

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Plataforma para Águas Rasas

Sistema de Equilíbrio

Manuel Luís Miranda de Moraes

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Aníbal Castilho Coimbra de Matos

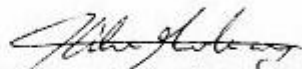
26 de Fevereiro de 2014

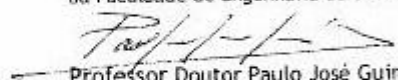
A Dissertação intitulada

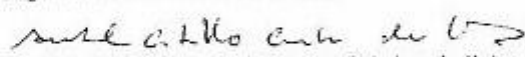
“Plataforma para Águas Rasas - Sistema de Equilíbrio”

foi aprovada em provas realizadas em 21-02-2014

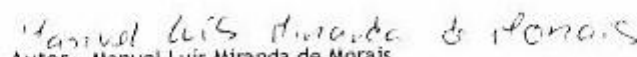
o júri


Presidente Professor Doutor Hélio Mendes de Sousa Mendonça
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


Professor Doutor Paulo José Guimarães Garrido
Professor Associado do Departamento de Eletrónica Industrial da Escola de
Engenharia da Universidade do Minho


Professor Doutor Anibal Castilho Coimbra de Matos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.


Autor - Manuel Luis Miranda de Moraes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Quer da necessidade de operar em ambientes aquáticos adversos, quer do ponto de vista da redução de custos no que toca, por exemplo, à sensorização ou atuação em áreas aquáticas, surge o desafio de desenvolver uma embarcação capaz de atuar em meio aquático pouco profundo, de custo reduzido e boa eficiência.

Neste documento pretende-se analisar a prospeção de veículos do género e da sua robustez e aplicabilidade, bem como demonstrar o processo para o desenvolvimento de um concorrente à altura.

Pretende-se a operabilidade em águas pouco profundas e prevê-se a possibilidade de alterar a estrutura de um veículo pré existente, ou, inclusivamente, o desenvolvimento de um casco de raiz.

Uma forte possibilidade de implementação passa pela adaptação de um kayak monolugar de competição, de águas calmas, para um veículo do tipo USV (veículo de superfície não tripulado), de onde se infere imediatamente a possibilidade de criar um sistema de equilíbrio da embarcação devido à sua instabilidade.

O projeto envolverá as componentes mecânica, energética e computacional, destacando-se os processos de sensorização e atuação. Este trabalho enquadra-se nas atividades da Unidade de Robótica e Sistemas Inteligentes do INESC TEC de resposta à crescente procura de soluções robóticas (<http://oceansys.fe.up.pt>).

Abstract

From the necessity of operating in adverse environments and with the goal of reducing operation costs, the development of an Autonomous Surface Vehicle presents itself as a reliable and attractive option. Being able to carry a small payload or a set of sensors and cameras, while operating in an inhospitable or simply shallow environment, increases the demand for this kind of systems. Cost reduction and increasing efficiency are also seen as advantages while comparing with manned vehicles.

In the following document, a market survey and a critical analysis of some existing systems are done as a first approach, determining typical components and characteristics. The development of a self-operating vehicle is set as an objective. As possibilities for the base platform are two main options. The use of a preexisting boat or board or the development of a new one, were considered. For its low drag, a flat-water competition kayak reveals itself as a very unstable surface vehicle, however, being able to move fast and efficiently.

Special attention is given to the development of an equilibrium system, able to stand the vehicle in the upright position. Based in an inverted flywheel pendulum, a Matlab model and a theoretical and practical analysis were made.

On the project scope are mechanic, energetic and computational components. This project is integrated in the activities of the Robotics and Intelligent Systems Unit of INESC-Porto in response to the growing demand for robotic solutions.

Agradecimentos

Expresso desde logo o meu especial agradecimento ao Prof. Aníbal Matos, pela excelente orientação ao longo do desenvolvimento do projeto.

A toda a equipa de investigadores do *Ocean Systems Group*, que sempre se mostrou disponível, bem como ao Sr. Fernando e ao Jorge, das oficinas, que possibilitaram a construção do protótipo de testes.

Aos meus colegas e amigos, pelo apoio, disponibilidade e auxílio prestado.

Por último gostaria de expressar o meu agradecimento à família, nomeadamente aos meus pais e à minha irmã.

Índice

RESUMO	V
ABSTRACT	VII
AGRADECIMENTOS	IX
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Motivação</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 <i>Veículos Aquáticos não tripulados</i>	3
2.1.1 <i>Aplicabilidade</i>	3
2.1.2 <i>Levantamento de USV's no mercado e características</i>	4
2.1.3 <i>Conclusões do levantamento de USV</i>	9
2.3 <i>Sistema de equilíbrio</i>	10
2.3.1 <i>Sistemas semelhantes analisados</i>	11
2.3.2 <i>Análise comparativa dos projetos analisados</i>	16
CAPÍTULO 3 IDEALIZAÇÃO DE ARQUITETURA FUNCIONAL	21
3.1 <i>Visão global do sistema</i>	21
3.2 <i>Principais subsistemas</i>	22
CAPÍTULO 4 ESCOLHA DE COMPONENTES.....	25
4.1 <i>Controlador, IMU e GPS</i>	25
4.2 <i>Propulsor</i>	31
4.3 <i>Direcionamento</i>	33
4.4 <i>Comunicação</i>	34
4.5 <i>Estrutura</i>	36
4.6 <i>Baterias</i>	36

CAPÍTULO 5 SISTEMA DE EQUILÍBRIO.....	39
5.1 Descrição.....	39
5.2 Componentes Mecânicos	42
5.3 Componentes Eletrônicos.....	43
5.4 Interface entre componentes.....	48
5.4.1 Protocolo de comunicação com IMU.....	50
5.5 Modelo Matlab	52
5.5.1 Modelo em Simulink	52
5.5.2 Determinação de função de transferência	54
5.6 Algoritmos implementados.....	57
5.6.1 No modelo	57
5.6.2 No PC	59
5.7 Setup de testes.....	61
CAPÍTULO 6 TESTES PRÁTICOS	63
6.1 Ensaios de Tempos de Resposta do Controlador	63
6.2 Ensaios do Conjunto Controlador de Velocidade e Motor	64
6.3 Ensaios do IMU	68
6.4 Ensaios do Modelo Completo.....	68
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	75
7.1 Conclusões	75
7.2 Trabalhos futuros.....	76
CAPÍTULO 8 REFERÊNCIAS.....	79
ANEXO A. ESQUEMA DE LIGAÇÕES	81
ANEXO B. COMPONENTES MECÂNICOS.....	82
Anexo B1 – Barra L.....	82
Anexo B2 - Volante de inércia	83
Anexo B3 – Peça para acoplamento	84
Anexo B4 – Esquema de Furação do volante	84
ANEXO C. CÓDIGO MATLAB IMPLEMENTADO	85
ANEXO D. CÓDIGO ARDUINO IMPLEMENTADO	88
ANEXO E. LIGAÇÕES ELÉTRICAS DO CONTROLADOR.....	92

Lista de figuras

Figura 1 - Graus de liberdade de uma embarcação, retirado de (wikipedia.org 2008, Ship_motions).....	10
Figura 2 - Sistema de estabilização com barbatanas (Gheorghe Samoilescu 2002)	11
Figura 3 - Estabilizador do tipo "barbatana" (Gheorghe Samoilescu 2002)	12
Figura 4 - Estabilização giroscópica de bicicleta (Pom Yuan 2011)	14
Figura 5 - Sistema de bicicleta auto estabilizada	14
Figura 6 - Bicicleta como sistema de pêndulo invertido (Yamakita, Utano, and Sekiguchi 2006).....	15
Figura 7 - Bicicleta como sistema de duplo pêndulo (Yamakita, Utano, and Sekiguchi 2006) .	15
Figura 8 - Forças envolvidas em sistema de massa móvel	18
Figura 9 - Modelo de kayak de competição	21
Figura 10 - Interligação dos subsistemas do projeto	22
Figura 11 - Elementos de <i>hardware</i> previstos	22
Figura 12 - Kayak de competição Imagem retirada de www.mar-kayaks.pt/pt/	36
Figura 13 - Modelo à escala idealizado.....	40
Figura 14 - Modelo de pêndulo invertido com volante de inércia Imagem retirada (Sibhan Coady 2012)	41
Figura 15 - Paralelismo de modelos e embarcação	42
Figura 16 - Modelo à escala implementado- ligação dos componentes mecânicos.....	43
Figura 17 - Posição do IMU no modelo	46
Figura 18 - Comparativo de sistemas Arduino Retirado de http://learn.adafruit.com/	47
Figura 19 - Interface entre componentes do modelo.....	48
Figura 20 - Diagrama de sequência do controlo do modelo	49
Figura 21 - Configurações da porta de comunicação	50
Figura 22 - Estrutura de dados das mensagens	51
Figura 23- Representação do formato float32	51
Figura 24 - Modelo Simulink Implementado	53
Figura 25 - Resultado de simulação Matlab, $\theta_0 = 7$	54

Figura 26 - Algoritmo implementado	57
Figura 27 - Interface java implementado.....	60
Figura 28 - Diagrama de classes do interface java implementado	60
Figura 29 - Vista superior da montagem de testes	61
Figura 30 - Vista frontal da montagem de testes	61
Figura 31 - Tempos de processamento do controlador	63
Figura 32 - Variação de tensão de alimentação	64
Figura 33 - Relação referência-velocidade	65
Figura 34 - Relação entre velocidade e referência	65
Figura 35 - Variação da velocidade de referência	66
Figura 36 - Tempo de resposta do motor	66
Figura 37 - Resposta em velocidade do motor	67
Figura 38 - Resposta do controlador de velocidade do motor a diferentes degraus	67
Figura 39 - Ensaio do sistema de equilíbrio	69
Figura 40 - Tempos de queda para diferentes velocidades.....	69
Figura 41 - Tempos de queda com diferentes massas	70
Figura 42- Tempos de queda com controlador proporcional	72
Figura 43 - Ensaio com ganho proporcional	73
Figura 44 - Ensaio com controlador do tipo PI	73

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação de sistemas USV no mercado	8
Tabela 2 - Análise comparativa de sistemas	16
Tabela 3 - Controladores Arduino no mercado	27
Tabela 4 - Sensores inerciais disponíveis no mercado.....	27
Tabela 5 - Módulos do tipo Ardupilot.....	29
Tabela 6 - Projetos baseados em Raspberry pi	30
Tabela 7 - Comparação motor térmico e elétrico.....	32
Tabela 8 - Sistemas de controlo rádio no mercado	35
Tabela 9 - Características do sistema x-bee	35
Tabela 10 - Características de kayak de competição.....	36
Tabela 11 - Comparação de tipos de baterias (Husain 2003)	37
Tabela 12 - Componentes mecânicos do modelo à escala.....	42
Tabela 13 - Características do motor DC utilizado.....	44
Tabela 14 - Características do controlador do motor	44
Tabela 15 - Características do IMU em modo AHRS.....	45
Tabela 16 - Características do IMU em modo Compass	45
Tabela 17 - Características de comunicação do IMU	45
Tabela 18 - Estrutura da mensagem para definição de grandeza a medir.....	51
Tabela 19 - Massas e posição do centro de massa dos componentes	52
Tabela 20 - Grandezas utilizadas no modelo Matlab	54
Tabela 21 - Parâmetros calculados	56

Tabela 22 - Frequência de amostragem do IMU	68
Tabela 23 - Determinação de constante de tempo para M1 e L1	71
Tabela 24 - Determinação de constante de tempo para M2 e L2	71

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

3D	Tridimensional
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>
AHRS	<i>Attitude and heading reference system</i>
BLDC	<i>Brushless DC</i>
DC	<i>Direct current</i>
DEEC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
DSP	<i>Digital signal processor</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LAN	<i>Local area network</i>
LCD	<i>Liquid-crystal display</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LSB	<i>Least significant bit</i>
Ni-Ca	<i>Nickel-cadmium</i>
Ni-MH	<i>Nickel-metal hydride</i>
PC	<i>Personal computer</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
RC	<i>Radio Controlled</i>
SD	<i>Secure Digital (Card)</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>
UAV	<i>Unmanned aerial vehicle</i>
USV	<i>Unmanned surface vehicle</i>

Lista de símbolos

ω	Frequência angular
α	Ângulo
a	Aceleração
m	Massa
T	Binário
F	Força
x	Posição num eixo
v	Velocidade linear
θ_B	Ângulo de roll- inclinação, tal como descrito na figura
$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$	Primeira e segunda derivadas da posição (inclinação)
θ_f	Ângulo de rotação do volante de inércia
$\dot{\theta}_f$	Velocidade angular
m_B	Massa da embarcação
m_f	Massa do volante de inércia “flywheel”
J_B	Momento de inércia em relação ao ponto pivot
J_f	Momento de inércia do volante
τ	Constante de tempo

Capítulo 1

Introdução

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um veículo autónomo de superfície, não tripulado, (USV) desde a sua idealização, modelização e simulação até ao desenvolvimento de código de controlo e interligação de sistemas necessários à sua automatização.

Como pontos fulcrais identificam-se a capacidade de manter o equilíbrio vertical, de seguimento de uma rota, a possibilidade de operação por controlo remoto, a inclusão de sistemas de comunicação devidamente imunizados a perturbações quer a nível de ruído quer furtivas, o seguimento do estado do veículo em tempo real e a sua posição, a estimação e controlo das variáveis associadas à sua deslocação, como velocidade e autonomia, etc.

O enfoque passa no entanto pelo desenvolvimento de um sistema de equilíbrio capaz de fazer com que qualquer embarcação possa ver reduzido o arrasto na água, pelo aumento da instabilidade mas consequentemente redução do atrito.

1.1 Motivação

Da aplicação de veículos não tripulados e autónomos advêm imediatamente vantagens no que toca à redução do perigo para os humanos, redução de custos de desenvolvimento e operabilidade, acesso a áreas remotas e de elevada densidade de vegetação (acima ou abaixo do nível da água), bem como à eficiência energética. Nesse sentido e com a massificação da utilização de diversos componentes eletrónicos torna-se mais apelativo o desenvolvimento de projetos neste campo.

Do facto de o autor do projeto ser praticante de desportos náuticos, nomeadamente canoagem, adveio a restante motivação para o projeto. Pelo contacto com embarcações no dia-a-dia e de alguma perceção prática do funcionamento das mesmas surgiu o desafio de controlar uma embarcação, nomeadamente no que toca à manutenção do seu equilíbrio vertical e consequente redução do atrito no meio aquático. Surgiram por associação as possibilidades de utilização para sensorização de águas, por exemplo, em zonas de prática balnear ou desportiva, registo de correntes e caudais de cursos de água, registo de variáveis

associadas ao aumento de rendimento de um atleta de alta competição, desenvolvimento de embarcações mais hidrodinâmicas e ainda de registo fotográfico de áreas pouco acessíveis ou competições desportivas.

1.2 Objetivos

Os objetivos de trabalho a desenvolver durante a dissertação são:

1. Analisar as soluções existentes no mercado e desenvolver um veículo aquático não tripulado, capaz de operar em águas pouco profundas.
2. Projetar e implementar um conjunto de subsistemas a incluir no projeto, destacando-se os sistemas de equilíbrio, navegação, armazenamento e conversão de energias e tração elétrica.
3. Modelar e desenvolver, ao nível de *software* e *hardware*, o conjunto de subsistemas e possibilitar o interface entre estes e com um operador.
4. Desenvolver um protótipo capaz de satisfazer um conjunto de testes a elaborar.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Veículos Aquáticos não tripulados

2.1.1 Aplicabilidade

A aplicabilidade de veículos não tripulados destaca-se desde logo aquando da necessidade de aplicação em ambientes hostis. Quer sejam aéreos, terrestres, aquáticos ou anfíbios, os veículos autónomos destacam-se pela facilidade de atuação em zonas de acessibilidade reduzida, quer devido à dimensão necessária para operar quer ao potencial risco envolvido em intervenções humanas.

Emergem desde logo as aplicações no âmbito militar. “Esta deve-se essencialmente à constatação do enorme potencial dos sistemas baseados em veículos autónomos para aumentar a capacidade operacional militar das forças, sobretudo no atual contexto de crescente assimetria das ameaças.(Pereira 2005)” Destacam-se, portanto, os investimentos em veículos aquáticos por parte das forças militares. Os USV constituem ferramentas estratégicas no que toca, por exemplo, às missões antiterroristas e de vigilância/reconhecimento, combate litoral, deteção de minas subaquáticas e investigação de objetos suspeitos, defesa antissubmarino, operações fluviais, segurança portuária, etc.

Outros exemplos de aplicações, quer de caráter militar quer civil, constituem também áreas de intervenção por parte dos veículos aquáticos não tripulados/autónomos. Neste campo, constituem exemplos de aplicação a inspeção e reparação de cascos de navios e cabos/oleodutos/plataformas *offshore*, seguimento de embarcações, utilização no combate a incêndios e a análise química de águas, busca e salvamento, pesquisa e medição de parâmetros oceanográficos, mapeamento de vegetação, correntes, características do subsolo aquático, mapeamento, calibração e ampliação da cobertura de redes sem fios, estudo de comportamentos e padrões migratórios de fauna e flora aquáticas, deteção e mitigação de problemas causados pelo derramamento de substâncias contaminantes, auxílio na atuação de mergulhadores.

A vasta aplicabilidade das soluções referidas não constitui, no entanto, condição suficiente para a viabilidade dos USV. Esta depende obviamente da possibilidade de superação perante os veículos tripulados. Esta superação pode ser traduzida na redução de risco para o homem, diminuição de custos no desenvolvimento/produção de veículos, aumento da autonomia e capacidade de carga pela eliminação de restrições de *design* causadas pela necessidade de acomodação de tripulantes.

Sensores e componentes eletrónicos de dimensões reduzidas, bem como a utilização de dispositivos de comunicação, permitem o desenvolvimento de volumes físicos com elevada capacidade de recolha de informação. A inclusão de câmaras, sensores de diversos tipos e dispositivos de navegação e posicionamento num volume e carga útil relativamente reduzidos constituem uma marca de importância significativa.

Embora a massa espectável para um sistema de baixa complexidade, onde se inclui alguma capacidade de controlo, sensorização, vigilância e reconhecimento seja baixa o aumento mesmo quando relativo a um sistema mais complexo, pode exigir um *Payload* mais elevado, bem como um aumento significativo da estabilidade e autonomia.

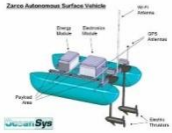
Uma grande parte dos USV provém de plataformas originalmente desenhadas para serem tripuladas, o que pressupõe a necessidade de lidar com flutuações e interferência água/ar, para lidar com a acomodação de ocupantes humanos. Essa limitação não se aplica aos veículos não tripulados, pelo que a adesão a plataformas semi-submersíveis ou completamente submersíveis pode aumentar a furtividade e estabilidade dos veículos.

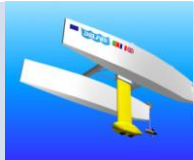
Como principal desvantagem dos veículos originalmente desenhados para a utilização como USV passa pela dificuldade de inclusão de novos equipamentos, uma vez que estes podem ter de competir por espaço limitado e originalmente não considerado. A adaptação de *kits* de controlo remoto em veículos já utilizados de forma tripulada pode ser importante no que toca não só a esta capacidade de acomodação, mas também pela simplificação do desenho e teste de elementos, como o casco do navio ou a sua hidrodinâmica, bem como a manutenção da capacidade de operabilidade por um tripulante.

2.1.2 Levantamento de USV's no mercado e características

No sentido de perceber quais os pontos fortes e lacunas do mercado no que toca aos USV foi efetuado um levantamento, segundo um conjunto de critérios, de um grupo onde se incluem embarcações de dimensões variáveis, bem como com áreas de aplicação diferentes. Identificam-se veículos do tipo prancha, kayak e catamaran, apresentando-se uma tabela resumo em seguida.

Veículo/ Projeto	Imagem	Fabricante /Ano fabrico	Dimensão	Capacidade de carga	Propulsão	Velocidade /Autonomia	Navegação/ Sensores	Característ icas da plataforma	Algoritmos implementa dos /Função	Observações
Cooperative Robotic Watercraft		(Mellon 2011)	Não divulgado, baseado em prancha de bodyboard	Não se aplica para a finalidade escolhida, reduzida ou nula	“airboat” Brushless + Hélice propulsora +Brushless ESC	Não divulgado	5TE Sensor (cond. Elétrica, humidade e Temp.) ATU200S Depth Sonar (profundidade) GPS	Prancha com hélice propulsora e câmara de vídeo	Proteção e monitorizaçã o ambiental, cooperação de veículos, socorro de vítimas	os autores do projeto apresentara m já uma nova plataforma
Development of unmanned airboat for water- quality mapping		Hokkaido University 2011 (Kaizu and Noboru)	0,69m de largura X 1,42m comprimento X 0,38m)	150Kg	2 Motores combustão 4 tempos (Makita Numazu - EH035) max. 1.2 kW e 7000rpm 2 hélices 0,35 m diâmetro	6h à potência máxima (depósito 5l) Velocidade máx 1.2 m/s (48 °/s)	Recetor GPS diferencial e Bussola GPS (GPS compass)	Baseado em Car Mate Mfg. Co., LTD., model Z1	Operação autónoma medição de temperatura, pH, oxigénio, condutividad e elétrica, turbidez e níveis de clorofila-a da água	Motores sem reversibilida de Módulo de sensorização submersível
Q-Boat 1800 P		(oceanscienc e 2011)	Comprimento do casco 1,8m Largura do casco 0,9m	30 lbs. (13,6 Kg)	2xBrushless DC 750W 24V NiMH	Vel. Cruzeiro -4 m/s Vel. máx. 5 m/s	R/C Control (Futaba 6- canais) Antena	Casco em V Casco rugoso e	(acoustic Doppler current	

			25 Kg		Packs (3)	Duração bateria @ vel. Cruzeiro 45-200 min.	omnidirecional Depth Sounder Transducer	leve, resistente a impacto e UV, em ABS	profiling)	
Zarco ASV		FEUP INESC PORTO 2005-2008	1,5m x 1m 50kg	variável área base máxima 500x300mm	Energia acumulada 625Wh; Dois propulsores elétricos baseados em motores de 250 N	0-3 knts (0- 1,54 m/s)	Computador principal PC- 104 ong <i>link</i> wi-fi de longo alcance; dois recetors L1 e L2 RTK GPS, sistema de medição inercial e bússola digital	Estrutura catamaran com 2 camaras estanque e estrutura de alumínio, módulo de energia e de eletrónica na plataforma superior	Operação autónoma ou por controlo remoto, transmissão em tempo real para terra	Portas extra para acomodação de sensores
Q-Boat 1550T		(oceanscienc e)	Comprimento do casco 1,55m Largura do casco 0,445 a 0,82m Altura dobrado-	4,5 Kg	2x Brushed DC inboard motor NiMH battery packs	Vel. Cruzeiro -1,5 m/s Vel. máx. 2,3 m/s Duração bateria @ vel. máx 40 min.	R/C Control (Futaba 6- canais) Antena omnidirecional	Flutuadores laterais dobráveis sob plataforma central	Especialment e desenhado para acomodar “Teledyne RD Instruments StreamPro	

			0,32m 20 Kg			@ vel. cruzeiro 80 min			ADCP”	
delfim project		DSOR-ISR 1999 Instituto Superior Técnico (P. Oliveira 1999)	comprimento 3,5m; viga mestra 2m; calado máximo 1,1m 320kg (deslocament o leve)	320kg (deslocamen to leve)	2x baterias chumbo 3960Wh (55Ah at 36V) + 2 motores não divulgados	Vel. máx. 5knts- 2,57 m/s	GPS, rádio e luzes de navegação	Velejador autónomo, estilo catamaran	sistema ultra preciso de GPS com correção computacion al	
USYD - EIE Kayak		University of Sidney (sidney)	comprimento 4,88m peso (casco principal 39,14 Kg, total 52,16Kg) largura (entre 1,06m e 2,84m)	159Kg (1 tripulante)	Hobie eVolve Motor (aprox 0,75kW- 1hp)	Não divulgado	Controlo direcional(serv o motor HS- 5755) GPS integrado	Kayak adaptado	Motor, Bateria e acelerador à prova de água	
Multiple Autonomous Surface Vehicle Project		Worcester Polytechnic Institute (Clark Bakstran 2012)	Variável, uma vez que se pretende adaptabilidad e de diversos kayaks	40Kg	Roboteq AX15 Motor Control 2 xMinn Kota 30 Trolling Motors bateria 12V	2 knts- 1m/s	Devantech CMPS03 Magnetic Compass Module Garmin 18 differential	Plataforma ajustável para acoplar em kayaks comerciais	comunicação wi-fi (Xbee- Pro XSC)	Para integrar frota USV

							GPS Arduino UNO Microcontrolle r Board			
Autonomous Vessel For Coastal Marine Sensing		Tom Ituarte, Vince Akhperjanya n, Zach Bernal 2009 (Tom Ituarte 2009)	Não divulgado	Não divulgado	baterias chumbo 12 V bateria NiMH 5V Células solares 2x Trolling motor 1 servo de alto binário	70 a 200km de autonomia	GPS e bússola digital Atmel AVR 128L conversor 5v- 3,3V VEMCO VR28 Sonar	Kayak adaptado com implement ação de painéis solares	Com objetivos de seguimento de peixes, calibração de antenas e mapeamento de correntes	
Inspector MK1		eca-robotics (robotics)	Comprimento 7,1m viga mestra 2,5m 2100 Kg (carregado)	Não divulgado	Motor turbo diesel 250 HP	vel. máx. até 35 knts (18 m/s) mais de 15 hrs @ 20 kts (10,3 m/s)	Não divulgado	Casco rígido, insuflável (semi- rígido)	Controlo remoto ou autónomo, sistemas desacopláveis, vídeo 360°, sensorização	Desenhado para defesa e certificação de armamento, deteção de minas e combate à poluição

Tabela 1 - Comparação de sistemas USV no mercado

2.1.3 Conclusões do levantamento de USV

Do levantamento de veículos não tripulados de superfície existentes, quer como aplicações comerciais, quer no seguimento de projetos de Investigação e desenvolvimento, é possível inferir um conjunto de aplicações e características estruturais comuns.

Quanto à plataforma física para acomodação dos componentes denota-se sobretudo a utilização de estruturas adaptadas de cascos já existentes, isto é, é frequente o recurso a pranchas, kayaks ou flutuadores de embarcações do tipo catamaran e adaptação das mesmas por forma a permitir acomodar os elementos de propulsão, navegação e sensorização. Alternativamente, e a uma escala dimensional maior, são utilizadas embarcações desenvolvidas para utilização tripulada, também estas adaptadas para a utilização remota.

A menos de algumas exceções, sobretudo de carácter militar, denota-se a prevalência de dispositivos com capacidade de carga e consequentemente massa, dimensões e atrito na água reduzidos, cujos dispositivos não fundamentais para a tração, controlo e navegação passam sobretudo por módulos de sensorização para monitorização de parâmetros aquáticos ou atmosféricos. Ao nível dos dispositivos a bordo é então possível efetuar uma divisão onde por um lado se encontram sensores como o GPS, Bússola, Giroscópios e Acelerómetros e por outro, sensores de medição de turbidez, pH, oxigénio e dióxido de carbono, humidade, sonares e para medição de potência de sinais sem fios.

Inferem-se, portanto, do conjunto de sensores aplicados, um conjunto de aplicações comuns como a monitorização ambiental, monitorização e ampliação de redes sem fios e busca e salvamento. Embora com menos frequência nas aplicações estudadas, a acomodação de camaras vídeo, a capacidade de transportes de materiais ou armas, e a capacidade de deslocação furtiva permitem a utilização de carácter militar.

Grandezas como a velocidade máxima de deslocamento, velocidade cruzeiro, e autonomia estão, como naturalmente se percebe, diretamente relacionadas não só com o atrito na água mas também com o tipo de propulsão utilizada. A tração elétrica, com recurso a propulsores do tipo “trolling motor” são a solução mais frequente, uma vez que apresentam uma opção quando estão em jogo os fatores custo, robustez, densidade energética da fonte de energia (baterias geralmente de chumbo, sendo utilizadas as de iões de lítio para aplicações com maiores restrições dimensionais), possuindo ainda vantagens ao nível do baixo ruído, baixos níveis de vibração e facilidade de controlo.

As velocidades típicas de deslocamento passam geralmente por valores a rondar 1 ou 2 m/s, podendo, em casos mais otimistas, atingir os 5 ou 6 m/s, comprometendo no entanto a autonomia. Descritos em horas ou quilómetros, os valores típicos de autonomia para os veículos analisados centram-se entre 1 a 2 horas ou 100 a 200 km, dependendo muito significativamente da exigência submetida ao nível da velocidade.

2.3 Sistema de equilíbrio

Grandezas envolvidas

De acordo com o identificado por (Gheorghe SAMOILESCU 2002), que caracteriza o movimento de navios em operação marítima, são identificados seis graus de liberdade, identificados como *roll*, *heave*, *pitch*, *yaw*, *sway* e *surge*. A imagem abaixo pretende demonstrar a representação das grandezas referidas, dividindo-as em translacionais e rotacionais.

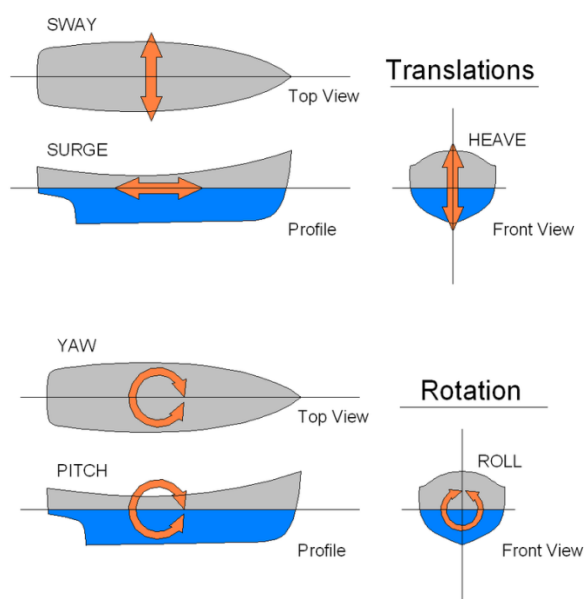


Figura 1 - Graus de liberdade de uma embarcação, retirado de (wikipedia.org 2008, Ship_motions)

Do ponto de vista do controlo da estabilidade de uma embarcação, a atuação é apenas possível de um modo eficaz quando do ponto de vista do *roll*- rotação sobre o eixo longitudinal. Dos sistemas conhecidos para atuação nesta componente destacam-se, para veículos de grande porte, a alteração da forma das quilhas, inclusão de tanques de estabilização ou lemes de inclinação.

Para veículos de menor porte destacam-se sistemas com base na estabilização giroscópica, utilização de massas móveis, volantes de inércia e atuação no sistema direcional. Apresenta-se de seguida uma recolha de soluções implementadas nesta área.

2.3.1 Sistemas semelhantes analisados

Estabilização com “barbatana”

Um dos métodos referidos para a estabilização de navios, descrita em (Gheorghe SAMOILESCU 2002), como “Beam sea/Following sea control” é baseado na assunção de que a alteração do *rolling* depende de um de dois estados de mar possíveis. Em “Beam Sea”, em que a direção da embarcação é perpendicular (ou num ângulo próximo de 90°) à da ondulação, a tendência é para o navio oscilar na sua frequência natural (especialmente se esta coincidir com a das ondas) ou “Following sea”, em que as direções são coincidentes ou aproximadamente e em que a tendência de oscilação, para além de uma componente da frequência natural, inclui uma parcela variável de acordo com a oscilação imposta pela forma da onda.

A atuação é feita através do esquema da imagem abaixo, podendo este ser descrito como um módulo de sensorização do ângulo de inclinação (roll) e velocidade do navio, cujo sinal é processado e aplicado a um atuador hidráulico que movimenta as pás dos estabilizadores (*fin stabilizer*).

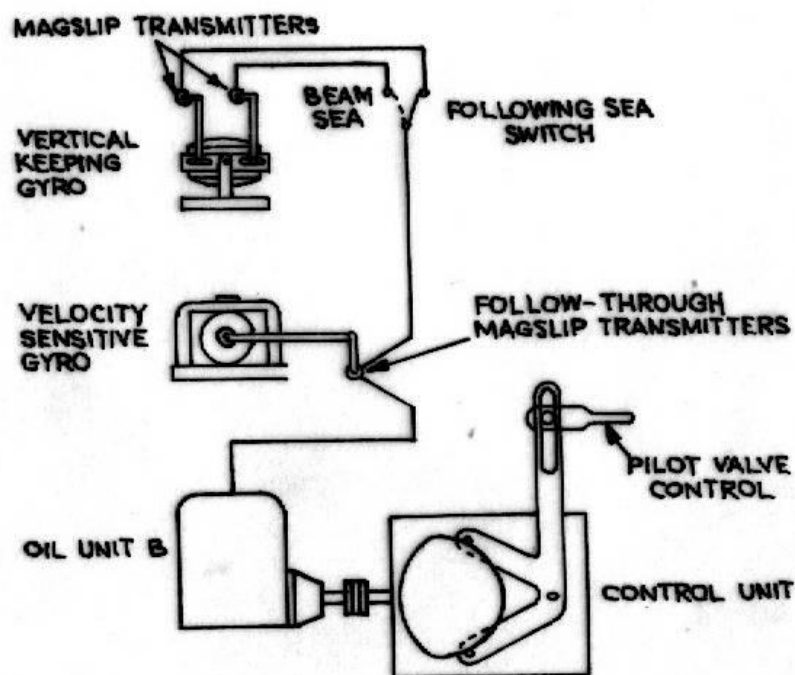


Figura 2 - Sistema de estabilização com barbatanas
(Gheorghe Samoilescu 2002)

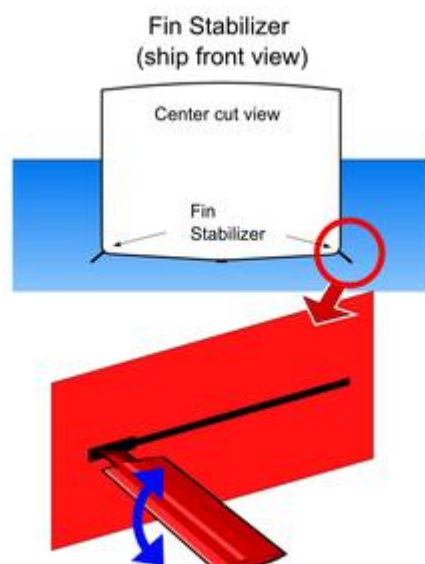


Figura 3 - Estabilizador do tipo "barbatana"
(Gheorghe Samoilescu 2002)

A atuação é efetuada tendo em conta um conjunto de parâmetros medidos pelos respetivos sensores, ângulo, velocidade e aceleração angular da inclinação (*roll*), um valor definido como referência e a velocidade da embarcação.

Tanques de estabilização

A ação dos tanques de estabilização é virtualmente independente da velocidade da embarcação. Estes geram forças de *anti-rolling*, através da movimentação de fluidos em reservatórios transversais instalados com alturas e distâncias ao centro do navio adequadas. A passagem dos fluidos pode ser aberta ou através de condutas entre tanques. Esta passagem constitui um sistema com um período natural de oscilação capaz de imprimir forças pela ressonância do movimento induzido pela ondulação.

Uma vez que o fluido apenas se move com uma dada inclinação e possui inércia, há um número mínimo de graus aos quais este se move. As forças naturais limitam o ângulo máximo e aplicam uma força oposta a partir de uma dada inclinação. É provocado um movimento cíclico no qual o atraso face à ondulação é de cerca de um quarto de ciclo (90°). Este atraso pode ser aumentado através da inserção de entraves à circulação dos fluidos. A alteração da geometria dos tanques pode implicar a possibilidade de um maior binário e um consequente melhoramento da estabilização. O volume do tanque deve ser suficiente para que a subida do nível do fluido no seu interior não o deixe totalmente cheio. Uma estratégia adicional pode passar pelo controlo do deslocamento do ar que ocupa o restante espaço dos reservatórios.

A Bicicleta como termo comparativo

Uma bicicleta constitui por si só um sistema instável no que toca ao equilíbrio rotacional em torno do seu eixo de deslocamento, nesse sentido apresenta um elevado grau de semelhança com o projeto a desenvolver. Pressupõe-se que os sistemas utilizados para balanceamento de bicicletas poderão também ser aplicados no equilíbrio de uma embarcação, como tal, interessa estudar aplicações já desenvolvidas quer do ponto de vista do sistema de controlo, quer do ponto de vista da montagem física elaborada.

Sem controlo adequado uma bicicleta não se mantém em equilíbrio vertical. Neste tipo de balanceamento foram já desenvolvidos métodos baseados, por exemplo, na estabilização giroscópica (CMG-Control moment gyroscope), na alteração do centro de massa ou na mudança de direção (Pom Yuan 2011). A utilização de uma “reaction wheel” (volante de inércia) como atuador, através da criação de um binário rotacional, é uma das soluções abordadas por diversos autores. Um volante de inércia consiste num rotor giratório, com taxa de rotação geralmente nula, cujo eixo se encontra fixo no veículo a controlar (no caso estudado, uma bicicleta) e cuja velocidade é aumentada ou decrescida para gerar um binário em torno do eixo rotacional. Os volantes de inércia constituem a forma mais simples e mais económica de utilização de atuadores de alteração de momento de inércia. Como desvantagens identificam-se o consumo de energia e a limitação de produção de binários reduzidos.

Uma outra abordagem aquando da tentativa de equilibrar um velocípede passa pelo controlo da direção e consequentemente o binário exercido pela mudança de direção da roda direcional. Como vantagens deste sistema surge a menor massa e menor consumo energético, por outro ponto de vista exige forças de reação no solo e tem limitações no que toca a grandes perturbações do equilíbrio vertical. Quando comparado com o sistema a desenvolver neste projeto antevêm-se limitações no que toca à ação reacional. Uma vez que o veículo a desenvolver se destina ao meio aquático e a forma apresenta alguma complexidade, bem como ao facto de a resistência à deslocação variar com a direção (devida à ação das correntes), a previsão do comportamento do veículo pode tornar-se demasiada complexa, inviabilizando a utilização deste tipo de solução.

Estabilização giroscópica

De entre os métodos referidos, a estabilização giroscópica é uma boa opção no que toca ao tempo de resposta e à possibilidade de atuar com o veículo estacionário.

No projeto (Pom Yuan 2011) é utilizado o rotor com uma constante de momento angular elevada, cuja direção do vetor de momento angular pode ser alterada através da rotação do mesmo. O rotor é montado num *gimbal* e ao ser aplicada uma força é possível a aplicação de um binário ortogonal ao eixo de rotação do volante e ao eixo vertical do veículo, conforme demonstrado na imagem abaixo.

Pode considerar-se o sistema como possuidor de uma amplificação de binário, uma vez que ao aplicar um baixo valor no *gimbal* é aplicado um valor superior na bicicleta.

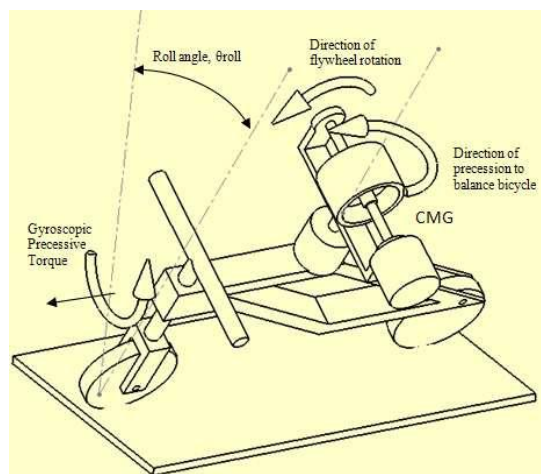


Figura 4 - Estabilização giroscópica de bicicleta (Pom Yuan 2011)

Como variação do modelo acima descrito encontram-se outros modelos, cuja orientação do volante de inércia varia. Devido ao facto de uma bicicleta em posição vertical e sem considerar a capacidade de articulação das rodas (considerando-as diretamente alinhadas com o eixo longitudinal) se comportar como um pêndulo, em posição invertida, perpendicular ao solo existem sistemas que suprimem a necessidade de utilização de um *gimbal* pela aplicação do volante com a superfície perpendicular ao eixo longitudinal da bicicleta e com o centro de massa do mesmo alinhado com o ponto de interseção entre ambos.



Figura 5 - Sistema de bicicleta auto estabilizada

Pêndulo invertido

Uma outra abordagem utilizada na estabilização de bicicletas (Yamakita, Utano, and Sekiguchi 2006) passa pela aplicação de uma massa no extremo superior de um eixo instalado verticalmente no veículo. Segundo os autores, a literatura convencional assume que os

veículos se deslocam a uma velocidade elevada, o que não satisfaz a necessidade de manter a verticalidade a velocidade zero. No entanto, um sistema que usa um pêndulo invertido, quando comparado com um sistema com volantes de inércia, pode facilmente inclinar um corpo e realizar movimentos dinâmicos através da alteração do centro de massa.

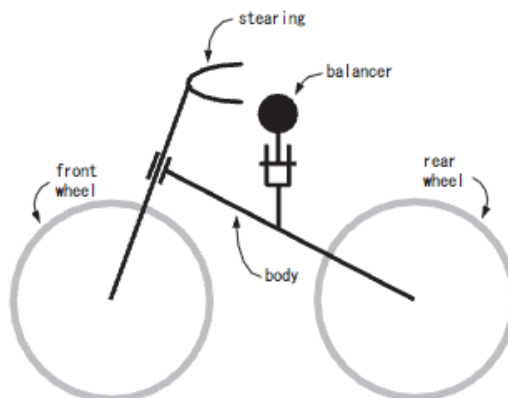


Figura 6 - Bicicleta como sistema de pêndulo invertido
(Yamakita, Utano, and Sekiguchi 2006)

Na mesma publicação, e no sentido de complementar o sistema anteriormente descrito, a bicicleta é modelizada como sendo um sistema articulado, em que a roda frontal e respetiva capacidade direcional são tomadas em conta no que toca à compensação do equilíbrio vertical, isto é, o sistema composto pelo pêndulo é complementado no balanceamento pela compensação da direção longitudinal do veículo.

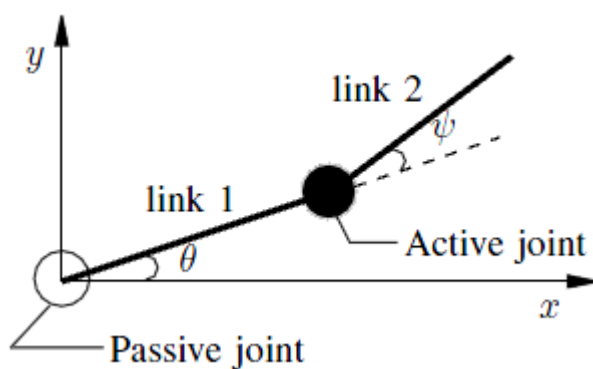


Figura 7 - Bicicleta como sistema de duplo pêndulo
(Yamakita, Utano, and Sekiguchi 2006)

Vendo o veículo como um todo, a modelização anteriormente descrita assume a possibilidade de aplicação de binário em 3 pontos distintos, na roda traseira, na direção e na posição do pêndulo.

2.3.2 Análise comparativa dos projetos analisados

		Desenho1 Sistema duplo pêndulo		Desenho2 Roda com face paralela ao solo- eixo de rotação vertical		Desenho3 Roda com face perpendicular ao solo- eixo de rotação perpendicular ao deslocamento		Desenho 4 Roda com face perpendicular ao solo- eixo de rotação no sentido do deslocamento	
		/5	Valor pesado	/5	Valor pesado	/5	Valor pesado	/5	Valor pesado
Critério	Peso								
Complexidade do sistema	8	2	16	2	16	3	24	4	32
Facilidade de acomodação em embarcação	8	3	24	2	16	2	16	4	32
Requisitos de potência	7	4	28	2	14	2	14	3	21
Complexidade do sistema de controle	6	2	12	2	12	2	12	4	24
Facilidade de mudança de direção	5	2	10	2	10	3	10	3	15
Complexidade de cálculo	5	2	10	2	10	2	10	4	20
Eficiência observada (com base na visualização de sistemas implementados)	6	3	18	3	18	3	18	5	30
Custo	4	4	16	1	4	2	8	3	12
Total			134		100		112		186

Tabela 2 - Análise comparativa de sistemas

Sistemas com volante de inércia

A tabela 2 apresentada anteriormente pretende sintetizar, segundo um conjunto de parâmetros abordados de seguida, o conjunto de projetos analisados, em cuja solução passava pela aplicação de um volante de inércia numa bicicleta.

A abordagem tomada, que tinha por objetivo a perceção de sistemas de equilíbrio usados em bicicletas, revelou quatro abordagens principais quanto à utilização de volantes de inércia. Este conjunto foi analisado comparativamente segundo um conjunto de critérios que se consideraram relevantes, sendo atribuído um peso a cada um destes, de acordo com a sua importância. De destacar a complexidade do sistema a desenvolver, quer pelo elevado número de variáveis associadas e número elevado de componentes móveis e consequentes elementos de falha possíveis, quer pela complexidade da montagem física a desenvolver, ou ainda pela facilidade de manutenção e montagem. Também a dimensão física do mesmo, relacionada com o número de graus de liberdade de movimento necessários, limitam a acomodação numa embarcação que se pretende o mais estreita possível. A ponderação quanto a este parâmetro foi levada a cabo tendo em mente a possibilidade de acomodação de um volante de inércia num kayak de competição, cujas dimensões se encontram em torno dos 5,2 m de comprimento, 0,4m de largura máxima na zona do cockpit e cerca de 0,3m de altura.

Ao nível de requisitos de potência, o principal motivo de discussão será talvez o número de motores a utilizar, enquanto em dois dos sistemas basta um único motor, nos outros dois é necessário um segundo motor para direcionar o volante de inércia, pois este não se encontra numa posição fixa face ao veículo. Para o caso do sistema com pêndulo é possível gerar um maior binário com uma mesma força gerada pelo volante, uma vez que o braço de aplicação da mesma é maior.

Na complexidade do sistema de controlo e complexidade de cálculo são tidos em conta os modelos matemáticos dos sistemas, de onde advém uma maior ou menor capacidade para efetuar operações aritméticas e consequentemente uma variação na dificuldade de geração de código adequado. Aqui, parâmetros como os tempos de reação e atuação podem ser determinantes, bem como os tipos de tecnologias e velocidades de processamento necessários.

Quanto à eficiência observada, passa por um critério baseado na observação de vídeos de projetos semelhantes, ou seja, pela análise visual de sistemas onde será aplicado um controlador semelhante ao descrito. De salientar o relativo valor desta observação, uma vez que é possível existirem sistemas implementados cuja demonstração do funcionamento não incluía suporte vídeo.

Sistema de barbatanas estabilizadoras

Aquando da análise deste tipo de sistema destaca-se de imediato a diferença de dimensão da embarcação em que foi aplicado para a embarcação a desenvolver. Dada a reduzida dimensão da embarcação e o facto de se pretender usufruir da redução do arrasto na água para o aumento da velocidade e eficiência da mesma, esta solução torna-se praticamente inviável ou altamente ineficiente.

Massa móvel

Quando se analisa um sistema cujo princípio de atuação se baseia na alteração do centro de massa da embarcação, a possibilidade de aplicação de uma determinada massa, capaz de compensar o efeito da inclinação da mesma, surge como uma possibilidade. Da revisão do projeto desenvolvido pela empresa SIREHNA destaca-se o princípio de funcionamento, ressaltando-se também a divergência de dimensões entre o projeto analisado e o projeto a desenvolver. Nesse sentido pretendeu-se analisar o conjunto de forças envolvidas neste processo.

Estabelecendo-se um ângulo de inclinação máximo, e através do esquema apresentado na figura, enunciaram-se algumas relações entre as grandezas.

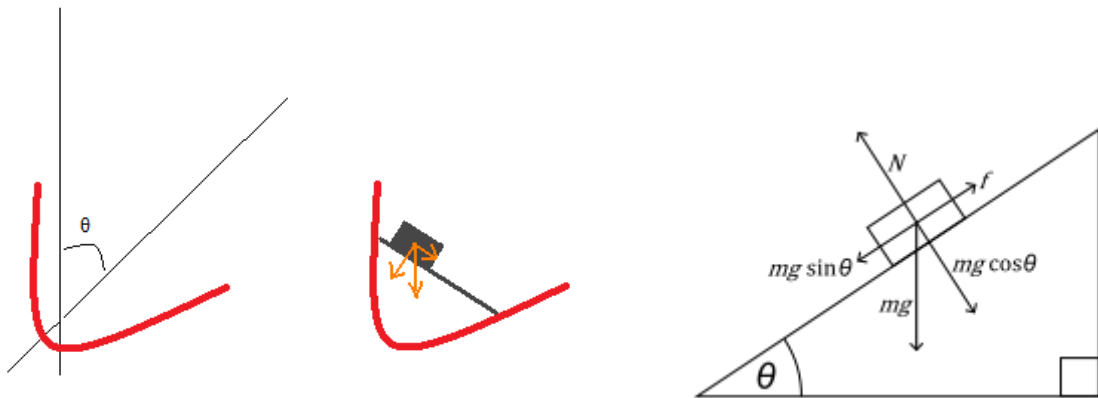


Figura 8 - Forças envolvidas em sistema de massa móvel

As equações apresentadas em seguida pretendem estabelecer a relação entre a força atuante por ação da gravidade e uma eventual força a aplicar, por acionamento de um motor, para contrariar o movimento gerado pela inclinação da embarcação.

$$F_{\text{resultante}} = F_{\text{motor}} - mg \sin \theta \quad (2.1)$$

$$T = F_{\text{motor}} \cdot l \quad (2.2)$$

$$F_r = m \cdot a \quad (2.3)$$

$$x = x_0 + v_0 t + 0,5 a t^2 \quad (2.4)$$

A geração de um binário pelo motor a aplicar (T) com um dado braço de aplicação, aplica uma aceleração (a) a uma massa móvel (m) que contraria a força gravítica cujo efeito na embarcação depende do ângulo de inclinação θ representado. É possível relacionar o tempo de resposta de um sistema como este, bem como a sua posição num eixo x pela expressão (2.4).

Capítulo 3

Idealização de arquitetura funcional

3.1 Visão global do sistema

Quando falando em sistemas velozes com grande capacidade de aceleração, a instabilidade surge como característica associada. Com um maior enfoque nas duas últimas décadas de anos, o desenvolvimento de kayaks de competição, aliado à integração de novos materiais compósitos, tem permitido uma eficiência acima da média quando falando em veículos aquáticos. O projeto a desenvolver pretende aproveitar a vertente de investigação e desenvolvimento aplicada aos desportos aquáticos, com vista a desenvolver um protótipo de veículo aquático não tripulado com elevada eficiência e velocidade de deslocamento.

As possibilidades identificadas numa fase inicial passam pela adaptação de um kayak de competição integral, parcial, ou pelo desenvolvimento de um casco de características semelhantes. Como desafio associado à instabilidade surge o desenvolvimento de um sistema de equilíbrio capaz de manter a verticalidade do veículo, numa superfície aquática de baixa profundidade.

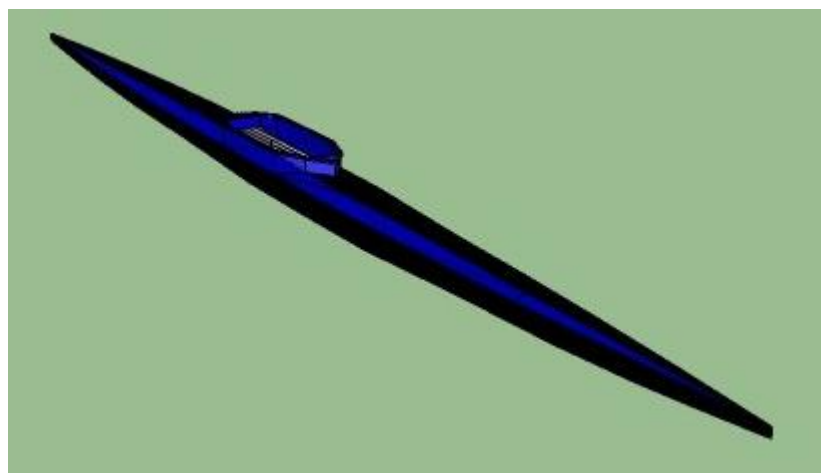


Figura 9 - Modelo de kayak de competição

3.2 Principais subsistemas

Em antecipação de possíveis elementos de hardware ou software a adquirir ou desenvolver desenvolveu-se uma primeira versão de uma possível arquitetura funcional do sistema completo.

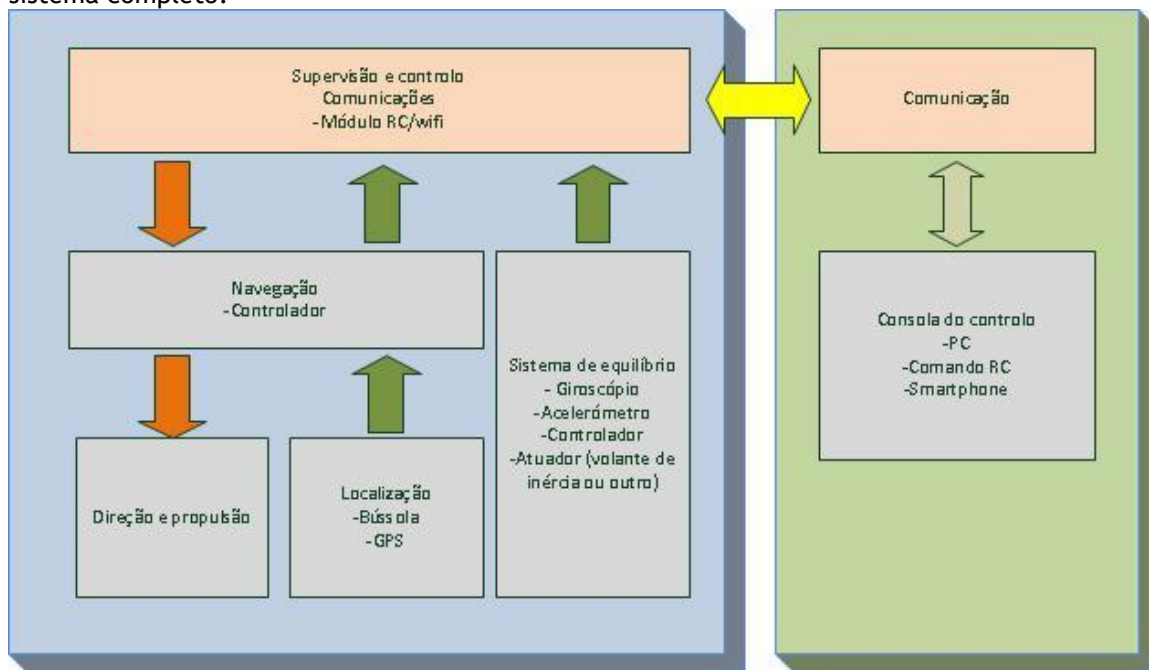


Figura 10 - Interligação dos subsistemas do projeto

Na imagem acima é possível verificar o conjunto de subsistemas, organizados de acordo com a função a desempenhar. Da divisão é possível inferir de imediato a existência de uma plataforma móvel, constituída pela plataforma em si e subsistemas de suporte a navegação e propulsão. Por outro lado observa-se a existência de uma plataforma física que se prevê estática (podendo no entanto apresentar também mobilidade) capaz de providenciar um interface de comando a um utilizador.

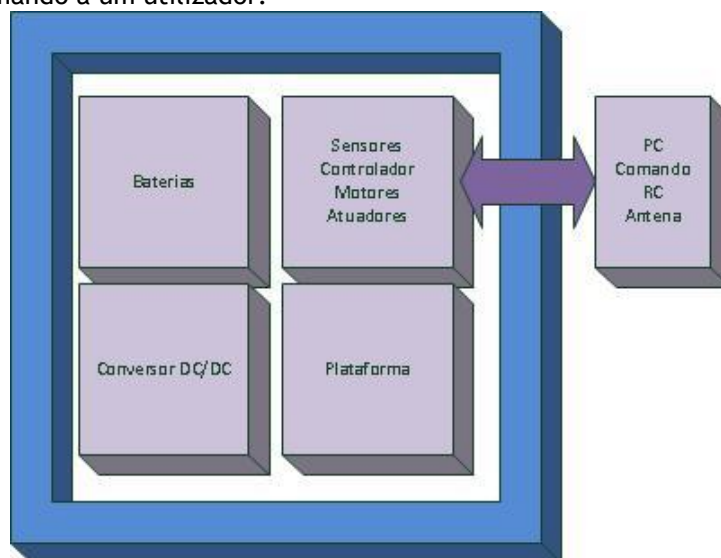


Figura 11 - Elementos de *hardware* previstos

Ao nível dos elementos físicos envolvidos destacam-se o suporte energético, constituído por baterias, conversores e possivelmente unidades para a gestão e comando do estado das mesmas, a plataforma, o conjunto de sensores a aplicar, o conjunto dos atuadores direcionais e para o sistema de equilíbrio, os elementos de auxílio à comunicação (por exemplo, antenas de radio frequência) e a estação de comando. Podem a estes elementos ser associados microcontroladores ou elementos de processamento de sinal (DSP). O relacionamento entre os componentes descritos pode ser verificado na figura 10.

Capítulo 4

Escolha de Componentes

4.1 Controlador, IMU e GPS

Como unidade central do processamento de informação encontra-se o sistema computacional, cuja implementação se prevê ser feita com base num microprocessador presente no mercado e cujo custo seja adequado para um projeto desta envergadura. Interessa portanto analisar o poder de processamento requerido por um projeto desta natureza, recorrendo por um lado a projetos semelhantes como termo de comparação e por outro a um conjunto de parâmetros mínimos de desempenho.

Destaca-se a necessidade de um sistema com alguma capacidade de processamento em tempo real. Se um conjunto de variáveis do sistema, como o posicionamento (GPS), variáveis telemétricas (por exemplo, a rota a seguir), a velocidade, não são à partida identificadas como muito limitativas, uma vez que a constante de tempo envolvida é relativamente alta, a variável inclinação, ou seja, a posição da embarcação face a um eixo vertical pode apresentar uma constante de tempo significativamente mais baixa. Ainda que a quantidade de informação a processar ou armazenar possa ser bastante reduzida, sobretudo quando comparada, por exemplo, com sistemas capazes de efetuar processamento de imagem, o microcontrolador deve apresentar provas dadas de que será capaz de satisfazer os requisitos com um desempenho aceitável. Nesse sentido, e como foi já referido, interessa analisar o desempenho de sistemas semelhantes.

Após uma breve análise de mercado identificaram-se as principais soluções adotadas em veículos aquáticos não tripulados no que toca ao tipo de controlador utilizado:

Uma das possíveis soluções ao nível do processamento de dados pode passar pela utilização de uma das plataformas Arduino existentes no mercado. Baseadas em microcontroladores ATMEGA, e sendo as versões mais comuns equipadas com o atmel 2560 ou atmega328, cujas especificações descrevem uma memória flash de 256 kB, uma frequência de operação máxima de 16 MHz, um processador de 8 bits e com capacidade para suportar um número máximo de 86 entradas/saídas, as plataformas Arduino são placas de circuito integrado, associadas a um compilador de software próprio e aberto, com o objetivo de facilitar a integração de microcontroladores noutro tipo de circuitos. A sua massificação possibilita um custo relativamente reduzido, facilidade de acesso a projetos semelhantes ou informação acerca da sua programação e resolução de erros, a incorporação de outros módulos previamente desenvolvidos, nomeadamente no que toca à inclusão de módulos com sensores giroscópicos, acelerómetros ou GPS e ainda a rápida disponibilidade de equipamentos.

A solução base que se identifica para um sistema com esta base inclui uma placa do tipo Arduino, um sensor do tipo IMU (Inertial measurement unit), e caso se pretenda o controlo posicional, um módulo GPS. Nesse sentido elaborou-se uma tabela resumo com um conjunto de placas, e as suas características, disponíveis no mercado. Devido às limitações não muito restritivas no que toca ao volume de acomodação, bem como de massa, não se considera este fator como crítico. Características retiradas de (atmel).

Componente	Características principais	Custo
Arduino Nano 3.0	ATmega328 Tensões- operação 5V entrada (recomendada): 7-12V (limites): 6-20V Entradas/saídas digitais: 14 (6 saídas PWM) 8 pinos, entradas analógicas Memória Flash 32 KB (2 KB usados pelo <i>bootloader</i>) SRAM: 2 KB EEPROM: 1 KB 16 MHz	€33
Arduino Uno Rev. 3	ATmega328 Tensões- operação 7-12V Entradas/saídas digitais: 14 (6 saídas PWM) 6 pinos, entradas analógicas Memória Flash 32 KB 16 MHz	€20
Arduino Mega ADK Rev. 3	Microcontrolador MEGA 2560. Interface USB para conexão com telemóveis Android (MAX3421e IC.) 54 entradas/saídas digitais (14 saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (hardware serial ports)	€51

	16 MHz, conexão USB	
--	---------------------	--

Tabela 3 - Controladores Arduino no mercado

Especificações e preços retirados de www.inmotion.pt

O microcontrolador Arduino Nano apresentado em primeiro lugar foi já utilizado num projeto de características semelhantes (Siobhan Coady), é descrito como compacto e compatível com qualquer *breadboard standard*, sendo o número de entradas analógicas e saídas digitais com possibilidade de geração de PWM suficientes para as variáveis envolvidas.

Tal como já referido, a necessidade de incorporação de sensores IMU e GPS pode ser facilitada ao nível do interface, quer ao nível físico ou de *software* pela incorporação de módulos que podem ser facilmente acoplados e que implementam algumas das funções pretendidas. São de seguida analisados alguns desses módulos que podem vir a ser utilizados. Primeiramente são descritos dois módulos, também eles utilizados num projeto semelhante já anteriormente referido. Neste, é também referido que os 10 bits do ADC do Arduino são preteridos face a um conversor ADC de 12 bits que permite que as resoluções passem de 0,23° para 0,06 no caso do acelerómetro e de 0.04 rpm para 0.01 rpm no caso do giroscópio.

Componente	Características	Custo
MMA7361 Triple-axis Accelerometer	2 gamas de medida ($\pm 1.5g$, $\pm 6g$) compatível com <i>breadboard standard</i> baixo consumo 400 μA -Sleep mode: 3 μA Tensão de operação: 2.2 V - 3.6 V Sensibilidade (800 mV/g at 1.5g)	€12,95
LPR550 Dual-axis Gyro	Regulador 3.3V integrado- pode ser conectado com sistemas de 5V Sensibilidade variável de $\pm 100^\circ/s$ a $\pm 2000^\circ/s$ Saída filtrada- filtro passa baixo integrado Dimensões reduzidas	US\$ 11.95

Tabela 4 - Sensores inerciais disponíveis no mercado

Especificações e preços retirados de www.inmotion.pt e www.pololu.com

MPU-9150	Saídas digitais 9 eixos, em matriz rotacional, quatérniões, angulo Euler ou “raw” Giroscópio 3 eixos, com sensibilidade até 131 LSBs/dps e valor de fim de escala entre ± 250 , ± 500 , ± 1000 , e ± 2000 dps Acelerómetro com escala programável nas gamas $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ and $\pm 16g$ Bússola de 3 eixos com escala total de $\pm 1200\mu T$ Tensão de alimentação de 2.4V-3.46V	€37.95
----------	---	--------

	Gyro operating current: 3.6mA (full power, gyro at all rates) Gyro + Acel corrente de operação: 3.8mA (full power, gyro at all rates, acel a 1kHz) Gyro + Accel + Bússola + DMP : 4.25mA (full power, gyro at all rates, acel a 1kHz, Bússola a 8Hz) 400kHz Interface I ² C série	
--	---	--

Ardupilot

Uma outra solução já encontrada em projetos de cariz semelhante passa pela utilização de um módulo, também ele tendo por base a plataforma Arduino, cujo desenvolvimento tem como objetivo o controlo de UAV (Veículos aéreos não tripulados) denominado de Ardupilot. Este sistema possui um conjunto de características que demonstram uma predisposição para a acomodação de módulos IMU e GPS, bem como para a conexão de módulos de controlo RC. Neste tipo de solução existe também a possibilidade de reaproveitar algum código, bem como adquirir módulos de sensores previamente desenvolvidos.

Ardupilot Mega	Desenvolvido para o controlo de aviões, carros e barcos autónomos. Baseado no processador Atmega2560 a 16 MHz Hardware <i>failsafe</i> incorporado Suporta <i>waypoints</i> 3D e comandos de missão Conector para GPS 6 pinos incorporado 16 entradas analógicas (com ADC), e 40 entradas e saídas digitais 4 portas de série dedicadas a telemetria, com possibilidade de inclusão de módulos XBee Direcionado para o controlo de servos- capacidade para processar 8 canais RC LEDs indicadores de estado Software completo, incluindo IMU e planeamento de missões.	€37.95
-------------------	---	--------

Ardupilot Mega 2.5	Inclui giroscópio 3 eixos, acelerómetro, magnetómetro e barómetro Flash de 4Mb Bússola digital Honeywell's HMC5883L-TR Opcional- off-board GPS, Mediatek MT3329 ou uBlox LEA-6H. Invensense's 6 DoF Accelerometer/Gyro MPU-6000. Barometric pressure sensor upgraded to MS5611-01BA03Atmel's ATMEGA2560 and ATMEGA32U-2 chips para processamento e funções usb respetivamente. MediaTek MT3329 GPS V2.0 (+\$20.00) 3DR Radio Telemetry Kit - 433 Mhz (Europe) (+\$80.00)	\$159.9 9
-------------------------------	---	----------------------

Tabela 5 - Módulos do tipo Ardupilot

PC104

PC/104 (ou PC104) é um *standard* para computadores embebidos que define tanto o barramento de dados entre as placas como o fator de forma (*form factor*) onde são especificadas as dimensões, tipo de fornecimento de energia, localização dos buracos de instalação entre outros. Isto permite a utilização de várias placas de diferentes tipos e fabricantes com garantia de compatibilidade. (Almeida 2012)

Num projeto semelhante foram utilizadas três placas empilhadas PC/104 mais duas placas empilhadas para o suporte do disco de memória permanente (Compact Flash) e suporte do radio e Wi-Fi. Uma das quais funciona como fonte de alimentação, sendo dotada da possibilidade de extrair uma gama variada de tensões de alimentação. A placa mãe (motherboard), ou placa CPU, é um modelo MOPSIcdVE da Kontron com um processador Via Eden de 300 MHz, 32 MB de memória RAM com vários portos de entrada e saída nomeadamente para um monitor LCD (JILI-Interface), teclado e rato, duas portas USB, duas portas RS-23, Ethernet, e um socket para memória ROM onde foi inserido um cartão de memória compact flash de 4GB. A terceira e última placa usada foi uma EMERAL-4M-XT da Diamond Systems Corporation, que funciona como placa de quatro portas série configuráveis para diferentes protocolos de comunicação, nomeadamente RS-232, RS-422 e RS-485.

Raspberry pi

A crescente cota de mercado do dispositivo denominado de raspberry pi faz de imediato despertar o seu interesse para projetos de carater muito variado. A sua incorporação em projetos do âmbito dos veículos autónomos não tripulados tem vindo a ser

desenvolvida e, como tal, apresenta-se como uma possibilidade quanto ao sistema computacional a utilizar.

Também com base neste tipo de dispositivo foram analisados alguns projetos, de onde se retiraram alguns dispositivos necessários para o interface do controlador com o restante *hardware*. Neste caso, foram agrupados de acordo com o projeto de onde foram retirados.

Projeto	Componentes	Preço estimado
Making an autonomous boat using a Raspberry Pi (SilverJimmy)	Model B Raspberry Pi. 8gb SD Card. Raspy Juice. Flytron Navigatron V2 i2c GPS. CMPS10 - Tilt Compensated Compass Module. Adafruit 16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver - i ² c interface - PCA9685. Mtronics MicroViper Marine10 Electronic Speed Controller (ESC) . MFA 919D 540 Motor With Attached Single Ratio Metal Gearbox 2.5:1. Six 5000mAH 1.2 Volt NiMH SubC cells. Flytron 3.3v & 5v Tiny Regulators.	
Autonomous Man Overboard Rescue Equipment (Clark Bakstran 2012)	Raspberry Pi XBee Ad -Hoc Network Device (AHND) EM406a GPS receiver - \$60from the Adafruit compass module used was an HMC6352 from Sparkfun Electronics ATMEGA328P fourT1N60N-Channel MOSFET Song Chuan 896H1CH-D1SW-R1-12VDC relays two 12V trolling motors, 2x \$109.99	

Tabela 6 - Projetos baseados em Raspberry pi

O facto de o sistema computacional ser talvez o maior limitador na embarcação, quer ao nível do número de elementos com quem deve estabelecer interface, ao nível do custo, ao nível da capacidade de processamento e memória ou ainda da robustez da mesma, torna a escolha do mesmo bastante difícil.

Da análise previamente efetuada é então possível retirar algumas conclusões importantes.

Dos exemplos dados, PC/104 é a solução mais poderosa, portanto também mais exigente do ponto de vista energético. Tem a vantagem de ser modular e facilmente configurável em função das funcionalidades pretendidas, comunicando facilmente com outros

dispositivos. Partilha com o raspberry pi a possibilidade de correr sistemas operativos como Windows (não é possível no raspberry pi) ou Linux e de poder ser programado em várias linguagens. Ainda devido à sua capacidade de memória, compete com o raspberry, uma vez que este suporta cartões do tipo SD, o que pode tornar-se um fator importante para o registo de dados durante, por exemplo, uma missão pré programada.

A solução que utiliza os microcontroladores mais simples, como o caso do Arduino, facilmente estabelece comunicação com a Eletrónica de Bordo e com os restantes sistemas. É programado através de uma linguagem própria e de entre as diferentes soluções é a menos exigente energeticamente e menos poderosa computacionalmente, como a memória disponível é relativamente pequena terá maiores limitações no registo de todos os eventos, variáveis e parâmetros associados. A vulgaridade de sistemas pré concebidos implicam a facilidade de interface com os sensores e atuadores a utilizar, o que implica uma maior simplicidade e robustez e a par do custo mais reduzido destacam-se como vantagens para a sua utilização. Também as dimensões mais reduzidas, e menor consumo energético influenciam positivamente a escolha, em contraponto com o menor poder de processamento e capacidade de memória.

Beagle board

A placa BeagleBone pode ser descrita como um computador de dimensões reduzidas, capaz de suportar Linux, possibilitando ainda a conexão à internet e com suporte para aplicações Android 4.0 e Ubuntu. Com dimensões mais reduzidas do que algumas alternativas do mesmo tipo, nomeadamente com a BeagleBoard-xM, e com um poder de processamento relativamente menor, demonstra grande apetência para pequenas aplicações do tipo *embedded*. A conexão Ethernet disponível, bem como o suporte para periféricos de baixo consumo como conversores analógico-digital, conferem algum poder de expansão.

Com um poder de processamento elevado é não só capaz de possibilitar o interface com um vasto leque de drivers para motores, sensores e câmaras como de correr os *softwares* OpenCV ou OpenNI para incorporação de algoritmos de reconhecimento de imagem.

Através das suas placas de expansão HDMI, VGA, ou LCD torna-se ainda capaz de fornecer um interface gráfico. Apesar de a sua utilização ser muito recente e com pouca projeção revela alguma potencialidade para aplicações do género.

4.2 Propulsor

Para este subsistema interessa inicialmente ponderar a possibilidade de incorporação de um motor a combustão, em contraponto com um motor de tração elétrico.

Os veículos de combustão, quando comparados com similares elétricos com baterias, destacam-se pelo tempo diminuto de abastecimento e baixas frequências das mesmas, em contraponto, os motores elétricos destacam-se pela ausência de partes móveis e consequentemente a redução do risco de desgaste, do ruído e vibração e do custo de manutenção, evitando a utilização de fluidos como óleos de lubrificação e fluidos de travões e transmissão.

O motor de combustão pode revelar um comportamento inconstante, apresentando algumas limitações no que toca à fiabilidade. Há o risco de saída de funcionamento súbito, implicando grande dificuldade de reativação e necessidade de um sistema muito robusto ao nível da pilotagem, podendo ser impreterível a existência de um piloto de reserva capaz de assumir o controlo a qualquer momento.

Outra questão pertinente poderia prender-se com a invisibilidade e impossibilidade de ser detetado. Nesse caso, as assinaturas térmica e sonora de um veículo não tripulado seriam fatores a ter em conta na escolha da propulsão.

<i>Características</i>	<i>Motor Térmico</i>	<i>Motor elétrico</i>
Potência	Superior	Inferior
Binário	Superior (dependente da velocidade)	Inferior mas constante (binário independente da velocidade)
Eficiência	Inferior 25-30%	Superior 80-85% ou até 95%
Níveis de Vibração	Superiores	Inferiores
Manutenção	Mais frequente e de maior custo	Menos frequente e de menor custo
Controlo	Mais complexo	Mais simples
Custo do combustível	Mais elevado	Mais baixo
Centro de massa	Variável	Fixo
Risco de acidente	Superior	Inferior ¹
Fatores ambientais	Maiores emissões de poluentes	Menores emissões de poluentes

Tabela 7 - Comparação motor térmico e elétrico

Da pesquisa de projetos semelhantes destacaram-se duas soluções mais comuns, ambas com motorização elétrica. Uma delas passa pela incorporação de um propulsor do tipo “ROV Thruster”, isto é, um propulsor cuja tecnologia está associada com o desenvolvimento de veículos submersíveis e, como tal, apresentam a capacidade de operar a profundidades relativamente altas. Este tipo de dispositivo apresenta, na generalidade das montagens

¹ Risco acrescido no motor de combustão devido à possibilidade de ocorrência de fugas no depósito, bem como pela incorporação de líquidos inflamáveis.

disponíveis no mercado, uma hélice acoplada, bem como uma proteção que rodeia a mesma, conferindo uma maior robustez ao equipamento. Estão disponíveis numa gama bastante elevada de potências, entre poucas dezenas a alguns milhares de watts, com diversos valores de impulsão associados. Tipicamente o seu custo é bastante elevado face a outras alternativas, e uma vez que para o projeto em questão não se pretende a capacidade de operar a profundidades elevadas, esta característica constitui um desperdício.

A outra possibilidade bastante explorada, e com resultados bastante aceitáveis, passa pela adaptação de um “*trolling motor*”, este consiste numa unidade que inclui um motor elétrico, uma hélice e o controlador para o motor e é geralmente utilizado em embarcações de pequeno porte. Neste caso, identifica-se um custo bastante acessível, bem como a possibilidade de aproveitamento do controlador já implementado.

Uma possibilidade mais trabalhosa, mas que poderia reduzir ainda mais o custo, bem como possibilitar o aproveitamento para algum motor já adquirido, poderia passar pela adaptação de um motor DC como propulsor.

Os motores DC podem ser divididos, de acordo com as suas características, em motores DC de ímanes permanentes (PMDC), motor DC sem escovas (brushless- BLDC), motor “shunt”, motor de excitação separada e motor de excitação série. A escolha ótima para esta aplicação seria o motor sem escovas, uma vez que a manutenção do motor é menor; no entanto, o custo é significativamente mais elevado. Uma boa escolha seria então o motor de ímanes permanentes ou do tipo shunt. O motor de excitação série apresenta-se como uma má alternativa devido à má eficiência a baixa velocidade. Deve também ser tida em conta a reversibilidade do motor, uma vez que nem todos funcionam em ambos os sentidos.

Devem também ter-se em atenção a necessidade de manter uma determinada relação entre velocidade e potência, em que a utilização de uma caixa redutora pode ser uma possibilidade. A necessidade de implementar ou adquirir um controlador adequado, capaz de limitar as variações bruscas de corrente ao inverter o sentido.

De salientar também a necessidade de desenvolver uma plataforma capaz de acomodar o motor à embarcação.

4.3 Direcionamento

Para direcionamento da embarcação surgem numa primeira abordagem três possibilidades distintas. Uma delas, e geralmente a mais utilizada pelo facto de se descartar a utilização do motor como *pivot* e, conseqüentemente, melhorar a robustez do sistema, passa pela adaptação de dois propulsores orientados na mesma direção e sentido mas paralelamente entre si. Neste caso, o direcionamento é feito através da aplicação de

diferentes velocidades de rotação em cada um dos motores, sendo que a reversibilidade pode ficar bastante limitada, ainda mais no caso de ser utilizado um motor a combustão. O raio de viragem pode ser reduzido através da capacidade da embarcação em girar em torno do seu eixo vertical. Neste caso, o custo é superior e a massa da embarcação é também aumentada e pode aumentar a potência consumida e o número de semicondutores capazes de suportar potências mais elevadas.

Uma segunda possibilidade passa pela aplicação de apenas um propulsor mas com capacidade de alteração do ângulo entre o mesmo e o eixo longitudinal da embarcação, isto é, o próprio propulsor funciona simultaneamente como leme da embarcação. Para este caso, a necessidade de construção de peças capazes de acomodar o propulsor na embarcação pode constituir um desafio. É também criada uma limitação no que toca ao binário do motor aplicado na direção, uma vez que deve ser capaz de movimentar o propulsor.

A última possibilidade, e que à partida se identifica como a mais económica, passa pela aplicação de um propulsor fixo à embarcação com a direção coincidente com o eixo longitudinal e um servomotor, cuja interligação com um leme possibilite a alteração da direção de acordo com o pretendido. Esta disposição permite alterar a forma do leme a aplicar e consequentemente alterar a profundidade mínima para navegação ou a eficiência do mesmo.

4.4 Comunicação

No mercado corrente são diversas as tecnologias de comunicações sem fios. Das alternativas abordadas, três das opções são descartadas devido a limitações associadas. Pelo facto de terem um alcance bastante limitado, as tecnologias Bluetooth e *wireless* LAN, sendo que esta segunda apresenta também como desvantagem a necessidade de um router, são automaticamente descartadas. Uma terceira opção, a utilização da rede GSM, é descartada pela necessidade de cobertura de rede telefónica móvel para funcionamento, bem como devido aos custos que poderiam surgir da necessidade de recorrer a um operador móvel. (Gang 2012)

Na solução ideal proposta para a embarcação o sistema de comunicação poderia passar pela utilização de dois canais de comunicação. Um primeiro permitiria a comunicação com um controlo manual (RC control), podendo ser atuado em tempo real por um piloto. O segundo diz respeito ao sistema de telemetria entre a estação base e a embarcação de forma a garantir a capacidade de planeamento e monitorização de uma missão previamente estabelecida ou com pontos de passagem introduzidos. Como requisitos primordiais definem-se a capacidade de comunicação bidirecional, de modo a permitir não só o controlo em

tempo real da embarcação mas também a monitorização da localização, direção e outras eventuais grandezas internas ou medidas.

A tabela que se segue pretende efetuar uma análise comparativa a alguns sistemas de controlo manual por rádio. Foram escolhidos três diferentes produtos, correspondentes aos maiores fabricantes de sistemas de controlo por rádio. Produtos que correspondem à mesma gama.

<i>Fabricante</i>	<i>Futaba</i>	<i>Spectrum</i>	<i>JR</i>
Transmissor	6EX	DX6i	XG6
Canais	6	6	6
Display	LCD	LCD	LCD
Sistema Telemetria	Failsafe	Failsafe	Sim
Recetor	R606FS	AR6210	RG 611B
Preço Final	219.99\$	209.99\$	300\$

Tabela 8 - Sistemas de controlo rádio no mercado

Para a comunicação baseada no sistema x-bee, é normalmente utilizado um canal de comunicação rádio na banda dos 900 MHz tendo em conta a sua fiabilidade, baixa potência e distâncias elevadas que permite atingir. Comparando com um canal a 2.4 GHz, na mesma distância, o canal a 2.4 GHz tem uma atenuação de 8.5 dB maior do que o canal a 900Mhz. No entanto, na Europa não é permitido usar esta largura de banda, sendo ela utilizada para a rede de telefonia móvel.

<i>Tecnologia</i>	<i>Xbee Telemetry Kit 2.4GHz [38]</i>
Potência saída	63mW
Mission Re-Planner	Sim
Live telemetry data	Sim
Taxa de transmissão	9600 bps
Alcance sem falhas	~ 1km
Preço	160 €

Tabela 9 - Características do sistema x-bee

4.5 Estrutura

Como plataforma para acomodação dos componentes previamente discutidos pretende-se a utilização de um kayak de competição de águas calmas. Como referência para as dimensões utilizou-se um kayak da marca Nelo, um fabricante nacional, com grande projeção internacional e cuja experiência no fabrico deste tipo de embarcações conta já com mais de 30 anos. Apesar de, por uma questão de redução de custos, se pretender a utilização de uma embarcação usada e, conseqüentemente com um design um pouco divergente do atual, a referência dimensional foi do modelo *K1 Quattro M*, cujas dimensões se apresentam na tabela seguinte:

Peso atleta:	até 70 kg
Comprimento:	5,2 m
Peso Barco:	8 - 12 kg (Sprint) 6,5 kg (Marathon)
Nível de estabilidade:	1 (o mais instável de uma escala 0-5)
Largura máxima:	0,41 m
Cockpit:	0,90 m x 0,38 m

Tabela 10 - Características de kayak de competição



Figura 12 - Kayak de competição
Imagem retirada de www.mar-kayaks.pt/pt/

4.6 Baterias

Tipo	Energia Específica (Wh/Kg)	Potência Específica W/Kg	Eficiência (%)	Ciclos de carga	Auto descarga (% por 48h)	Custo (US\$/KWh)
Ácido Chumbo	35-50	150-400	>80	500-1000	0.6	120-150
Ni-MH	70-95	200-300	70	750-1200+	6	200-350
Ni-Ca	50-60	80-150	75	800	1	250-350

lões lítio	80-130	200-300	>95	1000+	0.7	200
------------	--------	---------	-----	-------	-----	-----

Tabela 11 - Comparação de tipos de baterias (Husain 2003)

Na tabela 11 evidencia-se uma comparação dos tipos de baterias mais usuais em aplicações do género. Uma vez que se pretende um custo de projeto reduzido, relevando para segundo plano fatores como a autonomia ou massa total do sistema, a solução mais adequada passará pela utilização de baterias do tipo ácido-chumbo. Interessa, no entanto, perceber as contrapartidas envolvidas caso se pretenda beneficiar outros parâmetros. As baterias de iões de lítio permitem uma eficiência bastante superior e uma melhor densidade energética, o que, apesar de ter como contrapartida o aumento substancial do custo, permite reduzir perdas e também a massa total do sistema. Um outro fator a ter em conta poderá ter a ver com a necessidade de manter o sistema em repouso por um período elevado de tempo. A percentagem de auto descarga das baterias não apresenta no entanto um fator decisional muito significativo.

Capítulo 5

Sistema de equilíbrio

5.1 Descrição

Como ponto de partida para a definição de parâmetros para a embarcação, e com o intuito de perceber a viabilidade de implementação de um sistema de equilíbrio na mesma idealizou-se um modelo à escala em cujo conhecimento das características físicas permitiu a parametrização de um modelo Matlab desenvolvido.

Do modelo Matlab elaborado, bem como o estabelecimento de um paralelismo com projetos de conceito semelhante, foi possível inferir alguma viabilidade do sistema, no entanto, identificam-se desde logo algumas condicionantes relacionadas com a dinâmica do mesmo. A dificuldade em estimar o binário necessário pelo motor, bem como a sua potência e velocidade de rotação, associados ainda à necessidade de definir uma dada massa para volante de inércia elevam o número de variáveis do sistema. Este, caracterizado pela presença de um polo no semiplano direito do respetivo lugar geométrico de raízes, isto é, um sistema tipicamente instável, necessita de um controlador adequado, cuja calibração é, usualmente, um processo moroso e, em parte, empírico.

Tendo em conta também a escalabilidade dos custos e subjacente possibilidade de aquisição de material que se poderia vir a revelar inadequado, foi idealizado um modelo à escala em que se pretende uma demonstração do conceito (*proof of concept*) e a possibilidade de inferir algum conhecimento através de um protótipo de dimensões e custos relativamente reduzidos.

Como forma de efetuar um modelo à escala idealizou-se a construção de um modelo tendo por base um objeto cilíndrico com uma plataforma para acomodação de sensores e controlador e uma outra para suporte do motor e volante de inércia. Esta deve permitir a regulação da altura e é responsável por dar instabilidade ao sistema, isto é, elevar o centro de massa e fazer com que o objeto tenha tendência a tombar. De seguida apresenta-se uma imagem para um possível protótipo.

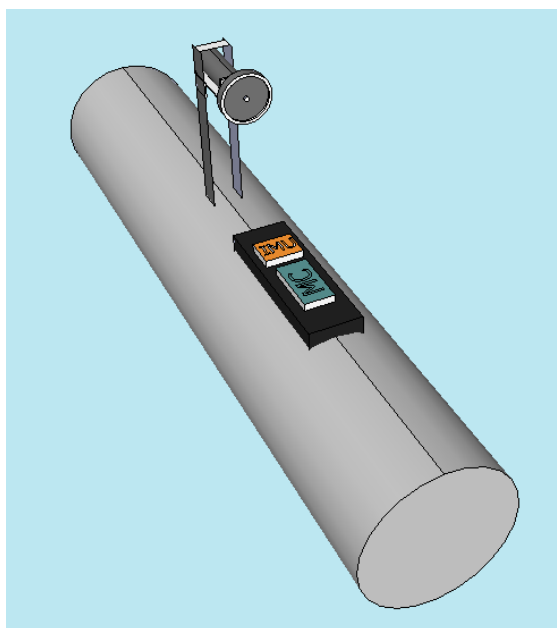


Figura 13 - Modelo à escala idealizado

Pretende-se que, ainda que não na fase inicial, a montagem possa ser estanque. Deste modo, seria possível verificar o comportamento dinâmico do sistema como uma embarcação, podendo estimar-se o volume de água deslocado em função da massa da montagem.

Do ponto de vista físico, e no sentido de se conseguir um modelo simplificado da embarcação, esta pode ser vista como um pêndulo vertical, com o apoio assente no eixo longitudinal e cuja inclinação se pretende controlar com a atuação de um volante de inércia.

Nesse sentido pretende-se a modelização do respetivo sistema, com vista à sua simulação computacional, recorrendo a ferramentas adequadas, nomeadamente o software Matlab.

A representação simplificada do sistema pode ser vista na imagem abaixo, em que se pretende demonstrar a incorporação de um volante de inercia perpendicularmente e com o eixo de rotação alinhado com o eixo longitudinal da embarcação.

Aquando da existência de uma perturbação ao nível da rotação da embarcação, o que é apresentado na figura como o ângulo de θ_B , um motor aplicará um binário rotacional num volante de inércia, representado do lado direito da imagem, procurando o restabelecimento da posição vertical.

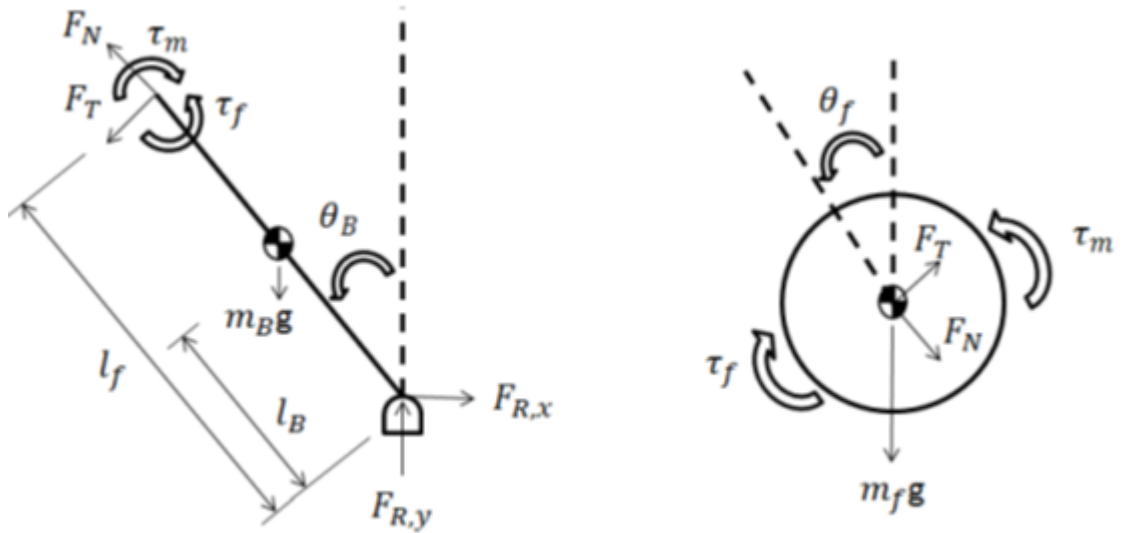


Figura 14 - Modelo de pêndulo invertido com volante de inércia
Imagem retirada (Sibhan Coady 2012)

A implementação de um algoritmo de controlo do tipo PID num microcontrolador determinará a atuação do respetivo motor. As equações que descrevem a dinâmica do sistema e a partir das quais se criou o modelo de simulação estão descritas abaixo, sendo também explicados os significados das representações simbólicas.

$$\ddot{\theta}_f = \frac{1}{J_f} (-B\dot{\theta}_f + \tau_m) \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}_B = \frac{1}{(m_f l_f^2 + J_B)} (B\dot{\theta}_f + (m_f l_f + m_B l_B) g \sin(\theta_B - \tau_m)) \quad (4)$$

θ_B = ângulo de *roll*- inclinação, tal como descrito na figura

$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ = primeira e segunda derivadas da posição (inclinação)

θ_f = ângulo de rotação do volante de inércia

$\dot{\theta}_f$ = Velocidade angular

m_B = massa da embarcação

m_f = massa do volante de inércia “flywheel”

J_B = Momento de inércia em relação ao ponto pivot

J_f = Momento de inércia do volante

τ_m = Binário gerado pelo motor

B = atrito relacionado com a interação motor-volante de inércia

τ_f = Binário devido ao atrito $\tau_f = B\dot{\theta}_f$

F_T, F_N, F_{RN} = Forças de reação

A imagem abaixo pretende estabelecer de uma forma sucinta o paralelismo existente entre o modelo à escala desenvolvido, a modelização recorrendo à equiparação do sistema a um pêndulo invertido e a aplicação real do sistema de equilíbrio que se pretende desenvolver.

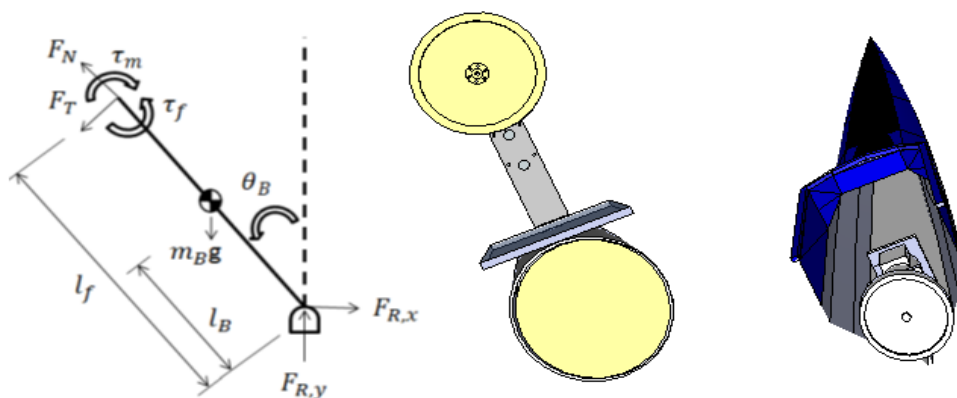


Figura 15 - Paralelismo de modelos e embarcação

5.2 Componentes Mecânicos

Com o auxílio do *software* Google SketchUp 8 foi idealizado um modelo que pretendia recriar uma embarcação e possibilitar o teste físico com uma escala reduzida. Na generalidade, os componentes mecânicos utilizados podem ser visualizados na figura 16.

A seguinte tabela descreve os componentes e materiais utilizados. De salientar que o seu fabrico apenas foi possível com o auxílio dos técnicos das oficinas do departamento de engenharia eletrotécnica, sendo que os tampos e o volante de inércia foram fabricados com recurso a uma impressora 3D. A base retangular e o tupo de PVC utilizados foram reaproveitados de outros projetos em curso no mesmo departamento.

Componente	Quantidade	Figura/Anexo	Material
Viga suporte em L	1	B1	Metal
Tampo extremidade	2	Fig. 16	ABS
Tubo cortado longitudinalmente	(0,50 m)	Fig.16	PVC
Circulo, volante de inércia	1	B2	ABS
Base retangular	1	Fig. 16	Acrílico
Conector de acoplamento	1	B3	Metal

Tabela 12 - Componentes mecânicos do modelo à escala

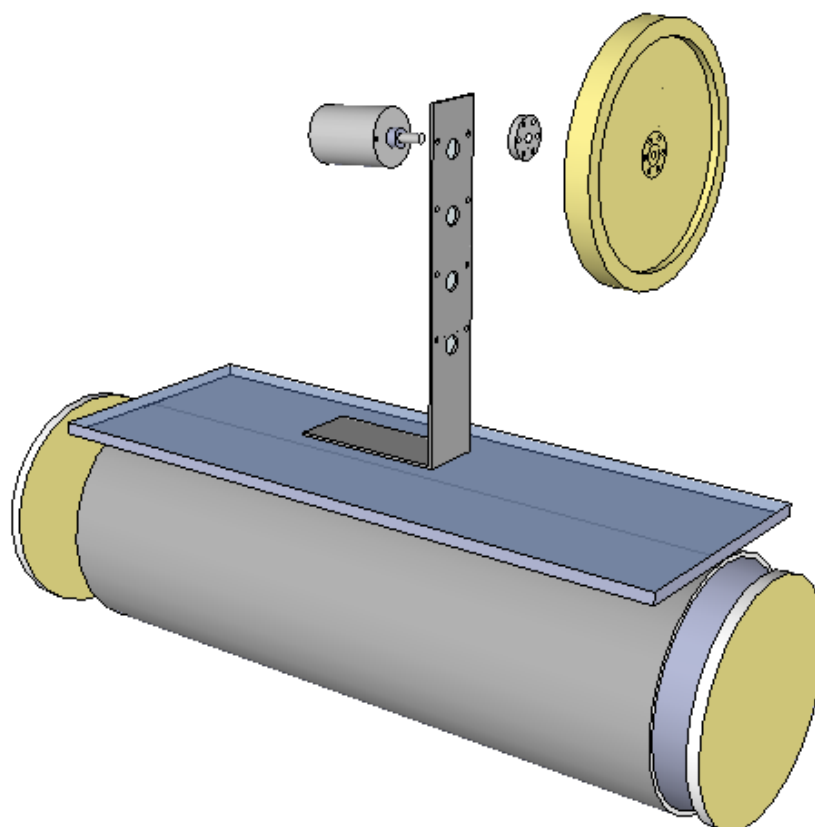


Figura 16 - Modelo à escala implementado- ligação dos componentes mecânicos

5.3 Componentes Eletrónicos

Os componentes pretendidos para a construção do mesmo foram fruto de uma sequência lógica de escolha. Inicialmente ponderou-se a utilização de um motor de corrente contínua sem escovas (Brushless- BLDC), uma vez que apresenta uma boa relação de massa/volume e binário, no entanto, apresenta um custo mais elevado e maior dificuldade de controlo para tensões baixas, o que é determinante para a aplicação. Foi então selecionado o motor 29:1 Metal Gearmotor 37Dx52L, um motor já com uma dada desmultiplicação e que inclui associado um encoder capaz de emitir 64 pulsos por revolução do eixo do motor, o que se traduz em 1856 pulsos por rotação à saída da caixa e $0,19^\circ$. Como características destacam-se respetivamente para 6V e 12V de tensão de entrada as descritas na tabela 13.

Tensão (V)	Vel. Rotação	Corrente sem	Corrente	Binário Nominal
------------	--------------	--------------	----------	-----------------

	sem carga (RPM)	carga (mA)	nominal (A)	(Nm)
6	175	250	2,5	0,388
12	350	300	5	0,785

Tabela 13 - Características do motor DC utilizado

De modo adequado foi selecionado o controlador **Pololu Dual VNH5019 MotorDriver Shield**, cujas características se resumem na tabela seguinte.

Grandeza	Valor
Canais	2
Tensão de operação	5,5 a 24 V
Corrente contínua máxima	12 A (24 para 1 só motor)
Corrente máxima	30 A (60 para 1 só motor)
Frequência máxima PWM	20 kHz
Compatibilidade	Arduino Uno Arduino Leonardo Arduino Due Arduino Mega 2560 Arduino Duemilanove chipKIT Max32 Arduino-Compatible Prototyping Platform
Funções da biblioteca	void init() void setM1Speed(int speed) void setM2Speed(int speed) void setSpeeds(int m1Speed, int m2Speed) void setM1Brake(int brake) void setM2Brake(int brake) void setBrakes(int m1Brake, int m2Brake) unsigned int getM1CurrentMilliamps() unsigned int getM2CurrentMilliamps() unsigned char getM1Fault() unsigned char getM2Fault()
Proteções	Proteção de tensão inversa Proteção contra subtensão e sobretensão Proteção de curto-circuito Proteção de temperatura

Tabela 14 - Características do controlador do motor

Sensorização

A sensorização do ângulo de inclinação fica a cargo de um IMU FieldForce TRAX que inclui um giroscópio e um acelerómetro, ambos de 3 eixos e um conjunto de sensores magnéticos que utilizam um algoritmo com um filtro de Kalman proprietário do fabricante para gerar uma trama de dados.

AHRS mode

Parâmetro		Valor
Direção	Precisão	2,0° rms
	Resolução	0,1°
Atitude	Alcance Pitch	±90°
	Alcance Roll	±180°
	Precisão	2,0° rms
	Resolução	0,01°
Consumo	Corrente média à taxa máxima de aquisição	55mA

Tabela 15 - Características do IMU em modo AHRS

Compass mode

Parâmetro		Valor
Direção	Precisão	0,3° rms
	Resolução	0,1°
Atitude	Alcance Pitch	±90°
	Alcance Roll	±180°
	Precisão	0,2° rms
	Resolução	0,01°
Consumo	Corrente média à taxa máxima de aquisição	28mA

Tabela 16 - Características do IMU em modo Compass

Características de comunicação

Parâmetro	Valor
Tensão de alimentação	Valor 3,6 a 5 Vdc
Interface de Comunicação	RS232 UART e USB
Protocolo comunicação	PNI Binary
Taxa Comunicação	2400 a 921,600 baud
Máxima taxa de saída de dados	≈30 amostras/s

Tabela 17 - Características de comunicação do IMU

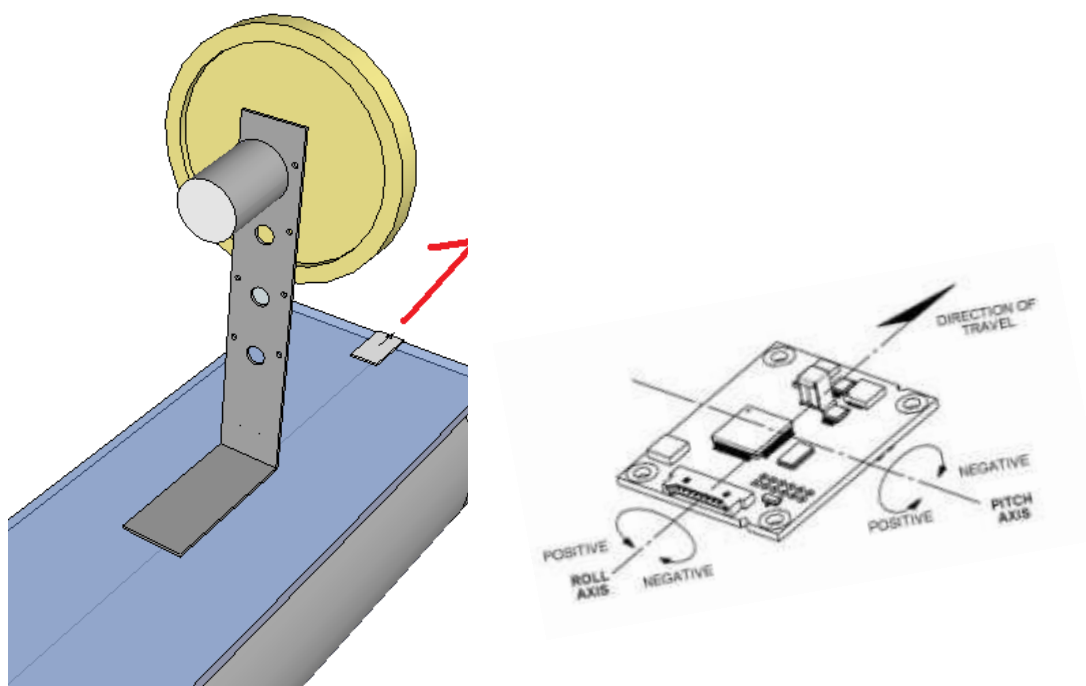


Figura 17 - Posição do IMU no modelo

A figura anterior demonstra a posição do sensor inercial no modelo desenvolvido, sendo que para uma eventual embarcação, a orientação deveria ser semelhante. De ressaltar a possível necessidade de inclusão de envoltórios estanques para aplicação em ambiente aquático.

Micro-Controlador

Das características do sistema à escala destaca-se de imediato a necessidade de uma elevada taxa de atualização das entradas e saídas do sistema, como tal, a utilização de um microcontrolador de baixo nível, com capacidade de interface físico com RS232 e geração de PWM, apresenta-se como alternativa adequada. A escalabilidade do modelo é também tida em conta nesta opção. Pretende-se que seja possível adicionar, por exemplo, um módulo GPS como entrada ou um servo para controlo direcional como saída e deste modo a reutilização de código gerado de modo a controlar o modelo para uma possível implementação à escala real. Nesse sentido, foi selecionado o controlador Arduino MEGA, cuja opção se justifica pela possibilidade de quatro ligações série. Destacam-se também os seus 256Kb de Flash e 8kb de RAM.

	Processor	Processor Voltage	Supply Voltage	Flash	SRAM	Digital I/O Pins	PWM Pins	Analog Inputs	Hardware Serial Ports	Dimensions	Shield Compatibility	Notes and Special Features
Uno	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	2.1"x2.7" 53x75mm	Excellent (most will work)	
Uno Ethernet	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	2.1"x2.7" 53x75mm	Very Good (some pin conflicts)	Has Ethernet Port. Requires FTDI cable to program.
Mega	16MHz Atmega 2560	5v	7-12v	256Kb	8Kb	54	14	16	4	2.1"x4" 53x102mm	Good (some pinout differences)	
Mega ADK	16MHz Atmega 2560	5v	7-12v	256Kb	8Kb	54	14	16	4	2.1"x4" 53x102mm	Good (some pinout differences)	Works with Android Development Kit.
Leonardo	16MHz Atmega 32U4	5v	7-12v	32Kb	2.5Kb	20*	7	12*	1	2.1"x2.7" 53x75mm	Fair (many Pinout Differences)	Native USB capabilities. USB Micro B programming port.
Due	84MHz ARM SAM3X8E	3.3v	7-12v	512Kb		54	12	12	4	2.1"x4" 53x102mm	Poor (voltage and pinout differences)	Fastest processor. Most memory. 2-channel DAC. USB micro B programming port. Native micro AB port.
Micro	16MHz Atmega 32U4	5v	5v	32Kb	2.5Kb	20*	7	12*	1	0.7"x1.9" 18x49mm	N/A	Smallest board size. Native USB capabilities
Flora	16MHz Atmega 32U4	3.3v	3.5-16v	32Kb	2.5Kb	8*	4	4*	1	1.75" dia 44.5mm dia	N/A	Sewable Pads. Fabric-friendly design. Native USB Capabilities
DC Boarduino	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	0.8"x3" 20.5x76mm	N/A	Can build without headers or sockets for smaller size. Requires FTDI cable for programming
USB Boarduino	16MHz Atmega 328	5v	5v (USB)	32Kb	2Kb	14	6	6	1	0.8"x3" 20.5x76mm	N/A	Can build without headers or sockets for smaller size. USB Mini B programming port.
Menta	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	0.8"x3" 20.5x76mm	Excellent (most will work)	Mint-Tin Size and Prototyping Area. Requires FTDI cable for programming.

Figura 18 - Comparativo de sistemas Arduino

Retirado de <http://learn.adafruit.com/>

5.4 Interface entre componentes

De modo a facilitar a observação dos componentes envolvidos no modelo de teste elaborado, desenvolveu-se um esquema da sua interligação, que se pretende simples de interpretar.

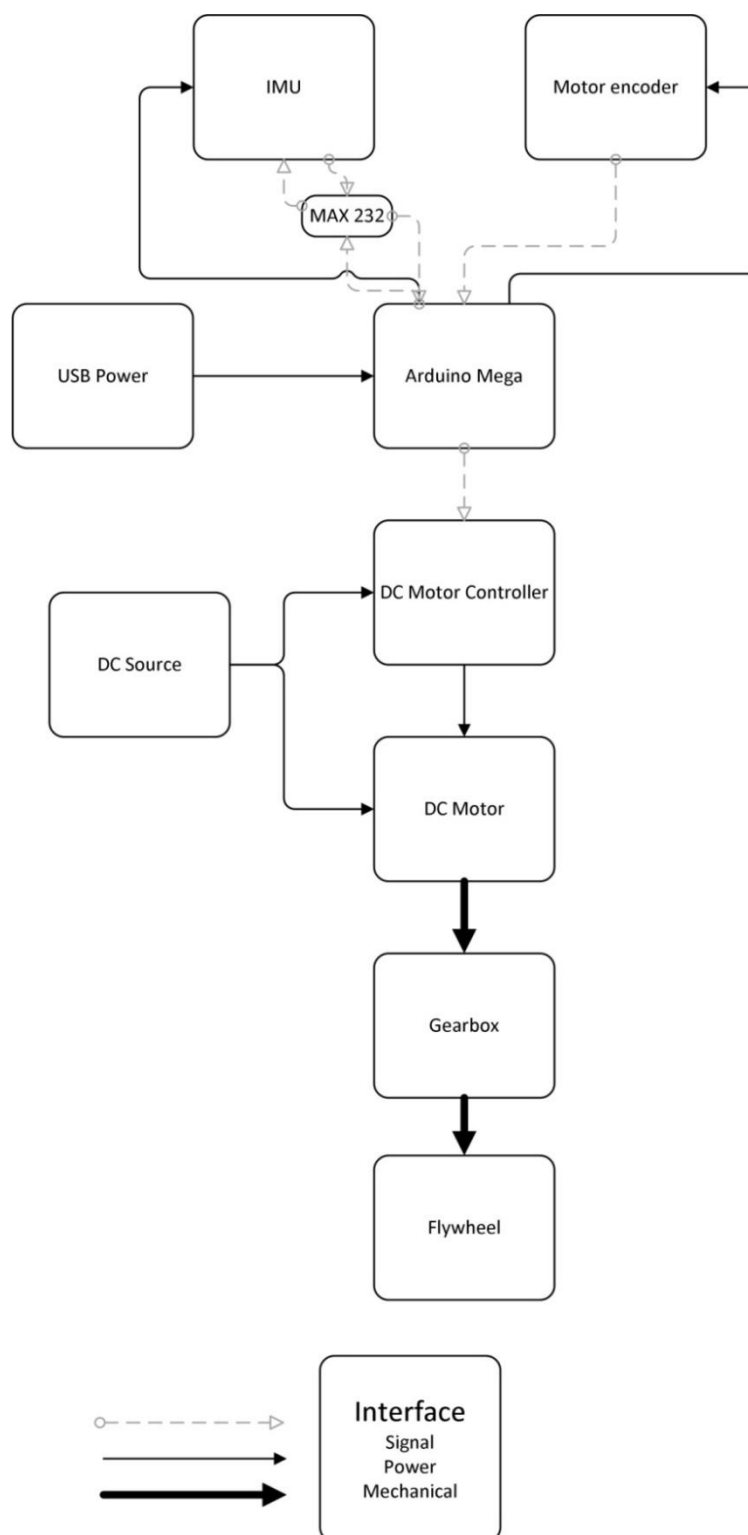


Figura 19 - Interface entre componentes do modelo

Na imagem anterior é possível perceber a interligação de componentes que integram o modelo elaborado para prova de conceito do sistema de equilíbrio. Como se pode verificar, para interface entre o IMU e o microcontrolador utilizados é necessária a inclusão de um circuito integrado capaz de adequar os níveis de tensão, uma vez que o Arduino opera com tensões entre os 0 e 5V, o que não acontece com o IMU, cujas tensões se situam em torno dos -12V para o nível lógico 0 e 12 V para o nível lógico 1.

Verifica-se também o caráter agregador do microcontrolador, que possibilita quer através das suas portas série ou saídas digitais a troca de informação entre a camada sensorial e o atuador, neste caso um motor DC que tem associado um controlador que possibilita o controlo da velocidade de rotação do mesmo.

O motor tem acoplado no seu veio um conjunto composto por uma caixa de transmissão com uma relação de 29:1 e um volante de inércia cujas dimensões podem ser consultadas na secção 5.5 do presente documento.

Ao nível da alimentação, utilizou-se como fonte para o microcontrolador a porta USB de um PC e para o controlador do motor uma fonte de tensão disponível no laboratório. De realçar que para a implementação de um modelo à escala real seria necessária uma bateria, ou um conjunto de baterias, eventualmente associadas a um conversor do tipo CC/CC capaz de alimentar devidamente o referido sistema.

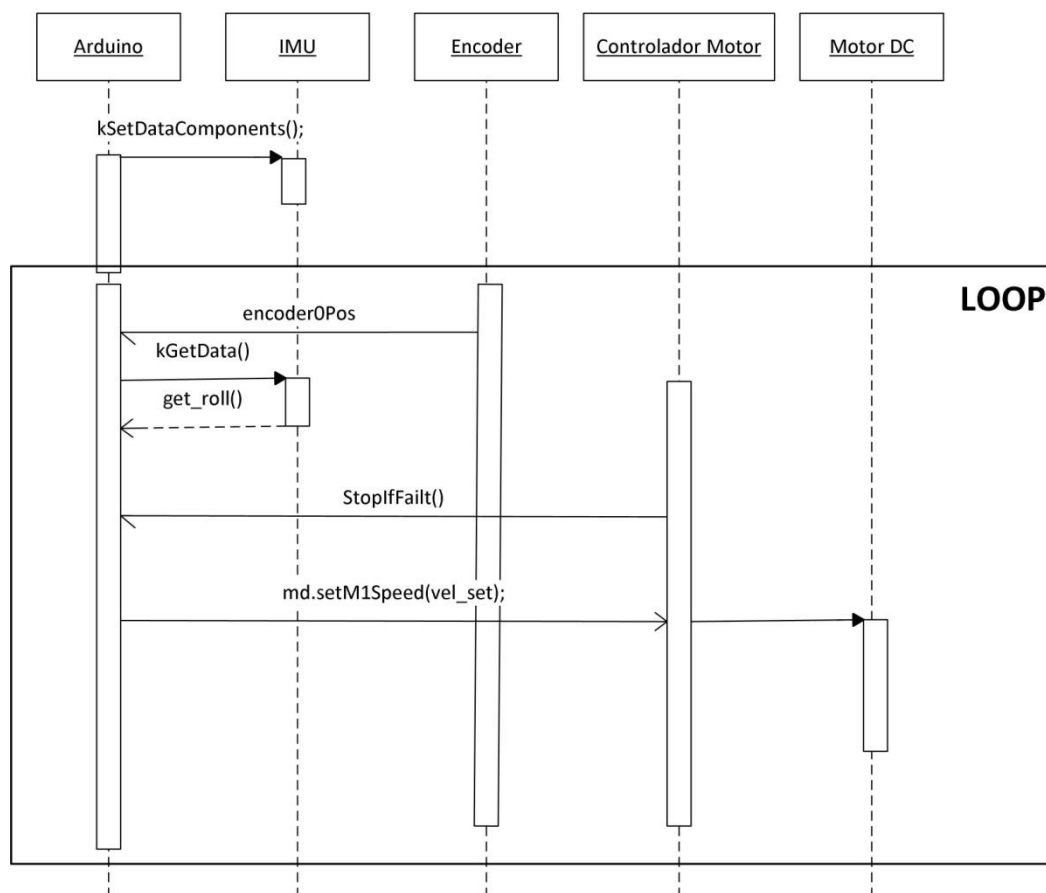


Figura 20 - Diagrama de sequência do controlo do modelo

O funcionamento cíclico do programa de controlo do sistema pode ser verificado com recurso a um diagrama de sequência. De salientar a utilização do IMU através de um princípio pedido resposta, contrariamente a uma possível utilização periódica. A medição da velocidade de rotação do motor é feita com recurso a interrupts que detetam a variação da posição do veio do motor, antes da caixa de velocidades. Com a associação de um temporizador permitem então saber a variação da mesma num determinado período de tempo.

O controlador do motor possui já funções pré estabelecidas quer ao nível de interface *hardware*, quer a nível das bibliotecas *software* disponibilizadas pelo fabricante, que permitem a monitorização da corrente e do correto estado de funcionamento do motor.

Também ao nível do controlador do motor se identifica uma limitação temporal no sistema. Através de uma série de testes efetuados, verificou-se que caso se pretenda a inversão do sentido de rotação do motor num espaço de tempo muito reduzido, e que será analisado posteriormente no documento, este demonstra-se incapaz de o fazer, continuando a girar no mesmo sentido e invalidando o correto funcionamento do modelo.

5.4.1 Protocolo de comunicação com IMU

Um dos contratempos da fase inicial do projeto prendeu-se com a correta implementação do protocolo de comunicação para com o sensor inercial. Apesar de a folha de características do mesmo/manual de instalação apresentar bastante informação, nomeadamente da implementação do designado “PNI Binary Protocol”, neste caso transmitido através de RS232 UART, alguns contratempos surgiram da construção da trama das mensagens. Como já referido, foi necessário conformar o nível de tensão entre este e o Arduino.

As configurações da porta foram as seguintes:

<i>Parametro</i>	<i>Valor</i>
Data bits	8
Start bits	1
Stop bits	1
Paridade	nenhuma

Figura 21 - Configurações da porta de comunicação

A trama de comunicação deve seguir estrutura demonstrada na imagem seguinte. Os bytes de *sumcheck* não são verificados pelo Arduino, uma vez que caso exista uma falha o sistema não é capaz de funcionar sem a posição. A verificação é feita apenas através do valor do ângulo medido, que deve, após os cálculos, estar entre -180° e 180° , e segundo um

algoritmo implementado, não pode variar mais do que uma determinada margem face ao valor anteriormente medido.

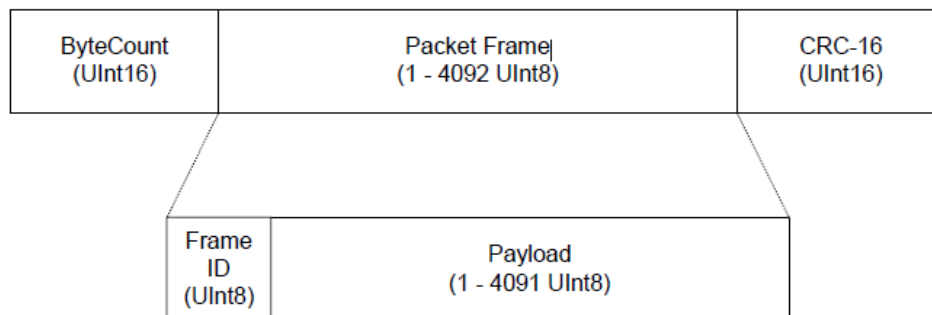


Figura 22 - Estrutura de dados das mensagens

A título de exemplo a mensagem que define que irá ser pedida apenas uma grandeza e que se trata do roll, descrita na função `kSetDataComponents()` deve ser codificada segundo a seguinte sequência:

0x00	0x07	0x03	0x01	0x19	0xB8	0x54
byte count		Frame ID	ID count (read 1 parameter)	parameter ID 25 ₁₀ =roll	CRC-16	

Tabela 18 - Estrutura da mensagem para definição de grandeza a medir

A sombreado representa-se o pacote descrito como Payload.

Da resposta obtida, interessa referir que é constituída por 13 bytes, dos quais apenas os bytes 5 a 8 possuem a informação pretendida. Estes representam um valor em graus, no formato Float32, cuja representação em big Endian é representada abaixo.



Figura 23- Representação do formato float32

Em que o valor, v , é determinado segundo a expressão:

$$v = (-1)^S * 2^{(Exponent-127)} * 1.Mantissa, \text{ if and only if } 0 < Exponent < 255 \quad (5)$$

O conjunto das funções de comunicação implementadas, integradas no algoritmo geral de controlo, está descrito em 5.6 e segue também o padrão previamente descrito. Durante o processo de desenvolvimento do código recorreu-se ao *software* proprietário do fabricante “TRAX Studio” bem como a um software de monitorização de dados da porta de serie “Device Monitor” que permitiu através do envio de pedidos e análise de respostas verificar a correta concatenação de dados das mensagens.

5.5 Modelo Matlab

5.5.1 Modelo em Simulink

O recurso ao *software* Matlab, mais concretamente ao aplicativo Simulink, possibilita um teste prévio das grandezas envolvidas no sistema, bem como a identificação de possíveis fragilidades que possam surgir. A modelização e simulação do sistema como ponto de partida para a implementação do sistema permitem também uma tentativa de parametrização dos componentes necessários, nomeadamente a definição da frequência necessária para os sensores, binário e velocidade de rotação do motor e consequentemente tensões e correntes envolvidas para a sua alimentação.

Numa fase posterior, a inclusão dos parâmetros reais do sistema em simulação permite a validação de eventuais resultados experimentais, o contraponto entre os tempos reais medidos no sistema e um padrão de resultados simulados.

A tabela seguinte apresenta os valores medidos do sistema real. De salientar que a medição das massas apresenta algum desvio da realidade, uma vez que pelo facto de diversos componentes se encontrarem já interligados limitava a medição individual desta grandeza. A medição das distâncias dos centros de massa dos elementos ao ponto de pivotação foi efetuada experimentalmente, considerando que todos os elementos eram uniformes, e como tal, considerando o centro de massa no seu centro vertical. Para o caso do suporte do motor, uma barra em forma de L, o centro de massa foi estimado tendo em conta que o suporte horizontal faz com que este se desloque para um ponto de altura inferior.

Componente	L (m)	Massa (Kg)
Volante	0,366	0,101
Tampa 1	0,08	0,1
Tampa 2	0,08	0,1
Acrilico	0,164	0,942
Tupo pvc	0,08	0,679
Barra L	0,248	0,235
Parafusos	0,164	0,05
Arduino	0,17	0,04
IMU Trax	0,17	0,007
Motor	0,373	0,2
Shield + cabos	0,172	0,06
Total estimado		2,514
Total medido		2,42

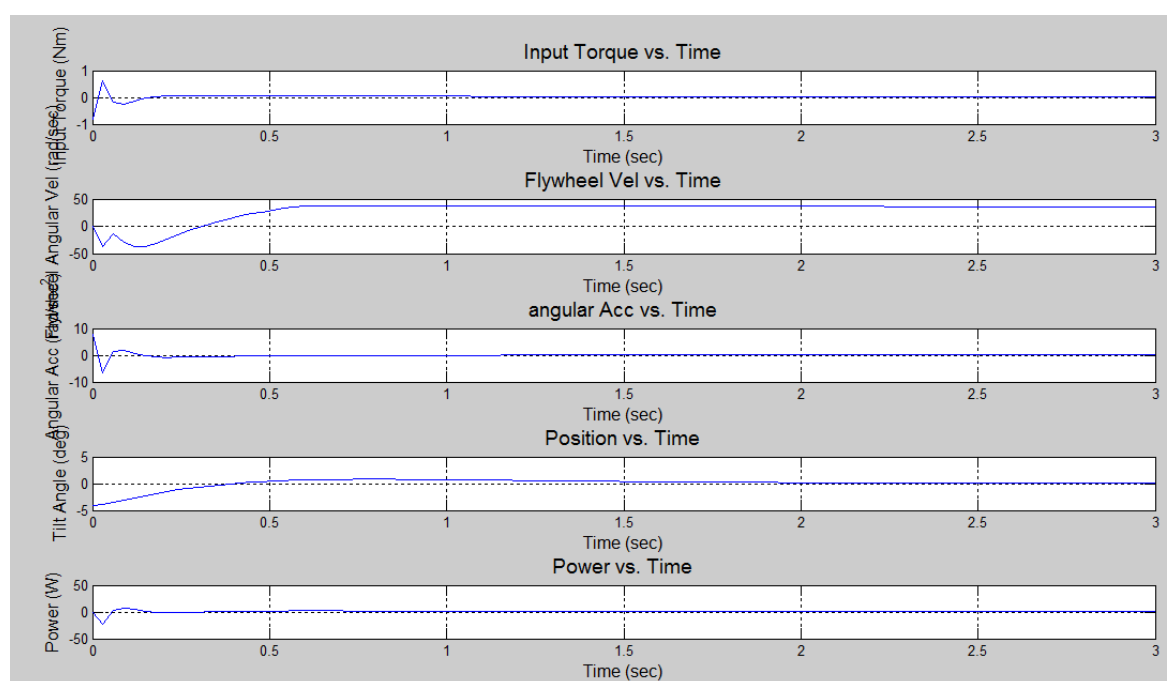
Tabela 19 - Massas e posição do centro de massa dos componentes

thetaf_0	Posição inicial do volante	0	rad
thetadotf_0	Velocidade angular inicial do volante	0	rad/s
g	Aceleração gravítica	9.807	m/s ²
rf	Raio do volante de inércia	0.076	m
mf	Massa do volante de inércia	0.101	Kg
r_flywheel	Distância do centro do volante ao ponto pivot	0.366	m
Jf	Momento de inércia do volante	$(1/2)*mf*rf^2$	Kgm ²

Tabela 20 - Grandezas utilizadas no modelo Matlab

O resultado de uma simulação pode ser visto na imagem seguinte. A imposição de limites máximos de binário e velocidade é feita através da imposição de valores máximos nos blocos Simulink. De notar a rápida resposta na variação do binário do motor, que no sistema físico se revela limitativa.

Os parâmetros apresentados são, respetivamente, e em relação ao tempo em segundos, binário do motor, velocidade de rotação do volante, aceleração angular do sistema completo, ângulo de inclinação e potência consumida pelo motor.

Figura 25 - Resultado de simulação Matlab, $\theta_0 = 7$

5.5.2 Determinação de função de transferência

Para pequenas oscilações o modelo pode ser linearizado da seguinte forma:

$$J_B \ddot{\theta} + B_B \dot{\theta} - B\omega = m_b g l_b \theta - T \quad (6)$$

$$J_F (\ddot{\theta} + \dot{\omega}) + B\omega = T \quad (7)$$

Em que:

θ = ângulo de roll- inclinação

$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ = primeira e segunda derivadas da posição (inclinação)

ω = velocidade de rotação do volante de inércia em relação ao barco

m_B = massa da embarcação

m_f = massa do volante de inércia “flywheel”

J_B = Momento de inércia em relação ao ponto pivot

J_f = Momento de inércia do volante

T = Binário gerado pelo motor

B = atrito relacionado com a interação motor-volante de inércia

Somando as equações acima obtém-se:

$$(J_B + J_F) \ddot{\theta} + B_B \dot{\theta} + J_F \dot{\omega} - m_b g l_b \theta = 0 \quad (8)$$

Se se considerar uma velocidade de rotação do volante de inércia constante, ou seja, $\dot{\omega} = 0$, podem obter-se os pólos de malha aberta pela equação:

$$(J_B + J_F) s^2 + B_B s - m_b g l_b = 0 \quad (9)$$

Através da aplicação, por exemplo, do critério de Routh-Hurwitz, verifica-se que o sistema é instável. No entanto, se for possível a atuação na velocidade de rotação, a estabilização do sistema será possível.

Ao considerar a variável ω como uma variável de controlo, podendo em cada instante definir o seu valor a função de transferência do sistema vem:

$$\frac{\Phi(s)}{\Omega(s)} = \frac{-J_F s}{(J_B + J_F) s^2 + B_B s - m_b g l_b} \quad (10)$$

Esta aproximação estará neste caso dependente da dinâmica da resposta do sistema de controlo de velocidade do volante.

Da equação (8) conclui-se que a aplicação de um controlo proporcional não será suficiente, uma vez que o polinómio daí resultante, em 11, possui pelo menos uma das raízes no semiplano direito do lugar geométrico de raízes.

$$(J_B + J_F) s^2 + (B_B + K J_F) s - m_b g l_b = 0 \quad (11)$$

Assim, considere-se uma lei de controlo correspondente a um controlador PI, com

$$\omega = k_p \theta + k_i \int \theta \quad (12)$$

Substituindo a expressão (12) em (8) vem

$$(J_B + J_F)\ddot{\theta} + (B_B + k_p J_F)\dot{\theta} + (k_I J_F - m_b g l_b)\theta = 0$$

Sendo que, neste caso, o sistema será estável para $K_I J_M > m_b g l_b$.

Considerando que a velocidade de rotação do volante não é diretamente manipulável, mas a saída de um sistema de primeira ordem vem,

$$\tau \dot{\omega} + \omega = \omega_r \quad (13)$$

Sendo τ uma constante de tempo que caracteriza a resposta a uma velocidade de referência ω_r manipulável. Para este caso a função de transferência de um sistema de entrada ω_r e saída θ será:

$$\frac{\Phi(s)}{\Omega(s)} = \frac{\Phi(s)}{\Omega(s)} \cdot \frac{\Omega(s)}{\Omega_r(s)} \frac{-J_F s}{(J_B + J_F)s^2 + B_B s - m_b g l_b} \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \quad (14)$$

Por interpretação dos ensaios realizados à dinâmica do controlador de velocidade do motor determinou-se uma constante de tempo τ de 0,15s.

Uma vez conhecida uma aproximação das massas e localização de centros de massa do sistema obtiveram-se os seguintes parâmetros:

Parâmetro	Valor calculado/medido
J_F	2.9169e-004 Kg m^2
J_B	0.0915 Kg m^2
m_b	3.2140 Kg
l_b	0.1413 m

Tabela 21 - Parâmetros calculados

Considerando os atritos desprezáveis obteve-se a função de transferência:

$$\frac{\Phi(s)}{\Omega(s)} = \frac{-0.0002917s}{0.09174 s^2 - 4.453} \quad (15)$$

Multiplicando por $\frac{1}{\tau s + 1}$ com $\tau = 0,15$, vem:

$$\frac{\Phi(s)}{\Omega(s)} = \frac{-0.0002917s}{0.01376 s^3 + 0.09174 s^2 - 0.6679s - 4.453} \quad (16)$$

De modo a que $K_I^* J_M > m_b g l_b$ e com $m_b g l_b = 4,45$ e $J_M = 2.9 \cdot 10^{-4}$, a constante de integração K_I deve ser maior que $1,52 \cdot 10^4$.

5.6 Algoritmos implementados

5.6.1 No modelo

A sequência lógica utilizada no modelo implementado pode ser vista na figura 26, estando posteriormente descrito parte do código, na linguagem C.

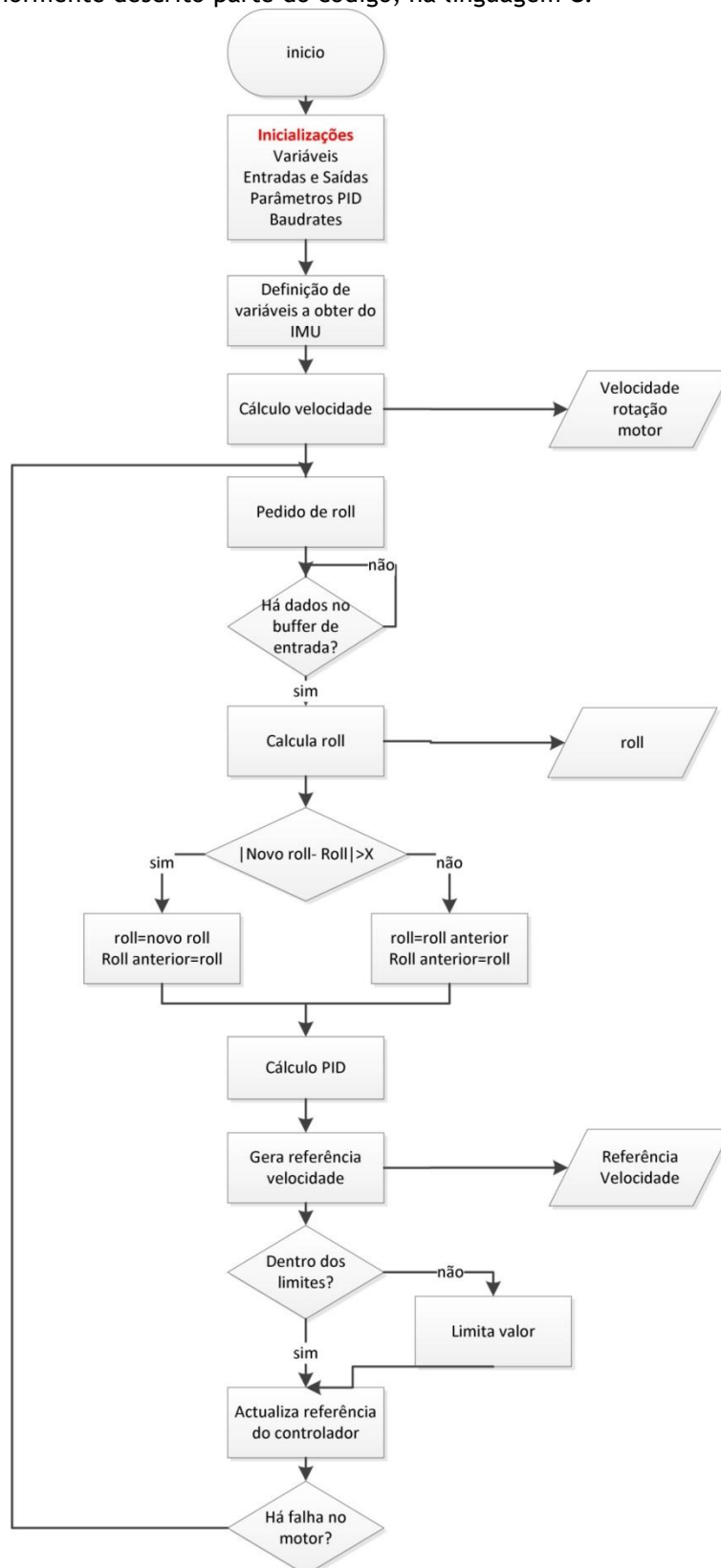


Figura 26 - Algoritmo implementado

O diagrama representado na figura 26 é explicado em seguida, sendo associada a cada etapa a função implementada que a representa. As variáveis a ser exportadas para o PC são apresentadas do lado direito da referida imagem.

Definições

Definir pinos do Encoder

```
#define encoder0PinA 20
```

```
#define encoder0PinB 21
```

Definir sentido de rotação do motor

```
#define SENTIDO 1
```

Definir ângulo de referência para roll

```
#define teta_ref 0
```

Inicializações

Inicializar função de detecção de falha no motor

```
stopIfFault()
```

Inicializar variáveis do PID

```
int pidSampleTime=20;
```

```
PID myPID(&roll, &vel_set, &teta_ref, kp, ki, kd, DIRECT);
```

```
Definir limites dos valores do PID myPID.SetOutputLimits(-350, 350);
```

Definir pinos do encoder como entrada e associar interrupt

```
pinMode(encoder0PinA, INPUT);
```

```
digitalWrite(encoder0PinA, HIGH);
```

```
pinMode(encoder0PinB, INPUT);
```

```
digitalWrite(encoder0PinB, HIGH);
```

```
attachInterrupt(3, doEncoder, RISING);
```

Inicializar portas de série e definir baudrates

```
Serial.begin (38400);
```

```
Serial1.begin(38400);
```

Definir dados a receber do IMU - Roll

```
kSetDataComponents();
```

LOOP- Programa Principal

Obter tempo do programa e posição atual

Obter sentido de rotação do motor e velocidade (em rotações por minuto)

```
vel_act = (newposition-oldposition) * 1000 / (newtime-oldtime)* 60 / 1856
```

Atualizar valor de posição e tempo de funcionamento

Enviar pedido de informação para IMU

```
kGetData();
```

Ler trama de dados do IMU, selecionar e formatar corretamente dados do roll e descartar cabeçalho e checksum

```
roll=get_roll();
```

Caso a diferença do valor anterior para o atual seja superior a uma constante, descarta-se a nova leitura e mantém-se o valor anterior

Guardar valor de roll

Calcular velocidade de referência para o motor

```
myPID.Compute();
```

Linearizar a referência de velocidade

Gerar referência de velocidade para o controlador do motor, monitorizando falhas

```
md.setM1Speed(vel_set);
```

```
stopIfFault();
```

Funções em Interrupt

Atualizar posição por leitura de saídas do encoder

```
doEncoder()
```

5.6.2 No PC

Descrita no planeamento inicial do projeto como um dos objetivos a atingir, a implementação de um protocolo de comunicação capaz de permitir a monitorização e/ou controlo ativo de uma eventual embarcação foi abordada aquando do desenvolvimento do modelo.

Antevendo uma possível utilização de um PC como estação terra, e aquando de um período de espera por componentes encomendados, iniciou-se o desenvolvimento de uma aplicação java com o objetivo de funcionar como interface gráfico.

O intuito inicial da mesma era disponibilizar informação durante uma missão da embarcação. A título de exemplo identificam-se a monitorização das variáveis internas da embarcação (tensões, correntes, estado das baterias, temperaturas), as coordenadas GPS, eventuais grandezas a ser recolhidas por um conjunto de sensores anexos, etc. Como mais-valia para a funcionalidade e polivalência do sistema de controlo, pretende-se a capacidade de comunicação bidirecional, isto é, não só a receção de variáveis por parte da estação terra mas também o envio, nomeadamente de novos pontos de coordenada GPS a atingir durante uma missão.

Tendo em conta que a versão inicial da aplicação foi desenvolvida paralelamente com o modelo à escala, o interface implementado comporta as funções de comunicação necessárias, recorrendo a uma biblioteca de comunicação série pré desenvolvida mas difere em ambiente gráfico e variáveis a monitorizar daquela que se pretende em última instância.

Um exemplo gráfico ilustrativo pode ser observado na figura 27.

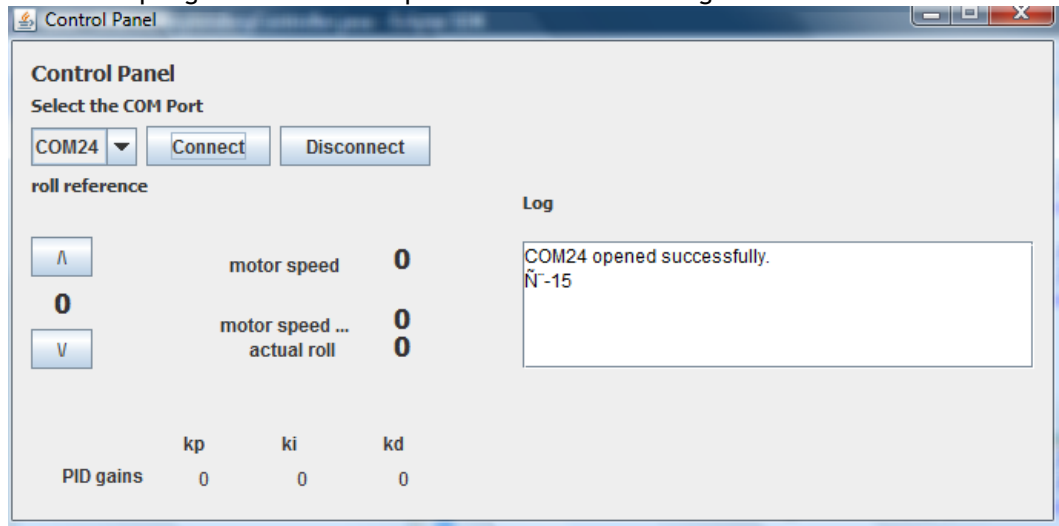


Figura 27 - Interface java implementado

O seguinte diagrama descreve o conjunto de classes implementado, bem como o conjunto de variáveis e funções que as compõe. A possibilidade de controlar eventuais variáveis com recurso ao teclado do PC foi tida em conta e está contemplada na classe KeyBindingController. O código desenvolvido teve por base a página <http://henrypoon.wordpress.com/2011/01/01/serial-communication-in-java-with-example-program/>

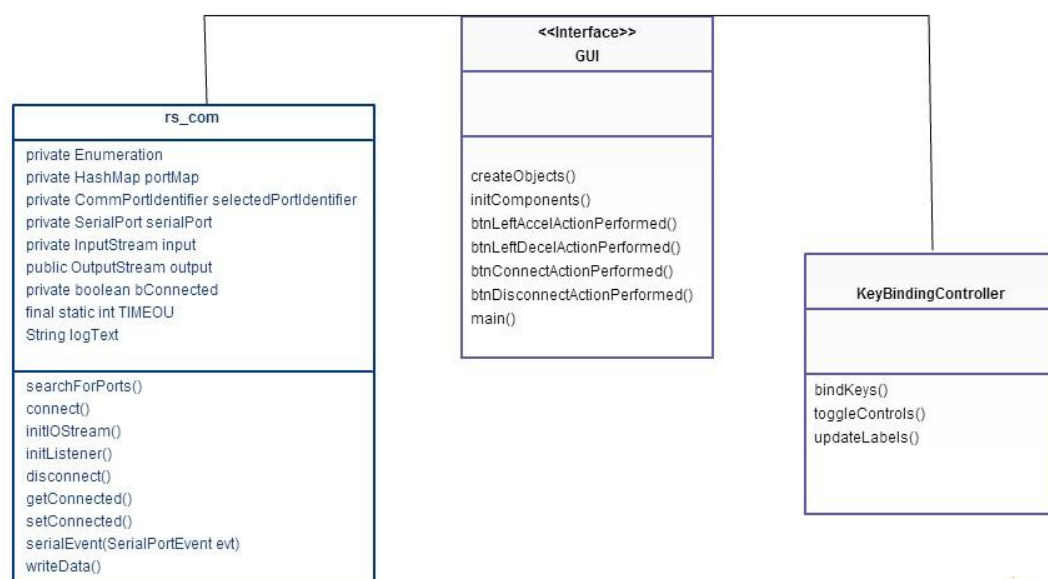


Figura 28 - Diagrama de classes do interface java implementado

5.7 Setup de testes

A montagem de testes efetuada pode ser vista nas figuras que se seguem.

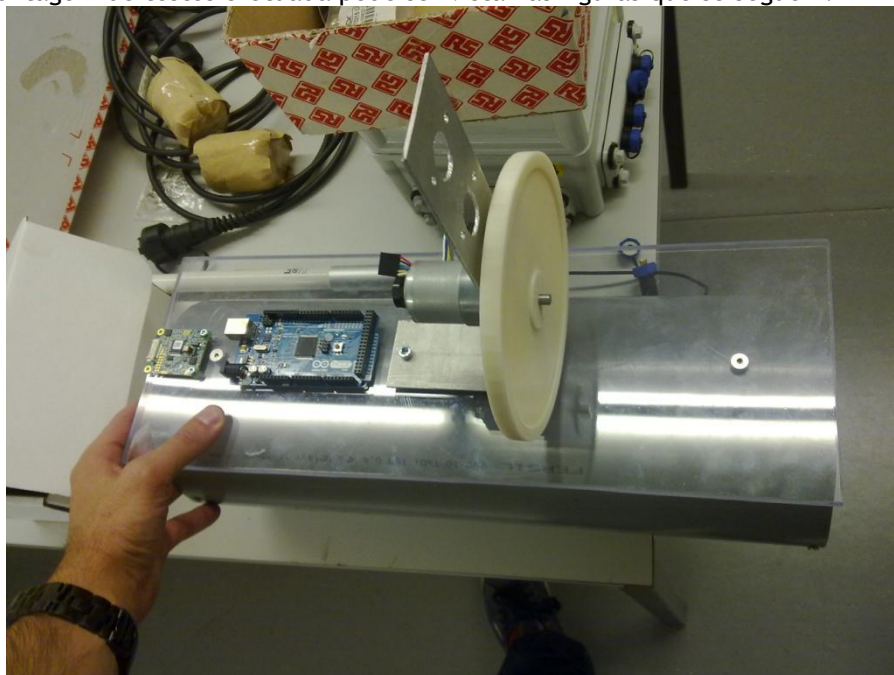


Figura 29 - Vista superior da montagem de testes

Na figura abaixo é possível verificar a montagem aberta, no seu interior está uma massa com o intuito de baixar o centro de massa do sistema, aumentar a massa e consequentemente diminuir a dinâmica do mesmo.

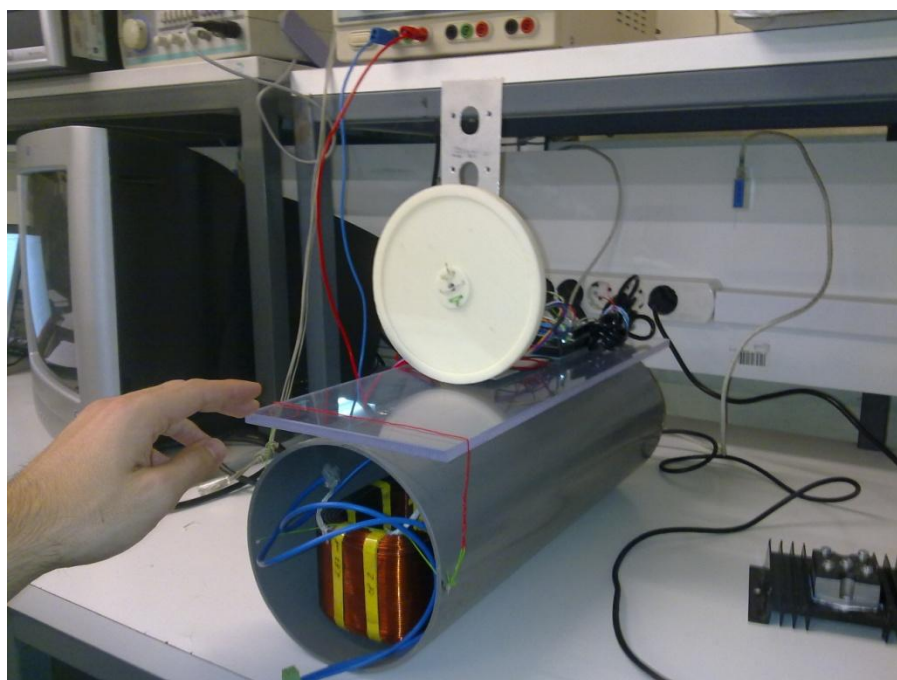


Figura 30 - Vista frontal da montagem de testes

Capítulo 6

Testes práticos

6.1 Ensaios de Tempos de Resposta do Controlador

A percepção da importância dos tempos de processamento do controlador, bem como dos intervalos de tempo necessários para a comunicação, foi estudada através da verificação dos tempos médios necessários para a realização de determinadas funções. O esquema abaixo pretende sumarizar um teste efetuado, sendo apresentados em milésimas de segundos os tempos mínimo, médio e máximo, medidos com recurso à função `millis()` disponível nas bibliotecas do Arduino, e que retorna um valor temporal decorrido após o início do primeiro ciclo de funcionamento.

De salientar que para o correto funcionamento do controlador do motor é exigido um tempo de ciclo superior a 50 milissegundos, pelo que no final de cada ciclo é adicionado este valor sob a forma de um atraso.

Calculate w	Roll request	Roll read	PID compute	Set w ref	Test motor fault	Delay request	Delay
Máx 2ms Min 0ms Avg 0,36	Máx 2ms Min 0ms Avg 0,29	Máx 2ms Min 0ms Avg 0,87	Máx 2ms Min 0ms Avg 0,29	Máx 2ms Min 0ms Avg 0,3	Máx 2ms Min 0ms Avg 0,23	Máx 2ms Min 0ms Avg 0,29	Máx 54ms Min 50ms Avg 52,48

Figura 31 - Tempos de processamento do controlador

6.2 Ensaio do Conjunto Controlador de Velocidade e Motor

A capacidade de reação do conjunto controlador-motor a alterações na referência estipulada (entre -400 e 400) caracteriza a capacidade de resposta do mesmo. Apesar de a biblioteca do controlador disponibilizar um conjunto de funções, nomeadamente de controlo de aceleração e travagem, monitorização de corrente e deteção de falhas, não apresenta a relação entre a referência estipulada e a velocidade imposta. Como tal, efetuaram-se um conjunto de testes não só para perceber essa característica mas também de modo a estimar o atraso temporal na resposta do mesmo.

Para todos os testes a medição da velocidade foi efetuada com recurso a um encoder acoplado ao motor, gerando 464 pulsos por cada rotação do eixo à saída da caixa.

Num primeiro conjunto de testes o motor foi alimentado a 6, 9 e 12 V e foi gerada uma referência (para o controlador do motor) a iniciar em -400 e terminar em 400, subindo 20 unidades a cada ciclo (100ms). Destaca-se da análise do gráfico da figura 32 a não linearidade da velocidade perante a variação da referência, isto é, ao aumentar a referência em intervalos de tempo e valor constantes a resposta apresentada não varia linearmente em velocidade. Neste caso, o eixo vertical representa rotações por minuto (velocidade de rotação do motor) e o eixo horizontal o número de ciclos de execução do programa.

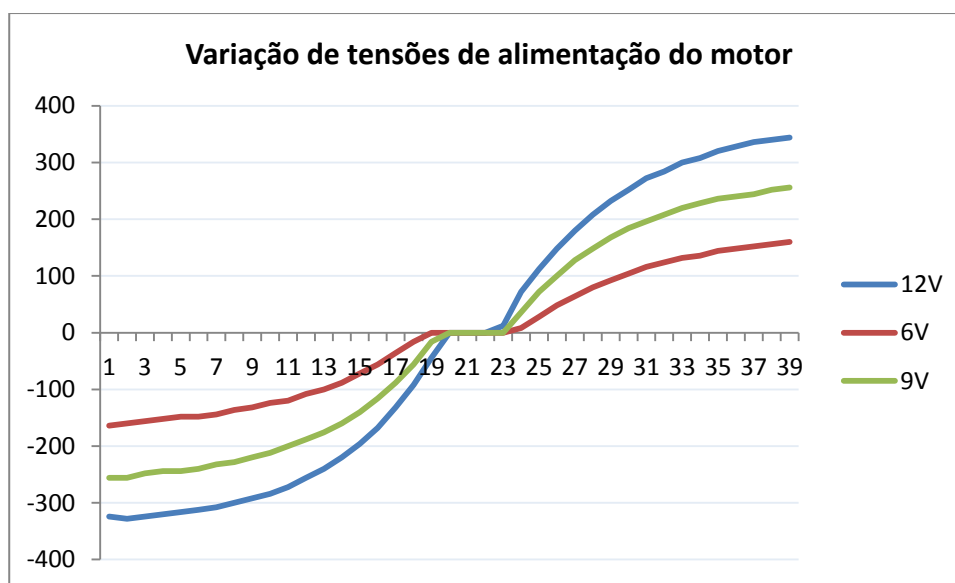


Figura 32 - Variação de tensão de alimentação

Por análise dos dados obtidos no ensaio a 12V, e por ser esta a tensão de alimentação máxima a que se pretende submeter o motor, efetuou-se a regressão linear e a aproximação a um polinómio de grau 3, quer utilizando a referência de -400 a 400 como ordenada e a velocidade efetivamente medida como abcissa, quer o inverso.

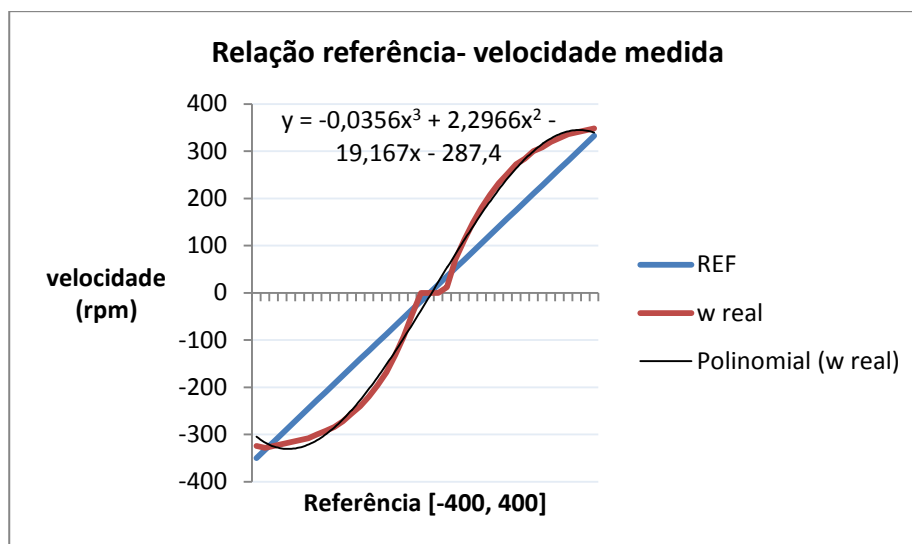


Figura 33 - Relação referência-velocidade

Em baixo é apresentada a relação inversa ao gráfico anterior (de onde se retirou a expressão para a linearização), isto é, apresentando no eixos abcissas a referência de -400 a 400 e a velocidade efetivamente medida como ordenada.

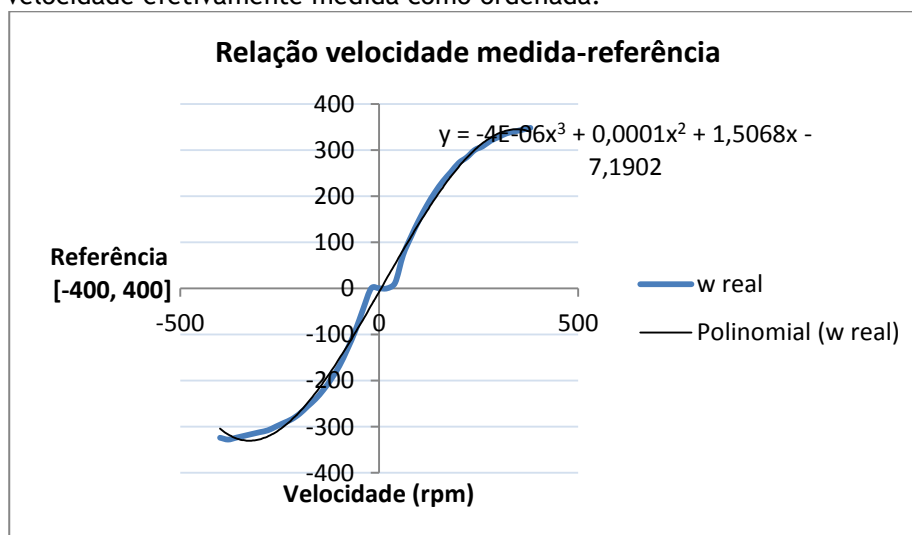


Figura 34 - Relação entre velocidade e referência

Para o ensaio representado no gráfico da figura 35 definiu-se um tempo de atraso entre ciclos de 30 ms, sendo que se estabeleceu a velocidade de referência consecutivamente em 0, 350, 0, -350, 0, 100, 200, 100, 0 rotações por minuto (sendo este valor depois escalado para valores correspondentes na escala [-400;400]). Foi possível efetuar então uma estimativa do tempo de resposta pelo atraso entre o momento em que é estabelecida a referência de velocidade máxima (primeiramente num sentido e depois no inverso) e o momento em que a velocidade pretendida é atingida. Percebe-se também que, de acordo com o ensaio anterior, para referências intermédias, a velocidade não varia linearmente com a referência.

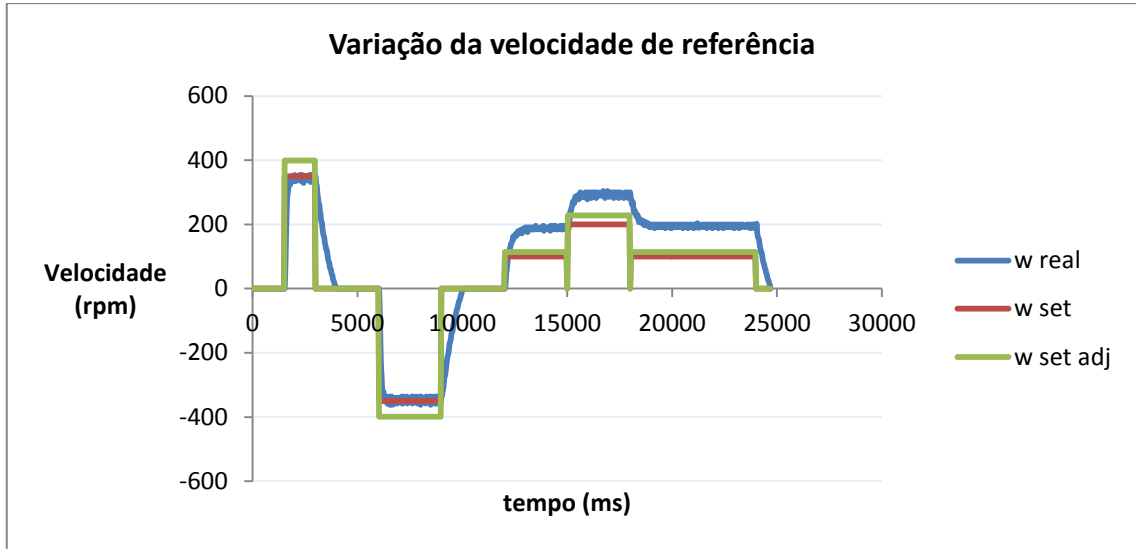


Figura 35 - Variação da velocidade de referência

Para determinação do atraso típico da resposta na aceleração para a velocidade máxima em cada um dos sentidos efetuou-se um ensaio onde se estabelecem as referências de velocidade demonstradas no gráfico da figura 36, considerando o valor da abcissa para quando o motor atinge 95% da velocidade máxima como 3τ (três vezes o atraso), chegou-se à estimativa de 150ms para o valor típico de atraso.

Verifica-se que a expressão característica da resposta apresenta uma característica do tipo

$$y = V_f(1 - e^{-t/\tau}) \quad (17)$$

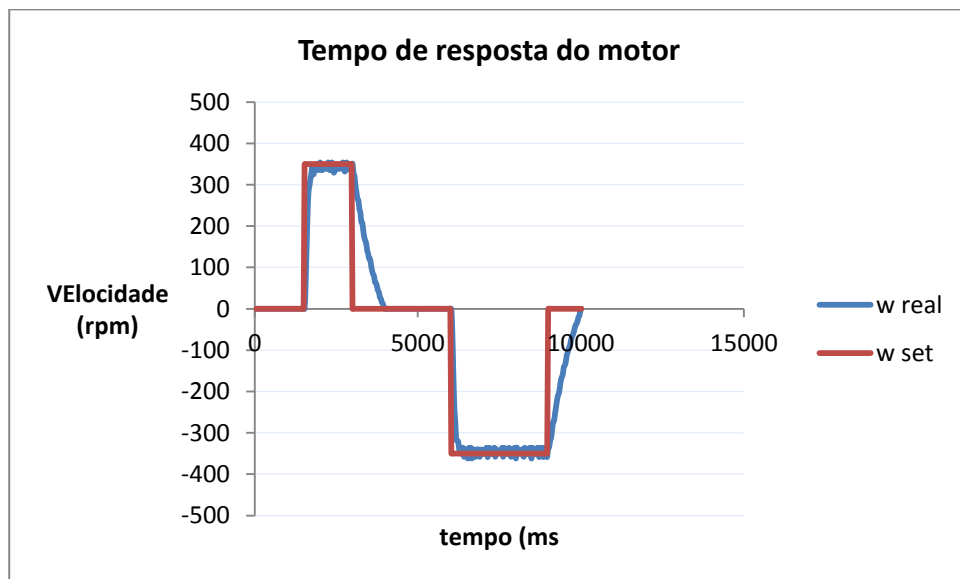


Figura 36 - Tempo de resposta do motor

Procurando corrigir a não linearidade no que toca à referência e utilizando o polinómio determinado no gráfico da figura 34, efetuou-se um novo ensaio em que se verifica a resposta do motor depois de aplicada uma referência de -350 a 350 rpm com intervalos de 25rpm, isto é, efetua-se um escalonamento de [-350;350] para [-400;400] e posteriormente aplica-se esse valor ao polinómio de aproximação limitando os valores máximo e mínimo dentro da mesma gama de [-400;400].

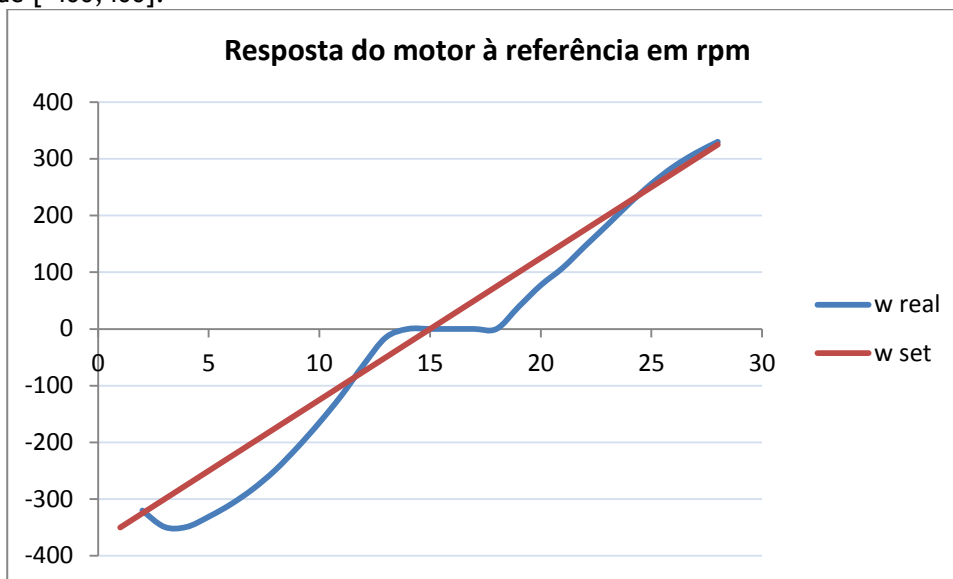


Figura 37 - Resposta em velocidade do motor

Procurando perceber o funcionamento dentro dos pontos intermédios e para a aplicação de degraus efetuou-se um novo ensaio. Os resultados podem ser vistos na figura 38.

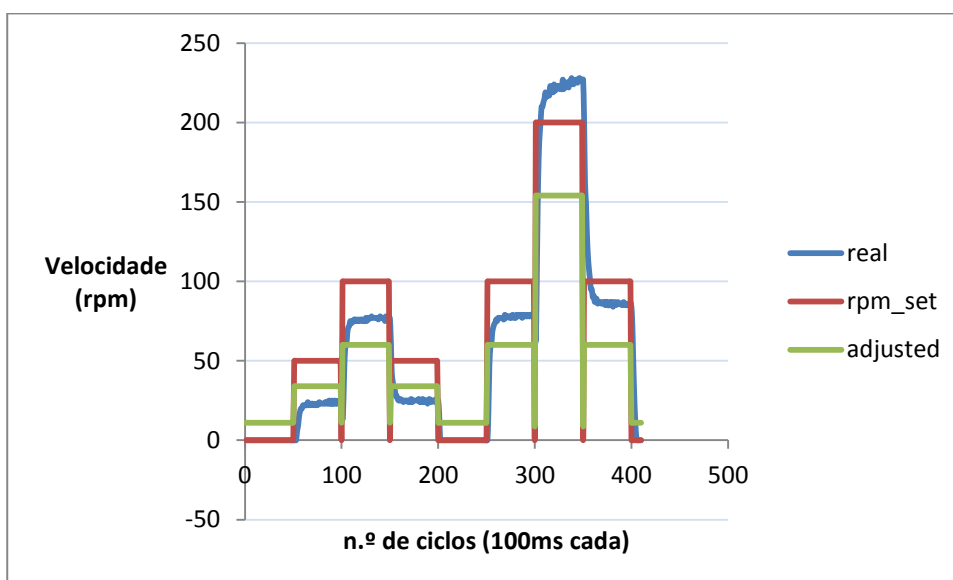


Figura 38 - Resposta do controlador de velocidade do motor a diferentes degraus

A vermelho é apresentado o valor de velocidade pretendido, a verde o valor de referência gerado após ajuste e a azul a velocidade real medida.

Verifica-se que a aproximação melhora o resultado, não sendo no entanto ideal.

6.3 Ensaio do IMU

O sistema de medição inercial utilizado, isto é, o sensor que deteta as variações no ângulo de rol, pode impor uma limitação temporal ao sistema, uma vez que possui uma taxa máxima para a qual consegue gerar valores de inclinação.

Apesar de a folha de características do IMU utilizado apresentar uma taxa máxima de amostras procedeu-se a um teste em que o controlador envia pedidos sucessivos para leitura do valor da inclinação, procedendo depois à sua leitura. Uma vez que o risco de perda de informação na comunicação é significativo, aplica-se um algoritmo em que, caso um valor lido apresente uma diferença superior a um dado valor da leitura anterior, substitui o respetivo valor pela última leitura, descartando os dados que se pressupõem incorretos.

Para este ensaio fez-se mover constantemente, e durante 11s, o modelo desenvolvido, alterando assim a sua inclinação, sendo efetuada uma leitura a cada 25ms. A seguinte tabela relaciona cada segundo do ensaio com o número máximo de variações do valor de inclinação obtido.

tempo (s)	nº de amostras diferentes
1	19
2	26
3	29
4	30
5	29
6	27
7	29
8	30
9	31
10	30

Tabela 22 - Frequência de amostragem do IMU

6.4 Ensaio do Modelo Completo

Perceber a capacidade de atuação do conjunto motor-volante de inércia com uma dada velocidade e massa, em contraponto com um dado sistema físico, com um conjunto de parâmetros também eles conhecidos levou à idealização de um conjunto de testes com o conjunto dos elementos físicos e eletrónicos anteriormente descritos.

Um primeiro teste, efetuado ainda antes da tentativa de linearização da velocidade do motor em relação à referência, pretendeu estabelecer se a capacidade de atuação do motor era superior na posição superior ou inferior do suporte criado. Visualmente observou-se que, de acordo com a simulação em Matlab, a resposta era melhor para posições mais próximas do solo.

Um segundo teste e para o sistema de massa M1 e distância L1 entre o centro de massa e o ponto pivot (segundo os valores de referência para a simulação em Matlab), aplicou um controlador do tipo PID, com os ganhos obtidos por simulação ao sistema. O gráfico abaixo demonstra estes resultados. Para o referido teste limitou-se manualmente o ângulo de inclinação do modelo, quer positivo, quer negativo, verificando-se que o mesmo balançava entre um extremo e outro.

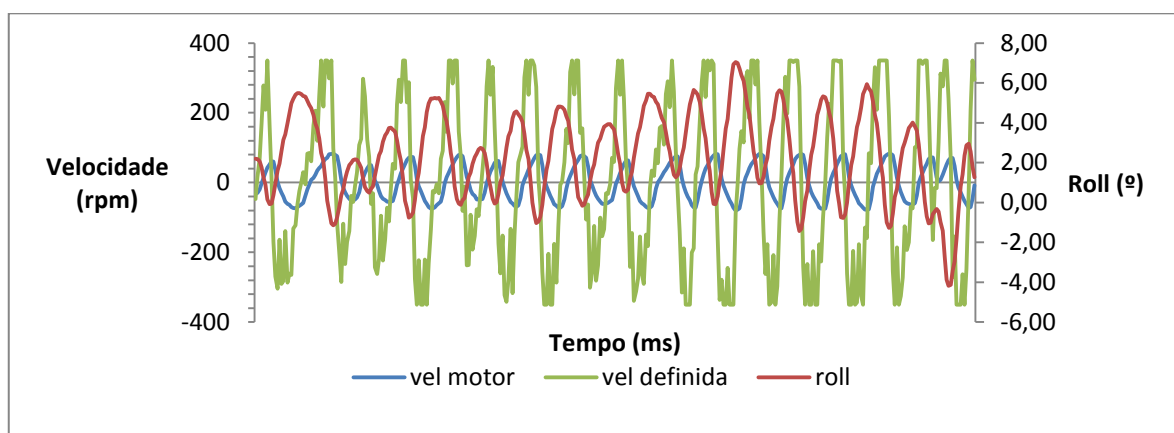


Figura 39 - Ensaio do sistema de equilíbrio

Partiu-se deste modo para um conjunto de testes mais rigoroso, sendo os mesmos explicados de seguida.

Para o sistema com os mesmos parâmetros M1 e L1 anteriormente definidos, definiu-se uma velocidade inicial de rotação do motor, verificando o seu comportamento em queda livre, para valores de aceleração nulos.

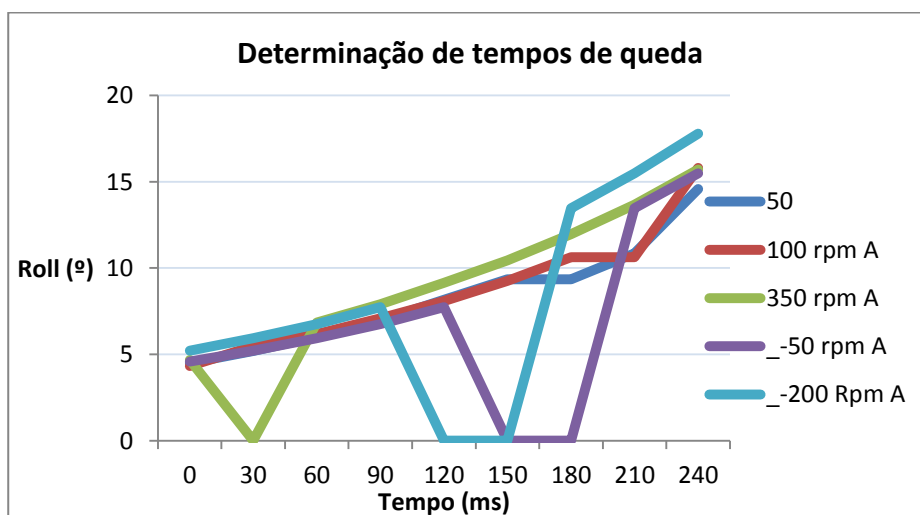


Figura 40 - Tempos de queda para diferentes velocidades

Como era de esperar, uma vez que a aceleração angular é nula não há binário, logo as curvas são muito próximas.

Repetindo o mesmo ensaio, para velocidades de rotação nulas (uma vez que a variação do ângulo é independente da velocidade) e fazendo baixar o centro de massa e aumentar a massa total do sistema.

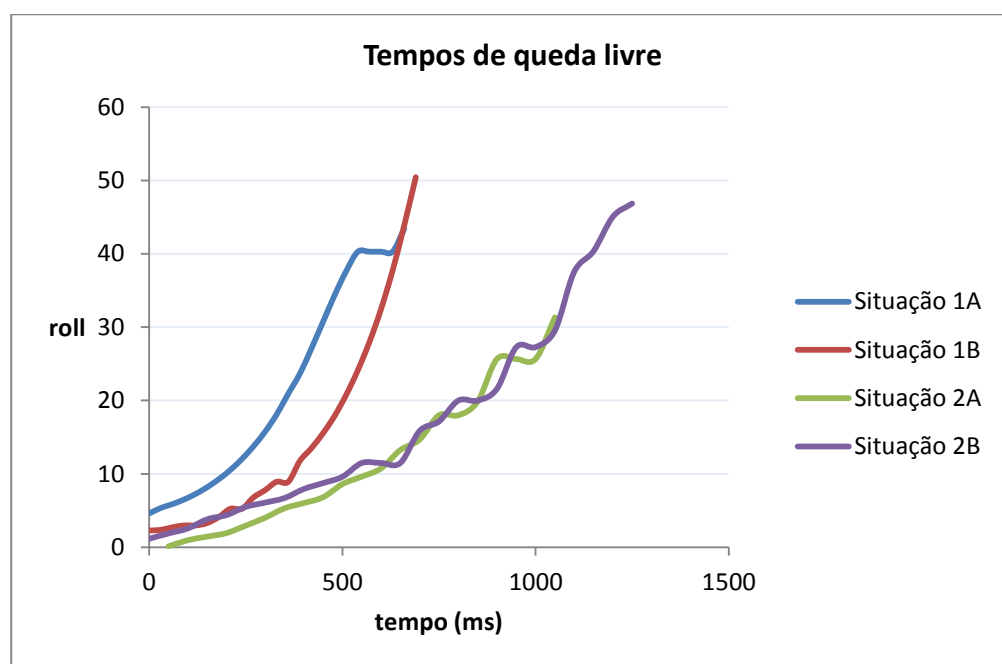


Figura 41 - Tempos de queda com diferentes massas

O gráfico anterior apresenta 2 ensaios para cada uma das massas e raios de rotação, M1 e L1 e M2 e L2.

Como era de esperar com o centro de massa mais abaixo e maior massa total (situação 2) a dinâmica do sistema é mais lenta.

Como se observa, a variação das curvas apresenta um comportamento exponencial. De acordo com as expressões (18) e (19) procurou-se a determinação das constantes de tempo associadas a cada curva.

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\tau} \quad (18)$$

$$\frac{1}{\tau} = \left(\ln \frac{\theta}{\theta_0} \right) \cdot \frac{1}{t} \quad (19)$$

Para massa M1 e L1

$\ln \frac{\theta}{\theta_0}$	θ	$\frac{1}{\tau}$	τ
0,1426563	4,5	0,004755	210,2957
0,291009863	5,19	0,00485	206,1786
0,436102078	6,02	0,004846	206,3737
0,596391512	6,96	0,00497	201,2101
0,731298947	8,17	0,004875	205,1145
0,731298947	9,35	0,004063	246,1374
0,880087683	9,35	0,004191	238,6126
1,174887223	10,85	0,004895	204,2749
1,32027326	14,57	0,00489	204,5031
1,469409268	16,85	0,004898	204,1637
1,62312164	19,56	0,004919	203,3119
1,775705363	22,81	0,004933	202,7363
1,929264438	26,57	0,004947	202,1496
2,078607861	30,98	0,004949	202,0583

Tabela 23 - Determinação de constante de tempo para M1 e L1

Para M2 e L2

$\ln \frac{\theta}{\theta_0}$	θ	$\frac{1}{\tau}$	τ
2,96	0,308577	0,001234	810,1703
4,03	0,584403	0,001948	513,3448
5,31	0,711558	0,002033	491,8786
6,03	0,83467	0,002087	479,2312
6,82	1,067735	0,002373	421,4529
8,61	1,179694	0,002359	423,8387
9,63	1,289716	0,002345	426,4503
10,75	1,499563	0,002499	400,1166
13,26	1,601978	0,002465	405,7485
14,69	1,804627	0,002578	387,8918
17,99	1,804627	0,002406	415,5984
17,99	1,903015	0,002379	420,3856
19,85	2,159744	0,002541	393,5651
25,66	2,159744	0,0024	416,716

Tabela 24 - Determinação de constante de tempo para M2 e L2

Sucederam - se alguns testes do sistema sem controlador PID, mas com controlador do tipo proporcional e constante k , variando k . Isto para M2 e L2.

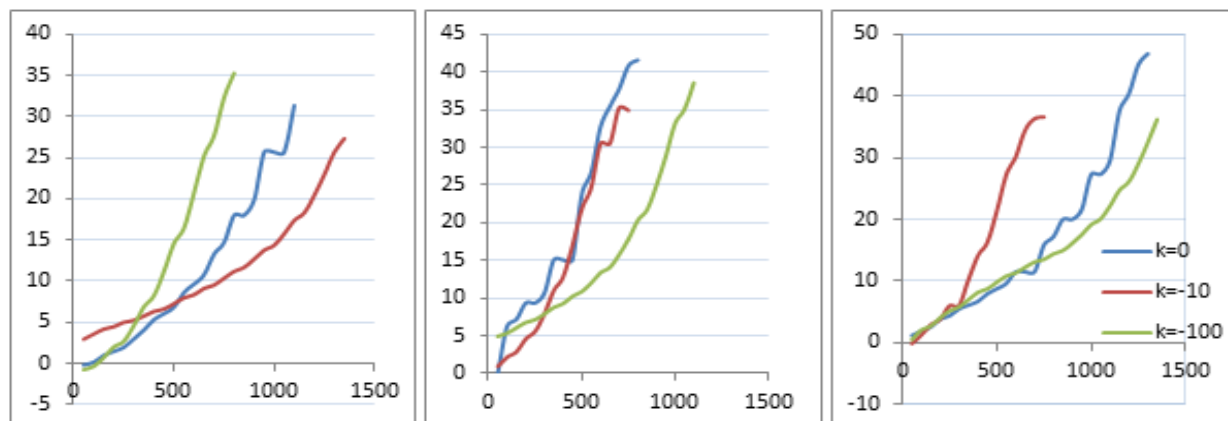


Figura 42- Tempos de queda com controlador proporcional

Nos gráficos anteriores, verificou-se alguma falta de coerência na variação dos ângulos. No primeiro, para $k=-100$, a queda foi para a direita e as restantes para esquerda. No gráfico 2 para $k=-10$ a queda foi para a direita e as restantes para a esquerda. No gráfico 3, para $k=0$ e $k=-10$ a queda foi para a direita.

Pôs-se a hipótese da falta de coerência estar relacionada com a posição da massa adicionada, que estaria a deslocar horizontalmente o centro de massa. Pela pouca variação nas curvas dos gráficos e por observação dos valores de velocidade de referência gerados no microcontrolador, verifica-se que a variação do ganho k apenas tem influência para valores de ângulos muito próximos do valor de referência.

Por observação percebeu-se que para equilibrar o sistema o sentido de rotação inverso aparentava melhores resultados, pelo que o sentido de rotação imposto estaria errado. Ao realizar um ensaio com $K=100$, e para uma pequena inclinação conseguiu-se o equilíbrio do sistema por pequenos instantes.

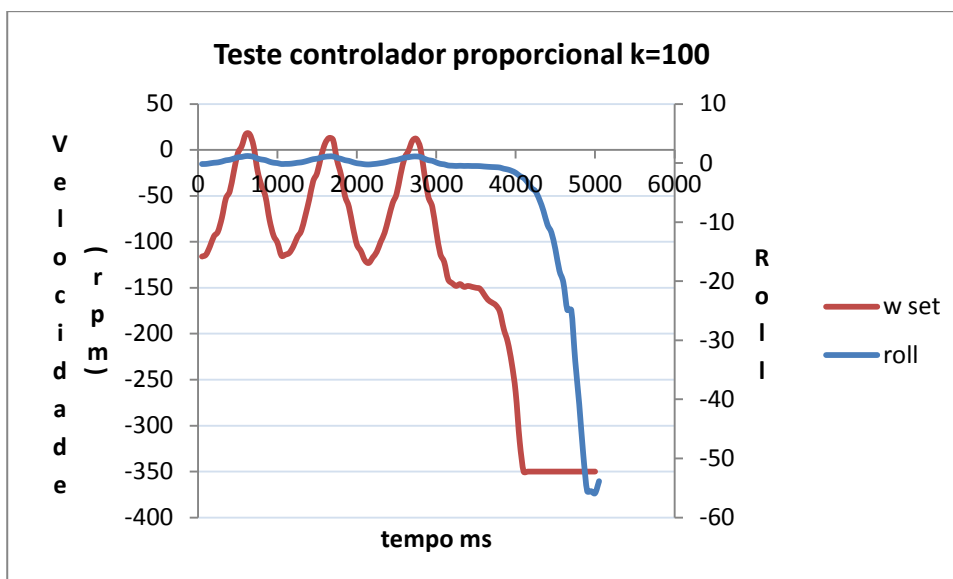


Figura 43 - Ensaio com ganho proporcional

Também a partir da repetição deste ensaio anterior foi possível observar que a massa adicionada apresentava pequenas oscilações de posição em relação ao restante modelo, fazendo deslocar horizontalmente o centro de massa e fazendo variar o ponto de referência vertical (θ_{ref}).

Após uma análise mais cuidadosa da função de transferência descrita no ponto 5.5.2, verificou-se a necessidade de um controlador PI para o controle do sistema. Um conjunto de resultados com controlador PI, de constantes $k_i=16000$ e $k_p = 10$, pode ser visto de seguida.

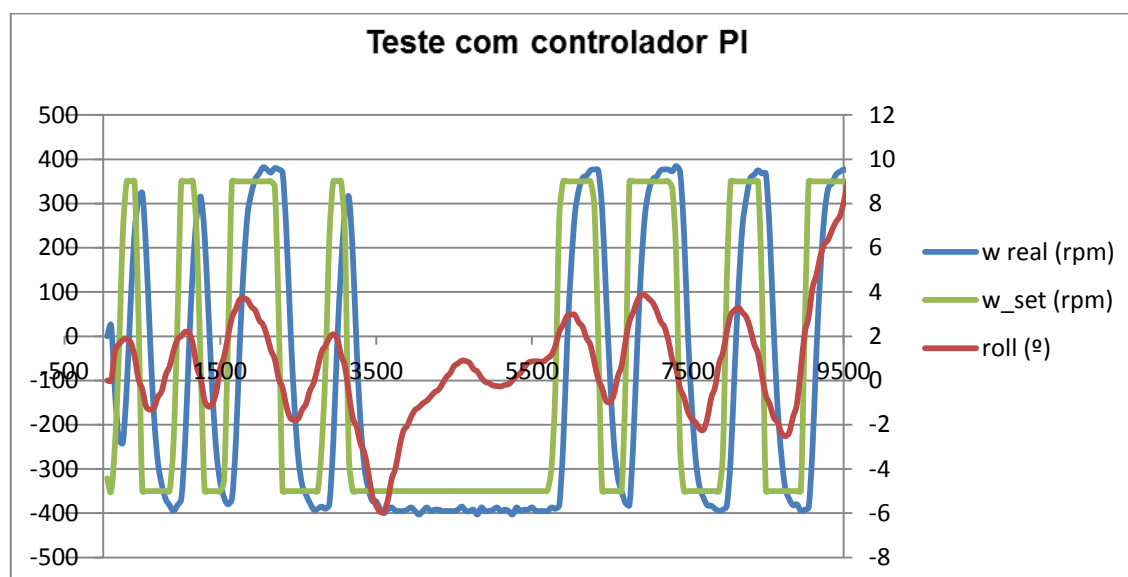


Figura 44 - Ensaio com controlador do tipo PI

O ponto mínimo de *roll* foi limitado manualmente, isto é, não se permitiu a inclinação superior a um certo ponto. O controlador teve alguns resultados aceitáveis para ângulos inferiores a 4° , num dos sentidos.

Da rápida saturação da velocidade infere-se a incapacidade em gerar binário suficiente para ângulos superiores.

Não se verificaram alterações de comportamento visualmente identificáveis com a alteração do ganho proporcional, K_p .

Quando reduzindo muito o ganho integral K_i , verifica-se que a resposta do motor se torna mais lenta, sendo incapaz de controlar o sistema mesmo para ângulos muito pequenos.

Capítulo 7

Conclusões e trabalho futuro

7.1 Conclusões

Da análise das funções de transferência do sistema, e com suporte nas simulações conclui-se que:

1. A utilização do conjunto motor-volante de inércia numa posição de altura inferior é benéfica, uma vez que a instabilidade criada aquando do aumento da altura é superior ao aumento da resultante da força de atuação.
2. O tempo de amostragem do sistema revela uma importância elevada e, como tal, demonstra-se que as limitações de frequência de amostragem do IMU e na resposta do controlador podem ser fatores críticos.
3. O binário gerado pelo volante aparenta ser suficiente para pequenas variações de inclinação, aparentado no entanto ser insuficiente para inclinações acima dos 10° .

Dos resultados dos testes conclui-se que:

1. O controlo em velocidade do motor, ainda que com a tentativa de mitigar as não linearidades por um polinómio de aproximação, nunca apresenta uma resposta completamente linear.
2. Para referências de velocidade muito baixas o comportamento do motor é inconstante, dependendo da velocidade anterior e apresenta dificuldade aquando do arranque.
3. A constante de tempo de atraso associada à resposta do controlador foi estimada em 150ms, podendo no entanto variar.
4. O facto de a base do modelo (ponto pivot para o pêndulo) não ser totalmente uniforme, associada à pequena deslocação horizontal do centro de massa, e à

necessidade de calibração da posição vertical por tentativa e erro, aumenta significativamente a complexidade e dificuldade de controlo do sistema.

5. A tentativa de controlar o sistema para ângulos de módulo superior a 3 a 4 ° face ao ponto de referência revela-se muito difícil.
6. A constante temporal de aceleração do motor (estimada com base em testes anteriores), associada à limitação temporal da atualização de velocidade no interface entre o microcontrolador e o controlador de velocidade do motor (aprox. 50 ms) aparentam não ser suficientemente inferiores ao tempo de resposta dinâmica do sistema, para a massa M1 e distância L1.
7. O veio do motor apresenta uma vibração bastante elevada, de onde se supõe que a linearidade do mesmo possa ser alterada, bem como o atrito possa ser aumentado.
8. O controlo proporcional (utilizando controlador apenas do tipo k), apresenta um comportamento que denota falta de capacidade de atuação para k muito baixo, e uma rápida saturação da velocidade de referência para k elevados, isto é, com k elevados e pequenos ângulos de inclinação o sistema aparenta ter capacidade de atuação (para pequenos ângulos) mas o valor de referência em velocidade tende quase instantaneamente para ± 350 rpm.
9. De acordo com o esperado, a adição de massa ao sistema, fazendo baixar o seu centro de massa, faz com que a dinâmica associada ao mesmo fique mais lenta.
10. Da rápida saturação da velocidade infere-se a incapacidade em gerar binário suficiente para ângulos superiores.
11. Não se verificaram alterações de comportamento visualmente identificáveis com a alteração do ganho proporcional, K_p , aquando da utilização de um controlador do tipo PI.
12. Quando reduzindo muito o ganho integral K_i , para valores na ordem das dezenas ou poucas centenas, verifica-se que a resposta do motor se torna mais lenta, sendo incapaz de controlar o sistema mesmo para ângulos muito pequenos.

7.2 Trabalhos futuros

Nos trabalhos a desenvolver no futuro destaca-se desde logo a necessidade de modificar o modelo de testes de modo a permitir o teste parcialmente imerso.

A robustez do sistema de equilíbrio deverá sofrer um aumento significativo de modo a ser viável a sua aplicação. A utilização de sistemas de processamento mais rápidos e sensores/atuadores com frequências de atualização de entradas e saídas superior pode funcionar como alavanca para se atingir uma fiabilidade aceitável.

O desenvolvimento de uma embarcação com o conjunto de subsistemas idealizados denota também elevada importância. Nesse sentido seria necessário desenvolver algoritmos

de navegação, nomeadamente seguimento de *Waypoints*, controlo do servo de direcionamento e o motor para propulsão, bem como idealizar um sistema resistente à água capaz de acomodar os diversos elementos.

Pelo seguimento lógico seguir-se-ia o melhoramento do interface java e um conjunto de testes de autonomia, velocidade e capacidade de atuação e eventualmente a acomodação de um conjunto de sensores e/ou câmaras.

Capítulo 8

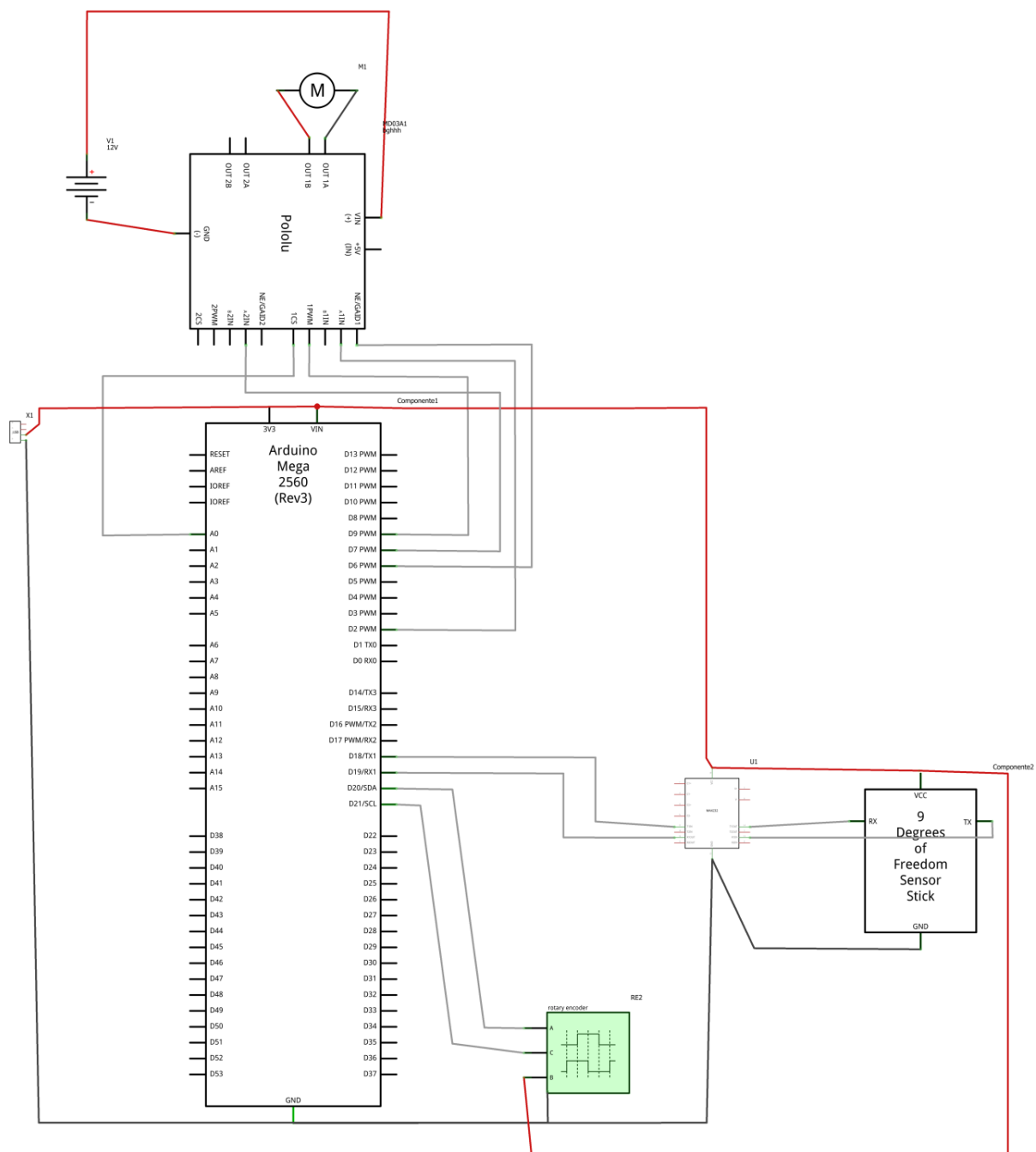
Referências

- Almeida, Duarte. 2012. "Prancha Robótica Autônoma." *Dissertação-Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores*.
- atmel. 2013. *atmega2560* [cited Outubro 2013]. Available from <http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx>.
- Clark Bakstran, Scott Brooks, Angelo Platanius, Greg Sletterink, Nick Solarz, Thomas Womersley. 2012. "Multiple Autonomous Surface Vehicle Project Robotic Kayak." *Worcester Polytechnic Institute*.
- Gang, Wang. 2012. Wireless remote control technology in intelligent buildings system. Paper read at World Automation Congress (WAC), 2012, 24-28 June 2012.
- Gheorghe SAMOILESCU, Serghei RADU. 2002. "STABILISERS AND STABILISING SYSTEMS ON SHIPS." *CONSTANTIN BRÂNCUSI UNIVERSITY - ENGINEERING FACULTY*.
- Husain, I. 2003. "Electric and Hybrid Vehicles." *Boca Raton, FL: CRC Press LLC*.
- Kaizu, Yutaka; Iio, Munetaka; Yamada, Hiroyuki; Noguchi, and Noboru. *Development of unmanned airboat for water-quality mapping*, 2011-08. Available from <http://hdl.handle.net/2115/47053>.
- Mellon, Carnegie. 2011. "Carnegie Mellon Cooperative Robotic Watercraft." oceanscience. Q-Boat 1550T. In *Remotely-Operated Instrumentation boat*, edited by oceanscience.
- oceanscience. 2011. Q-Boat 1800. edited by oceanscience.
- P. Oliveira, A. Pascoal, M. Rufino, L. Sebastião, C. Silvestre. *The Delfim Autonomous Surface Craft: Set-Up for Systems Integration and Tests at Sea*. Instituto Superior Técnico, Dezembro 1999. Available from <http://dsor.isr.ist.utl.pt/Projects/Delfim/Report8/6.html>.
- Pereira, Fernando Lobo. *Sistemas e Veículos Autônomos-Aplicações na Defesa*. Instituto de Defesa Nacional 2005 [cited Janeiro 2014]. Available from http://paginas.fe.up.pt/~flp/papers/SVA-AD_flp_cdn05.pdf.
- Pom Yuan, Lam. 2011. Gyroscopic stabilization of a kid-size bicycle. Paper read at Cybernetics and Intelligent Systems (CIS), 2011 IEEE 5th International Conference on, 17-19 Sept. 2011.
- RANDY PARRILLA, ROBERT BROWN, EMANUEL TOWNS II. "UAV UF 118 Night Falcon." robotics, eca. U.S.V. INSPECTOR MK1. In *Remote-Controlled Target (RCT)*, edited by eca robotics.
- Ship_motions, wiki. 2013. *Ship motions* [cited Junho 2013]. Available from http://en.wikipedia.org/wiki/Ship_motions.
- sidney, University of.
- SilverJimny. *Making an autonomous boat using a Raspberry Pi*. Available from www.instructables.com/id/Making-an-autonomous-boat-with-a-Raspberry-Pi-a-/.

- Siobhan Coady, Branden Hatheway, Christa Masson, Tero Virtanen. *Self-Stabilizing Bicycle*, Dezembro 2012 [cited Janeiro 2014. Available from http://poisson.me.dal.ca/~dp_12_07/deliverables/Team%207%20Fall%20Report.pdf.
- Tom Ituarte, Vince Akhperjanyan, Zach Bernal. 2009. An Autonomous Vessel For Coastal Marine Sensing. In *Continuation of the KRAKEN project*.
- wikipedia.org. *Ship_motions* 2008 [cited Abril 2013. Available from http://en.wikipedia.org/wiki/Ship_motions.
- xor-motors. *rendimento motor eletrico* 2013. Available from <http://www.xor-motors.com/pt/tudo-sobre-eletricidade/tecnologia-motor/rendimento-motor-eletrico.php>.
- Yamakita, M., A. Utano, and K. Sekiguchi. 2006. Experimental Study of Automatic Control of Bicycle with Balancer. Paper read at Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, 9-15 Oct. 2006.

Anexo A.

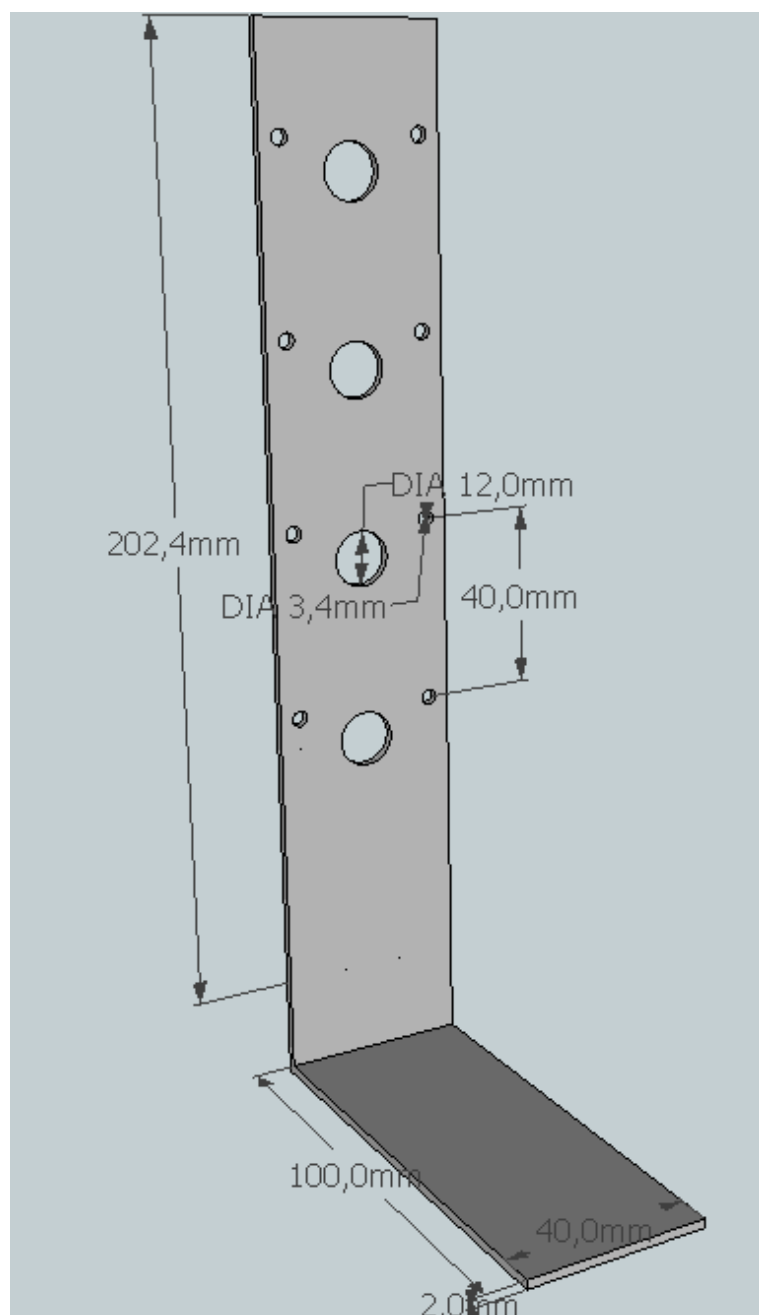
Esquema de ligações

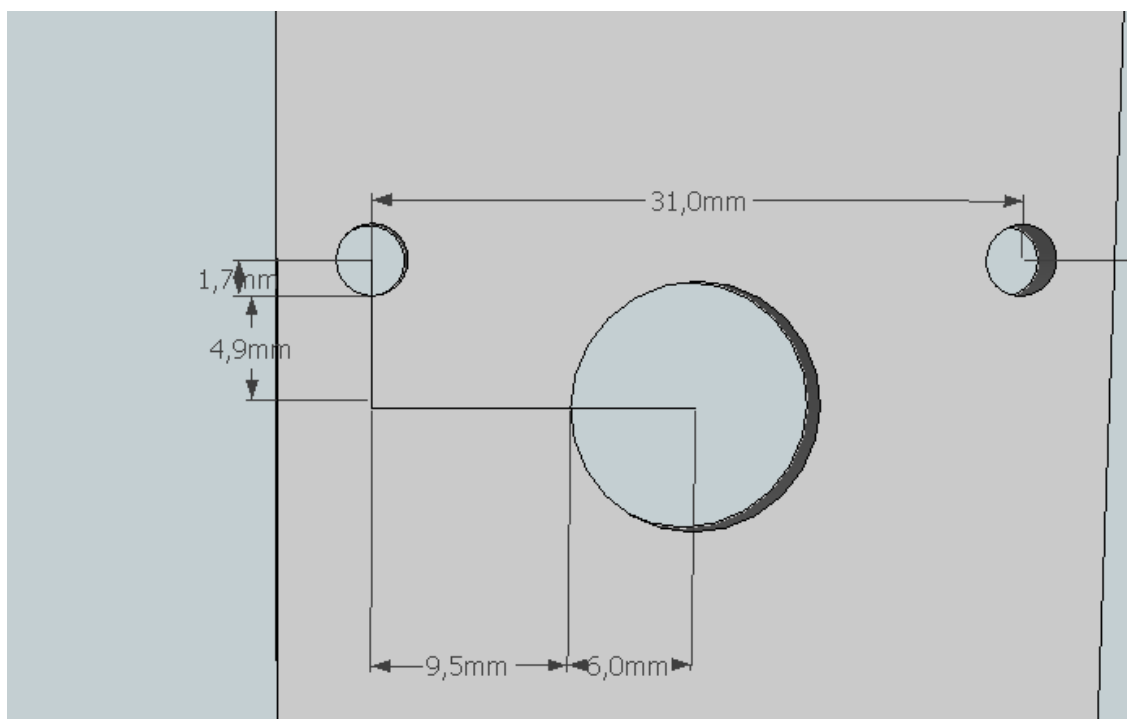


Anexo B.

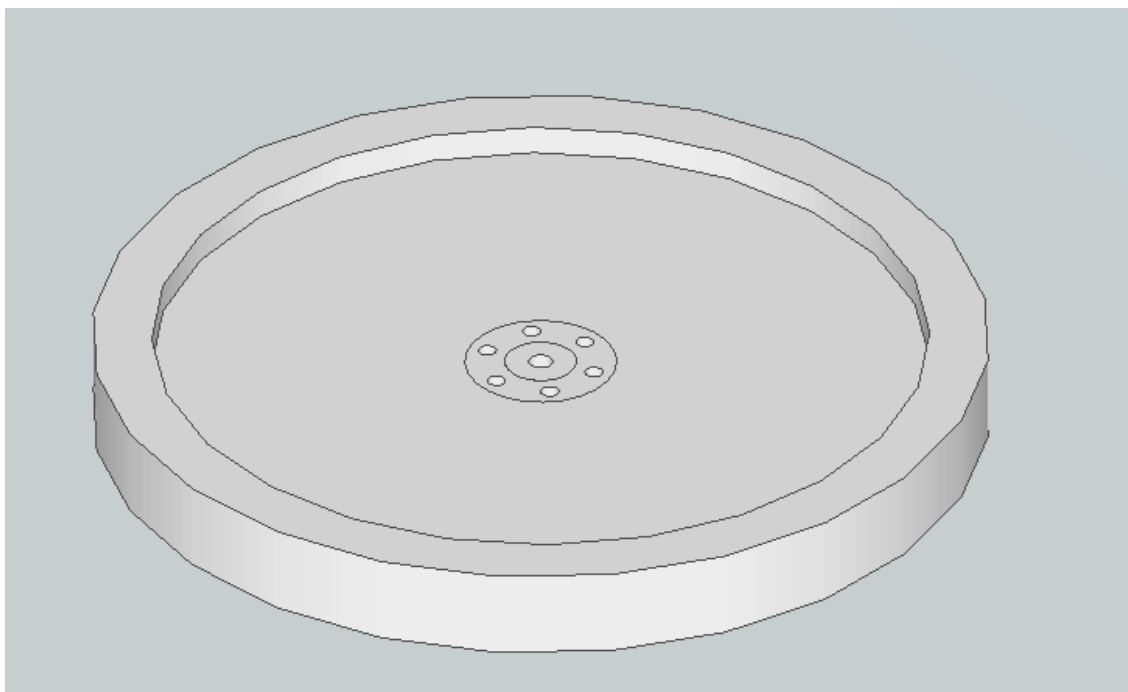
Componentes mecânicos

Anexo B1 - Barra L

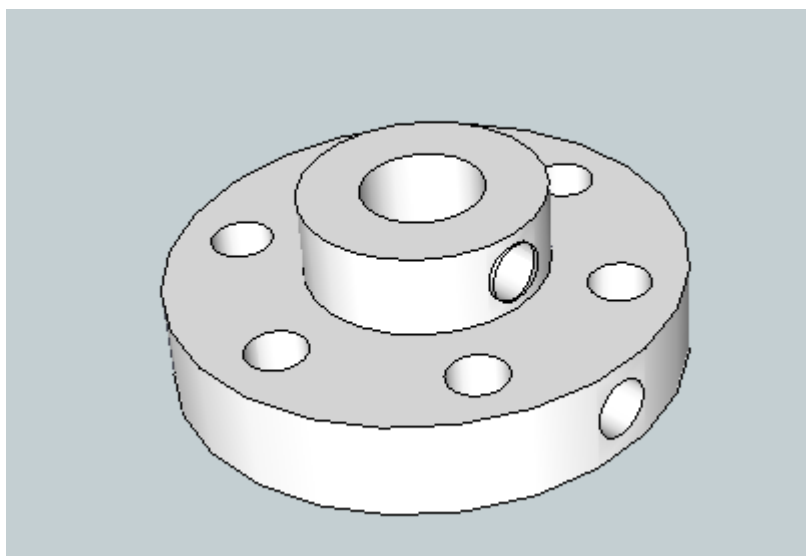




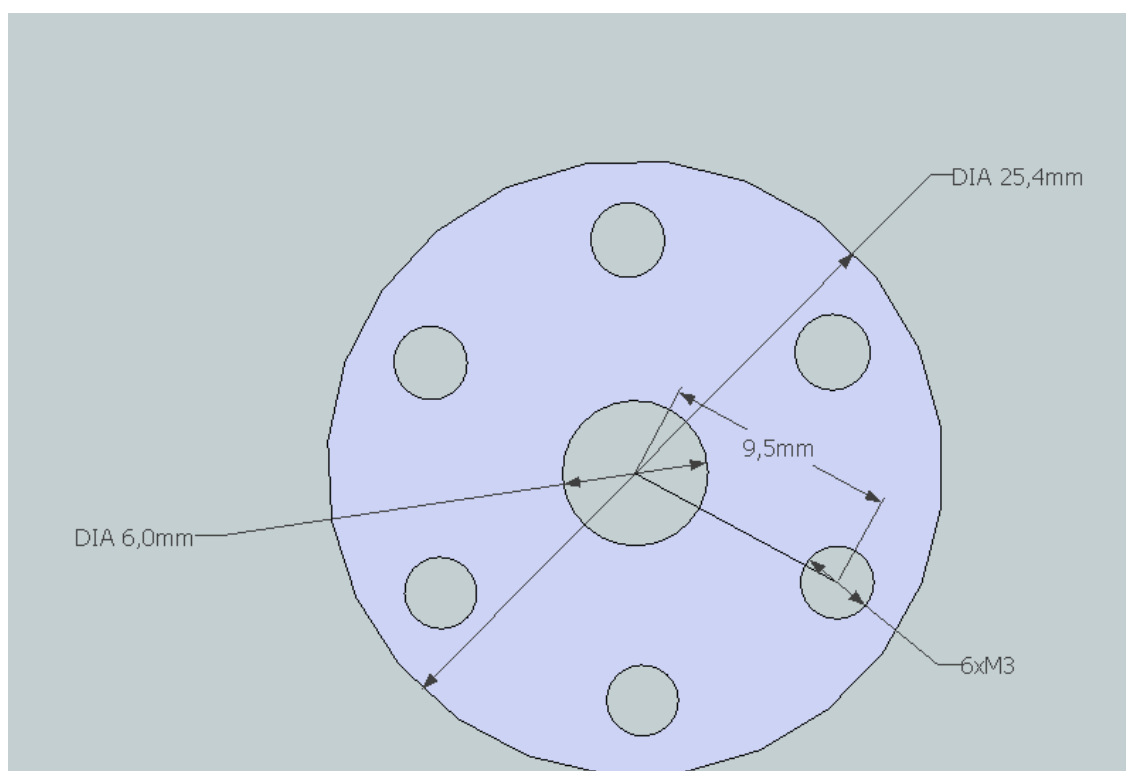
Anexo B2 - Volante de inércia



Anexo B3 - Peça para acoplamento



Anexo B4 - Esquema de Furação do volante



Anexo C.

Código Matlab Implementado

```

clear all;
close all;
clc;

wmax=37;
T_max=0.8;
T_min=-T_max;
time_step=30e-3;
tmax = 5; %[sec] Duration of simulation
thetab_0 = pi/180*-4; %[rad] Inital angular position of bike with
respect to the equilibrium position
r_motor1 = 0.366; % motor For flywheel

r_flywheel = r_motor1-0.007;

Kp = 10; %Proportional gain
Ki = 11; %Integral gain
Kd = 2; %Derivative gain

m_top1= 0.1;
m_top2= 0.1;
m_pipe = 0.679;
m_acrylic = 0.942;
m_L= 0.235;
m_screws= 0.05;
m_arduino= 0.04;
m_trax= 0.007;
m_shield= 0.06;
m_flywheel = 0.101;
m_motor1 = 0.2; % For flywheel

r_top1= 0.08;
r_top2= 0.08;
r_pipe = 0.08;
r_acrylic = 0.164;
r_L= 0.248;
r_screws= 0.164;
r_arduino= 0.17;
r_trax= 0.17;
r_shield= 0.172;
% r_flywheel = 0.366;
% r_motor1 = 0.373; % For flywheel

num_masses = 11;

```

```

masses =
[m_top1;m_top2;m_pipe;m_acrylic;m_L;m_screws;m_arduino;m_trax;m_shield
;m_flywheel;m_motor1];
radii =
[r_top1;r_top2;r_pipe;r_acrylic;r_L;r_screws;r_arduino;r_trax;r_shield
;r_flywheel;r_motor1];
Js = zeros (num_masses,1);
col = 1;

for row=1:num_masses
Js(row,col)=masses(row,col)*radii(row,col)^2;
end
m_r = zeros (num_masses,1); % mass times moment arm of each component
col = 1;
for row=1:num_masses
m_r(row,col)=masses(row,col)*radii(row,col);
end

calc = [masses,radii,Js,m_r];
m_tot = sum(calc(:,1));
J_tot = sum(calc(:,3));
cm_tot = sum(calc(:,4))/m_tot;

%% Initialize other variables
g = 9.807; %[m/sec^2] Acceleration due to gravity
mf = m_flywheel; %[kg] Mass of flywheel
mb = m_tot; %[kg]

lf = r_flywheel; %[m] Length from pivot point to center of mass of
flywheel
lb = cm_tot; %[m] Length from pivot point to center of mass of bike
Jb = J_tot;

rf = 0.076; %[m] Radius of flywheel
Jf = (1/2)*mf*rf^2; %[kgm^2] Polar moment of inertia of flywheel
B = 0.001; % Damping of flywheel

%Specify motor parameters
% Ts = 1.3; %[Nm] Stall torque
% wn = 583*2*pi/60; %[rad/sec] No load speed
thetadotb_0 = 0; %[rad/sec] Initial angular velocity of the bike
thetaf_0 = pi/180*0; %[rad] Initial angular position of bike with
respect to the equilibrium position
thetadotf_0 = pi/180*0; %[rad/sec] Initial angular velocity of the
bike

%motor parameters
% Armature_inductance=1; %mH
% Stall_torque=0.785; %Nm
% No_load_speed=350; %rpm
% DC_supply_Voltage=12; %V

% Simulation

sim('modeloescala_v1')

%Torque plotted vs. time
figure(1) %Opens figure 1

```

```

subplot(5,1,1); %Opens subplot 1
plot(output(:,1),output(:,2)) %Plots input torque vs. time
title('Input Torque vs. Time','FontSize',14);
grid on;
xlabel('Time (sec)','FontSize',12);
ylabel('Input Torque (Nm)','FontSize',12);
hold on
%Flywheel Angular Velocity plotted vs. time
subplot(5,1,2); %Opens subplot 2

plot(output(:,1),output(:,3)) %Plots flywheel vel vs. time
title('Flywheel Vel vs. Time','FontSize',14);
grid on;
xlabel('Time (sec)','FontSize',12);
ylabel('Flywheel Angular Vel (rad/sec)','FontSize',12);
hold on
%Bike Angular Acc plotted vs. time
subplot(5,1,3); %Opens subplot 2
plot(output(:,1),output(:,4)) %Plots input torque vs. time
title('angular Acc vs. Time','FontSize',14);
grid on;
xlabel('Time (sec)','FontSize',12);
ylabel('Angular Acc (rad/sec^2)','FontSize',12);
hold on
%Bike position plotted vs. time
subplot(5,1,4); %Opens subplot 2
plot(output(:,1),output(:,5)*180/pi) %Plots input torque vs. time
title('Position vs. Time','FontSize',14);
grid on;
xlabel('Time (sec)','FontSize',12);
ylabel('Tilt Angle (deg)','FontSize',12);
hold on
%Power plotted vs. time
subplot(5,1,5);
plot(output(:,1),output(:,6))
title('Power vs. Time','FontSize',14);
grid on;
xlabel('Time (sec)','FontSize',12);
ylabel('Power (W)','FontSize',12);
hold on

```

Anexo D.

Código Arduino Implementado

```
#include <PID_v1.h>
#include "DualVNH5019MotorShield.h"

#define encoder0PinA 20
#define encoder0PinB 21
#define SENTIDO 1 //1 or 0
#define teta_ref 1 //roll angle reference degrees
//variaveis

volatile long encoder0Pos=0;
long newposition;
long oldposition = 0;
unsigned long newtime;
unsigned long oldtime = 0;
long vel_act=0, vel_set=0;
int negative=0, vel_set=0,vel_set_rpm=0, num_cicl=0;
long cubo=0, quadrado=0;

//PID GAINS
int kd=0;
int kp=1;
int ki=16000;

int pidSampleTime=20;

unsigned char buffer[11];
float prev_roll=0.0;
double roll= 0.0;
long value=0b00000000000000000000000000000000;

////////////////da biblioteca do controlador////////////////
DualVNH5019MotorShield md;

void stopIfFault()
{
  if (md.getM1Fault())
  {
    Serial.println("M1 fault");

    while(1);
  }
}

////////////////////////////////PID////////////////////////////////
//double roll_fit=roll;
double Setpoint= teta_ref, Output_pid;
PID myPID(&roll, &Output_pid, &Setpoint,kp,ki,kd, DIRECT);
//PID myPID(&roll, &vel_set, &teta_ref,kp,ki,kd, DIRECT);

////////////////setup////////////////
void setup()
{
  //PID
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetOutputLimits(-350, 350); // motor max rpm- 350
```

```

myPID.SetSampleTime(pidSampleTime);

//para leitura do encoder
pinMode(encoder0PinA, INPUT);
digitalWrite(encoder0PinA, HIGH);    // turn on pullup resistor
pinMode(encoder0PinB, INPUT);
digitalWrite(encoder0PinB, HIGH);    // turn on pullup resistor
attachInterrupt(3, doEncoder, RISING); // encoDER ON PINS 20 and 21


//portas serie

Serial.begin (38400);
Serial1.begin(38400);

//TRAX
kSetDataComponents();


//motor
md.init();


Serial.println("setup ok \n");
}

////////////////////////////////////loop MAIN PROGRAM////////////////////////////////////
void loop()
{
  num_cicl++;

  //medir velocidade RPM
  newposition = encoder0Pos;
  newtime = millis();

  Serial.print("num_cicl= ");
  Serial.print(num_cicl);

  if (newposition>=oldposition) {
    vel_act = (newposition-oldposition) * 1000 /(newtime-oldtime)* 60 / 464;
    negative=1;
  }
  else {
    vel_act = (oldposition-newposition) * 1000 /(newtime-oldtime)* 60 / 464;
    negative=0;
  }

  Serial.print (" motorspeed = ");
  if (negative==1){
    vel_act=-vel_act;
  }

  Serial.print (vel_act);
  oldposition = newposition;
  oldtime = newtime;

  //medir Roll

  kGetData();

  roll=get_roll(prev_roll);
  prev_roll=roll;

  //calcular velocidade

```

```

myPID.Compute();

vel_set_rpm=Output_pid;

//linearização da velocidade
vel_set = vel_set_rpm* 1.142;
cubo=vel_set*vel_set*vel_set;
quadrado=vel_set*vel_set;
vel_set= cubo*6/1000000 - quadrado*3/10000 + 0.382*vel_set+11.7;

//Serial.print(" set a= ");
//Serial.print(vel_set);
Serial.print(" setspeedrpm= ");
Serial.print(vel_set_rpm);
//Serial.print(" setspeedadjusted= ");
//Serial.print(vel_set);

//VELOCIDADE DO MOTOR
if (SENTIDO==0){
  vel_set=-vel_set;
}

if (vel_set>400) {
  vel_set=400;
}
else if (vel_set<-400) {
  vel_set=-400;
}
md.setM1Speed(vel_set);

//stopIfFault();

Serial.print("\n");
delay(50);
}//////////FIM DO LOOP//////////

//funções encoder e velocidade

void doEncoder()
{
  if (digitalRead(encoder0PinA) == digitalRead(encoder0PinB)) {
    encoder0Pos++;
  }
  else {
    encoder0Pos--;
  }
}

//funções comunicacao TRAX
void kGetData()
{
  ;
  Serial1.write(0x00);
  Serial1.write(0x05);
  Serial1.write(0x04);
  Serial1.write(0xBF);
  Serial1.write(0x71);
}

```

```

void kSetDataComponents() //set roll as parameter
{
  Serial1.write(0x00); //byte count
  Serial1.write(0x07); //byte count
  Serial1.write(0x03); //Frame ID SetDataComponents
  Serial1.write(0x01); //ID count (read 1 parameter)
  Serial1.write(0x19); //parameter ID- 25=roll
  Serial1.write(0xB8); //CRC-16
  Serial1.write(0x54); //CRC-16
}

float get_roll(float prev_roll) {

  int i=0;
  while (Serial1.available()) {
    int inByte = Serial1.read();
    buffer[i]=inByte;
    i++;

    //if(i==5 || i==6 || i==7 || i==8) {value= (value <<8); value |= buffer[i];}
    //delay(1);
  }

  for(int j = 5; j < 9; j++) // bytes 5 a 8 do buffer sao os do roll
  {
    value= (value <<8);
    value |= buffer[j];
  }

  roll = (*(float*) &value);
  if ((roll-prev_roll>15 || prev_roll-roll>15) && prev_roll!=0) {
    roll =prev_roll; /*delay(500);*/
  }
  if(roll==0.00 || roll== -0.00) {
    roll= prev_roll;
  }

  Serial.print(" roll= ");
  Serial.print ( roll);

  return roll;
}

```

Anexo E. Ligações elétricas do controlador

