANANDA, Gavin K.; SELIG, Michael. *Reynolds Number Effects on the Performance of Small-Scale Propellers*. Department of Aerospace Engineering, University of Illinois. 32nd American Institute for Aeronautics and Astronautics (AIAA) Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, 2014.

DIAS, Luiz Eduardo Bentes; MACIEL, Jussara Socorro Cury. **Diagnóstico da Logística e Infraestrutura do Transporte Hidroviário de Cargas no Amazonas**. 8^o Congresso Luso-brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2018). Cidades e Territórios - Desenvolvimento, atratividade e novos desafios. Coimbra – Portugal, 2018.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Hidrovia do Amazonas** (2021). Disponível em: < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/hidrovia-do-amazonas> > Acesso em: out/2021.

DUARTE, Lucas Luz. **Projeto Conceitual de uma Embarcação do tipo Catamarã para Transporte de Passageiros na Região de Manaus**. Dissertação de

graduação apresentado ao curso de Engenharia Naval, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2017.

EMAX. MT2204 2300KV MILTIROTOR MOTOR (2021). Disponível em: <<https://emaxmodel.com/>> Acesso em: Ago/2021.

ERTOĞAN, Melek; WILSON, Philip A.; TAYYAR, Gokhan T.; ERTUGRUL, Seniz. *Optimal Trim Control of a High-Speed Craft by Trim Tabs/Interceptors Part I: Pitch and Surge Coupled Dynamic Modelling Using Sea Trial Data*. **Ocean Engineering**: v. 130, p. 300 – 309, 2017.

FALTISEN, Odd M. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. New York: Cambridge University Press, 2005.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, John C. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, ed. 8, 2014.

FROUDE, W. *Observations and Suggestions on the Subject of Determining by Experiment the Resistance of Ships*. Institution of Naval Architects: The Papers of William Froude (1810– 1879), 1955.

FUJARRA, André Luís C. **Módulo 1: Arquitetura Naval**. Curso de Especialização em Engenharia Naval oferecido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco - UPE, 2006.

GLENN RESEARCH CENTER OF NASA. National Aeronautics and Space Administration. *Inclination Effects on Lift*. (2021). Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/incline.html>> Acesso em: out/2021.

GLENN RESEARCH CENTER OF NASA. National Aeronautics and Space Administration. *Propeller Thrust*. (2021). Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/propth.html>> Acesso em: out/2021.

GLENN RESEARCH CENTER OF NASA. National Aeronautics and Space Administration. *The Lift Equation*. (2021). Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lifteq.html>> Acesso em: out/2021.

GIL, Antônio C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo: Atlas, ed. 6, p. 8, 2008.

GREGORY, N.; O'REILLY, C. L. *Low-Speed Aerodynamic Characteristics of NACA 0012 Airfoil Sections, including the Effects of Upper-Surface Roughness Simulation Hoar Frost*. Ministry of Defence (Procurement Executive). Aeronautical Research Council. London: Reports and Memorand No. 3726, 1970.

HANSEN, Martin O. L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. London: Earthscan, Second Edition, 2008.

HAYWARD, Leslie. The History of Hydrofoils. **Hovering Craft & Hydrofoils**: Londres, v. 4, n. 8 – v.6, n.6, 1965 – 1967.

HILTON, Eduardo. **Aerofólios para aeronaves leves** [s.d]. Disponível em: <www.aviacaoexperimental.pro.br/aero/perfis/perfisavilevel.html>. Acesso em: set/2021.

HYPERPHYSICS. *Bernoulli Equation* [2005?]. Department of Physics and Astronomy of Georgia State University. Disponível em: < <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pber.html> > Acesso em: set/2021.

JESPERSEN, Dennis C.; PULLIAM, Thomas H.; CHILDS, Marissa L. **2DN00: 2D NACA 0012 Airfoil Validation Case**. Turbulence Modeling Resource. Langley Research Center of NASA – National Aeronautics and Space Administration, 2021.

JOURNÉE, J. M. J.; MASSIE, W. W. **Offshore Hydromechanics**. Delft University of Technology: first edition, 2001.

JOHNSTON, Robert J., *Hydrofoils*, **Naval Engineers Journal**: v. 97, ed. 2, cap. 5, p. 142 – 199, 1985.

LADSON, Charles L. *Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section*. Langley Research Center of NASA – National Aeronautics and Space Administration, 1988.

LEWIS, Edward V. *Principles of Naval Architecture*. Volume I: Stability and Strength. NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Second Revision, 1988.

LEWIS, Edward V. *Principles of Naval Architecture*. Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration. NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Second Revision, 1988.

LI, Chennan et. al. *Measurement of Propeller Lift Force*. Lab 2 Final Report. VM495 Mechanical Engineering Laboratory II & University of Michigan – UM. Shanghai Jian Tong University – SJTU Joint Institute, 2015.

LUIZ, Thiago. **Solte o cinto! A turbulência sumiu**. Fapemat Ciência (2014). Disponível em: < <http://www.revistafapematciencia.org/noticias/noticia.asp?id=572> >. Acesso em: ago/2021.

MARITIMUS. Boat Online Shop. Interceptor Trim Tabs 450FWV (2021). Disponível em: < https://www.maritimusboote.de/epages/289397.sf/en_GB > Acesso em: out/2021.

MCCROSKEY, W. J. *A Critical Assessment of Wind Tunnel Results for the NACA 0012 Airfoil*. Ames Research Center of NASA – National Aeronautics and Space Administration, 1987.

MELLO, Nicolas Xavier de. **Análise de Equilíbrio Dinâmico e Resistência ao Avanço de Cascos Planadores em CFD**. Dissertação de graduação apresentado ao curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2015.

MEYER JR., John R. *Ships that Fly. A Story of the Modern Hydrofoil*. Hydrofoil Technology, Inc., 1990.

MORAES, Rita de Cássia M. de; MORAES, Hito Braga de. **Análise das Características de Projeto das Embarcações da Amazônia**: uma contribuição para a elaboração de projetos navais. 22º Congresso Nacional de Transportes Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro: SOBENA, 2008.

MUNROE, R. M. *The Commodore's Story*. Miami: Historical Association of Southern Florida, 1985.

NÁUTICA. **Como usar corretamente os flapes?** (2015) Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1_ZzRhKdDS0> Acesso em: ago/2021.

NI - NATIONAL INSTRUMENTS. **Explicando a Teoria PID** (2020). Disponível em: < <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html#section--1730282404> > Acesso em: set/2021.

NOVO ALIANÇA. **Primeira chegada em Parintins da nova lancha ‘A Noiva’** (2013). Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=KX-5C3IQF1M> > Acesso em: set/2021.

NORMAM – 02. Normas da Autoridade Marítima para embarcações empregadas na navegação interior. Marinha Do Brasil. Diretoria de Portos e Costas - DPC, 2011.

OTHMAN, M. N. K. et. al. *Experimental study of UAV propeller Thrust generation for various Propeller Blade-Span and the relation with mouthring.* IOP Publishing. Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 557. The 1st International Conference on Mechanical Eletronics & Biosystem Engineering 2018 – MEBSE 2018, Indonesia, 2019.

POPULAR MECHANICS. *Fins to Stop Ship’s Rolling Governed by Gyro.* Chicago, vol. 59, n. 4, p. 509, 1933.

RAO, Singiresu S. *Vibrações Mecânicas.* Tradução de Arlete Simille. São Paulo: Pearson Prentice Hall, ed. 4, 2008.

REYNOLDS, Osborne. *An Experimental Insvestigation of the Circumstances which determine whether the Motion of Water shall be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels.* **Royal Society:** London, Philosophical Transactions, v. 174, p, 935 – 982, 1883.

SANTOS, Milton. **A natureza do Espaço.** São Paulo: Hucitec, ed. 2, 1999.

SAKAKI, Abdollah; GHASSEMI, Hassan; KEYVANI, Shayan. *Evaluation of Hydrodynamic Performance of Planing Boat with Trim Tab and Interceptor and Its Optimization Using Genetic Algorithm.* **Journal of Marine Science and Application:** v. 18, cap. 2, p. 131 – 141, 2018.

STACCIARINI, João Henrique Santana; FELDMANN, Luana. Importância da Rede Hidroviária para o Estado do Amazonas. **Revista OKARA:** João Pessoa/PB, Geografia em debate, v. 14, n. 1, p. 153-168, 2020.

SINHA, Tanumoy. *Different Types of Roll Stabilization Systems Used for Ships*. (2021). Disponível em: < <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/roll-stabilization-systems/> > Acesso em: ago/2021.

SMARTKITS. Mancal com Rolamento KP8 (2021). Disponível em: <<https://www.smartkits.com.br/mancal-com-rolamento-kp8> > Acesso em: ago/2021.

SOEIRO, Newton Sure. **Curso de Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores**. Universidade Federal do Pará -UFPA. Belém, 2008.

SONG, Ke-wei et. al. *Influence of interceptors, Stern flaps, and their combinations on the hydrodynamic performance of deep-ve ship*. **Ocean Engineering**: Elsevir, v. 170, p. 306 – 320, 2018.

VATALARO, Michael. *Knowing how trim tabs work is the first step to using them effectively, and smoothing out your ride*. Trim Tab Basics. **BoatUS Magazine**: Virginia, 2015. Disponível em: < <https://www.boatus.com/expert-advice/expert-advice-archive/2015/april/trim-tab-basics> > Acesso em: out/2021.

VIANELLO, Luciana P. **Métodos e Técnicas de Pesquisa**. Conteúdo programático da grade de pós-graduação do Centro Universitário UNA, [ca. 2013].

WESCOTT, Tim. *PID without a PhD: A Simple Software Controller Design Method*. Wescott Design Services. Oregon, 2018.

ZHONG, Jinghua. *PID Controller Tuning: A Short Tutorial*. Conteúdo programático da grade de Engenharia Mecânica da Purdue University. Indiana, 2006.

8. APÊNDICES

8.1. APÊNDICE A

CÓDIGO DO CONTROLADOR UTILIZADO

O código abaixo foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE para o controlador Arduino UNO utilizando a linguagem C+ de programação e pode ser utilizado diretamente em equipamentos semelhantes com processador AVR e compatíveis.

```

1  #include <Servo.h>
2  #include <Wire.h>
3
4  float Acceleration_angle[2];
5  float Gyro_angle[2];
6  float Total_angle[2];
7  int16_t Acc_rawX;
8  int16_t Acc_rawY;
9  int16_t Acc_rawZ;
10 int16_t Gyr_rawX;
11 int16_t Gyr_rawY;
12 int16_t Gyr_rawZ;
13
14 float elapsedTime, time, timePrev;
15 int i;
16 float rad_to_deg = 180/3.141592654;
17
18 float PID, pwmLeft, pwmRight, error, previous_error;
19 float pid_p=0;
20 float pid_i=0;
21 float pid_d=0;
22
23 Servo left_prop;
24 Servo right_prop;
25
26 //PID CONSTANTS CONFIG//
27
28 double kp=1;
29 double ki=0.9;
30 double kd=1;
31
32
33 double throttle=1300;
34 float desired_angle = 0;
35
36 void setup() {
37   Wire.begin(); // wire communication
38   Wire.beginTransmission(0x68);
39   Wire.write(0x6B);
40   Wire.write(0);
41   Wire.endTransmission(true);
42   Serial.begin(250000);
43   right_prop.attach(3);

```

```

44 left_prop.attach(5);
45
46 time = millis();
47
48 left_prop.writeMicroseconds(800);
49 right_prop.writeMicroseconds(800);
50 delay(5000); /*delay for esc startup*/
51
52 }//end of setup void
53
54 void loop() {
55     timePrev = time;
56     time = millis();
57     elapsedTime = (time - timePrev) / 1000;
58     Wire.beginTransmission(0x68);
59     Wire.write(0x3B); // 0x3B register correspond to AcX
60     Wire.endTransmission(false);
61     Wire.requestFrom(0x68, 6, true);
62     Acc_rawX=Wire.read()<<8|Wire.read();
63     Acc_rawY=Wire.read()<<8|Wire.read();
64     Acc_rawZ=Wire.read()<<8|Wire.read();
65
66     Acceleration_angle[0] =
67     atan((Acc_rawY/16384.0)/sqrt(pow((Acc_rawX/16384.0),2) +
68     pow((Acc_rawZ/16384.0),2)))*rad_to_deg;
69     Acceleration_angle[1] = atan(-
70     1*(Acc_rawX/16384.0)/sqrt(pow((Acc_rawY/16384.0),2) +
71     pow((Acc_rawZ/16384.0),2)))*rad_to_deg;
72     Wire.beginTransmission(0x68);
73     Wire.write(0x43); //Gyro data first adress
74     Wire.endTransmission(false);
75     Wire.requestFrom(0x68, 4, true);
76     Gyr_rawX=Wire.read()<<8|Wire.read();
77     Gyr_rawY=Wire.read()<<8|Wire.read();
78
79     Gyro_angle[0] = Gyr_rawX/131.0;
80     /*---Y---*/
81     Gyro_angle[1] = Gyr_rawY/131.0;
82
83     /*conventional filter*/
84     /*---X axis angle---*/
85     Total_angle[0] = 0.98 *(Total_angle[0] + Gyro_angle[0]*elapsedTime)
86 + 0.02*Acceleration_angle[0];
87     /*---Y axis angle---*/
88     Total_angle[1] = 0.98 *(Total_angle[1] + Gyro_angle[1]*elapsedTime)
89 + 0.02*Acceleration_angle[1];
90
91 /*////////////////////////////////////P I D////////////////////////////////////*/
92 error = Total_angle[1] - desired_angle;
93 /*Next the proportional value of the PID*/
94 pid_p = kp*error;
95 /*The integral part */
96 pid_i = pid_i+(ki*error*elapsedTime);
97 /*The last part is the derivate.*/
98 pid_d = kd*((error - previous_error)/elapsedTime);

```

```
99 /*The final PID values is the sum of each of this 3 parts*/
100 PID = pid_p + pid_i + pid_d;
101
102 /*Control max and min PID number*/
103 if(PID < -1050)
104 {
105     PID=-1050;
106 }
107 if(PID > 1050)
108 {
109     PID=1050;
110 }pwmLeft = throttle + PID;
111 pwmRight = throttle - PID;
112
113 /*Control max and min PWM.*/
114 //Right
115 if(pwmRight < 1000)
116 {
117     pwmRight= 1000;
118 }
119 if(pwmRight > 1500)
120 {
121     pwmRight=1500;
122 }
123 //Left
124 if(pwmLeft < 1000)
125 {
126     pwmLeft= 1000;
127 }
128 if(pwmLeft > 1500)
129 {
130     pwmLeft=1500;
131 }
132 /*Create the PWM*/
133 left_prop.writeMicroseconds(pwmLeft);
134 right_prop.writeMicroseconds(pwmRight);
135 previous_error = error;
136 }//end of loop void
```

8.2. APÊNDICE B

PROPOSTA DE RELAÇÃO DO *TRIM TAB* COM MOTORES NÃO
ESCOVADOS COM HÉLICES

Observa-se que ambos os equipamentos, *trim tabs* e motores não escovados com hélices, possuem natureza física semelhante, taxas de crescimento semelhantes e, além disso, derivam da mesma ferramenta física, para verificação de suas soluções: a equação de Bernoulli (1738). Como consequência do exposto podemos relacionar os resultados apresentados, com a finalidade de identificar suas dependências.

A fim de identificar uma dependência entre os estudos, recapitula-se a força de sustentação desempenhada pelo hidrofólio, apresentada por Faltisen (2005):

$$F_s = C_l * \frac{\rho}{2} * V_{emb}^2 * A_h$$

Já a Força de Sustentação gerada pelo por um folio, conforme *Glenn Research Center of NASA* (2021), se dá por:

$$F_{folio} = C_{lfolio} \frac{\rho}{2} V_{max}^2 A_{folio}$$

Embora ambos os problemas físicos exibirem alta semelhança e serem solucionados através da mesma estratégia e metodologia, considerando as limitações de aplicação da equação de Bernoulli (1738) e os problemas inerentes a diferença entre os fluidos e o número de Reynolds (1883), não podem ser diretamente comparados. Há a possibilidade de existir ferramenta física, empírica ou matemática, capaz de comparar a Força de Sustentação gerada em ambos os equipamentos, corrigida para as particularidades de cada equipamento.

- Proposta de Comparação:

Dividindo-se F_s por F_{folio} obtém-se:

$$\frac{F_s}{F_{folio}} = \frac{C_l}{C_{folio}} \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{ar}}} \frac{A_h}{A_{sm}} \frac{V_{emb}^2}{V_s^2}$$

Aplicando a solução de Coeficiente de Sustentação para casos de perfis finos, como utilizado nos equipamentos *trim tabs*:

$$C_l = 2 \pi a$$

Obtemos a seguinte relação:

$$\frac{F_s}{F_{sm}} = \frac{2 \pi a}{C_{folio}} \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}} \frac{A_h}{A_{sm}} \frac{V_{emb}^2}{V_s^2}$$

Executando a mesma estratégia de avaliação do conjunto de motor elétrico com hélice, a fim de poder avaliar a Força de Sustentação do mesmo, a partir da velocidade máxima de saída gerada pelo conjunto. Dada pela introdução do Coeficiente de Sustentação para hélices em pequenos motores encontrado por Deters, Ananda e Selig (2014) e Li et. al. (2015).

$$C_{sm} = \frac{F_{sm}}{\rho n^2 D^4}$$

Chega-se a seguinte equação:

$$\frac{F_s}{F_{sm}} = \frac{2 \pi a}{C_{folio}} \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}} \frac{A_h}{D^4} \frac{V_{emb}^2}{n^2}$$

Em seguida aplicando as definições propostas por Deters, Ananda e Selig (2014), e a relação de rps, n , de motores não escovados apresentadas anteriormente:

$$n D = V;$$

$$D^2 = A; \text{ e}$$

$$n = kv \text{ v.}$$

Podemos reescrever a última relação encontrada, para verificar a seguinte equação:

$$\frac{F_s}{F_{sm}} = \frac{2 \pi a}{C_{folio}} \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{ar}} \frac{1}{kv^2} \frac{A_h}{A_{sm}^2} \frac{V_{emb}^2}{1}$$

As avaliações, quanto a diferença do número de Reynolds do modelo ao equipamento final, não foram consideradas e devem ser analisadas e corrigidas com o apoio de algum estudo relacionado, como o ITTC-57.