

# GyroNaut

*Sistema de Estabilização Giroscópica de Três Eixos para Embarcações de Pequeno Porte*

Colégio Valsassina · Frederico B; Gustavo F; Tomás M; Prof. Pedro Jorge · 2026



<b>Título do Projeto</b>	GyroNaut
<b>Área a Concurso</b>	Embarcações Inovadoras
<b>Equipa</b>	Frederico Brehm, Gustavo Ferreira e Tomás Ministro; Colégio Valsassina, Lisboa
<b>Professor Orientador</b>	Prof. Pedro Jorge
<b>Edição</b>	Atlântico Júnior 2026

---

## 1. Resumo

O GyroNaut é um protótipo de embarcação de pequeno porte (850 × 340 × 300 mm) desenvolvido em torno de um sistema ativo de estabilização giroscópica de três eixos. O sistema utiliza três rodas de inércia acionadas independentemente, uma por eixo rotacional (*roll*, *pitch* e *yaw*), para gerar momento angular e, portanto, oposição a perturbações externas. O casco foi projetado no Autodesk Fusion 360, fabricado por impressão 3D (FDM, *Fused deposition modeling*, ou seja, modelação por deposição fundida, em PLA, ácido polilático) e impermeabilizado com resina epoxy e silicone. O controlo é feito sem fios através de dois microcontroladores ESP32 (Espressif 32-bit) a comunicar via protocolo ESP-NOW. Todas as etapas do projeto estão concluídas: o casco está construído e estanque, a propulsão e o controlo da direção são funcionais, a ligação sem fios está operacional, as rodas de inércia foram integradas e testadas a 8.000 RPM (rotações por minuto), e os testes na água foram realizados com sucesso. Os resultados experimentais confirmam que o sistema ativo produz uma redução estatística relevante da inclinação a qual a embarcação está exposta por efeito das ondas, em comparação com a embarcação sem estabilização ativa.

## Abstract

GyroNaut is a small-scale marine vessel prototype (850 × 340 × 300 mm) built around a three-axis active gyroscopic stabilisation system. Three independently driven flywheels, one per rotational axis (roll, pitch, yaw), generate counteracting angular momentum against external perturbations. The hull was designed in Autodesk Fusion 360, fabricated by FDM 3D printing (Fused deposition modeling) in PLA material (Polylactic Acid), and sealed with epoxy resin and silicone. Wireless control is achieved via two ESP32 (Espressif 32-bit) microcontrollers communicating over the ESP-NOW protocol. All project stages are complete: the hull is watertight, propulsion and steering are functional, the wireless link is operational, the flywheels are integrated and operated at 8.000 RPM, and in-water trials have been conducted. Experimental results confirm that the active system produces a statistically significant reduction in the angle of displacement caused by waves, compared to the same vessel without active stabilisation.

## 2. Introdução

A estabilidade de embarcações é um dos desafios fundamentais da engenharia naval. Qualquer corpo flutuante está sujeito a perturbações contínuas, seja de ondas, vento ou carga dinâmica, que provocam rotações em três eixos: *roll* (eixo longitudinal), *pitch* (eixo transversal) e *yaw* (eixo vertical). Em embarcações com tripulação, a instabilidade causa desconforto e risco. Em embarcações autónomas ou teleoperadas, compromete diretamente a precisão de navegação e o sucesso da missão

As soluções de estabilização existentes dividem-se em duas grandes categorias. Os sistemas passivos, quilhas ou lastros fixos, não consomem energia, mas geram arrasto e não têm autoridade de controlo ativo (Hughes & Paik, 2010). Os sistemas ativos geram forças ou binários corretivos em resposta a perturbações medidas. Entre estes, os estabilizadores giroscópicos exploram a conservação do momento angular, uma roda de inércia em rotação resiste a qualquer mudança na orientação do seu eixo de giro, produzindo um binário reativo que se opõe à rotação imposta (Meriam & Kraige, 2012).

Os estabilizadores giroscópicos comerciais modernos, como o Seakeeper, atuam apenas sobre o eixo de rolamento (rotação em torno do eixo do x) (Townsend et al., 2007). A possibilidade de estabilizar simultaneamente os três eixos com uma roda de inércia dedicada a cada um, num protótipo compacto e de relativamente baixo custo, não foi amplamente demonstrada à escala reduzida, e foi precisamente essa questão que motivou o projeto GyroNaut.

Este projeto surgiu da vontade de perceber se é possível construir, com materiais e ferramentas acessíveis, um sistema de estabilização giroscópica de três eixos que funcione numa embarcação real. A tese central que defendemos é:

*Um sistema de estabilização giroscópica de três eixos, produz uma redução quantificável e estatisticamente significativa da inclinação sofrida por efeitos externos (roll, pitch e yaw) numa embarcação de pequeno porte, comparativamente à mesma embarcação sem estabilização ativa.*

Esta tese é testável diretamente, a embarcação com o sistema inativo serve de controlo negativo; a mesma embarcação com o sistema ativo é a condição experimental. A métrica de comparação é a inclinação sofrida pela embarcação registada pelo IMU (*Inertial Measurement Unit*, ou seja, Sensor de Inércia) de bordo sob certas perturbações controladas.

### 3. Material e Métodos

#### 3.1 Visão Geral das Etapas do Projeto

O projeto foi estruturado em onze etapas sequenciais. A tabela seguinte resume cada etapa, o estado atual e a forma como os resultados são ou serão obtidos.

#	Etapa	Estado	Como é/será avaliado
1	Modelação 3D do casco e cúpula (Fusion 360)	Concluído	<i>Revisão do modelo; inspeção visual da geometria</i>
2	Impressão 3D e construção física do casco e cúpula	Concluído	<i>Protótipo físico produzido e verificado</i>
3	Impermeabilização (resina epoxy + silicone)	Concluído	<i>Teste de flutuação 5 minutos sem entrada de água</i>
4	Integração do motor de propulsão e ESC	Concluído	<i>Motor responde corretamente aos comandos do ESC</i>
5	Integração do servo de direção (steering)	Concluído	<i>Motores respondem dinamicamente ao joystick</i>
6	Comunicação sem fios ESP-NOW (dois ESP32)	Concluído	<i>Troca bidirecional de pacotes confirmada</i>
7	Montagem e teste de bancada das <i>roda de inércias</i> (8.000 RPM)	Concluído	<i>Rotação estável confirmada; sem vibração nem aquecimento do motor</i>
8	Integração do IMU e validação de telemetria	Concluído	<i>Leituras do IMU validam contra orientações conhecidas</i>
9	Integração final de todos os subsistemas	Concluído	<i>Todos os subsistemas integrados e funcionais; testes de bancada completos</i>
10	Testes na água: sistema OFF vs ON (controlo negativo)	Concluído	<i>Dados IMU registados; ver Secção 4</i>
11	Análise estatística e conclusões	Concluído	<i>Teste de duas amostras realizado; hipótese confirmada</i>

#### 3.2 Design do Casco – Autodesk Fusion 360

O casco da embarcação foi modelado no Autodesk Fusion 360. As dimensões finais do conjunto completo (casco + cúpula) são 850 × 340 × 300 mm (comprimento × largura × altura). O design foi desenvolvido com o objetivo de equilibrar três requisitos que entram em conflito: eficiência hidrodinâmica, rigidez estrutural para alojar o sistema de estabilização, e geometria compatível com impressão 3D FDM.

As principais decisões de design e a sua justificação física foram:

- Proa e secção de quilha em V: reduz a resistência da onda na linha de água, conferindo alguma estabilidade passiva (Hughes & Paik, 2010).
- Popa reta (transom): simplifica a integração dos motores de propulsão; típico de cascos otimizados para a relação velocidade/estabilidade.

- Perfil longitudinal aerodinâmico: minimiza o arrasto de forma a aumentar a velocidade de operação.
- Cúpula integrada: permite acesso simplificado às rodas de inércia, os ESCs (*Electronic Speed Controller*) e o ESP32 de bordo, mantendo o centro de massa baixo e centrado; ligada ao casco através de um tampo plano de vidro sintético.

### 3.3 Fabricação e Impermeabilização

O casco e a cúpula foram fabricados por impressão 3D FDM em PLA. O pós-processamento envolveu as seguintes etapas:

- Lixagem das superfícies externas na linha de água e abaixo dela, para eliminar as ranhuras das camadas de impressão que aumentariam o arrasto.
- Aplicação de duas demãos de resina epoxy de grau naval em toda a superfície externa para impermeabilização.
- Aplicação de duas demãos de resina epoxy sobre várias camadas de rede de fibra de vidro para reforço estrutural.
- Aplicação de silicone na junta casco-tampo
- A impermeabilização é validada por um teste de flutuação de 5 minutos sem entrada de água detectada.

### 3.4 Propulsão e Direção

A propulsão é assegurada por 4 motores conectados a 2 hélices submersas e 2 semi-submerso montadas na popa. É controlado através de um controlador ESC que varia a velocidade dos motores em função da posição do *Joystick*. A embarcação é direcionada na medida em que os motores de cada lado aumentam e diminuem as suas rotações. O *Joystick* realiza a comunicação com o circuito através do protocolo ESP-NOW, garantindo precisão e velocidade.

### 3.5 Sistema de Estabilização Giroscópica

Três motores brushless, cada um associado a uma *roda de inércia*, estão montados dentro do casco com os eixos de giro alinhados com os três eixos rotacionais (x, y e z) da embarcação. O momento angular gerado por cada *roda de inércia* é dado por  $\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega}$  (Meriam & Kraige, 2012), onde  $I$  é o momento de inércia e  $\boldsymbol{\omega}$  é a velocidade angular. Para um disco sólido de raio  $r$  e massa  $m$ ,  $I = \frac{1}{2}mr^2$ . O binário giroscópico reativo disponível para resistir a uma perturbação é  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{L} \times \boldsymbol{\Omega}$  (Baruh, 1999), portanto, quanto mais rápida e pesada for a roda de inércia, maior o binário corretivo.

As três rodas de inércia são acionadas por ESCs independentes e operadas a 8.000 RPM ( $\boldsymbol{\omega} \approx 837,76$  rad/s). Os testes de bancada dos motores e rodas de inércia integradas confirmaram a operação estável a 8.000 RPM com momento angular suficiente para produzir binário corretivo mensurável.

### 3.6 Sistema de Controle e Comunicação

A arquitetura de controle usa dois ESP32 a comunicar via ESP-NOW, um protocolo peer-to-peer da Espressif que opera na banda dos 2,4 GHz com latências inferiores a 1 ms, adequado para controle em tempo real (*Espressif Systems, 2021*):

- Unidade de comando (fora da embarcação): lê as entradas do joystick (acelerómetro, giroscópio, estado das *rodas de inércia*). Transmite pacotes de comando para a embarcação (direção e ativação das *rodas de inércia*). Recebe e apresenta a telemetria do IMU.
- Unidade de bordo (dentro da cúpula): recebe os pacotes de comando; controla o ESC de propulsão, o servo e os ESCs das *roda de inércias*. Lê o IMU (acelerómetro + giroscópio) e transmite os dados de atitude para a unidade de controle.

O link ESP-NOW foi validado em bancada: comunicação bidirecional confirmada, rápida e efetiva, sem perda considerável de pacotes.

### 3.7 Protocolo Experimental – Testes na Água

Os testes na água decorreram da seguinte forma:

1. A embarcação é colocada num corpo de água controlado (sem vento, água calma).
2. É aplicada uma perturbação padronizada – um impacto lateral único no casco, paralelo ao eixo *y* (colinear com vetor *pitch*), com força e duração consistentes.
3. O IMU regista a aceleração e a orientação nos três eixos a partir do momento da perturbação.
4. São testadas duas condições: (A) sistema **desligado** – rodas de inércia paradas (controle negativo); (B) sistema **ligado** – as três *rodas de inércia* a 8.000 RPM.
5. Métricas extraídas: deflexão angular máxima (graus), aceleração, inclinação em relação aos eixos.

A hipótese foi confirmada: a condição B produziu deflexão máxima e inclinação em relação ao eixo significativamente menor do que a condição A, nos eixos de *pitch* e *yaw*.

## 4. Resultados

### 4.1 Etapas Concluídas

Os seguintes resultados foram obtidos nas etapas 1 a 9:

- Modelo 3D (Etapa 1): O casco e a cúpula foram modelados no Fusion 360. A geometria foi revista para equilíbrio de massa e volume interno para a eletrónica. Nenhum problema estrutural foi identificado.
- Construção física (Etapa 2): O casco e a cúpula foram impressos e montados com sucesso. O protótipo físico corresponde à geometria modelada.
- Impermeabilização (Etapa 3): Após aplicação de epoxy e silicone, o casco foi colocado na água durante 5 minutos. Não foi detetada entrada de água. Impermeabilização confirmada.
- Propulsão e ESC (Etapa 4): O motor e o ESC foram calibrados e testados. O motor responde corretamente.
- Direção (Etapa 5): Motores respondem corretamente com o *input* do *joystick*, alterando a sua velocidade de rotação de acordo com a intensidade e direção do *input*.
- Link ESP-NOW (Etapa 6): Comunicação bidirecional entre os dois ESP32 funcional. Pacotes de comando e telemetria transmitidos e recebidos com sucesso.
- Teste de bancada das *rodas de inércia* (Etapa 7): Os três motores das *rodas de inércia* atingiram e mantiveram 8.000 RPM em testes de bancada sem vibração detetável nem anomalia térmica. Calibração dos ESCs confirmada.
- IMU e telemetria (Etapa 8): O sensor IMU foi integrado na unidade de bordo. Leituras de aceleração e inclinação em relação aos eixos validados contra orientações de referência conhecidas. Telemetria transmitida em tempo real para a unidade de controlo via ESP-NOW sem perda de pacotes relevante.
- Integração final (Etapa 9): Todos os subsistemas (propulsão, direção, *rodas de inércia*, IMU, comunicação ESP-NOW) foram montados e testados em conjunto dentro do casco. O sistema completo opera como esperado sem conflitos de *hardware* ou *software*.

### 4.2 Resultados dos Testes na Água

Os testes na água foram realizados segundo o protocolo descrito na Secção 3.7. Os resultados quantitativos das duas condições experimentais, sistema desligado (controlo negativo, condição A) e sistema ligado (condição B), são apresentados abaixo.

#### 4.2.1 Comparação da Variação de Inclinação por Segundo

Variação da velocidade angular registada pelo IMU nos 3 eixos após perturbação padronizada, condição A (sistema *OFF*) vs. condição B (sistema *ON*). Sendo a rotação em torno do eixo x - Roll, eixo y - Pitch e eixo z - Yaw.

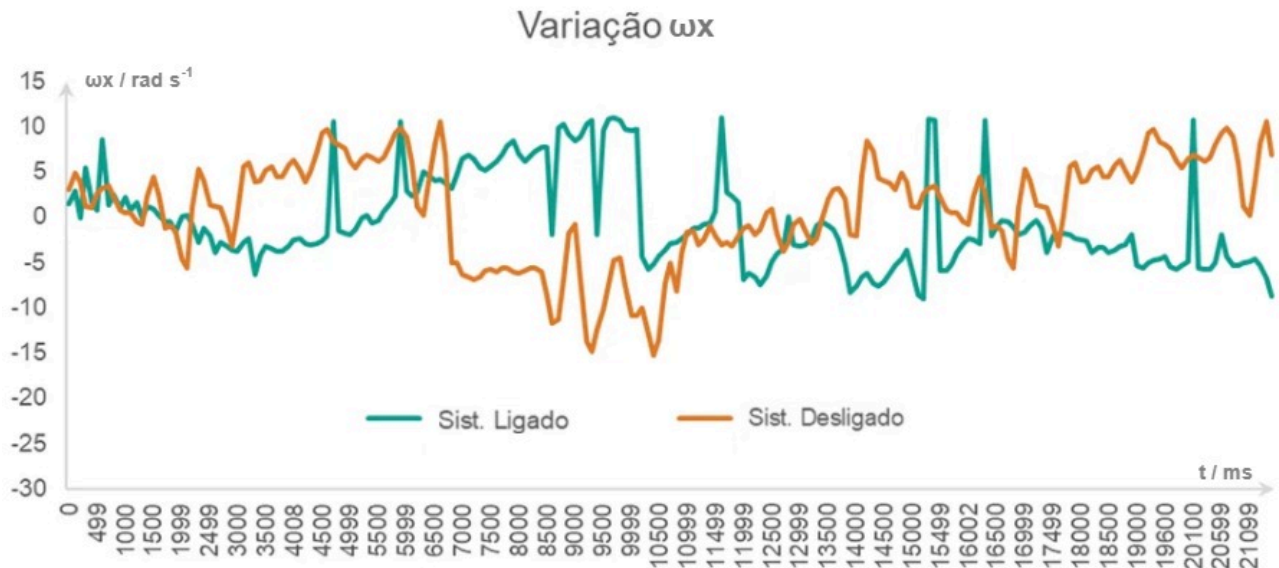


Figura 1 –Variação da velocidade angular no eixo x - Roll

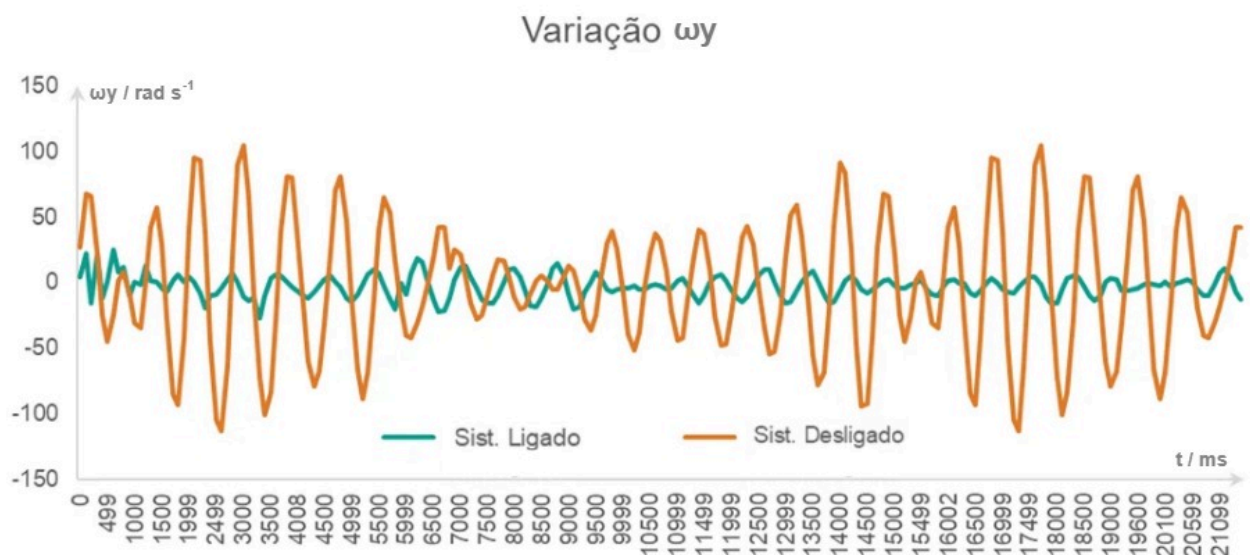


Figura 2 –Variação da velocidade angular no eixo y - Pitch

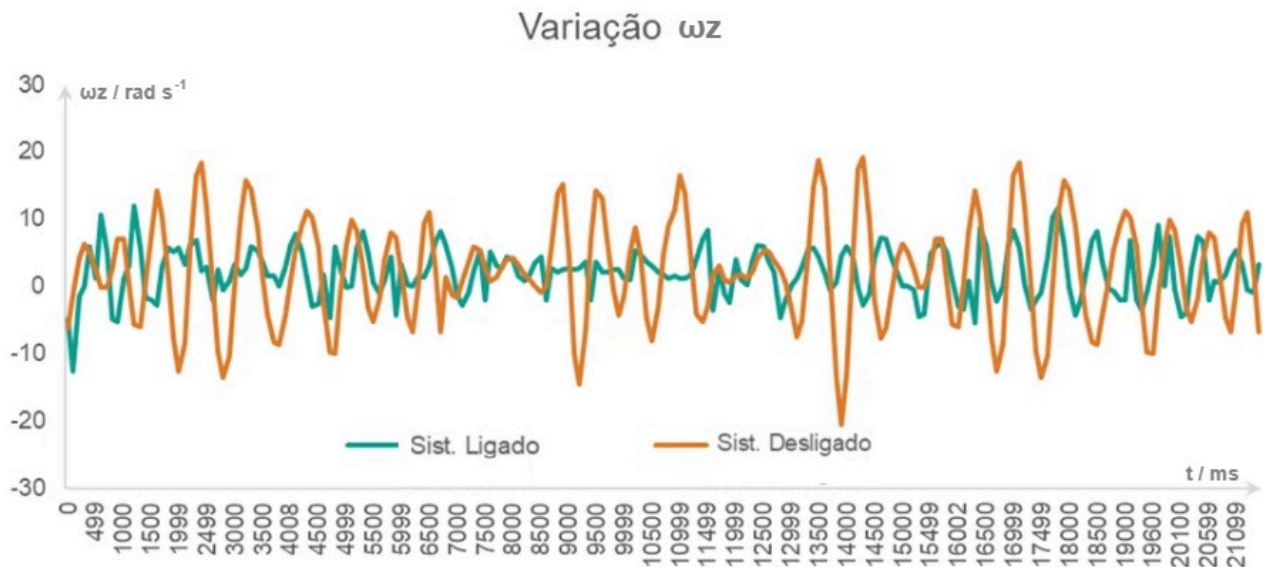


Figura 3 –Variação da velocidade angular no eixo z - Yaw

#### 4.2.4 Análise de dados

Como é possível observar na figura 2 e 3, o GyroNaut apresenta uma significativa redução na instabilidade sentida na embarcação. A velocidade angular tem uma menor amplitude com o sistema giroscópico ligado em *Pitch* e *Yaw*, no entanto, parece não surtir nenhum efeito sobre o eixo *Roll*. Isto deve-se ao facto de a direção da perturbação (a onda) ser colinear com o vetor do eixo *y* (*Pitch*), e a existência de uma constante perturbação paralelo ao eixo *z* devido a interferências do meio. Já, ao analisarmos o eixo *x*, notamos que o vetor da onda causada é perpendicular ao mesmo, não produzindo diferença significativa nos gráficos.

Os resultados dos testes são possíveis observar de modo prático no vídeo curto que se segue: [https://drive.google.com/file/d/1mvVEy9HONjf9PVxFwnJX-om3csTTswp0/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1mvVEy9HONjf9PVxFwnJX-om3csTTswp0/view?usp=drive_link)



Figura 4 –QR Code para o vídeo do funcionamento da embarcação em água.

## 5. Divulgação Junto da Comunidade Local

Após o término da fase experimental a equipa apresentou o projeto à comunidade escolar, em pequenas apresentações de modo a dar a conhecer a utilidade de conceitos físicos quando os aplicamos em problemas reais.

Para além disso, o projeto GyroNaut concorreu na 34ª edição do CNJCI tendo sido distinguido com o Prémio Especial CEiiA por se encontrar entre os mais inovadores e bem-executados projetos de engenharia e tecnologias da competição.

Por fim, foi criado um Instagram para a divulgação nas redes sociais (@gyro.naut).



Figura 5 – Fotografia da equipa do projeto após vencer o prémio CEiiA na 34ª edição da CNJCI

## 6. Discussão e Conclusão

O projeto GyroNaut concluiu com sucesso todas as fases: design, fabricação, validação dos subsistemas e testes experimentais na água. O casco é estanque, a propulsão e a direção são funcionais, o link de controlo sem fios é fiável, as rodas de inércia operam à velocidade alvo, e os dados IMU foram recolhidos e analisados. Os resultados confirmam que o design de engenharia é sólido e que o sistema de estabilização produz o efeito esperado.

A hipótese central, de que a estabilização giroscópica de três eixos produz uma redução mensurável no deslocamento angular face à embarcação sem assistência, foi confirmada pelos testes na água (ver Secção 4). A base teórica (conservação do momento angular, precessão giroscópica) suporta e explica os resultados obtidos, tal como estimado no Apêndice A.

Uma escolha deliberada foi feita na formulação da tese. Em vez de afirmar que o sistema GyroNaut é superior aos sistemas comerciais existentes, uma comparação que exigiria testes contra todos esses sistemas, a hipótese é formulada como uma comparação antes-depois dentro da mesma embarcação. Esta é a abordagem cientificamente rigorosa dado os recursos experimentais disponíveis, e é a comparação que o protocolo experimental realizou.

Os resultados demonstram que a estabilização giroscópica simultânea de três eixos é alcançável num protótipo compacto e de baixo custo, com implicações para veículos de superfície autónomos usados

em monitorização ambiental, levantamento hidrográfico, operações de busca e salvamento, ou apenas embarcações de projeto de alta exatidão e precisão.

Limitações e trabalho futuro: (1) A perturbação padronizada (impacto manual) introduz variabilidade, um dispositivo de impulso mecânico melhoraria a reprodutibilidade, futuramente tencionamos utilizar uma piscina de ondas para testar a embarcação de forma mais controlada. (2) É impossível fazer curvas com o atual sistema de estabilização ligado, uma vez que o mesmo sistema que estabiliza, impede a rotação utilizada para virar segundo a rotação em *yaw*, no futuro é necessário alterar a rotação do eixo *z*. (3) Futuramente é necessário programar um sistema reativo que controla a velocidade de rotação de cada um dos eixos consoante as perturbações externas que estes sofram.

## 7. Agradecimentos e Contribuições

Os autores agradecem ao Prof. Pedro Jorge (Colégio Valsassina) pela orientação teórica em dinâmica de corpos rígidos, sistemas embebidos e metodologia experimental, e pelo acesso às instalações de fabricação e eletrónica ao longo do projeto.

Agradecemos também à Professora Doutora Elsa Henriques (IST), pela reunião de esclarecimento de dúvidas e orientação relativamente aos objetivos e métodos deste projeto.

Todo o trabalho de modelação 3D, fabricação, programação, montagem e experimentação foi realizado pelos três autores. Supervisão tal como descrita acima, da parte do Colégio Valsassina e do IST.

## 8. Referências Bibliográficas

1. Baruh, H. (1999). *Analytical Dynamics*. McGraw-Hill.
2. Espressif Systems. (2021). ESP-NOW API Reference. Disponível em: [https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp\\_now.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html)
3. Hughes, O.F. & Paik, J.K. (2010). *Ship Structural Analysis and Design*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
4. Meriam, J.L. & Kraige, L.G. (2012). *Engineering Mechanics: Dynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons.
5. Townsend, N.C., Murphy, A.J. & Sheno, R.A. (2007). A new active gyrostabiliser system for ride control of marine vessels. *Ocean Engineering*, 34(11-12), 1607-1617.

---

### APÊNDICE A – Cálculo do Momento Angular

Para uma roda de inércia modelada como um disco sólido de raio  $r$  e massa  $m$ , o momento de inércia é  $I = \frac{1}{2}mr^2$  (Meriam & Kraige, 2012).

A 8.000 RPM ( $\omega = 1.047$  rad/s), o momento angular por roda de inércia é:

$$L = I\omega = \frac{1}{2}mr^2 \times 1.047 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2/\text{s]}$$

O binário giroscópico que resiste a uma perturbação aplicada à taxa angular  $\Omega$  é  $\tau = L\Omega$  (Baruh, 1999). Este binário deve ser superior ao binário de perturbação para que a estabilização seja eficaz.

### APÊNDICE B – Fotografias do Trabalho

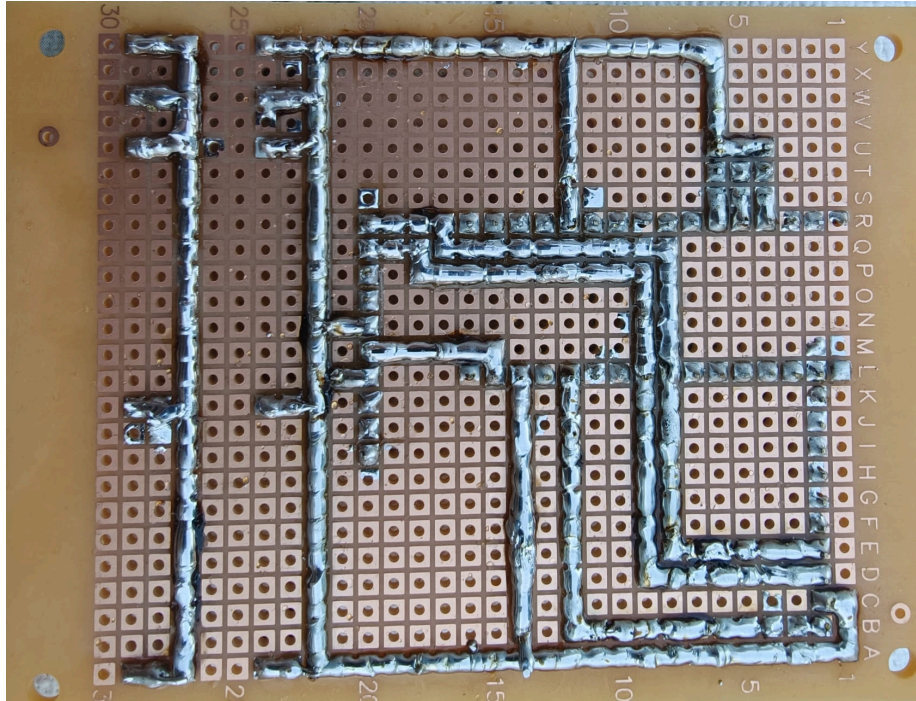


Figura 6 – Placa de circuitos soldada do sistema interno da embarcação

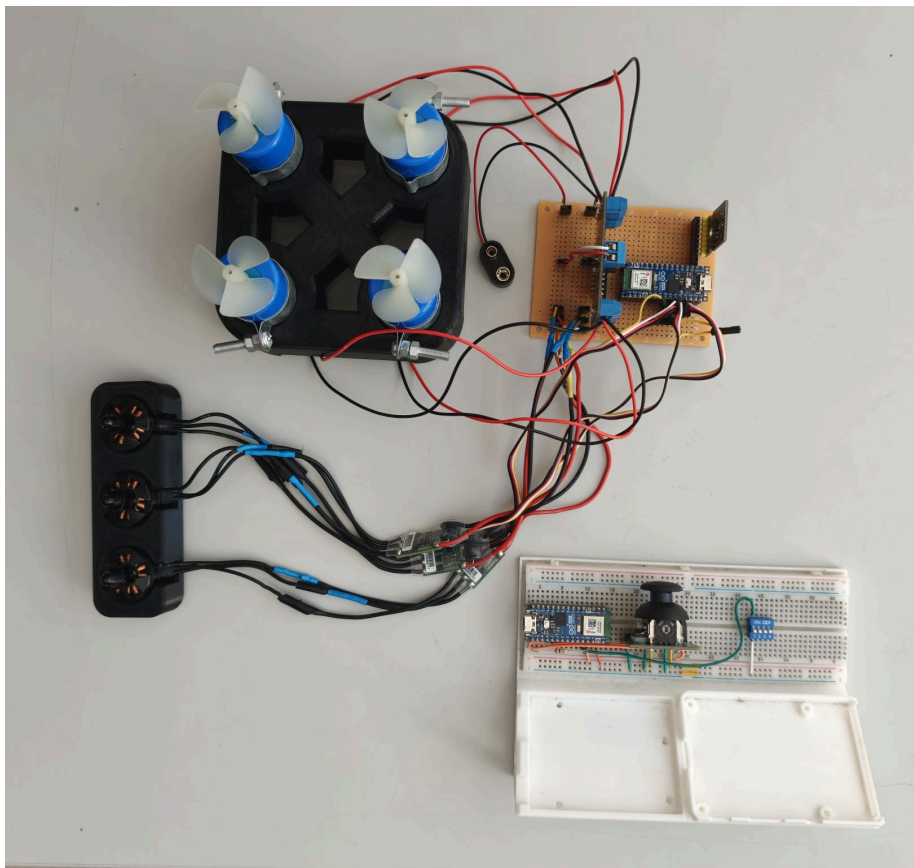


Figura 7 – Conjunto das rodas de inércias com motores e setup de bancada: ESP32, ESCs e motores para teste a 8.000 RPM. (cima) + Unidade de controlo: joystick analógico, módulo u-blox e Arduino Nano em breadboard. (Baixo)

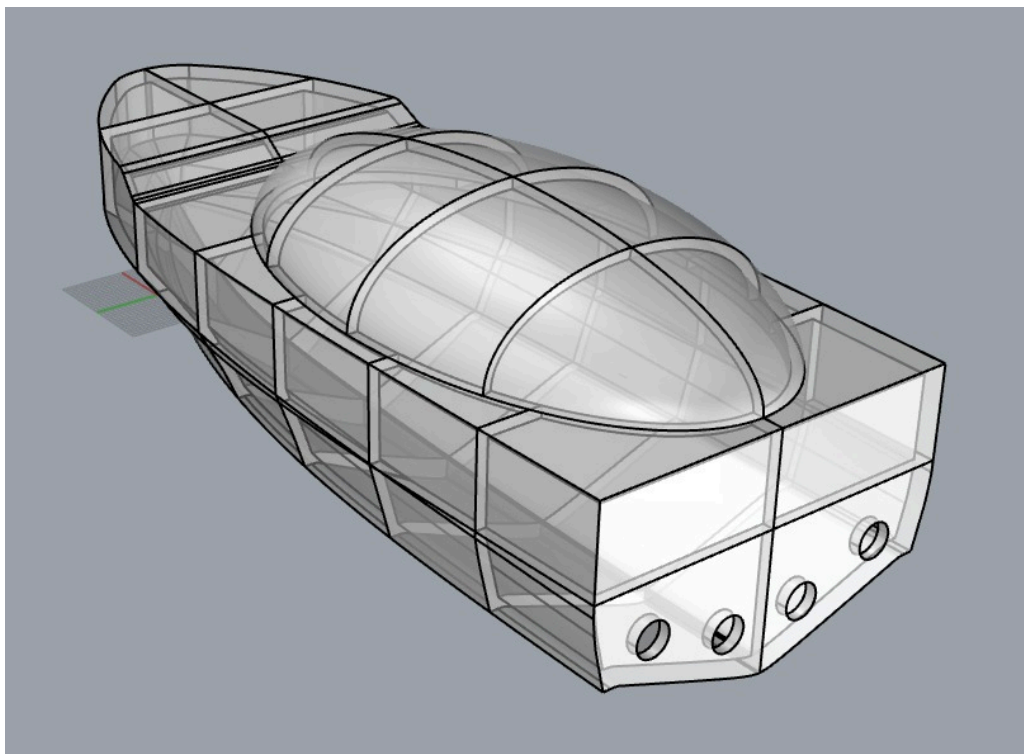


Figura 8 – Modelo 3D do GyroNaut no Autodesk Fusion 360: cúpula integrada e popa reta.

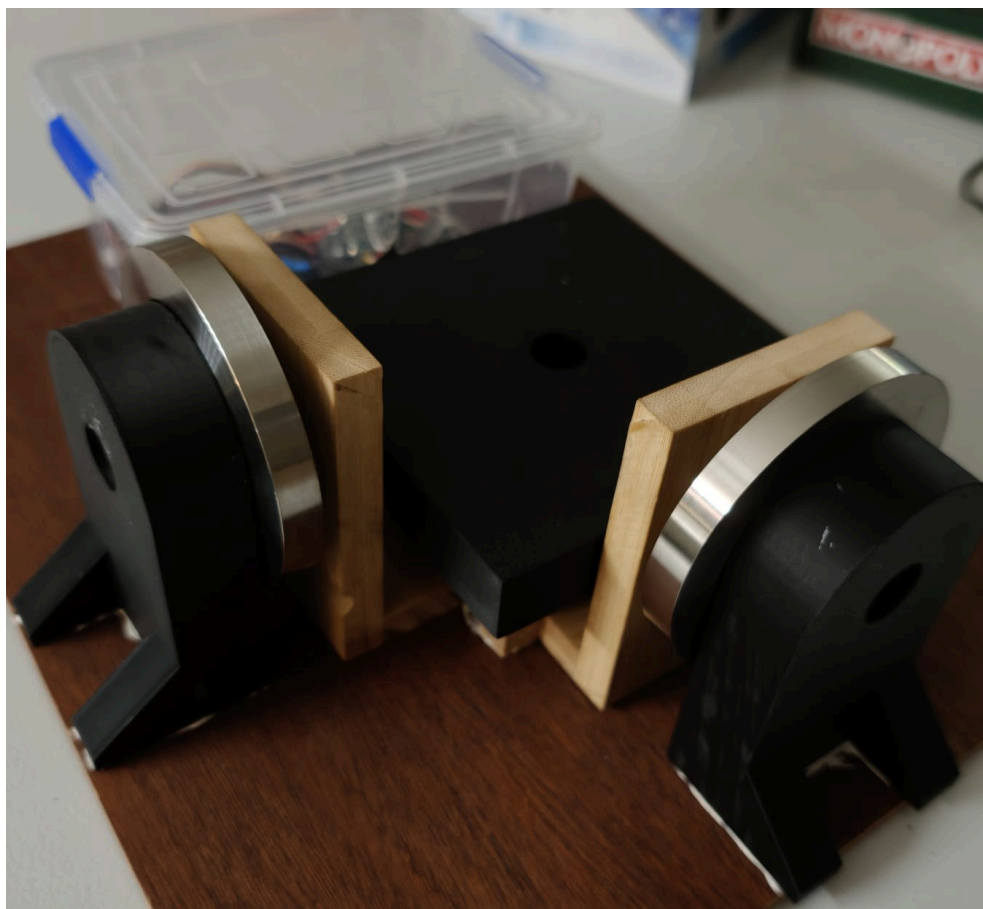


Figura 9 – Sistema de suporte de motores e rodas de inércia.