



**HENRIQUE DE MELO CORREIA BORGES COTA**  
Licenciatura em Ciências de Engenharia Física

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA  
STEWART COMO SUPORTE INERCIAL  
APLICADO A UMA EMBARCAÇÃO**

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA FÍSICA

MESTRADO EM ENGENHARIA FÍSICA

Universidade NOVA de Lisboa  
Novembro, 2024



# DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA STEWART COMO SUPORTE INERCIAL APLICADO A UMA EMBARCAÇÃO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA FÍSICA

**HENRIQUE DE MELO CORREIA BORGES COTA**

Licenciatura em Ciências de Engenharia Física

**Orientador:** Pedro Teodoro

*Professor Adjunto, Escola Superior Náutica Infante D. Henrique*

**Coorientador:** André Wemans

*Professor Associado, NOVA University Lisbon*

## Júri

**Presidente:** Pedro Manuel Cardoso Vieira

*Professor Associado, FCT-NOVA*

**Arguente:** José Luís Constantino Ferreira

*Professor Auxiliar, FCT-NOVA*

**Vogal:** Pedro Daniel Dinis Teodoro

*Professor Adjunto, ENIDH*

## **Desenvolvimento de uma Plataforma Stewart como Suporte Inercial Aplicado a uma Embarcação**

**Dissertação Para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Física**

Copyright © Henrique de Melo Correia Borges Cota, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado aos meus pais, Isabel Correia e Rui Cota.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão ao meu orientador, Pedro Teodoro, da Escola Náutica Infante D. Henrique, pelo seu apoio e orientação valiosa mas principalmente pela confiança que depositou em mim e pela liberdade que me proporcionou, sendo estas fundamentais para o meu crescimento pessoal e académico.

Ao meu co-orientador, André Wemans, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, agradeço pela ponte estabelecida entre as instituições e pela sua ajuda na revisão do documento final. O seu apoio foi essencial para garantir a qualidade deste trabalho.

Gostaria também de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e à Escola Náutica Infante D. Henrique, que proporcionaram o ambiente académico e os recursos necessários para a concretização deste projeto.

À minha família, tenho de agradecer pelo amor incondicional e pelo suporte em todas as fases deste percurso. Foram um pilar de força e motivação nos momentos mais difíceis. Um agradecimento especial aos meus pais que estiveram sempre lá quando precisei e por se assegurarem que não me faltava nada para completar este objetivo.

Aos meus amigos, Afonso Teodoro, Eduardo Ferreira e Pedro Guerra, obrigado por tudo, pelas gargalhadas, pelas noitadas, pelas histórias e por todos os momentos que passámos. Vocês foram dos principais responsáveis por terem tornado esta caminhada mais leve.

Por fim, mas com igual importância, à minha namorada, Catarina Oliveira, deixo o meu agradecimento mais profundo pelo carinho, paciência e compreensão. O teu apoio foi uma fonte constante de força e motivação para alcançar este objetivo, e sou extremamente grato por teres partilhado esta jornada comigo.

A todos, o meu sincero obrigado.

”

*«The best advice I've ever received is, 'No one else knows what they're doing either'.»*

— **Ricky Gervais**

Todos os anos, graças às condições adversas do oceano, são causadas perdas monetárias significantes devido ao adiamento de operações marítimas. Para além disto, por causa de condições de segurança precárias ocorrem acidentes que poderiam ser evitados através de uma estabilização mais correta de estruturas em ambientes *offshore*.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma Stewart de 3 elos, projetada para integração em embarcações, com o objetivo de estabilizar sistemas, mantendo o plano superior nivelado, ao compensar movimentos causados por ondas marítimas. Foi estudada a cinemática inversa destes equipamentos para determinar os comprimentos necessários dos atuadores para alcançar as orientações desejadas. Foi também desenvolvido um ambiente de simulação para estudar as implicações de um *design* de 3 elos em vez de 6. Foram construídos 3 protótipos ao longo desta tese, com cada iteração corrigindo problemas como o sobreaquecimento dos primeiros atuadores e falhas de estabilização, sobretudo através da projeção de componentes impressos em 3D. Os sensores MPU9250 e HR-S04 foram integrados no sistema, após a sua devida calibração e processamento de sinal, incluindo um filtro complementar e filtro de média móvel. O algoritmo de controlo foi implementado num Arduino UNO, que ao utilizar as leituras dos sensores, determina os *outputs* de controlo para o movimento correto dos atuadores lineares.

Os resultados obtidos em testes de resposta a perturbações apresentam erros *steady-state* de  $2,63^\circ$  e  $3,64^\circ$  para os valores de *roll* e *pitch* respetivamente, sendo este erro representativo da diferença entre os ângulos de estabilização da plataforma antes e depois de uma perturbação.

Trabalho futuro deverá incluir a integração de motores mais rápidos, e deverão ser exploradas as integrações de estratégias de controlo mais sofisticadas.

**Palavras-chave:** plataforma Stewart, compensação de ondas, cinemática inversa, controlo, atuadores

Every year, significant financial losses occur due to the postponement of maritime operations caused by the adverse conditions of the ocean. Additionally, accidents resulting from unsafe conditions, which could be prevented through better stabilization of structures in offshore environments, are a frequent occurrence.

This work presents the development of a three-legged Stewart platform designed for integration into vessels, with the goal of stabilizing systems by keeping the top plane level, compensating for movements caused by ocean waves. The inverse kinematics of these systems were studied to determine the necessary actuator lengths to achieve the desired orientations. A simulation environment was also developed to study the implications of a three-legged design versus a six-legged one. Three prototypes were built throughout this thesis, with each iteration addressing issues such as overheating of the initial actuators and stabilization failures, particularly through the design of 3D-printed components. The MPU9250 and HR-S04 sensors were integrated into the system, following proper calibration and signal processing, including a complementary filter and moving average filter. The control algorithm was implemented on an Arduino UNO, which, using the sensor readings, determines the control outputs for the correct movement of the linear actuators.

The results obtained from disturbance response tests show steady-state errors of  $2.63^\circ$  and  $3.64^\circ$  for roll and pitch, respectively. This error represents the difference between the platform's stabilization angles before and after a disturbance.

Future work should include integrating faster motors and exploring more sophisticated control strategies.

**Keywords:** Stewart platform, wave compensation, inverse kinematics, control, actuators

<b>Índice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Siglas</b>	<b>xii</b>
<b>Símbolos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Estado da Arte . . . . .	2
1.2.1 Métodos de Estabilização em Embarcações . . . . .	2
1.2.2 Plataformas Stewart . . . . .	3
1.3 Conceitos Teóricos . . . . .	4
1.3.1 Descrição da plataforma . . . . .	5
1.3.2 Controlo PID . . . . .	7
1.3.3 Fusão de Sensores . . . . .	7
1.4 Considerações sobre o <i>Design</i> . . . . .	10
<b>2 Componentes e Desenvolvimento</b>	<b>12</b>
2.1 Sensores . . . . .	12
2.1.1 <i>Inertial Measurement Unit</i> MPU9250 . . . . .	12
2.1.2 Sensor de Distância HC-SR04 . . . . .	15
2.2 Componentes Elétricos . . . . .	16
2.3 Protótipos . . . . .	18
2.3.1 Primeiro Protótipo . . . . .	18
2.3.2 Segundo Protótipo . . . . .	19
2.3.3 Terceiro Protótipo . . . . .	22
<b>3 Processamento de dados</b>	<b>24</b>
3.1 Calibração do MPU-9250 . . . . .	24
3.2 Aplicação de Filtro de Média Móvel . . . . .	26
3.2.1 Implementação do Filtro . . . . .	27
3.2.2 Resultados da Filtragem . . . . .	28

3.2.3	Análise Temporal . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Operação e Controlo da Plataforma</b>	<b>33</b>
4.1	Operação da Plataforma . . . . .	33
4.2	Implementação do Algoritmo de Controlo . . . . .	33
4.2.1	Teste de resposta a Perturbações . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Conclusão e Perspetivas Futuras</b>	<b>39</b>
5.1	Conclusão . . . . .	39
5.2	Perspetivas futuras . . . . .	40
	<b>Bibliografia</b>	<b>41</b>

1.1	Esquemático das diferentes direções de movimento da embarcação . . . . .	2
1.2	Compensador de <i>heave</i> passivo . . . . .	3
1.3	Esquemático das plataformas Stewart . . . . .	5
1.4	Diagrama de vetores da plataforma . . . . .	6
1.5	Diagrama de blocos da técnica PID . . . . .	7
1.6	Referencial inercial e referencial do corpo . . . . .	8
1.7	Espaço de trabalho de uma plataforma Stewart de 6 elos . . . . .	11
1.8	Espaço de trabalho de uma plataforma Stewart de 3 elos . . . . .	11
2.1	IMU MPU9250 . . . . .	13
2.2	Acelerómetro antes de sofrer aceleração . . . . .	14
2.3	Acelerómetro durante aceleração . . . . .	14
2.4	Diagrama de vetores do giroscópio . . . . .	15
2.5	Substrato giroscópio . . . . .	15
2.6	Sensor de distância HC-SR04. . . . .	16
2.7	Colocação do sensor HC-SR04 . . . . .	16
2.8	Princípio de funcionamento HC-SR04. . . . .	16
2.9	Esquemático de uma ponte-H . . . . .	17
2.10	Módulo L298N . . . . .	17
2.11	Atuador linear IP60-WR . . . . .	17
2.12	Interruptor fim-de-curso . . . . .	18
2.13	Esquemático do circuito final . . . . .	18
2.14	Desenhos do primeiro protótipo . . . . .	19
2.15	Componente para a união das junções universais com os atuadores . . . . .	19
2.16	Primeiro Protótipo . . . . .	19
2.17	Motor JGB37-3530 . . . . .	20
2.18	Conexão motor-parafuso . . . . .	20
2.19	Flange motor-atuador . . . . .	21
2.20	Desenhos e integração das peças para os interruptores fim-de-curso . . . . .	21
2.21	Suporte para os atuadores lineares . . . . .	21
2.22	Base do 2º protótipo . . . . .	21
2.23	2º protótipo . . . . .	22
2.24	Novo suporte para os motores . . . . .	22

2.25	3ª base	23
2.26	3º protótipo	23
3.1	Gráfico dos dados do sensor de distância	25
3.2	Gráficos dos valores de giroscópio antes da calibração nos 3 eixos	25
3.3	Gráficos dos valores de giroscópio depois da calibração nos 3 eixos	26
3.4	Gráficos dos valores de acelerómetro nos 3 eixos	26
3.5	Gráfico da FFT do giroscópio nos 3 eixos	27
3.6	Gráfico do giroscópio filtrado nos 3 eixos com uma janela de 10 amostras	28
3.7	Gráfico do giroscópio nos 3 eixos com uma janela de 20 amostras	29
3.8	Gráfico do giroscópio nos 3 eixos com uma janela de 30 amostras	29
3.9	Gráfico de medidas do filtro complementar sem a aplicação do filtro de média móvel no giroscópio	30
3.10	Gráfico de medidas do filtro complementar com a aplicação do filtro de média móvel no giroscópio	30
3.11	Gráfico do desempenho temporal do filtro para o movimento de <i>roll</i>	31
3.12	Gráfico do desempenho temporal do filtro para o movimento de <i>pitch</i>	31
4.1	Fluxograma da plataforma Stewart	34
4.2	<i>Setup</i> para a realização do teste de resposta	35
4.3	Gráficos de <i>roll</i> e <i>pitch</i> para um controlador $K_p = 30$	36
4.4	Gráficos de <i>roll</i> e <i>pitch</i> para um controlador $K_p = 30, K_i = 0,03$	37
4.5	Gráficos de <i>roll</i> e <i>pitch</i> para um controlador $K_p = 30, K_i = 0,3$	37

4.1 Resultados dos ensaios de *roll* e *pitch* . . . . . 38

**EST** Erro *Steady-State* (pp. 7, 36, 38)

**IMU** *Inertial Measurement Unit* (pp. 8, 12)

**PID** *Proportional-Integral-Derivative* (pp. 7, 33, 35, 38)

**PWM** *Pulse Width Modulation* (pp. 18, 33, 34)

$A$	área das faces das pontas e dos elétrodos (p. 13)
$\vec{a}_B$	vetor das acelerações no referencial do corpo (p. 8)
$\alpha$	constante de filtro complementar (p. 10)
$\vec{b}_i$	vetor com origem no centro da base até junção da base (p. 6)
$\beta$	medição arbitrária (p. 10)
$\beta_a$	mediação acelerómetro (p. 10)
$\beta_t$	medição arbitrária atual (p. 10)
$\beta_{t-1}$	medição arbitrária anterior (p. 10)
$C$	capacitância (p. 13)
$d$	distância entre ponta de deteção e elétrodo (p. 13)
$e(t)$	erro PID (p. 7)
$\epsilon$	permissividade do metal (p. 13)
$\vec{F}_c$	força de Coriolis (p. 14)
$g$	aceleração gravítica (p. 8)
$\vec{g}_I$	vetor de aceleração gravítica no referencial inercial (p. 8)
$\vec{h}$	vetor com origem no centro da base até ao centro do plano superior (p. 6)
$K_d$	ganho diferencial (p. 7)
$K_i$	ganho integral (p. 7)
$K_p$	ganho proporcional (p. 7)
$\vec{l}_i$	vetor de uma das pernas (p. 6)
$m$	massa de prova (p. 14)

$N$	número de pontos da janela (p. 28)
$n_e$	número total de elétrodos (p. 13)
$\vec{\omega}$	velocidade angular (p. 14)
$\omega_g$	medição giroscópio (p. 10)
$\theta$	ângulo de <i>pitch</i> (p. 5)
$R$	matriz de rotação (p. 6)
$\phi$	ângulo de <i>roll</i> (p. 5)
$\vec{t}_i$	vetor com origem no centro do plano superior até junção do plano superior (p. 6)
$u(t)$	sinal de controlo PID (p. 7)
$\vec{v}$	velocidade no eixo de acionamento (p. 14)
$v_a$	velocidade de extensão ou retração do atuador (p. 35)
$v_{max}$	velocidade máxima de extensão ou retração do atuador (p. 35)
$x[n]$	sinal discreto (p. 28)
$y[n]$	<i>output</i> do filtro de média móvel (p. 28)
$\psi$	ângulo de <i>yaw</i> (p. 5)

## 1.1 Motivação

Ultimamente tem havido um aumento no desenvolvimento da indústria *offshore*, seja de plataformas petrolíferas, turbinas eólicas, gruas etc. Para a construção e avanço das aplicações anteriores é necessário o transporte de carga entre navios ou entre um navio e uma estrutura sólida. No entanto, estas operações são extremamente dependentes das condições marítimas e, caso estas não sejam apropriadas para tais deslocações, podem ter de ser atrasadas resultando em perda económica [2]. Foi demonstrado que, para ondas com altura de 1 m a 1.5 m, as operações feitas por grua devem ser abortadas devido à pendulação perigosa da carga a ser movida. Para além disto, atualmente, a maior parte das operações realizadas por grua é executada apenas por operadores de grua experientes, sendo estes quem decide se estas movimentações deverão, ou não, ser efetuadas com base nas condições marítimas [3].

Em situações de turbulência causada pelo mar, um navio experiencia 6 tipos de movimento forçado, tendo estes as seguintes designações:

- *Roll*: rotação à volta do eixo longitudinal;
- *Pitch*: rotação à volta do seu eixo lateral;
- *Yaw*: rotação à volta do eixo vertical;
- *Surge*: movimento linear ao longo do eixo longitudinal;
- *Sway*: movimento linear ao longo do eixo lateral;
- *Heave* movimento linear ao longo do eixo vertical;

Para clarificação, estes movimentos estão representados na figura 1.1.

Já que as plataformas Stewart podem possuir os mesmos 6 graus de liberdade de movimento, é então proposto, em conjunto com a Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, o desenvolvimento e instalação deste sistema no interior de uma embarcação com o objetivo de estabilizar pequenos sistemas (sensores, câmaras, etc.) face às oscilações do navio provocadas por ondas. A ideia principal é, controlar o movimento da plataforma para que este seja exatamente oposto ao do navio, eg. se o navio tem um movimento de *heave* de 1 m a plataforma terá um movimento de -1 m na mesma direção.

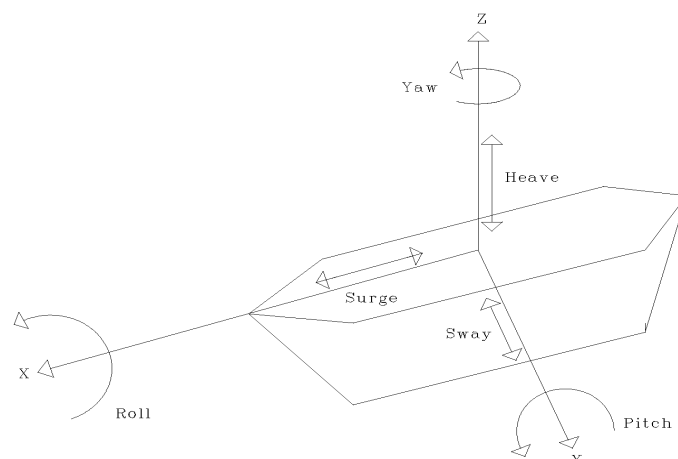


Figura 1.1: Esquemático das diferentes direções de movimento da embarcação

## 1.2 Estado da Arte

### 1.2.1 Métodos de Estabilização em Embarcações

Estes métodos podem ser decompostos em duas categorias[4]:

- Sistemas de compensação de ondas passivos,
- Sistemas de compensação de ondas ativos,

Dos 6 graus de liberdade anteriormente mencionados, o movimento de *heave* é o que mais impacta o comportamento da carga [4] sendo assim, a maior parte dos sistemas de estabilização são somente à base de compensação de movimentos verticais, e podem dividir-se em duas categorias, cujo funcionamento será brevemente abordado nas próximas secções: compensação de *heave* passiva e compensação de *heave* ativa. Existem outros sistemas de compensação mas normalmente são utilizados para reduzir o movimento do navio em si e por essa razão, não irão ser discutidos. Adicionalmente, a principal aplicação mencionada na literatura disponível é o uso destes equipamentos em guias em operações *offshore*, pelo que a mesma aplicação será analisada com maior foco.

Previamente ao desenvolvimento detalhado sobre os próximos sistemas, cumpre desde já, salientar, alguns aspetos que poderão ser resolvidos mediante a utilização destas plataformas. Primeiramente, como já foi referido, os equipamentos em questão, descritos nas próximas secções, só fazem a compensação de movimentos verticais e uma vez que há mais 5 graus de liberdade nos quais o navio se poderá movimentar, subsiste, uma margem de melhoramento significativa que poderá ser alcançada pela utilização da plataforma Stewart. No entanto, é necessário notar que, como a plataforma será incluída no interior do navio e tem dimensões reduzidas em relação às alternativas mencionadas (o que também pode ser considerado uma vantagem), a sua amplitude de movimento será limitada, logo não conseguirá compensar movimentos de ondas com amplitudes tão significativas como as outras soluções, pois estas não estão tão limitadas pelas suas próprias dimensões.

### 1.2.1.1 Compensação de *Heave* passiva

Estes sistemas são considerados passivos pois não requerem energia exterior para funcionar e são, no fundo, isoladores de vibrações em que, a sua versão mais simples pode ser representada como um sistema mola-amortecedor em paralelo, situados na linha da grua de modo a reduzir as oscilações verticais. Em geral apresentam uma solução simples, com requisitos de *hardware* bastante alcançáveis, para segurar cargas com massa de grandes dimensões, porém, apresentam dificuldades em situações em que é necessário um controlo mais preciso dos movimentos da carga a ser transportada[5].

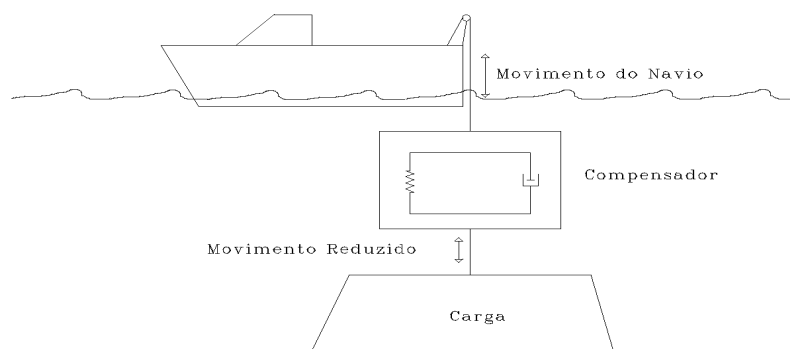


Figura 1.2: Compensador de *heave* passivo

### 1.2.1.2 Compensação de *Heave* ativa

Neste caso o movimento do navio é medido e retransmitido para um controlador que fará com que o atuador, que controla o movimento da massa, a mova de modo contrário, i.e. se a embarcação se mexe para cima o atuador irá mover a massa para baixo e vice-versa. E, como o nome poderá indicar, requer uma quantidade de energia de *input*[5] para o seu funcionamento. Estes sistemas são algo complexos e saem do alcance deste trabalho e por isso não serão analisados com grande detalhe. Contudo, a conclusão que se retira é que, devido à maior precisão de compensação de ondas (teoricamente é possível obter ausência completa de oscilações da carga[6]), estes sistemas permitem a realização de operações de grua em condições meteorológicas mais extremas[7]. Por outro lado, são muito mais complexos que a sua alternativa e exigentes a níveis de componentes necessários para o seu funcionamento correto[5].

## 1.2.2 Plataformas Stewart

A necessidade de movimento mecânico mais preciso de estruturas mecânicas causou um aumento na popularidade de manipuladores em paralelo, e.g. Plataformas Stewart, devido

à sua capacidade de posicionamento e capacidade de carga em relação a manipuladores em série [8]. Por força da sua complexidade dinâmica, não-linearidade e perturbações não expectáveis, existem poucos resultados reportados destes sistemas aplicados em navios [2]. Campos et al.[9] utilizou esta plataforma de modo a ajudar na aterragem e descolagem de helicópteros em embarcações, funcionando como um heliporto estável. Foi observado que este porto ativo conseguiu compensar movimentos do mar simulados, se o navio fosse grande o suficiente. Importa também referir que a plataforma utilizada nesse trabalho poderá ser melhorada através de redimensionamento. Salzmann[10] defendeu a ideia de que a acessibilidade a turbinas eólicas *offshore* em condições meteorológicas adversas podia ser melhorada através do desenvolvimento de um novo sistema de acesso composto de um *deck*, montado sobre uma destas plataformas, de modo a promover a movimentação segura de trabalhadores entre embarcações e as turbinas. Neste trabalho, descobriu-se que o modelo de plataforma escolhido conseguia fornecer compensação de movimento em mares com ondas de 2.5 m de altura, quando montada em embarcações com comprimento de pelo menos 50 m . No trabalho feito por Madsen et al. [3] em 2012, foram testadas várias configurações para este tipo de estruturas em navios e realizaram otimização cinemática sobre as mesmas. Tu et al. [11] projetaram um amortecedor baseado nestas plataformas com vista à redução de vibrações e danos por choque dos sensores de um sistema de navegação inercial de forma a melhorar a precisão de restauração dos mesmos. Cai et al. [12] analisaram a possibilidade de melhorar o desempenho de estabilização destes equipamentos, propondo um modelo matemático para o sistema que, ao contrário dos anteriores, considera o efeito total dos movimentos do navio sobre a plataforma. Para além disso, projetaram um modelo de controlo compensador *feedforward*, de forma a dissociar a perturbação de movimento da base da plataforma. Mais recentemente, Wu et al.[13] sugeriram o uso de Controlo de Rejeição de Perturbações Ativo para compensação de ondas, resultando assim, numa redução da influência do mar sobre os movimentos da plataforma. Com base nesta revisão, fica exposta a clara falta de resultados experimentais em ambientes marinhos.

O foco nos últimos tempos tem sido no melhoramento do desempenho destas plataformas nestes locais, no entanto, há uma óbvia necessidade de validação prática dos resultados obtidos nas simulações realizadas nos trabalhos anteriormente mencionados.

### 1.3 Conceitos Teóricos

Neste capítulo será feita uma descrição visual e teórica da plataforma, nomeadamente, como é que o conceito de cinemática inversa se aplica à mesma. Também serão abordados, os tópicos de fusão de sensores, principalmente, como foi utilizado um filtro complementar para se conseguir fazer a fusão, e o método de controlo utilizado para este trabalho.

### 1.3.1 Descrição da plataforma

Como mencionado anteriormente, estas plataformas possuem a capacidade de se movimentarem em 6 graus de liberdade e, por esse motivo, são uma ferramenta útil para a compensação dos movimentos causados pelo mar numa embarcação ao longo das mesmas 6 direções. As plataformas Stewart são compostas por 2 planos rígidos, um na base e outro no topo, ligados por seis elos. Cada um destes elos tem um comprimento variável e são fixadas a ambos os planos através de uma junção de 3 eixos em cada uma das suas extremidades[14]. Um esquemático representativo da plataforma pode ser observado na figura 1.3.

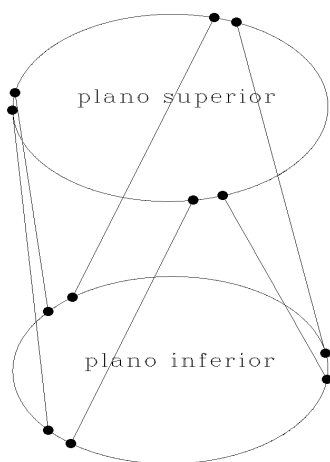


Figura 1.3: Esquemático das plataformas Stewart

A configuração do plano superior relativa ao plano inferior, reflete-se através de uma combinação de coordenadas cartesianas com coordenadas angulares que descrevem os ângulos de Euler da plataforma. Seja  $O_s$  o ponto correspondente ao centro do plano superior, neste caso, as coordenadas serão representadas da seguinte maneira  $O_s = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]$ , onde as primeiras 3 coordenadas descrevem a posição do plano superior e as últimas 3 a orientação angular do mesmo e correspondem ao *yaw*, *pitch* e *roll* respetivamente. Face à presença de 2 referenciais diferentes (um para cada plano), é necessário projetar os pontos das junções do plano superior no referencial do plano inferior. Para tal pode ser utilizada uma matriz de rotação  $R(\phi, \theta, \psi)$ . Esta é obtida através de 3 rotações consecutivas: primeiro em torno do eixo dos  $zz$  (*yaw*), de seguida, em torno do eixo dos  $yy$  (*pitch*) e por fim, em torno do eixo dos  $xx$  (*roll*)[3]. Apesar de existirem mais sequências de rotação possíveis para realizar esta transformação, esta ordem de multiplicação é a utilizada mais frequentemente [10]. Cada uma destas rotações tem uma matriz associada e são definidas da seguinte forma:

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}, R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A sequência de rotações é representada pelo produto das matrizes, logo:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R(\psi)R(\theta)R(\phi) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) & -\sin(\psi) \cos(\phi) + \cos(\psi) \sin(\theta) \sin(\phi) & \sin(\psi) \sin(\phi) + \cos(\psi) \cos(\phi) \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) \cos(\phi) + \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) & -\cos(\psi) \sin(\phi) + \sin(\psi) \cos(\phi) \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

### 1.3.1.1 Cinemática Inversa

Para se conseguir controlar os movimentos da plataforma de forma precisa, é necessário determinar qual o comprimento que cada um dos elos tem de ter, para que o elemento terminal atinja a posição desejada, tendo este processo o nome de cinemática inversa. O termo "elemento terminal" é utilizado para denominar o componente de um robô que é projetado para interagir com o ambiente que o rodeia, e, no caso da plataformas Stewart, é o plano superior da mesma[15].

Seja o vetor com origem no centro do plano superior até uma das junções no mesmo plano representado por  $\vec{t}_i$ , e  $\vec{b}_i$ , o vetor que vai desde o ponto central da base (plano inferior) até uma das junções do mesmo plano, com  $i = 1, \dots, 6$ . Definindo  $\vec{h}$  como o vetor com origem no centro da base e que vai até o centro do plano superior podemos calcular o vetor representativo de cada um dos elos da base representado por  $\vec{l}_i$  (Uma representação destes vetores está presente na figura 1.4).

Sendo assim, o cálculo do vetor de cada elo pode ser feito através de:

$$\vec{l}_i = \vec{h} + R\vec{t}_i - \vec{b}_i \quad (1.2)$$

Em que se utiliza a matriz  $R$ , para se conseguir projetar os vetores  $\vec{t}_i$  do referencial do plano superior, no referencial da base. Por fim, para obter o comprimento de cada mecanismo

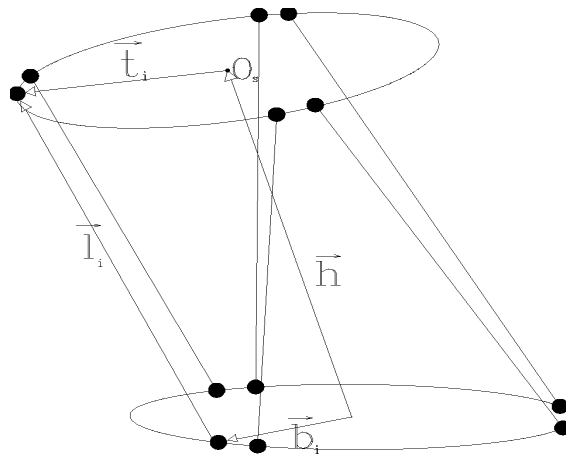


Figura 1.4: Diagrama de vetores da plataforma

de atuação calcula-se a norma de cada um dos vetores da equação 1.2:

### 1.3.2 Controlo PID

Um dos métodos de controlo mais utilizados nestas plataformas é a técnica *Proportional-Integral-Derivative* (PID), visto que é de simples implementação[16], é facilmente afinável e tem uma manutenção associada reduzida, para garantir um desempenho satisfatório[17].

Começando por definir uma variável de erro em função do tempo  $e(t)$ , que representa a diferença entre o valor desejado e o valor atual, por exemplo, no caso da plataforma este valor poderia corresponder à diferença entre o comprimento desejado de um dos elos e o seu comprimento atual. Este erro será influenciado por 3 termos diferentes, como o nome indica, o termo proporcional, termo integral e o termo derivativo. O termo proporcional reduz o erro através de incrementos proporcionais ao mesmo, portanto à medida que o erro diminui, esta parcela irá diminuir igualmente. O termo integral corresponde à soma do erro ao longo do tempo e serve para a correção de erros constantes ou que mudam de maneira lenta. Este tipo de erros é geralmente referido como Erro *Steady-State* (EST) O termo derivativo controla a taxa de variação da variável de modo a reduzir futuras oscilações aumentando a estabilidade do sistema. Seja  $u(t)$  o sinal de controlo aplicado aos atuadores da plataforma, este é calculado através da seguinte expressão:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t f(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.3)$$

onde  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , representam cada constante de proporcionalidade para cada parcela, geralmente designada por ganho, que pode ser alterada pelo utilizador. Para facilidade de compreensão, este processo pode ser representada através de um diagrama de blocos como na figura 1.5, onde  $y(t)$  representa a variável para a qual se quer corrigir o erro, e  $r(t)$  representa o valor que a variável deve atingir.

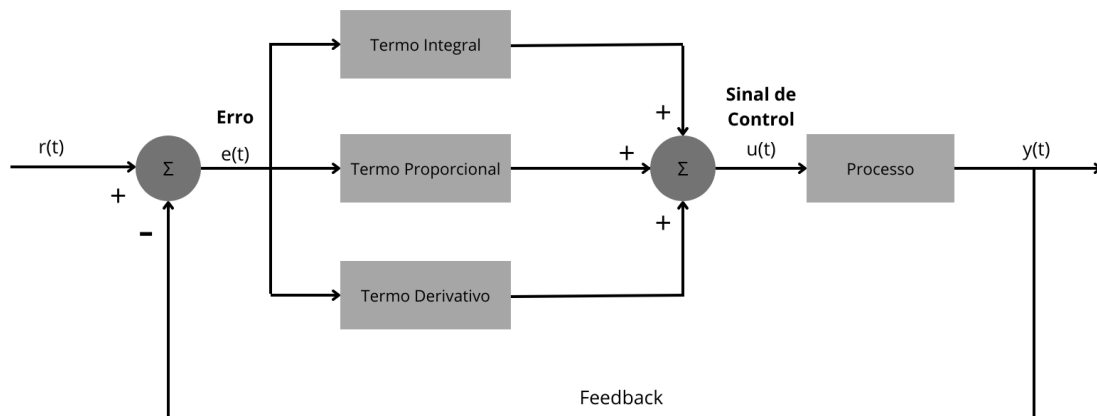


Figura 1.5: Diagrama de blocos da técnica PID

### 1.3.3 Fusão de Sensores

A fusão de sensores é a combinação de dados de 2 ou mais sensores com o propósito de obter informação mais precisa e inferir sobre outras grandezas cujos valores não seriam

possíveis de medir com um só sensor. Neste trabalho foi utilizado uma *Inertial Measurement Unit* (IMU), que é composta por um acelerómetro e um giroscópio. De modo a obter os ângulos discutidos na secção 1.3.1 é possível integrar as medidas do giroscópio ao longo do tempo. No entanto, as medidas de giroscópio são, no geral, ruidosas e enviesadas e, como tal, estes fatores contribuem significativa e acumulativamente para a respetiva integração e assim sendo, os ângulos medidos irão começar a apresentar *drift*, significando que a medição se afasta lentamente do valor real[18][19]. É também possível chegar aos valores dos ângulos de *roll* ( $\phi$ ) e *pitch* ( $\theta$ ) através de leituras de acelerómetro. Para perceber como, é necessário fazer a distinção entre o referencial inercial e o referencial do corpo, representada na figura 1.6.

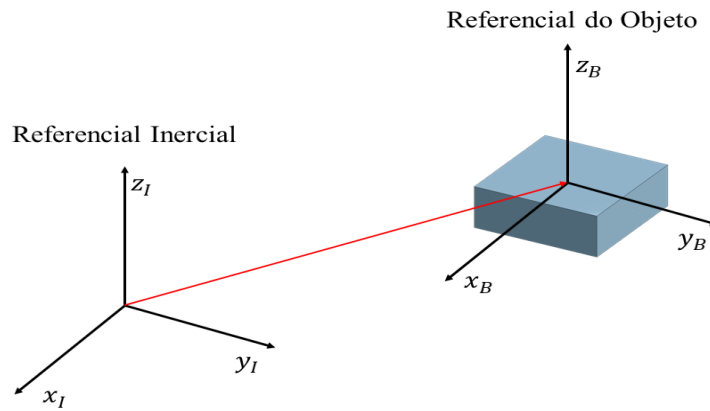


Figura 1.6: Referencial inercial e referencial do corpo

As acelerações medidas pelo acelerómetro pertencem ao referencial do corpo, sendo assim, escrevendo o vetor das acelerações em forma de matriz, tem-se  $\vec{a}_B = [a_x, a_y, a_z]^T$ , porém, é necessário referir que, se supõe que as acelerações medidas pelo acelerómetro no referencial do corpo são somente as várias componentes do vetor da aceleração gravítica, ou seja assume-se que o corpo não tem qualquer outra aceleração[18]. O vetor de aceleração gravítica no referencial inercial é representado como  $\vec{g}_I = [0, 0, g]^T$  e, de modo a fazer a conversão do vetor das acelerações medidas no referencial do corpo para o referencial inercial, é possível proceder à multiplicação deste vetor pela mesma matriz de rotação descrita em 1.3.1, do seguinte modo:

$$\vec{g}_I = R(\psi, \theta, \phi)\vec{a}_B \quad (1.4)$$

O que significa que:

$$\vec{a}_B = R(\psi, \theta, \phi)^{-1}\vec{g}_I \quad (1.5)$$

E, uma vez que, as matrizes de rotação são sempre ortogonais, na medida em que são transformações que preservam o comprimento dos vetores aos quais são aplicadas, as suas matrizes inversas são iguais às suas próprias transpostas, e então, pode-se escrever:

$$\vec{a}_B = R(\psi, \theta, \phi)^T \vec{g}_I = R(\phi)^T R(\theta)^T R(\psi)^T \vec{g}_I \quad (1.6)$$

O cálculo do ângulo de *yaw* ( $\psi$ ) não pode ser efetuado através das leituras de acelerómetro já que nenhum componente da aceleração gravítica no referencial do corpo se altera quando este roda sobre o eixo dos  $zz$ , isto é demonstrado matematicamente da seguinte forma: Como já mencionado, uma rotação deste tipo é descrita por:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Aplicando a transposta desta transformação ao vetor da aceleração gravitacional no plano inercial obtém-se:

$$R(\psi)^T \vec{g}_I = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \vec{g}_I \quad (1.8)$$

Conclui-se, então, que qualquer rotação executada no plano  $xy$  não terá qualquer efeito sobre o vetor da aceleração gravitacional e, sendo assim, a matriz de rotação transposta utilizada para a projecção das acelerações no referencial do corpo, poderá ser somente a multiplicação das versões transposta das matrizes de *roll* e de *pitch*, ou seja:

$$R(\phi)^T R(\theta)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 1 & \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ \sin(\phi) \sin(\theta) & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ -\cos(\phi) \sin(\theta) & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Aplicando esta transformação ao vetor  $\vec{g}_I$ :

$$\vec{a}_B = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = R(\theta)^T R(\phi)^T \vec{g}_I = \begin{bmatrix} -g \sin(\theta) \\ g \sin(\phi) \cos(\theta) \\ g \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

A partir desta conclusão, consegue-se chegar às seguintes relações:

$$\theta = -\arcsin\left(\frac{a_x}{g}\right), \phi = \arctan\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (1.11)$$

Deste modo, demonstra-se como se pode estimar os ângulos de *pitch* e *roll*, utilizando um acelerómetro. Todavia, esta medição tem os seus problemas, tais como o ruído e o facto de não contar com qualquer outro tipo de acelerações que este sensor poderá sentir. Como já mencionado, um dos problemas de integrar as medições do giróscopio é a presença de viés e de ruído que irá também ser somada ao longo do tempo, contudo, é possível tirar proveito da precisão deste sensor a curto-prazo bem como da estabilidade do acelerómetro a longo prazo para ter resultados mais precisos[19]. Isto é conseguido através da fusão destes sensores, e, no caso deste trabalho, este processo foi feito com a utilização de um filtro complementar, o qual será discutido na próxima subsecção.

### 1.3.3.1 Filtro Complementar

Este método de fusão de sensores foi o escolhido para este trabalho, pela sua simplicidade e, principalmente pela sua eficiência computacional[19]. Este último fator é de especial relevância, tendo em conta que o sistema ao qual será aplicado, é à base de um microcontrolador com um poder de processamento limitado. Outro fator importante, é também, a sua baixa latência. Considerando que, não é necessário um grande número de computações para o seu funcionamento correto, o filtro complementar é ideal para aplicações onde é fundamental uma resposta rápida. De modo a aproveitar a confiança dada pelos valores medidos pelo acelerómetro e remover algum do ruído intrínseco a este, poderá ser aplicado um filtro passa-baixo de modo a remover componentes de alta frequência. Por outro lado, é benéfico aproveitar a capacidade do giroscópio de deteção de mudanças de ângulo rápidas, ou seja, é essencial manter estes componentes de alta frequência na medição. Ao usar um filtro passa-alto mantém-se esta vantagem, e ao mesmo tempo, reduz-se o ruído de baixa frequência que é um dos principais fatores causadores de *drift*[19]. Tendo estes fatores em conta, os valores de *roll* e *pitch* poderão ser estimadas através de um filtro complementar da seguinte maneira: Sejam  $\beta$ ,  $\beta_t$ ,  $\beta_{t-1}$ ,  $\omega_g$ ,  $\beta_a$ ,  $\alpha$  os valores de uma medição arbitrária (*roll* ou *pitch*), da medição atual, da medição anterior, da medição de giroscópio (velocidade angular), da medição de acelerómetro e uma constante de filtro complementar, a expressão que descreve o comportamento do filtro pode ser escrita da seguinte forma:

$$\beta_t = \alpha(\beta_{t-1} + \omega_g dt) + (1 - \alpha)\beta_a \quad (1.12)$$

A constante  $\alpha$  é escolhida arbitrariamente (entre 0 e 1), sendo que o seu valor irá afetar o quanto é que as medidas de tanto o giroscópio como as do acelerómetro contribuem para a estimativa do ângulo. Quanto maior o seu valor, mais baixa será a frequência de corte e maior será a contribuição do valor do giroscópio enquanto que diminuir este valor tem o efeito oposto[19].

## 1.4 Considerações sobre o *Design*

Apesar dos movimentos plataformas Stewart serem acionados por 6 elos, o sistema desenvolvido neste projeto tem apenas 3. Tomou-se esta decisão de modo a testar o desempenho deste modelo, visto não ser tão utilizado e também por ser uma opção mais económica, o que é uma mais valia, tendo em conta que o dispositivo em questão é de pequenas dimensões. As principais implicações que esta alteração poderia ter na *performance* da plataforma são a alteração de graus de liberdade e mudança do espaço de trabalho, que é no essencial, um indicativo das posições que o elemento terminal pode atingir, e também da sua estabilidade[20][21]. Para avaliar estes possíveis problemas, foi desenvolvida uma simulação simples com o objetivo de comparar a amplitude do movimento da versão de 3 elos com a configuração mais utilizada da versão de 6 elos. Esta comparação está representada nas figuras 1.7 e 1.8.

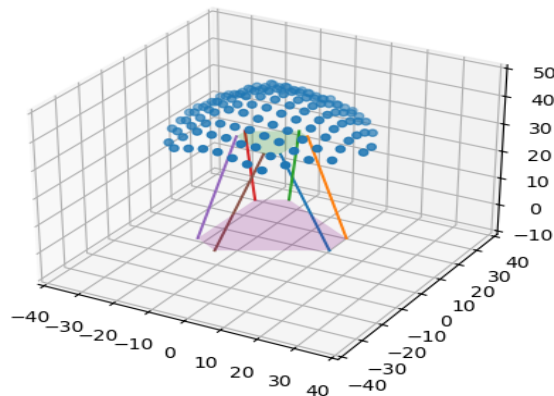


Figura 1.7: Espaço de trabalho de uma plataforma Stewart de 6 elos

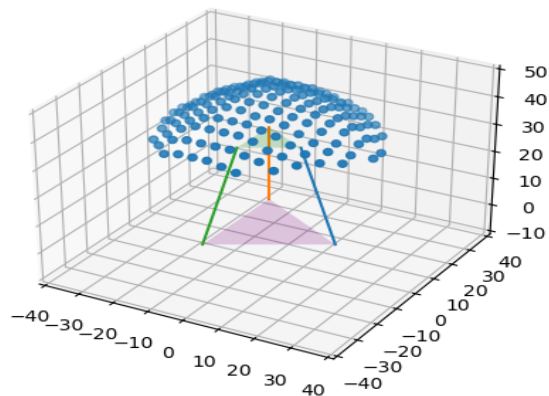


Figura 1.8: Espaço de trabalho de uma plataforma Stewart de 3 elos

A partir desta comparação meramente visual, mas na qual, foram consideradas dimensões iguais para ambas versões, nota-se que, apesar de possivelmente não ser intuitivo, o sistema de 3 elos tem um espaço de trabalho mais abrangente, o que provavelmente acontece devido à existência de constrangimentos causados pela presença dos elos restantes.

Num dispositivo com um leque de aplicações extenso como este, é desafiante tirar conclusões sobre se esta versão de 3 elos é uma mais valia. Os usos principais da plataforma Stewart desenvolvida nesta tese são a estabilização de sensores e de câmaras, o que, faz com que seja pertinente, o seu espaço de trabalho mais extenso em comparação com a alternativa de 6 elos. No entanto, em aplicações em que a segurança é o fator mais importante como nas mencionadas na secção 1.2, a estabilidade intrínseca à Plataforma Stewart original, pode provar-se crucial.

Neste capítulo serão identificados e examinados os componentes chave dos vários protótipos construídos ao longo deste trabalho, começando com uma descrição dos sensores utilizados, especificamente os sensores MPU9250 e HC-SR04. Depois disto, serão descritos os 3 modelos desenvolvidos incluindo os desafios enfrentados e problemas resolvidos durante o desenvolvimento.

## 2.1 Sensores

### 2.1.1 *Inertial Measurement Unit* MPU9250

O primeiro componente a ser integrado foi o IMU MPU9250 e que se encontra representado na figura 2.1. É composto por 3 sensores diferentes: um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro, cujo funcionamento será detalhado nas próximas secções. No entanto, logo no início da sua integração concluiu-se que o dispositivo utilizado não tinha magnetómetro ou que este não estava a funcionar. Como a comunicação entre a placa de controlo (Arduino UNO) é feita através do protocolo  $I^2C$ , é necessário saber o endereço de cada um dos dispositivos que, no caso do giroscópio e acelerómetro, é o mesmo. Para saber o endereço destes e do magnetómetro foi utilizado um programa de *scan* de dispositivos  $I^2C$  no qual se testam todos os endereços possíveis e, quando um dispositivo é detetado, um sinal é enviado ao Arduino. Após a sua execução, somente um dispositivo tinha sido detetado, e através da análise da *datasheet* do MPU9250 concluiu-se que o endereço identificado (0x69) pertencia ao acelerómetro e giroscópio, e que o endereço do magnetómetro, caso este fosse detetado, seria 0x0C.

Após o recolhimento das medições, através do uso de conversores-analógico-digitais estes dados são convertidos para sinais digitais que de seguida sofrem algum processamento de sinal e são armazenados em registos de 8 bits. Cada medida em cada eixo, tanto para o giroscópio e acelerómetro, requer 2 registos, um para os 8 bits mais significantes e o outro para os restantes 8 bits menos significantes[22]. Por fim, os últimos valores armazenados nos registos são transmitidos à placa de controlo.

#### 2.1.1.1 Acelerómetro

Apesar de existirem vários tipos de acelerómetros, e sendo que, o que está presente no MPU9250 é do tipo capacitivo[23], este será o foco desta subsecção. Através da utilização

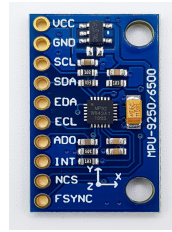


Figura 2.1: IMU MPU9250

de massas de prova (uma para cada eixo) com pontas de detecção presas a uma extremidade elástica, uma aceleração no sentido de um eixo particular causará um deslocamento da massa e, devido à presença de elétrodos posicionados estrategicamente, este deslocamento causará uma variação na distância entre as pontas da massa e os elétrodos, o que por sua vez, variará a capacitância entre os 2, conforme a seguinte expressão:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.1)$$

Onde  $C$  representa a capacitância,  $\epsilon$  representa a permissividade do metal utilizado no acelerômetro,  $A$  representa a área das faces das pontas e dos elétrodos e  $d$  representa a distância entre a ponta e o elétrodo. No entanto, o que é medido, é, na verdade, a soma das diferenças entre a capacitância os vários condensadores diferenciais elétrodo-ponta-elétrodo. Sendo assim, a quantidade medida é determinada por:

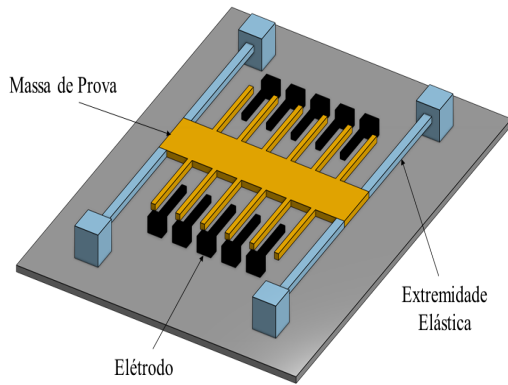
$$\sum_{i=1}^{n-1} \Delta C = \epsilon A \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) \quad (2.2)$$

Onde  $n_e$  representa o número total de elétrodos. É de notar que, em repouso e posicionado numa superfície lisa, os elétrodos encontram-se equidistantes de cada uma das pontas nos eixos  $xx$  e  $yy$  logo, a sua aceleração será  $0 g$ . Por outro lado, no eixo dos  $zz$ , devido à aceleração gravítica, as pontas irão deslocar-se de modo a produzir uma leitura de  $1 g \approx 9.81 m/s^2$

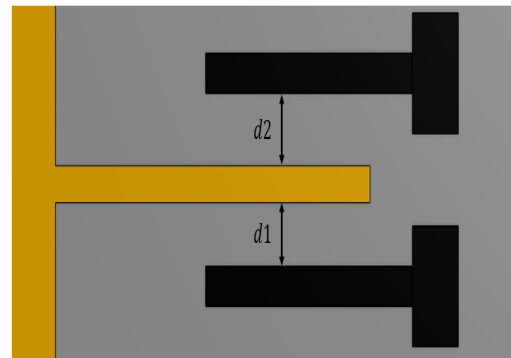
Esta explicação está representada nas figuras 2.2 e 2.3[24]

### 2.1.1.2 Giroscópio

De forma semelhante ao acelerómetro, o giroscópio adquire dados através da medição de capacitâncias diferenciais e é também composto por uma massa de prova (por eixo) presa a extremidades elásticas. Contudo, visto que estes sensores avaliam velocidades angulares e não acelerações, o seu aspeto apresenta diferenças claras em relação ao acelerómetro. A massa de prova tem a possibilidade de se mover em 2 eixos e, mesmo que o giroscópio não sofra perturbações, esta é colocada a oscilar com uma certa frequência (geralmente à frequência de ressonância do sistema[25]) através do uso de campos elétricos alternados. Esta oscilação dá-se no eixo de acionamento. Quando o dispositivo (figuras 2.4 e 2.5) sofre uma deslocação angular, haverá movimento da massa de prova no eixo de detecção, que

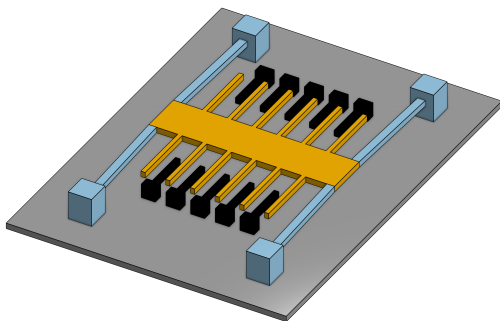


(a) Vista do substrato do acelerómetro antes da aceleração

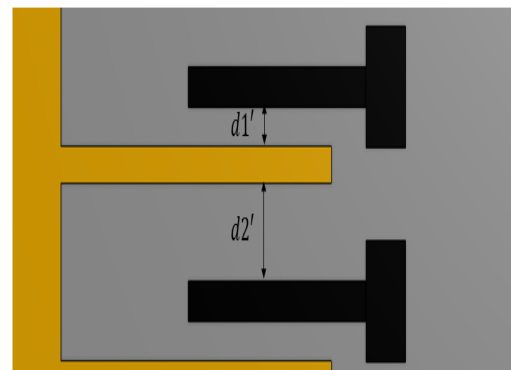


(b) Condensador diferencial eléctrodo-ponta-elétron antes de sofrer aceleração

Figura 2.2: Acelerómetro antes de sofrer aceleração



(a) Vista do substrato do acelerómetro durante a aceleração



(b) Condensador diferencial eléctrodo-ponta-elétron durante aceleração

Figura 2.3: Acelerómetro durante aceleração

é perpendicular a este distúrbio, causado pelo efeito de Coriolis[26] de acordo com a seguinte equação:

$$\vec{F}_c = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (2.3)$$

Onde:

- $\vec{F}_c$  representa a força de Coriolis no eixo de deteção
- $m$  representa a massa de prova
- $\vec{v}$  representa a velocidade no eixo de acionamento
- $\vec{\omega}$  representa a velocidade angular

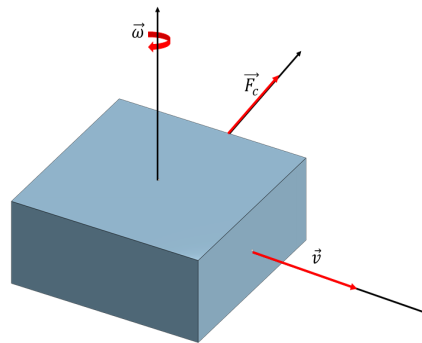


Figura 2.4: Diagrama de vetores do giroscópio

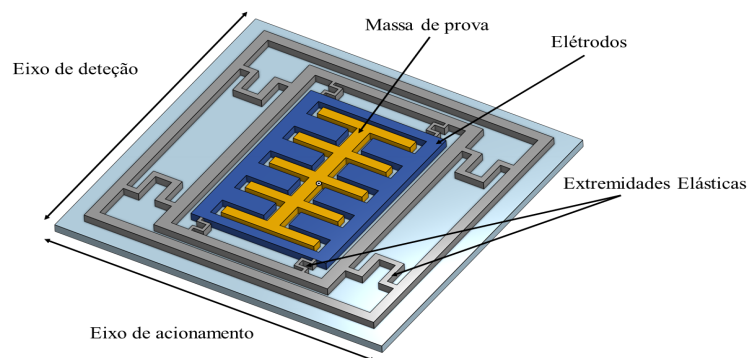


Figura 2.5: Substrato giroscópico

Isto verifica-se porque o giroscópio é um sistema que se move linearmente enquanto está contido num referencial rotacional e faz com que o objeto se mova para cima ou para baixo no eixo de detecção (consoante o sentido da velocidade no eixo de acionamento). Esta movimentação, à semelhança do que acontece no acelerómetro, faz com que as distâncias entre as pontas de detecção e os eléctrodos se alterem causando uma diferença de capacitância que será medida de acordo com a eq. 2.2 e convertida para velocidade angular.

### 2.1.2 Sensor de Distância HC-SR04

Este sensor (representado na figura 2.6) foi utilizado de forma a garantir a segurança dos atuadores lineares utilizados. Ao colocá-lo por baixo do plano superior da plataforma, como na figura 2.7, foi possível medir a distância entre o mesmo e a base da plataforma, permitindo assim, com base na medida adquirida ordenar aos atuadores as suas extensões e retrações de modo a que estes nunca atinjam os seus limites de amplitude.

O transmissor presente neste módulo utiliza energia eléctrica para gerar ondas sónicas através do ar até que estas atinjam um objeto e sejam refletidas no sentido inverso. O recetor do sensor irá, depois, detetar a onda e medir o intervalo de tempo entre o momento em que esta foi projetada e o momento em que foi recebida. Isto está representado na

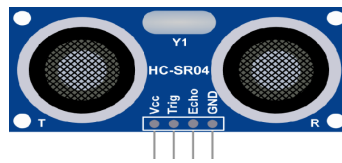


Figura 2.6: Sensor de distância HC-SR04.

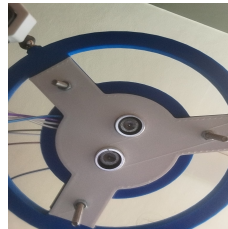


Figura 2.7: Colocação do sensor HC-SR04

figura 2.8[27].

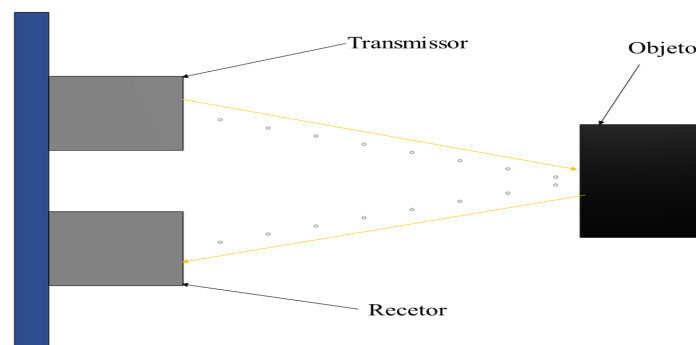


Figura 2.8: Princípio de funcionamento HC-SR04.

## 2.2 Componentes Elétricos

Nesta secção irão ser apresentados os restantes componentes elétricos, bem como uma descrição do circuito total. Foram utilizados os seguintes componentes, para além dos sensores já mencionados:

- 2 pontes-H L298N
- 3 atuadores lineares
- 3 interruptores fim-de-curso
- 1 microcontrolador Arduino UNO

Os atuadores lineares utilizados funcionam de modo a estenderem-se quando lhes é fornecida uma tensão positiva e a retraírem-se caso seja fornecida uma tensão negativa, como tal, são utilizadas pontes-H para facilitar a mudança de polaridade. As pontes-H

são, no seu essencial, um conjunto de 4 interruptores que a partir de certas configurações de interruptores abertos e fechados permitem com que o sentido da corrente se altere[28]. Um esquemático deste tipo de dispositivos está representado na figura 2.9. O módulo L298N (fig. 2.10) é composto por 2 pontes-H e, sendo assim, permite a ligação de 2 motores em simultâneo.

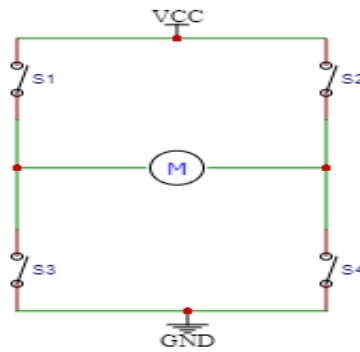


Figura 2.9: Esquemático de uma ponte-H

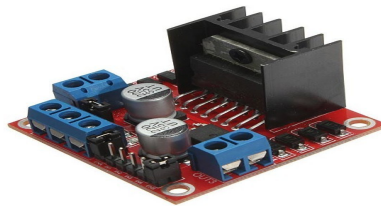


Figura 2.10: Módulo L298N

Os atuadores utilizados inicialmente, os IP60-WR (Zhejiang Hoodland Technology co. ltd, China) representados na figura 2.11, possuíam interruptores fim-de-curso integrados[29], no entanto, devido à falta de compatibilidade com este tipo de aplicação, foi, mais tarde, necessário o desenvolvimento de atuadores lineares mais robustos, os quais serão apresentados posteriormente. Sendo assim, com o uso dos novos atuadores, foi essencial a utilização de fins-de-curso externos (figura 2.12) para garantir que os atuadores não passavam os seus limites de retração. Quando estes são premidos, é permitido um fluxo de corrente que, quando detetada pelo microcontrolador, poderá ser usado como causa para que este impeça o movimento dos atuadores num certo sentido[30].



Figura 2.11: Atuador linear IP60-WR



Figura 2.12: Interruptor fim-de-curso

Como conclusão, o esquemático do circuito inteiro retrata-se na figura 2.13. É de notar que a velocidade com que os atuadores alteram o seu comprimento é controlada através de sinais *Pulse Width Modulation* (PWM). Somente alguns pins do Arduino é que possuem a capacidade da produção destes sinais (pins 3, 5, 6, 9, 11 e 12), daí serem estes os que estão ligados aos *inputs* dos módulos L298N.

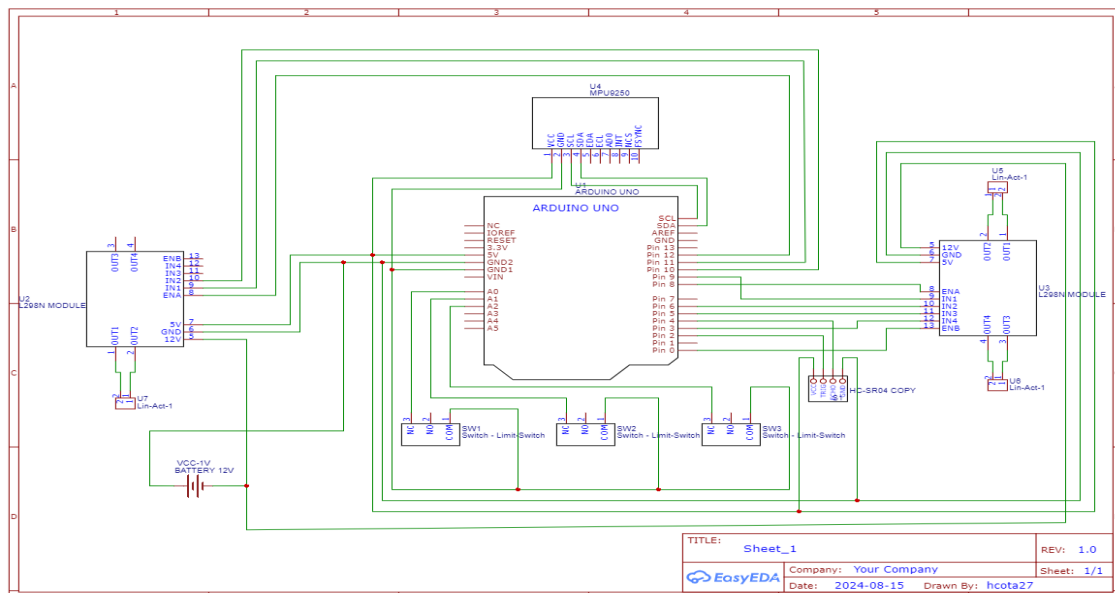


Figura 2.13: Esquemático do circuito final

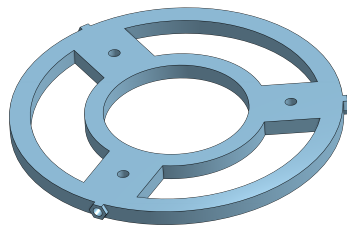
## 2.3 Protótipos

Ao longo do tempo de realização desta dissertação, foram desenvolvidos um total de 3 protótipos, os quais serão caracterizados nesta secção.

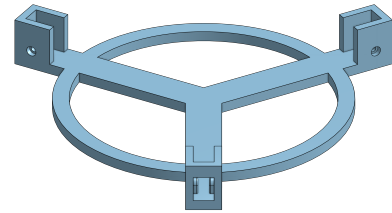
### 2.3.1 Primeiro Protótipo

O protótipo mais simples mas também mais rápido, devido à presença dos atuadores IP60-WR, que têm velocidades de extensão e retração máximas de  $15\text{cm/s}$ . Também, devido a esta alta velocidade notou-se uma presença notável de um comportamento de *overshoot*, ou seja, os atuadores tendiam a estender-se e retrair-se significativamente mais do que o necessário. Além disto, uma desvantagem da utilização destes atuadores revelou-se cedo: não foram projetados para aplicações de uso contínuo, já que facilmente

sobreaqueciam e até se quebravam. Abaixo apresenta-se os desenhos do plano superior e da base, que foram concebidos através do programa Onshape (assim como todos os outros componentes desenhados para este projeto) e também o aspeto final deste protótipo. Foi ainda concebido um componente de modo a fixar os atuadores lineares a uma junção esférica que foi aparafusada nos furos do plano superior, ilustrado na figura 2.15



(a) Desenho do plano superior



(b) Desenho da base

Figura 2.14: Desenhos do primeiro protótipo

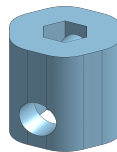


Figura 2.15: Componente para a união das junções universais com os atuadores



Figura 2.16: Primeiro Protótipo

### 2.3.2 Segundo Protótipo

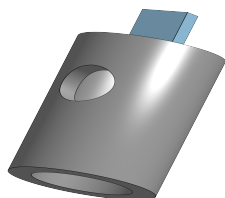
Como referido anteriormente, foi necessário o desenvolvimento de novos atuadores lineares para contrariar as principais falhas dos que foram utilizados no 1º protótipo. Os

IP60-WR são compostos por um motor DC ligado a um parafuso esférico que converte o movimento de rotação do motor num movimento linear. Face às falhas, que principalmente, derivavam desse motor, o mesmo foi descartado e reaproveitou-se o parafuso esférico, utilizando um motor mais lento mas também mais robusto: o JGB37-3530 (fig. 2.17) que tem uma velocidade de rotação de apenas 1000 rpm. Foi medida a extensão do atuador linear ao rodar o parafuso esférico no seu interior manualmente, sendo esta de 2,6 mm por rotação completa. Sabendo isto, ao multiplicar este valor pelo valor da velocidade de rotação do motor em segundos, obtém-se o valor de 4,3 cm/s, ou seja, aproximadamente 3 vezes mais lento, que os motores anteriormente utilizados.



Figura 2.17: Motor JGB37-3530

Para se conseguir integrar este tipo de motor com o que foi reaproveitado dos atuadores lineares foi preciso a projeção de certos componentes para fazerem esta ligação. Começou-se por desenhar uma peça que faça a conexão entre o veio dos JGB37-3530 e o parafuso. Este desenho, assim como a integração da peça estão ilustrados na figura 2.18.



(a) Desenho da conexão motor-parafuso



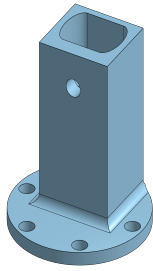
(b) Integração da conexão

Figura 2.18: Conexão motor-parafuso

De seguida, para fixar o resto do atuador ao motor, foi projetada uma flange, ilustrada na figura 2.19.

Para se conseguir integrar os interruptores fim-de-curso mencionados anteriormente foram concebidas mais 2 peças, uma para fixar o interruptor ao local onde o atuador está no fim do seu alcance de movimento e outra que, essencialmente, engrossa o veio do atuador e garante que este irá premir o fim-de-curso no fim da sua amplitude. Os desenhos destes componentes assim como a sua incorporação no sistema estão representados nas próximas figuras.

Por fim, foi necessária a projeção de uma nova base, assim como novos componentes que suportam os novos atuadores e os fixam à mesma (figuras 2.21 e 2.22)

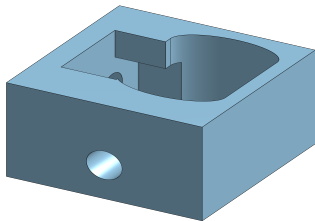


(a) Desenho da flange motor-  
atuador

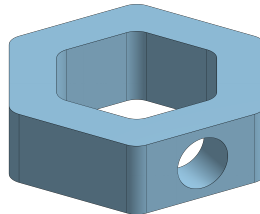


(b) Integração da flange

Figura 2.19: Flange motor-atuador



(a) Desenho do fixador do inter-  
ruptor



(b) Desenho do atuador do inter-  
ruptor



(c) Integração dos interruptores  
fim-de-curso

Figura 2.20: Desenhos e integração das peças para os interruptores fim-de-curso

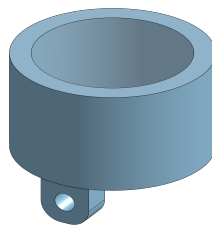


Figura 2.21: Suporte para os atuadores lineares

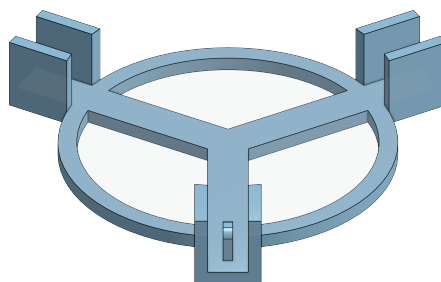


Figura 2.22: Base do 2º protótipo

Assim, apresenta-se abaixo o aspeto final do 2º protótipo . Apesar de corrigir os problemas do 1º, o *design* da segunda base criou problemas de estabilidade e fez com que a plataforma apresentasse oscilações significativas, especialmente devido a folgas entre a base e os suportes dos motores.

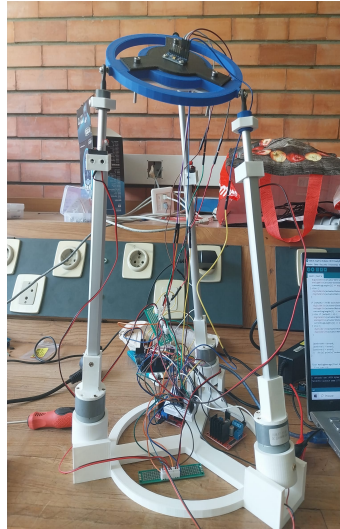


Figura 2.23: 2º protótipo

### 2.3.3 Terceiro Protótipo

Finalmente, foi desenvolvido um protótipo final, com o objetivo de corrigir as falhas de estabilidade do anterior. Para tal, foi projetada uma nova base em que os suportes foram fixados diretamente aos revestimentos laterais da base ao atravessar um parafuso de cada lado do suporte por um rolamento embutido no revestimento. Os suportes dos motores foram também redesenhados, de modo a ter mais área de contacto com os revestimentos laterais, e assim, para possivelmente, reduzir vibrações, foi considerando um aspeto cúbico, em vez de cilíndrico.

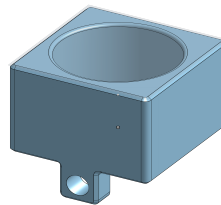


Figura 2.24: Novo suporte para os motores

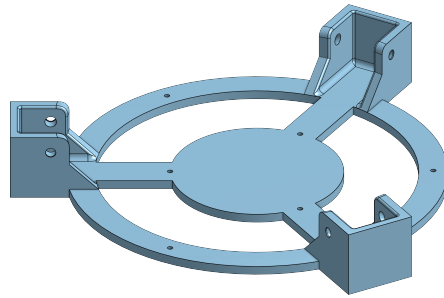


Figura 2.25: 3ª base

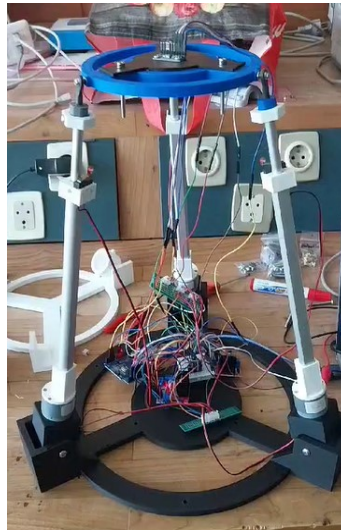


Figura 2.26: 3º protótipo

Neste capítulo será abordado detalhadamente todo o desenvolvimento e implementação do software que permite o funcionamento dos sensores utilizados na plataforma Stewart. Inicialmente irá ser descrito o processo de calibração dos sensores, seguidamente será detalhada a aplicação do filtro de média móvel com o objetivo de reduzir ruído presente nas leituras do giroscópio. Finalmente, serão analisados os resultados dos 2 processos mencionados, e que implicações o último tem sobre os valores dados pelo filtro complementar e também sobre a sua influência no desempenho da plataforma.

Neste capítulo, um dado relevante a saber, é a taxa da amostragem utilizada. Para se determinar tal valor, foram recolhidas amostras à taxa de amostragem máxima, registando o intervalo de tempo entre cada amostra recolhida. Através do inverso desse intervalo de tempo ( $1/\Delta t$ ), é possível determinar a taxa de amostragem do sistema, que neste caso é de 40 Hz.

Com a utilização do sensor HR-S04 seria, possivelmente, esperada a aplicação de algum tipo de filtro. No entanto, como se pode observar na figura 3.1, este não apresenta ruído significativo o suficiente para ter sido considerada a utilização de algum processamento sinal sendo os picos do gráfico provavelmente causados pela presença de conexões elétricas sob o local de atuação do sensor. A falta de ruído poderá, eventualmente, dever-se à falta de movimento por parte da plataforma, já que os dados do gráfico foram adquiridos com esta em repouso, mas como a presença deste sensor só se justifica pela garantia da segurança dos atuadores da plataforma, não foi considerada a aplicação de filtros neste sensor devido à dispensabilidade de precisão das suas medidas e também por motivos de otimização do tempo de resposta do sistema, já que a aplicação de qualquer processamento de sinal resulta num aumento deste tempo.

### 3.1 Calibração do MPU-9250

Como mencionado na secção 1.3.3 e mais tarde comprovado em laboratório, o giroscópio apresenta viés. Como se pode ver na figura 3.2, em cada um dos eixos, é possível observar a presença de um *offset* ao olhar para o valor médio do gráfico. Neste caso, os valores são  $\approx -2,5$  rad/s para o eixo dos  $xx$ ,  $\approx 2,2$  rad/s para o eixo dos  $yy$  e  $\approx -1,0$  rad/s para o eixo dos  $zz$ . Este é removido através de uma recolha de amostras inicial, com a plataforma em repouso e sempre que esta é reiniciada, em que é feito o cálculo do valor médio das amostras, de modo a mais tarde, este ser subtraído do valor das seguintes amostras.

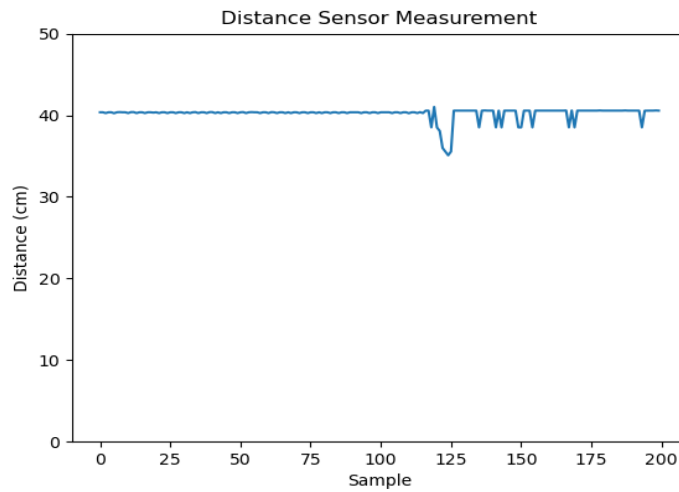


Figura 3.1: Gráfico dos dados do sensor de distância

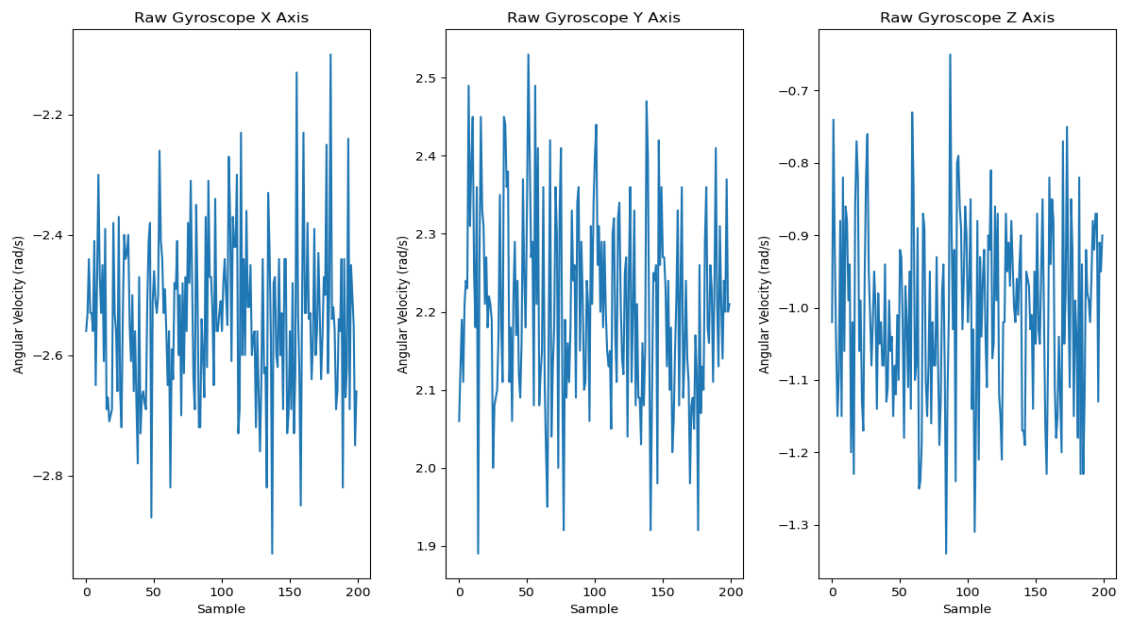


Figura 3.2: Gráficos dos valores de giroscópio antes da calibração nos 3 eixos

Após a remoção dos offsets, na figura 3.3, vê-se que a média dos gráficos para cada um dos eixos é nula.

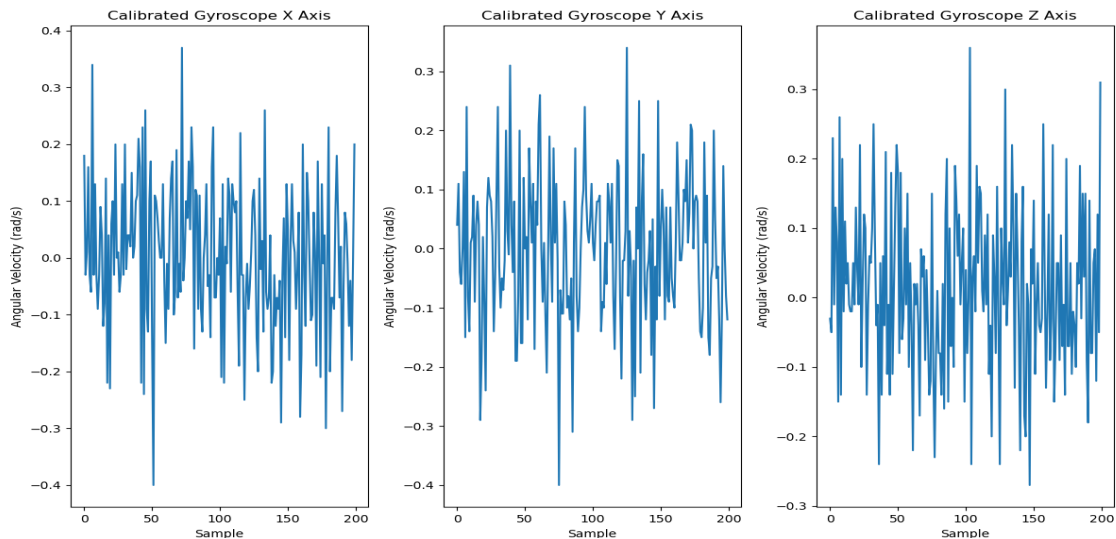


Figura 3.3: Gráficos dos valores de giroscópio depois da calibração nos 3 eixos

Por último, ao observar um gráfico de recolha de amostras do acelerómetro, na figura destaca-se a ausência de qualquer tipo de viés.

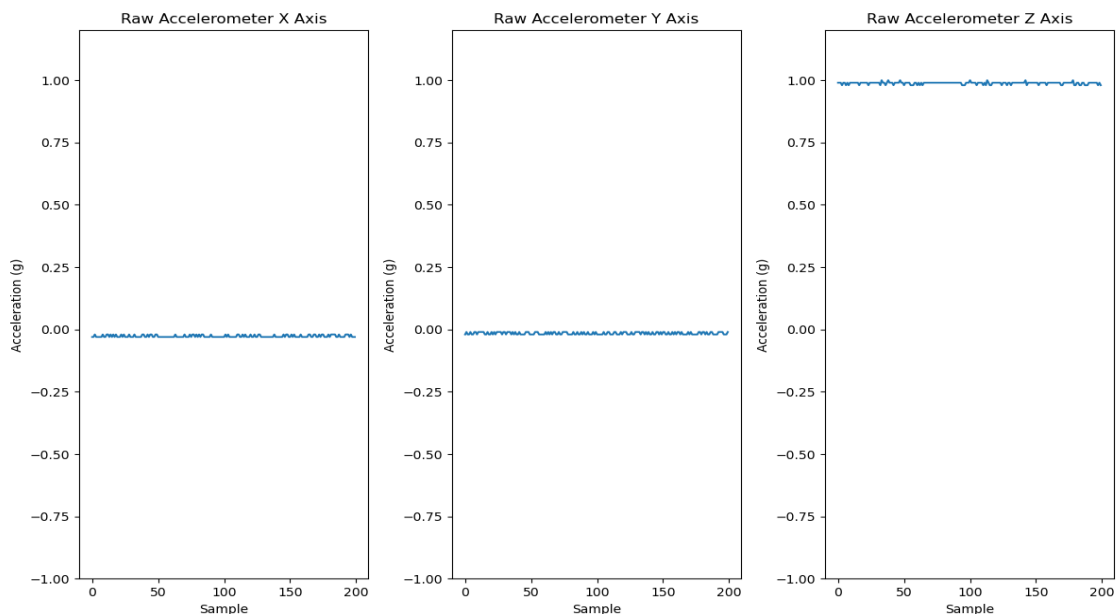


Figura 3.4: Gráficos dos valores de acelerómetro nos 3 eixos

### 3.2 Aplicação de Filtro de Média Móvel

Ao observarmos os gráficos de giroscópio na secção anterior, é visível a presença de ruído, e como tal, foi decidido aplicar um filtro digital com o objetivo de melhorar a precisão dos movimentos da plataforma. Por outro lado, olhando para o gráfico do acelerómetro

na mesma secção, nota-se a presença de ruído. No entanto, este não foi considerado suficiente para justificar a utilização de qualquer tipo de filtro, evitando, assim, um aumento no tempo de resposta do sistema.

### 3.2.1 Implementação do Filtro

Para decidir que tipo de filtro se utilizaria, começou-se por analisar um conjunto de amostras do giroscópio no domínio da frequência, através do uso de transformadas de Fourier. Como a taxa de amostragem utilizada é de 40 Hz, pelo teorema de Nyquist, é possível reproduzir sem erros de *aliasing*, componentes de frequência igual a metade da frequência de amostragem. Daí, na figura 3.5 é possível observar a contribuição de cada frequência até 20 Hz. Da análise deste gráfico, resulta a ausência de uma frequência que se destaque em relação às outras.

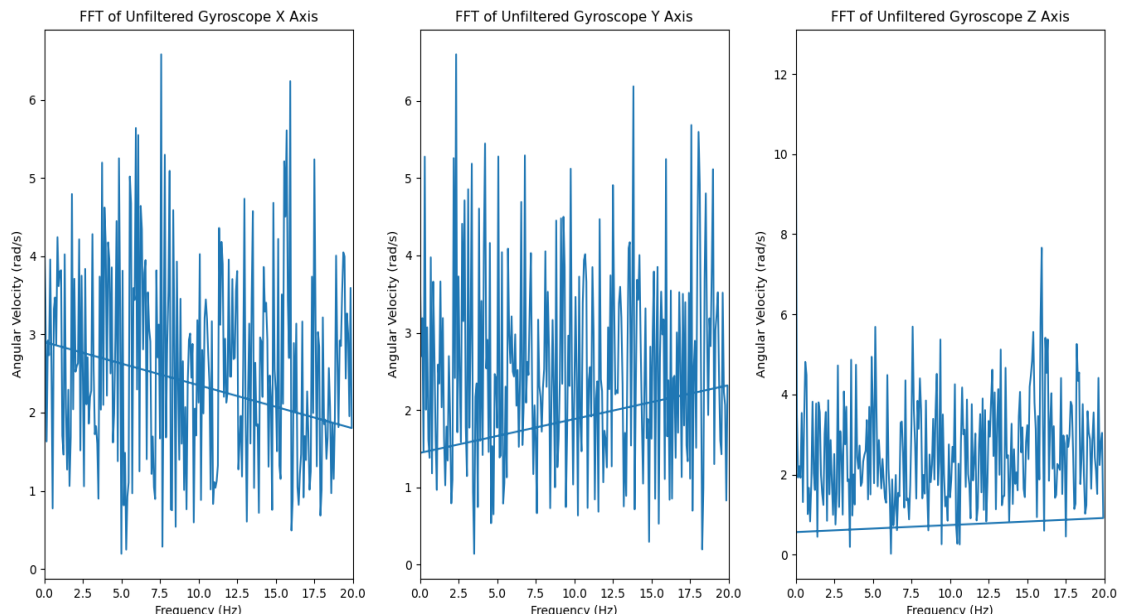


Figura 3.5: Gráfico da FFT do giroscópio nos 3 eixos

Como o sinal só está representado em frequências de até 20 Hz, é impossível retirar conclusões sobre o quanto do ruído do giroscópio provém de altas frequências, sugerindo que seria pertinente a aplicação de um filtro passa-baixo com uma frequência de corte igual à frequência de Nyquist. No entanto, como referido na secção 1.3.3, é benéfico manter as componentes de alta frequência do giroscópio de modo a que este mantenha a sua sensibilidade a mudanças angulares rápidas. Tendo em conta o fator anterior, foi escolhida a utilização de um filtro de média móvel devido à sua capacidade de remoção de ruído aleatório e de "alisar" o sinal.

Este tipo de filtros tem como principal característica a presença de uma janela amovível com um certo tamanho (número de pontos), que percorre o sinal enquanto é efetuado o cálculo da média dos pontos no interior da mesma.

Matematicamente, dado um sinal em função do tempo  $x[n]$ , o *output* da aplicação deste filtro a este sinal,  $y[n]$  será:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x[n - i] \quad (3.1)$$

Onde  $N$  representa o número de pontos na janela.

### 3.2.2 Resultados da Filtragem

Após a implementação no código, foram realizados alguns testes de modo a medir o desempenho do filtro. Inicialmente, foi feita uma análise de como é que o número de pontos da janela afetaria a quantidade de ruído nos valores de giroscópio e, como seria de esperar, aumentar o valor da janela resulta num sinal mais liso (comprovado pelas figuras 3.6, 3.7 e 3.8) mas também reduz a performance da plataforma por 2 razões, primeiro, produz um atraso maior na resposta do sistema devido à acumulação e processamento de mais dados antes de produzir o *output*, aumentando o intervalo de tempo entre a leitura dos sensores e a ação correspondente da plataforma; segundo, o uso de uma janela maior causa o aumento da ocupação da memória dinâmica do microcontrolador, pois é necessário armazenar mais dados antes de ser feito o cálculo de cada média. Isto pode causar falta de recursos para a realização de outras operações, resultando num tempo de processamento maior. Considerando que, o que se pretende é minimizar o tempo de resposta do sistema, optou-se por usar uma janela de 10 amostras.

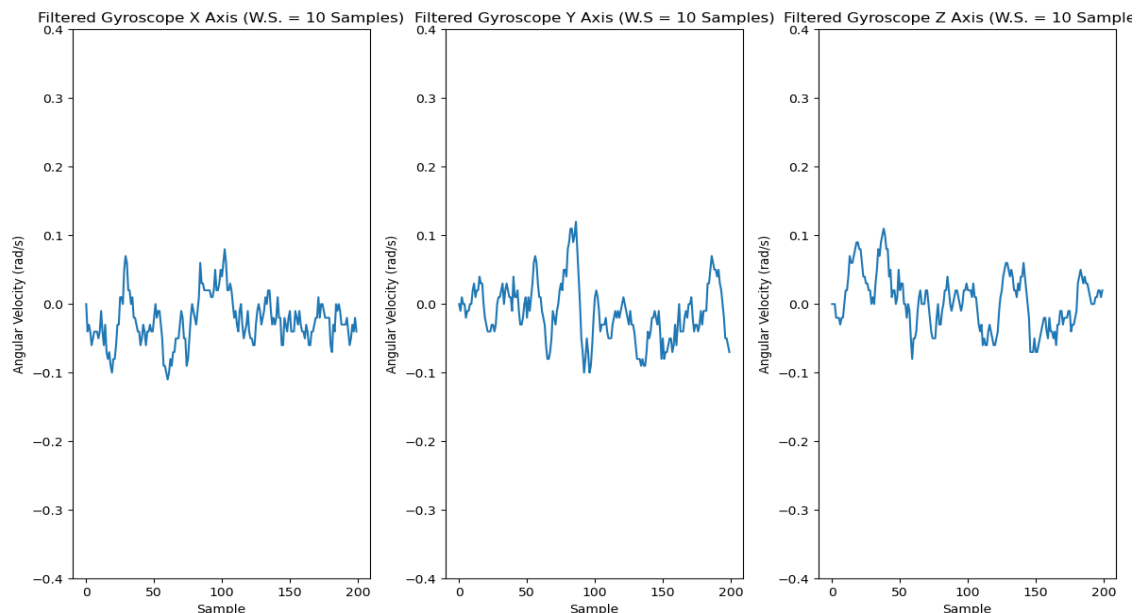


Figura 3.6: Gráfico do giroscópio filtrado nos 3 eixos com uma janela de 10 amostras

Para ver os efeitos da utilização do giroscópio filtrado nas medidas do filtro complementar (*roll* e *pitch*) foram recolhidas amostras destes valores com e sem a aplicação de filtro. Essas diferenças estão ilustradas nas próximas figuras.

### 3.2. APLICAÇÃO DE FILTRO DE MÉDIA MÓVEL

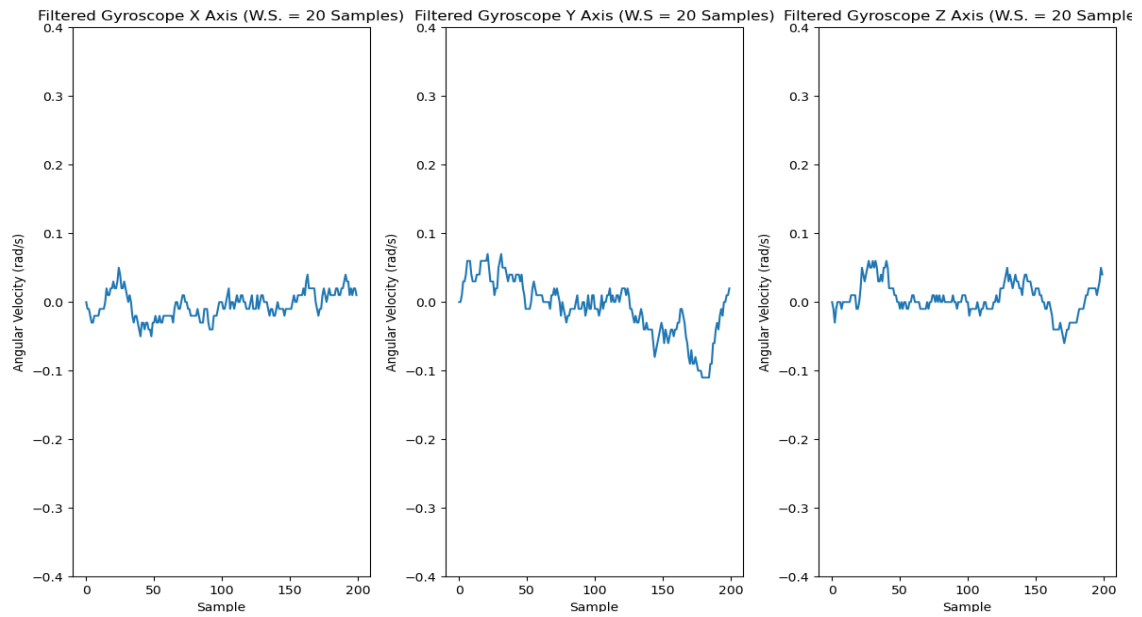


Figura 3.7: Gráfico do giroscópio nos 3 eixos com uma janela de 20 amostras

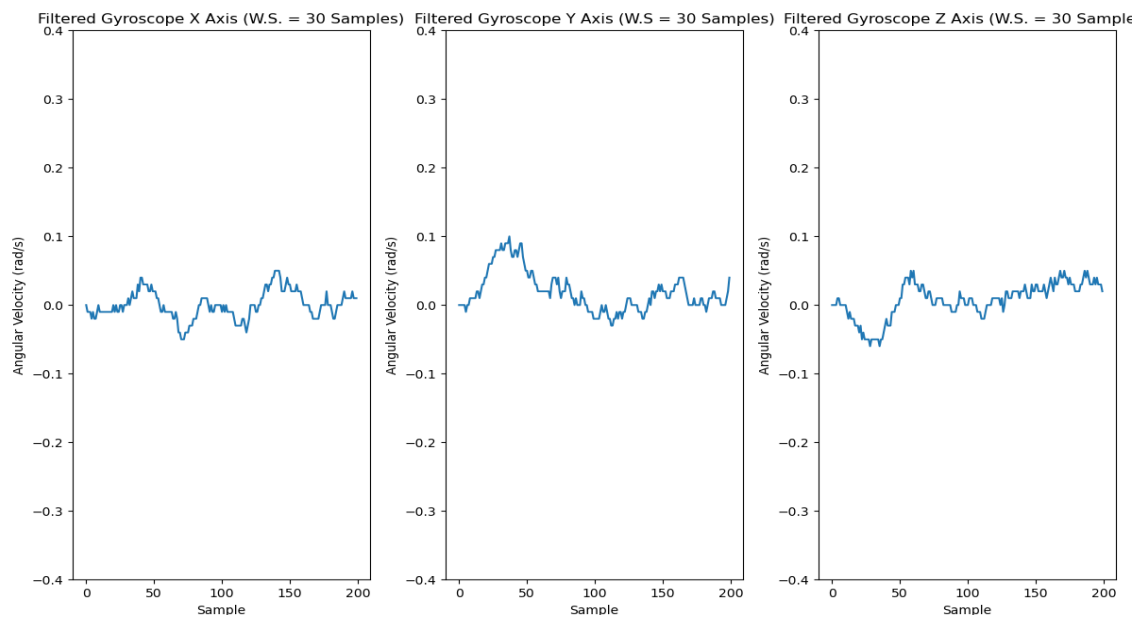


Figura 3.8: Gráfico do giroscópio nos 3 eixos com uma janela de 30 amostras

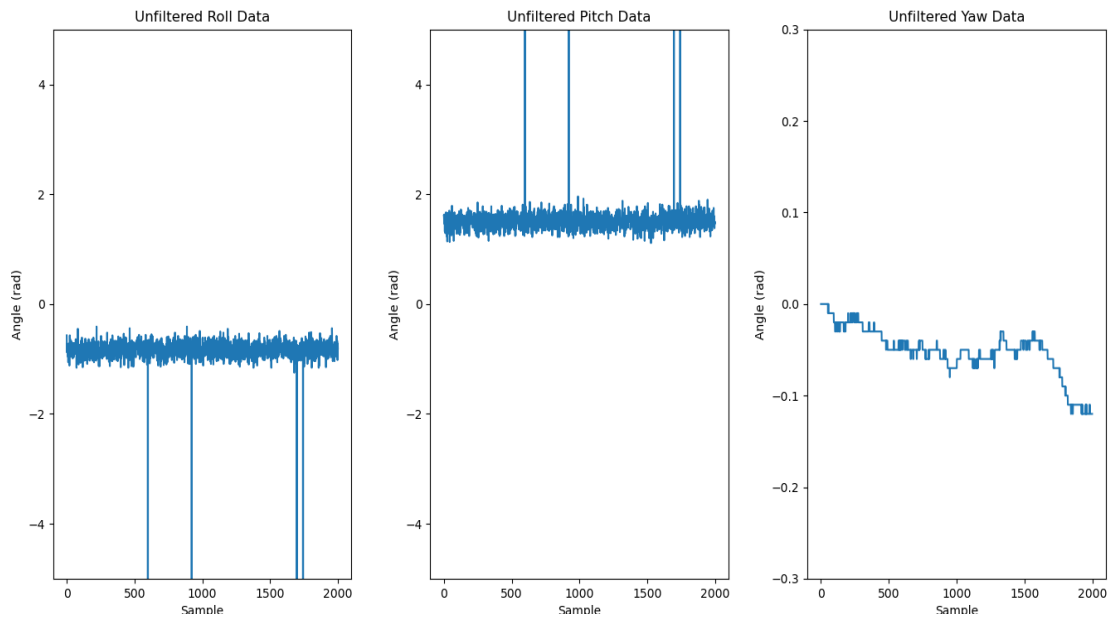


Figura 3.9: Gráfico de medidas do filtro complementar sem a aplicação do filtro de média móvel no giroscópio

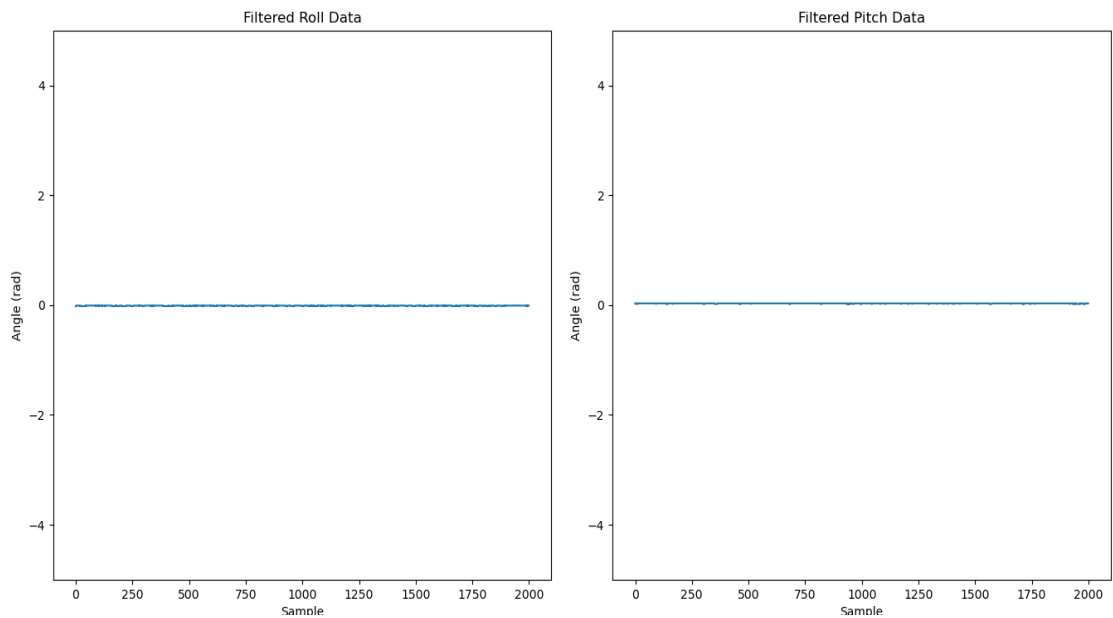


Figura 3.10: Gráfico de medidas do filtro complementar com a aplicação do filtro de média móvel no giroscópio

Nestes gráficos, repara-se na redução do ruído após a aplicação do filtro de média móvel. É também de notar que o gráfico do movimento de *yaw* foi incluído na figura 3.9 para demonstrar a existência de *drift*, descrita na secção 1.3.3.

### 3.2.3 Análise Temporal

Como teste final, fez-se uma avaliação da performance do filtro em termos temporais. Para tal, a plataforma foi posta a oscilar através de extensão e retração de 2 dos elos da mesma, enquanto a restante permanecia em repouso.

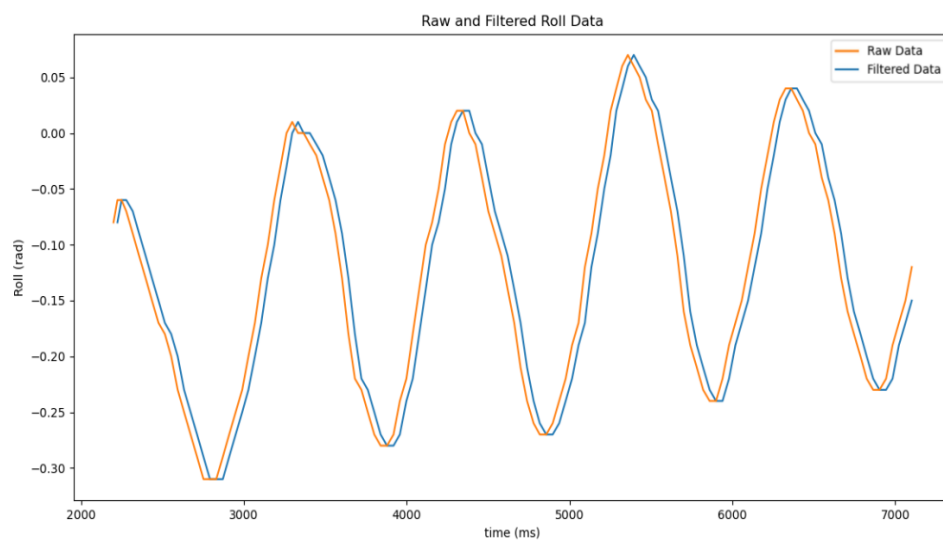


Figura 3.11: Gráfico do desempenho temporal do filtro para o movimento de *roll*

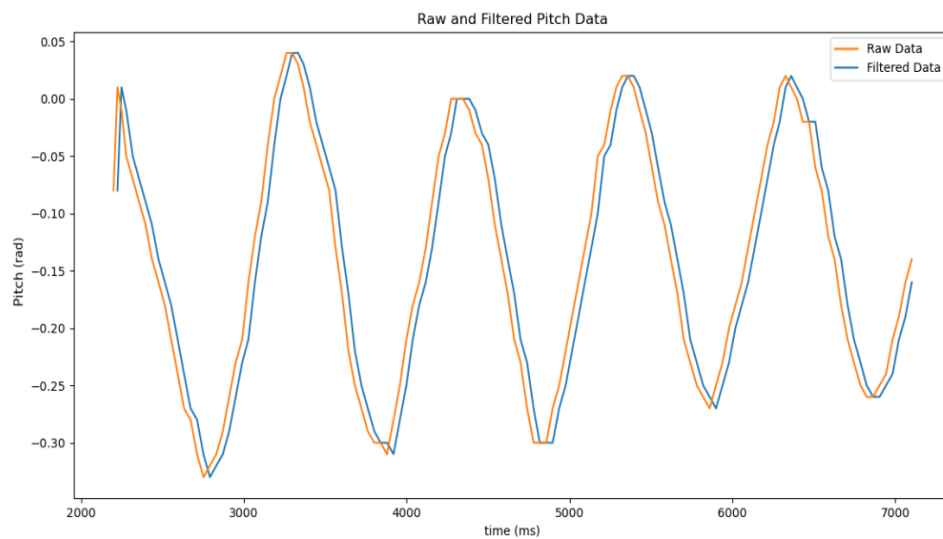


Figura 3.12: Gráfico do desempenho temporal do filtro para o movimento de *pitch*

Nas figuras 3.11 e 3.12 evidencia-se o atraso causado pelo filtro em relação à realidade (poucos milisegundos). Apesar deste atraso se incidir no tempo de resposta do sistema, devido à sua baixa relevância, a aplicação deste filtro considerou-se uma mais-valia para a *performance* da plataforma, face ao ganho de precisão conseguido, proveniente da redução do ruído.

No próximo capítulo será abordada a implementação prática dos sistema de controlo e descrito o modo de operação da plataforma. Será explorado em detalhe o desenvolvimento do algoritmo de controlo, usando um controlador PID, assim como o processo de inicialização do sistema que inclui a calibração dos sensores e configuração inicial da plataforma. Seguidamente, detalhar-se-á o ciclo de operação contínuo da plataforma concluindo com a descrição de um teste de resposta a perturbações exteriores e apresentação dos respetivos resultados.

## 4.1 Operação da Plataforma

Ao inicializar o sistema, a sua primeira ação será a calibração do giroscópio, seguida do reposicionamento do plano superior da plataforma. Isto é conseguido através da retração de todos os atuadores até ao seu limite inferior até que o plano fique no seu ponto mais baixo, e, logo a seguir, forçar a sua extensão simultânea a uma velocidade aproximadamente igual durante 1,5 segundos. Desta forma, garante-se que a plataforma se encontra aproximadamente nivelada e a uma altura conhecida, sendo este dado relevante para os cálculos dos comprimentos iniciais dos elos, que são efetuados logo após o processo de reposicionamento. Após este *setup*, inicia-se o ciclo de operação contínuo. A primeira etapa passa pela recolha de dados dos sensores, e, com base nos dados de acelerómetro e giroscópio, são calculados os valores de *roll* e *pitch* através do filtro complementar. Adicionalmente é medida a altura através do sensor HR-S04 e, caso esta seja inferior ou superior a um certo limite, dá-se novamente o reposicionamento do plano superior. A seguir, procede-se ao cálculo dos comprimentos desejados para cada elo de forma a que plataforma atinja uma posição nivelada, e, tendo em conta a diferença entre os resultados desses cálculos e os comprimentos dos elos atuais, um *output* de PID é gerado e convertido para um valor de PWM para, posteriormente, ser enviado para os *inputs* dos módulos L298N para o controlo dos atuadores. Para fins de clarificação foi elaborado um fluxograma deste funcionamento, o qual está representado na figura 4.1.

## 4.2 Implementação do Algoritmo de Controlo

O *output* dos atuadores é controlado através de uma função que funciona da seguinte forma: Inicialmente são calculadas as diferenças entre os comprimentos dos elos atuais

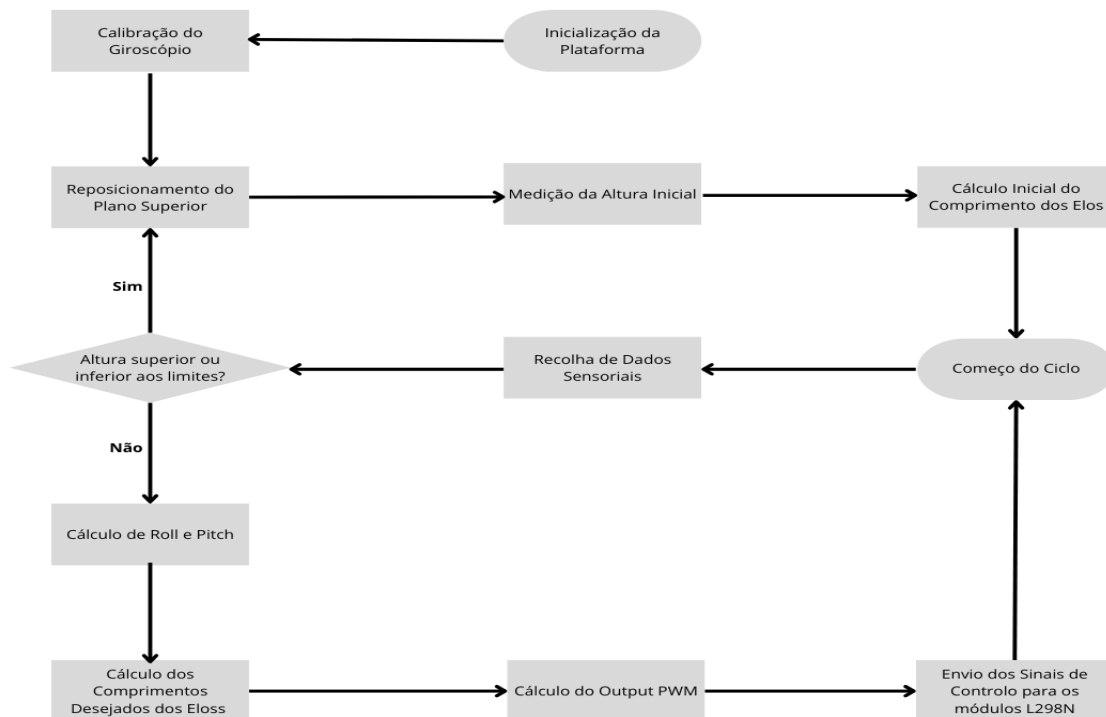


Figura 4.1: Fluxograma da plataforma Stewart

e os comprimentos desejados, que são determinados pela eq. 1.2, usando as leituras dos sensores como *input* da matriz  $R$ . Seguidamente, é calculada a diferença entre o erro atual e o anterior, dividida pelo intervalo de tempo entre eles ( $de(t)/dt$ ), e é também, efetuada a incrementação deste erro de modo a determinar o erro acumulado. Ambos estes cálculos são necessários para o cálculo do *output* através da equação 1.3. Multiplicando estes erros pelos seus ganhos respetivos e somando essas multiplicações, obtém-se o resultado do algoritmo de controlo. Através da função *constrain*, do ambiente Arduino, esse valor é forçado a permanecer entre 30 e 255, para 2 dos atuadores, e entre 50 e 255 para o restante. Os valores inferiores deste intervalo correspondem ao valor mínimo para que os motores consigam superar o seu atrito interno e comecem a rodar, sendo provável este valor ser diferente para cada motor. O valor superior corresponde ao *input* máximo da função mencionada anteriormente e como tal, também será o valor para o qual o atuador atinge a sua velocidade máxima. Este sinal é, então, transmitido pela função *analogWrite* (também do ambiente Arduino) para os pins da placa de controlo. Caso o valor do *output*, antes de ser restrito, seja negativo, o sinal PWM é enviado para o *pin* ao qual está ligado uma das entradas do módulo L298N que controlam o movimento de retração dos atuadores. Caso contrário, é enviado para o pin que controla a extensão dos mesmos. Depois desta etapa, é necessário atualizar os valores dos comprimentos de cada elo. A velocidade do atuador é estimada multiplicando a velocidade máxima dos motores por um fator que depende do output calculado. Esse fator é a proporção entre o output atual e os limites mínimo e máximo permitidos:

$$v_a = v_{max} \frac{u(t) - u_{min}}{u_{max} - u_{min}} \quad (4.1)$$

Esse valor é então multiplicado pelo tempo decorrido e somado ao comprimento atual dos elos se o output for positivo; caso contrário, é subtraído. Por fim, o erro é atualizado para ser usado na próxima iteração do ciclo no cálculo do fator  $de(t)/dt$ , ou seja passa a ser considerado o erro anterior.

#### 4.2.1 Teste de resposta a Perturbações

De modo a avaliar a *performance* da plataforma a eventuais situações de movimentos bruscos do navio, realizou-se um simples teste no qual uma caixa foi colocada sob uma dos elos da plataforma, causando uma inclinação da plataforma. Após a nivelção da plataforma, a caixa foi retirada abruptamente causando a "queda" da plataforma na mesa. Este *setup* está representado, na figura 4.2.



Figura 4.2: *Setup* para a realização do teste de resposta

##### 4.2.1.1 Resultados

Inicialmente foi considerado um controlador PID exclusivamente proporcional, ou seja os valores dos ganhos  $K_i$  e  $K_d$  foram anulados. O valor de  $K_p$  foi determinado através do registo contínuo dos *outputs* enquanto a plataforma foi submetida a mudanças de inclinação bruscas e com valor de  $K_p = 30$ , a plataforma apresenta oscilações mínimas enquanto mantém a capacidade de operar à sua velocidade máxima para perturbações, para as quais se considerou necessário este funcionamento mais rápido.

Foram gravados os valores de *roll* e *pitch* para cada ensaio. Os resultados do primeiro teste encontram-se na figura seguinte.

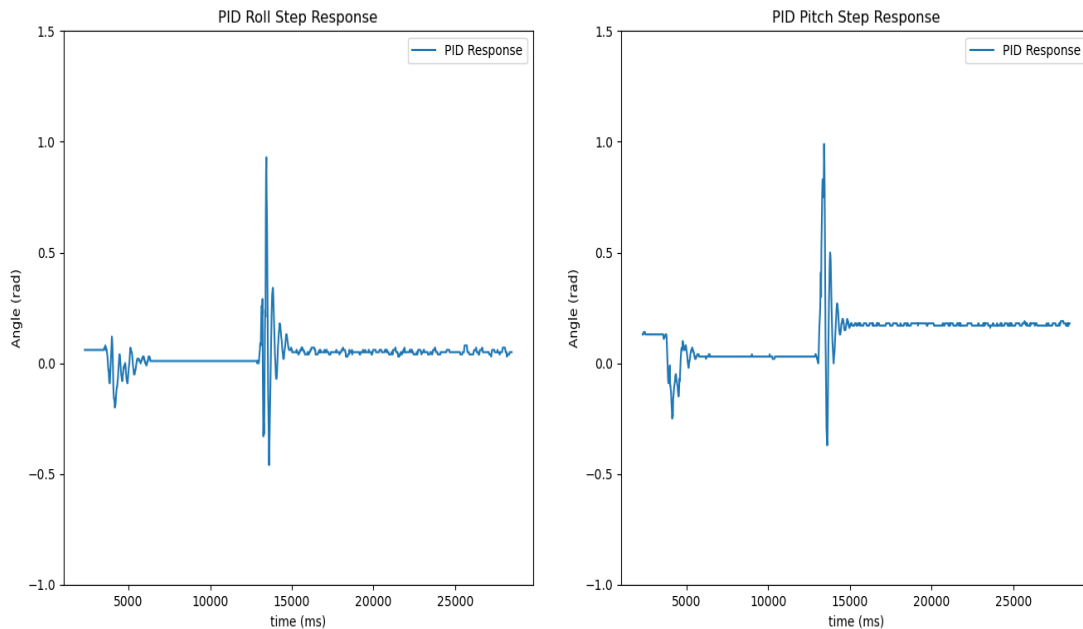


Figura 4.3: Gráficos de *roll* e *pitch* para um controlador  $K_p = 30$

Primeiramente, importa referir que o início da aquisição de dados deu-se antes da caixa ter sido colocada sob um dos elos da plataforma, daí a presença da pequena perturbação inicial. Ao analisar este gráfico de resposta, vemos a presença da estabilização da plataforma, praticamente sem oscilações após a colocação da caixa, seguida de uma perturbação significativa que corresponde à remoção brusca da mesma. É possível reparar nas oscilações dentro da perturbação, e mesmo já depois de a plataforma se "estabilizar", cuja origem está na falta de estabilidade estrutural, resultando em oscilações ao redor das junções da base, e não em falhas relacionadas com o algoritmo de controlo. Após a perturbação, é possível observar que o plano superior se estabilizou, em valores de *pitch* e *roll* ligeiramente superiores, sendo isto um exemplo de um erro *steady-state*. Como mencionado na secção 1.3.2, o aumento do ganho integral  $K_i$  pode resultar na minimização deste erro, e, sendo assim, isso foi efetuado nos próximos 2 ensaios.

Para a realização do segundo ensaio, foi considerado um controlador do tipo PI com o valor de  $K_i = 0.03$ , estando os resultados representados na figura 4.4.

No gráfico do segundo teste, repara-se numa diminuição do EST, no entanto, também se evidenciam mais oscilações, que novamente e principalmente originam em falhas estruturais do sistema mas neste caso, também provém do aumento do valor de  $K_i$ .

Apesar da redução do EST, foi ainda feita um 3º ensaio do mesmo teste, aumentando o valor do ganho integral para 0.3. Estes resultados constam na figura 4.5.

Pela análise do gráfico anterior, repara-se que, mais uma vez as, oscilações aumentam face ao ensaio anterior e que o EST aparenta ter diminuído.

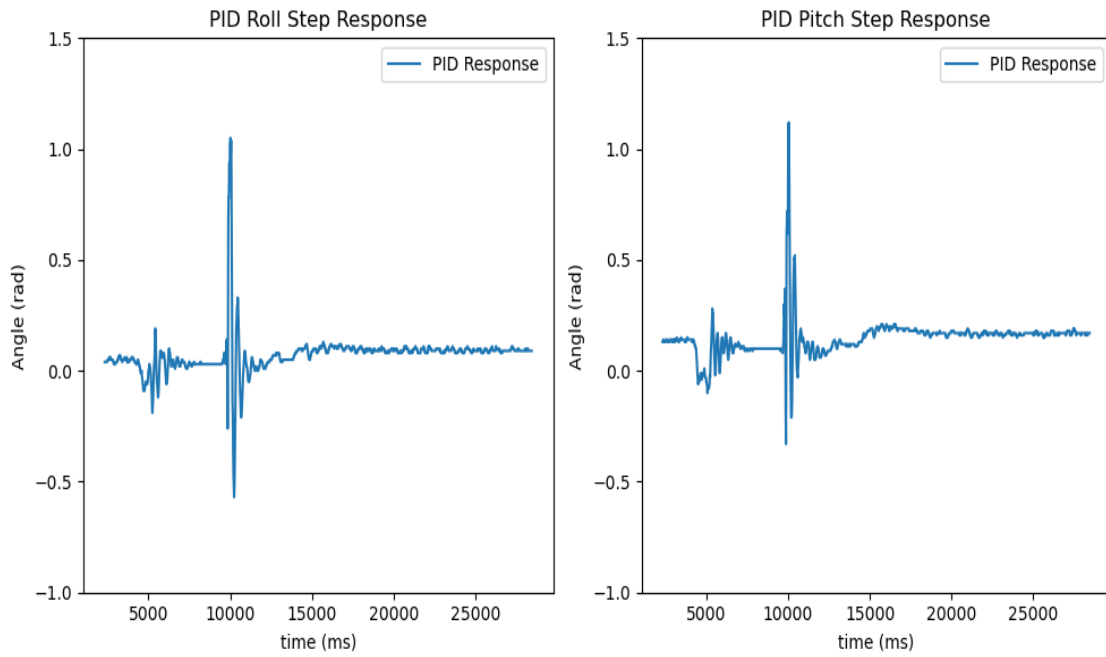


Figura 4.4: Gráficos de *roll* e *pitch* para um controlador  $K_p = 30$ ,  $K_i = 0,03$

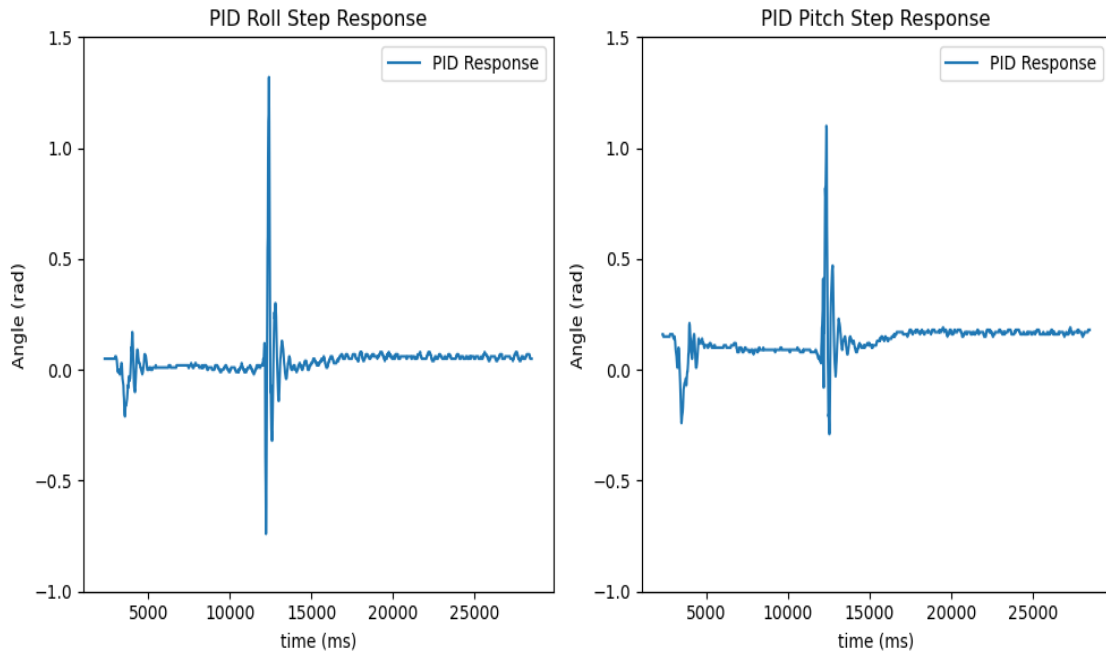


Figura 4.5: Gráficos de *roll* e *pitch* para um controlador  $K_p = 30$ ,  $K_i = 0,3$

Para se conseguir tirar conclusões concretas acerca da precisão da plataforma com cada uma das combinações de valores  $K_p$  e  $K_i$ , no fim de cada ensaio foram calculados os valores de EST. Estes valores encontram-se representados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de *roll* e *pitch*

	EST ( $\phi$ )	EST ( $\theta$ )
1º Ensaio	2,34°	8,30°
2º Ensaio	3,54°	3,89°
3º Ensaio	2,63°	3,64°

Como tal, conclui-se que a terceira combinação de ganhos PID apresenta a maior precisão face às alternativas. Sendo assim, considerou-se que este conjunto de valores de ganho proporcional e integral é aquele que apresenta a melhor *performance*, porque, apesar de apresentar uma presença mais significativa de oscilações, estas continuam a poder ser desprezáveis.

Para finalizar esta discussão, cumpre realçar, em primeiro lugar que, não foram registados mais dados de *pitch* e *roll* com valores de  $K_i$  superiores a 0.3 pois o erro acumulativo cresce rápido o suficiente para causar oscilações demasiado significativas e eventual perda de controlo completa, e que, apesar da provável redução de oscilações por causa de erros de controlo, o valor do ganho diferencial  $K_d$  manteve-se sempre igual a 0. Isto deve-se à subida do tempo de resposta que vem acompanhado do aumento deste valor, e como o tempo obtido é de aproximadamente 1,5 s e, como tal, excessivo para este tipo de aplicações, foi tomada a decisão de manter este valor nulo.

## 5.1 Conclusão

Nesta tese, foi explorado o desenvolvimento e implementação de uma Plataforma Stewart desenhada para a estabilização de objetos no seu plano superior. O Projeto envolveu um processo compreensivo, incluindo integração de sensores, o *design* e construção de 3 protótipos e a implementação de um algoritmo de controlo. Resumindo as várias etapas deste trabalho:

### 1. Teoria e Implementação da Cinemática Inversa

- As equações necessárias para o cálculo do comprimento dos atuadores para a obtenção de qualquer orientação da plataforma foram apresentadas, assim como a equação do *output* do método de controlo e ainda as equações necessárias para se conseguir realizar a fusão de sensores, através do uso do filtro complementar, provando-se cruciais para o controlo preciso dos movimentos da plataforma. Adicionalmente, devido ao uso de uma versão de 3 elos deste sistema, foi desenvolvida uma simulação simples com o objetivo de comparar os espaços de trabalho de ambas as alternativas, mostrando que esta versão possui um maior alcance em relação à versão de 6 elos;

### 2. Prototipagem

- Ao longo do curso deste trabalho, foram construídos 3 protótipos, com o objetivo comum de melhorar o anterior. O primeiro protótipo caracteriza-se pela escolha incorreta dos atuadores utilizados, pela sua facilidade em sobre-aquecer e quebrar. O segundo protótipo resolveu o problema anterior através da substituição do motor DC presente nos atuadores originais por um mais robusto e mais adequado para este tipo de aplicação. Por fim, de modo a corrigir alguns dos problemas de estabilidade, procedeu-se ao desenho de um terceiro protótipo;

### 3. Integração de sensores e calibração

- Foram utilizados um giroscópio, um acelerómetro e, ainda, um sensor de distância. Foi realizada a calibração do giroscópio para a remoção de *viés* assim como a filtragem de ruído, através de um filtro de média móvel, para garantir uma maior precisão no sistema;

#### 4. Desenvolvimento do Algoritmo de Controlo

- Foi implementado o controlo PID para a gestão dos comprimentos de cada atuador durante a operação da plataforma. Inicialmente, foi testado um controlador somente proporcional, tendo mais tarde sido aplicado uma componente integral para a eliminação de erros *steady-state*. Não foi utilizada a componente derivativa, de modo a evitar o aumento do tempo de resposta do sistema.

## 5.2 Perspetivas futuras

1. Todos os componentes impressos em 3D deverão ser fabricados com um material mais resistente, principalmente a peça que faz a conexão entre o motor e o parafuso esférico, pois tende a quebrar facilmente;
2. Deverá ser também estudada a possibilidade da colocação de interruptores fim-de-curso com o objetivo de limitar a extensão dos atuadores para além do seu limite superior;
3. O tempo de resposta pode ser reduzido significativamente ao utilizar-se motores com mais rotações por minuto. A utilização destes motores mais rápidos poderá provocar mais oscilações, sendo estas possivelmente reduzidas através da alteração do valor de  $K_d$ ;
4. Para facilitar a manutenção e compreensão do sistema, deverá ser projetada uma *printed circuit board* para a redução de conexões elétricas exteriores;
5. A longo prazo, deverão ser consideradas as aplicações das várias estratégias de controlo mencionadas na literatura mais recente. Estas poderão provar-se eficazes no melhoramento do desempenho da plataforma.

- 
- [1] J. M. Lourenço. *The NOVAthesis L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf> (ver p. i).
- [2] Y. Cai et al. «Sliding-mode control of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation using velocity feedforward». Em: *Ocean Engineering* 236 (2021), p. 109477. ISSN: 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109477>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821008799> (ver pp. 1, 4).
- [3] S. G. K. Anders Lohmann Madsen. «Design of Stewart Platform for Wave Compensation». Tese de mestrado. Fibigerstraede 16 DK - 9220 Aalborg East: Aalborg University, 2012 (ver pp. 1, 4, 5).
- [4] H. Chen et al. «Improved Fractional-Order PID Controller of a PMSM-Based Wave Compensation System for Offshore Ship Cranes». Em: *Journal of Marine Science and Engineering* (2022). URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10091238> (ver p. 2).
- [5] J. Woodacre, R. Bauer e R. Irani. «A review of vertical motion heave compensation systems». Em: *Ocean Engineering* 104 (2015), pp. 140–154. ISSN: 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801815001729> (ver p. 3).
- [6] U. A. Korde. «Active heave compensation on drill-ships in irregular waves». Em: *Ocean Engineering* 25.7 (1998), pp. 541–561. ISSN: 0029-8018. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(97\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(97)00028-0). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801897000280> (ver p. 3).
- [7] K. Do e J. Pan. «Nonlinear control of an active heave compensation system». Em: *Ocean Engineering* 35.5 (2008), pp. 558–571. ISSN: 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.11.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801807002508> (ver p. 3).
- [8] M. Furqan, M. Suhaib e N. Ahmad. «Studies on Stewart platform manipulator: A review». Em: *Journal of Mechanical Science and Technology* 31.9 (2017), pp. 4459–4470 (ver p. 4).

- [9] A. Campos et al. «An Active helideck testbed for floating structures based on a Stewart-Gough platform». Em: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008, pp. 3705–3710. DOI: [10.1109/IROS.2008.4650750](https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650750) (ver p. 4).
- [10] D. J. C. Salzmann. «Ampelmann : Development of the Access System for Offshore Wind Turbines». Em: 2010. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109760796> (ver pp. 4, 5).
- [11] Y. Tu et al. «Optimal design of SINS's Stewart platform bumper for restoration accuracy based on genetic algorithm». Em: *Mechanism and Machine Theory* 124 (2018), pp. 42–54. ISSN: 0094-114X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.01.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S094114X17317457> (ver p. 4).
- [12] Y. Cai et al. «Adaptive robust dual-loop control scheme of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation». Em: *Mechanism and Machine Theory* 164 (2021), p. 104406. ISSN: 0094-114X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104406>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S094114X21001646> (ver p. 4).
- [13] H. Wu et al. «Your Paper Title». Em: *J. Phys.: Conf. Ser.* 2458 (2023), p. 012040. DOI: [10.1088/1742-6596/2458/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2458/1/012040) (ver p. 4).
- [14] D. Stewart. «A Platform with Six Degrees of Freedom». Em: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 180.1 (1965), pp. 371–386. DOI: [10.1243/PIME\\_PROC\\_1965\\_180\\_029\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02). eprint: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1965\\_180\\_029\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02). URL: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1965\\_180\\_029\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02) (ver p. 5).
- [15] P. Corke. «A robotics toolbox for MATLAB». Em: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 3.1 (1996), pp. 24–32. DOI: [10.1109/100.486658](https://doi.org/10.1109/100.486658) (ver p. 6).
- [16] A. Koszewnik, K. Troc e M. Slowik. «PID Controllers Design Applied to Positioning of Ball on the Stewart Platform». Em: *Acta Mechanica et Automatica* 8 (2014-12). DOI: [10.2478/ama-2014-0039](https://doi.org/10.2478/ama-2014-0039) (ver p. 7).
- [17] R. Borase et al. «A review of PID control, tuning methods and applications». Em: *International Journal of Dynamics and Control* 9 (2021-06). DOI: [10.1007/s40435-020-00665-4](https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4) (ver p. 7).
- [18] C. J. Montalvo. *Aerospace Mechanics and Controls*. Last Update: July 22, 2024. University of South Alabama, 2024 (ver p. 8).
- [19] M. Kok, J. D. Hol e T. B. Schön. 2017. DOI: [10.1561/20000000094](https://doi.org/10.1561/20000000094) (ver pp. 8–10).
- [20] Y. Lu et al. «Kinematics/statics analysis of a novel 2S PS + PRR PR parallel manipulator». Em: *Mechanism and Machine Theory - MECH MACH THEOR* 43 (2008-09), pp. 1099–1111. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2007.10.002](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.10.002) (ver p. 10).

- [21] M. Abedin-Nasab, Y.-j. Yoon e H. Zohoor. «Exploiting Higher Kinematic Performance - Using a 4-Legged Redundant PM Rather than Gough-Stewart Platforms». Em: 2012-03. ISBN: 978-953-51-0437-7. DOI: [10.5772/32141](https://doi.org/10.5772/32141) (ver p. 10).
- [22] InvenSense. *MPU-9250 Register Map and Descriptions*. Rel. téc. RM-MPU-9250A-00. Release Date: 01/07/2015. InvenSense Inc., 2015 (ver p. 12).
- [23] I. Inc. *MPU-9250A Datasheet*. Rel. téc. PS-MPU-9250A-01. Versão 1.1. Tel: +1 (408) 988-7339, Fax: +1 (408) 988-8104, Website: [www.invensense.com](http://www.invensense.com). 1745 Technology Drive, San Jose, CA 95110 U.S.A.: InvenSense Inc., 2016-06 (ver p. 12).
- [24] I. Amerini et al. «Robust smartphone fingerprint by mixing device sensors features for mobile strong authentication». Em: vol. 28. 2016-02. DOI: [10.2352/ISSN.2470-1173.2016.8.MWSF-088](https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2016.8.MWSF-088) (ver p. 13).
- [25] C. Patel e P. McCluskey. «Modeling and simulation of the MEMS vibratory gyroscope». Em: 2012-05, pp. 928–933. ISBN: 978-1-4244-9533-7. DOI: [10.1109/ITHERM.2012.6231524](https://doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231524) (ver p. 13).
- [26] A. D'Alessando e G. D'Anna. «Retrieval of Ocean Bottom and Downhole Seismic sensors orientation using integrated MEMS gyroscope and direct rotation measurements». Em: *Advances in Geosciences* 40 (2014-12), pp. 11–17. DOI: [10.5194/adgeo-40-11-2014](https://doi.org/10.5194/adgeo-40-11-2014) (ver p. 14).
- [27] G. M. Vuyyuru e D. Talasila. «Hand Gesture Gaming using Ultrasonic Sensors Arduino». Em: *International Journal of Engineering Research and V9* (2020-06). DOI: [10.17577/IJERTV9IS060668](https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS060668) (ver p. 16).
- [28] STMicroelectronics. *L298N Dual Full-Bridge Driver*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>. STMicroelectronics. 2023 (ver p. 17).
- [29] Hoodland Technology Co., Ltd. *High-Speed Small Electric Linear Actuator*. Accessed: 2024-08-16. 2024. URL: [https://hoodland.en.made-in-china.com/product/vGXRcj0MQDVC/China-High-Speed-Small-Electric-Linear-Actuator.html?pv\\_id=1i6gan1jtdc7&faw\\_id=1i6ganakn9d](https://hoodland.en.made-in-china.com/product/vGXRcj0MQDVC/China-High-Speed-Small-Electric-Linear-Actuator.html?pv_id=1i6gan1jtdc7&faw_id=1i6ganakn9d) (ver p. 17).
- [30] Eaton. *Volume 8: Sensing Solutions*. Electrical Sector Solutions Catalog. 2015 (ver p. 17).



2024

Desenvolvimento de uma Plataforma Stewart como Suporte Inercial Aplicado a uma Embarcação:  
Dissertação Para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Física

Henrique Cota

