

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Competição de Embarcações

João Paulo dos Santos Leite

VERSÃO 1.0

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

Orientador: Prof. Dr. Aníbal Castilho Coimbra de Matos

Julho de 2012

© João Paulo dos Santos Leite, 2012

A Dissertação intitulada
“Competição de Embarcações”

foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2012

o júri



Presidente Professor Doutor António Paulo Gomes Mendes Moreira
Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Eduardo Alexandre Pereira da Silva
Professor Adjunto Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto Superior
de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto



Professor Doutor Aníbal 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 - João Paulo dos Santos Leite

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Atualmente têm sido estudadas muitas questões relacionadas com o controlo de robôs móveis, cada um com uma dinâmica intrínseca à sua forma, massa, meio de propulsão, meio em que está inserido, entre outros. Por consequente, a dedução de modelos que possam traduzir matematicamente a dinâmica e o comportamento do corpo é uma tarefa de extrema importância, pois servem de base para a determinação e desenvolvimento de um controlo. Estes modelos são uma aproximação da realidade, o que impede de traduzir rigorosamente o comportamento do corpo nos diferentes ambientes a que pode estar sujeito. Contudo, é o único meio de simular, testar e avaliar o comportamento teórico de um robô.

Há vários milénios que o homem usufrui do barco à vela como meio de transporte pois, usa a força do vento como meio de propulsão, sem qualquer custo energético. O manobramento de um veleiro implica uma vasta experiência na navegação à vela, pois é necessário ter uma ótima coordenação no ajuste do leme e da vela consoante a direção e força do vento, para ter a melhor performance num dado percurso.

Um veleiro apenas pode navegar a velocidades moderadas contudo, pode percorrer vastas áreas, transportar uma grande variedade de sensores e transmitir informações em tempo real, desde, condições climatéricas, mapeamento oceânico e de campos minados, reconhecimento e vigilância de uma determinada área, até mesmo o transporte de pessoas e bens, tudo isto realizado praticamente sem qualquer ruído sonoro e com recurso a poucas centenas de mili-watts de energia por hora.

Por todas estas razões o estudo matemático do comportamento de um veleiro tem aumentado nos últimos anos mas, quase todos, não consideram o movimento em *roll* nos seus modelos, o qual tem um papel fundamental na cinemática e no planeamento do percurso de um barco. Neste projeto, começa-se por deduzir um modelo dinâmico com 4 graus de liberdade conjuntamente com todas as forças e momentos exercidos sobre ele. Apresenta-se o método de modelação com os respetivos cálculos de todos os coeficientes envolvidos.

A obtenção do modelo permite criar o controlo não linear para o ângulo do leme e da vela, e serão apresentadas as simulações, resultados e respetivas conclusões para vários casos de teste.

Por fim, todo o sistema é aplicado na prática, desde a produção do código para o controlo até ao estudo de mercado dos vários sensores e microcontroladores necessários para o tornar totalmente autónomo. Depois de incorporados todos os componentes, são realizados vários testes práticos e estudado o seu comportamento para vários cenários.

Abstract

Nowadays, there is many research about questions related to the control of mobile robots, each one with is intrinsic dynamic of their form, mass, propulsion system, environment condition, among others. Consequently, the deduction of models that can translate mathematically the body's dynamic and behavior is an extremely important task, because these serve as base to determine and develop a controller. This is an approximation of the reality, which prevents to translate accurately the behavior of the body in different environments that it may be subject. However, this is the only way to simulate, test and evaluate the robots theoretical behavior.

For several thousand years now, mankind has been using sailboats as mean of transportation. One of its key features is the fact that it only depends on wind's strength as propulsion system, without any energy cost.

Sailing requires a great deal of experience and skill, in particular when it comes to relatively complex tasks, like simultaneously steering the rudder and trimming the sail. Wind's direction and strength are crucial factors for a good performance and have a great influence in the delineation of the desired navigation course.

Sailboats can only sail at moderate velocities, but they can reach vast areas, transport a wide variety of sensors and transmit data in real time, such as, weather conditions, ocean mappings and minefield mappings. They can even be used for recognition and surveillance of certain areas and transportation of people and goods, all of this almost without any king of audible noise and using a few hundred milli-watts of power per hour.

For all these reasons, the mathematical study of a yacht behavior has increased in last years, but most of these works do not consider the rolling motion in their models, even knowing that it actually plays an important role in the boat's kinematics and route delineation. In this project, we start by deducting a dynamical model with 4 degrees of freedom with all the forces and moments exerted on it. The modeling method and respective calculations of all the coefficients involved are also presented.

This model allows us to create a nonlinear controller for the rudder and sail. Simulations, results and their conclusions for several test cases are also discussed in this document.

Finally, the whole system is put into practice, since the creation of the source code for the controller, passing through the market study of several sensors and microcontrollers in order to make the sailboat fully autonomous. After incorporating all components, several practical tests are carried out in different scenarios and their behaviors analyzed.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Aníbal Castilho Coimbra de Matos que sempre se mostrou à disposição e paciente para me direcionar pelo caminho correto, mesmo quando apareciam obstáculos que pareciam inultrapassáveis.

Gostaria de agradecer à minha família pelo excelente apoio e carinho que me transmitiram ao longo deste percurso académico. Sem eles nada disto teria sido possível.

Por fim gostaria de agradecer à Rosário toda motivação que me transmitiu e pelo seu apoio incondicional, o qual foi importantíssimo para realizar este projeto.

O meu sincero Obrigado a Todos!

“A imaginação é mais importante que o conhecimento.”

Albert Einstein

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xiii
Lista de figuras	xv
Lista de tabelas	xix
Abreviaturas e Símbolos	xx
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivo e Interesse	1
1.2 - Organização do documento	2
Capítulo 2	3
Estado da Arte.....	3
2.1 - História	3
2.2 - Veleiros autónomos.....	4
2.3 - Classes	7
2.4 - RoboBoat - AUVSI	10
2.5 - RoboSub - AUVSI	13
2.6 - MicroTransat	16
Capítulo 3	19
Caracterização do Problema	19
3.1 - Plataforma	21
3.2 - Ground Station	22
Capítulo 4	23
Modelação corpo rígido	23
4.1 - Descrição do veículo	23
4.2 - Sistema de Coordenadas.....	25
4.3 - Cinemática	26
4.4 - Dinâmica.....	28
4.4.1 - Modelação do corpo rígido	28

4.4.2 - Momento de Inércia	30
4.4.3 - Hidrodinâmica: Massa acrescentada.....	32
4.4.4 - Amortecimento viscoso	34
4.4.5 - Lift.....	36
4.4.6 - Forças e momentos de restabelecimento	40
4.4.7 - Forças e momentos totais	40
4.4.8 - Cálculo de parâmetros adicionais.....	41
Capítulo 5	45
Simulação e Controlo	45
5.1 - Diagrama de blocos.....	45
5.2 - Sistema em Malha Aberta	46
5.2.1 - Caso nº1	46
5.2.2 - Caso nº2	48
5.2.3 - Caso nº3	49
5.2.4 - Caso nº4	49
5.3 - Sistema em Malha Fechada	50
5.3.1 - Caso nº1	54
5.3.2 - Caso nº2	56
5.3.3 - Caso nº3	56
5.3.4 - Caso nº4	57
Capítulo 6	59
Movimentos	59
6.1 - Controlador	60
Capítulo 7	73
Sistema computacional e sensores	73
7.1 - Arduino	74
7.2 - Sensor direcção do vento.....	74
7.3 - Sensor força do vento.....	77
7.4 - Xbee.....	80
7.5 - Servos	80
7.6 - Comando e Recetor	81
7.7 - Bateria e regulador.....	81
7.8 - Incorporação dos módulos.....	82
7.9 - Programação.....	84
7.10 - <i>Mission Planner</i>	85
Capítulo 8	87
Conclusões	87
8.1 - Perspetivas de trabalho futuro.....	88
8.1.1 Determinação dos coeficientes de <i>drag</i> e <i>lift</i>	88
8.1.2 Veleiro totalmente autossuficiente	88
8.1.3 Incorporação de uma câmara a bordo	88
8.1.4 Melhoria do código produzido	89
Referências	91
Bibliografia.....	94
Anexos	95

Lista de figuras

Figura 2.1 - Navio <i>Khufu</i> [1]	4
Figura 2.2 - Esquemático do controlo mecânico <i>wind vane</i> [5]	6
Figura 2.3 - Esquemático do controlo eletrónico	6
Figura 2.4 - <i>RC Sport Sail - Micro Magic</i> [6]	7
Figura 2.5 - <i>RC Scale Sail - Collin Archer</i> [11]	9
Figura 2.6 - Veleiro a atingir o alvo com água [13]	10
Figura 2.7 - Robô submarino construído pela equipa de Washington State University [16]	13
Figura 2.8 - Número de equipas participantes em competições de veleiros desde 2006 [4] ...	16
Figura 3.1 - Níveis superiores do SBS	19
Figura 3.2 - SBS completo Plataforma	20
Figura 3.3 - SBS completo <i>Ground Station</i>	20
Figura 3.4 - Arquitetura Funcional do veleiro	21
Figura 3.5 - Arquitetura Funcional da <i>Ground Station</i>	22
Figura 4.1 - <i>RC Laser</i>	23
Figura 4.2 - Constituintes básicos de um veleiro	24
Figura 4.3 - Representação do sistema de coordenadas	26
Figura 4.4 - Representação de uma elipsoide	31
Figura 4.5 - Efeito do vento num aerofólio com ângulo de ataque alto (Faltinsen 2005)[33]..	35
Figura 4.6 - Representação da força lift em laboratório	36
Figura 4.7 Gráfico da força lift em função do ângulo de ataque	36
Figura 4.8 - Representação da força lift em laboratório	37
Figura 4.9 - Coeficiente de Lift vs ângulo de ataque	37

Figura 4.10 - Representação dos ângulos do vento em relação ao barco [31]	38
Figura 4.11 - Esquema representativo do cálculo do centro de esforço da vela	41
Figura 5.1 - Diagrama de blocos do sistema global em malha aberta	46
Figura 5.2 - Percorso efetuado pelo barco (x,y)	47
Figura 5.3 - Representação gráfica do ângulo <i>yaw</i>	47
Figura 5.4 - Representação gráfica do ângulo <i>roll</i>	47
Figura 5.5 - Representação gráfica das componentes da velocidade <i>u</i> e <i>v</i> (linha a azul e vermelho respetivamente)	48
Figura 5.6 - Percorso efetuado pelo barco (x,y)	48
Figura 5.7 - Percorso efetuado pelo barco (x,y)	49
Figura 5.8 - Percorso efetuado pelo barco (x,y)	50
Figura 5.9 - Funções de pertinência para a entrada <i>teta</i>	51
Figura 5.10 - Funções de pertinência para a entrada <i>velTeta</i>	52
Figura 5.11 - Equações da saída do controlador implementado.....	53
Figura 5.12 - Diagrama de blocos em <i>Matlab</i> do modelo global em malha fechada.....	53
Figura 5.13 - Percorso efetuado pelo barco (x,y).....	54
Figura 5.14 - Representação gráfica do erro do ângulo <i>yaw</i> desejado.....	54
Figura 5.15 - Representação gráfica do ângulo <i>roll</i>	55
Figura 5.16 - Representação gráfica do ângulo do leme.....	55
Figura 5.17 - Representação gráfica do ângulo da vela.....	55
Figura 5.18 - Representação gráfica das componentes da velocidade <i>u</i> e <i>v</i> (linha a vermelha e azul respetivamente)	56
Figura 5.19 - Percorso efetuado pelo barco (x,y).....	56
Figura 5.20 - Percorso efetuado pelo barco (x,y).....	57
Figura 5.21 - Representação gráfica do erro do ângulo <i>yaw</i> desejado.....	57
Figura 5.22 - Representação gráfica do erro do ângulo <i>yaw</i> desejado.....	57
Figura 6.1 - Representação das zonas navegáveis e não navegáveis	59
Figura 6.2 - Manobra de <i>jibe</i> e <i>tack</i> respetivamente [37]	60
Figura 6.3 - Entradas / saídas do controlo de alto nível para vela	60
Figura 6.4 - Diagrama VPP	61

Figura 6.5 - Gráfico do Ângulo máximo da vela em função da orientação do veleiro com o vento	62
Figura 6.6 - Manobras passíveis de serem realizadas num veleiro	63
Figura 6.7 - Representação das variáveis introduzidas anteriormente	64
Figura 6.8 - Explicação visual para o facto de um veleiro não se deslocar diretamente a favor do vento	65
Figura 6.9 - Exemplo de escolha entre duas rotas	67
Figura 6.10 - Exemplo de escolha entre duas rotas.....	67
Figura 6.11 - Execução da manobra <i>jibe</i>	68
Figura 6.12 - Diagrama Polar VMG [43]	68
Figura 6.13 - Execução de manobras <i>tack</i>	69
Figura 6.14 - Representação dos estados do programa	70
Figura 6.15 - Janele de histerese para uma orientação desejada de 30°	70
Figura 6.16 - Controlo para o leme e para a vela em <i>Matlab</i>	71
Figura 7.1 - Arquitetura funcional, visão abrangente (vermelho - Plataforma ; azul - <i>Ground Station</i>)	73
Figura 7.2 - <i>Ardupilot MEGA 2.0</i>	74
Figura 7.3 - Representação das formas de ondas do pino 1 e 2 (azul e vermelho respetivamente).....	75
Figura 7.4 - <i>Encoder</i> rotativo (EMS22D51-B28-LS5)	75
Figura 7.5 - Cata-vento construído	76
Figura 7.6 - Estrutura na proa do veleiro para suporte do cata-vento e anemómetro	76
Figura 7.7 - Sensor de vento termo resistivo	77
Figura 7.8 - Teste prático realizado com o sensor de vento	77
Figura 7.9 - Circuito elétrico do sensor de vento [46]	78
Figura 7.10 - Valores médios da saída do sensor de vento para várias velocidades	79
Figura 7.11 - Módulo <i>Xbee 2.4GHz</i>	80
Figura 7.12 - Comando RC de 2.4 GHz e respetivo recetor.....	81
Figura 7.13 - Regulador à direita e bateria à esquerda	81
Figura 7.14 - Esquemático das ligações / comunicações do sistema no global	82
Figura 7.15 - Montagem de todos os componentes	83
Figura 7.16 - Componentes da <i>Ground Station</i>	83

Figura 7.17 - Componentes da Plataforma	84
Figura 7.18 - Restantes componentes da Plataforma	84
Figura 7.19 - Interface do <i>Mission Planner</i>	85
Figura 8.1 - Arquitetura Funcional Global.....	89

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características da competição <i>RoboBoat</i> [12] [14] [15]	12
Tabela 2.2 - Características da competição <i>RoboSub</i> [17]	15
Tabela 2.3 - Características da competição <i>Microtransat</i> [18] e <i>WRSC</i> [19]	18
Tabela 4.1 - Parâmetros veleiro	24
Tabela 4.2 - Notação <i>SNAME</i> [21] usada em veículos marítimos	25
Tabela 4.3 - Valores dos momentos e produtos de inércia	32
Tabela 4.4 - Coeficientes para o cálculo da massa acrescentada	34
Tabela 4.5 - Valor da viscosidade em diferentes meios	35
Tabela 4.6 - Valores de coeficientes de lift em função do ângulo de ataque	37
Tabela 4.7 - Parâmetros adicionais do veleiro	43
Tabela 6.1 - Cálculos para se obter o valor do ângulo máximo da vela e velocidade máxima [39]	62
Tabela 6.2 - Velocidade que um veleiro tem de atingir para um dado VMG [41]	65
Tabela 7.1 - Configuração dos pinos.....	74
Tabela 7.2 - Valores de saída do sensor de vento para várias velocidades.....	78
Tabela 7.3 - Valores médios da saída do sensor de vento para várias velocidades	79
Tabela 7.4 - Valores PPM mínimos, médio e máximo do leme e da vela	80
Tabela A.1 - Levantamento dos diversos componentes existentes no mercado	99
Tabela A.2 - Estudo de mercado dos vários microcontroladores	100

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

ASV	<i>Autonomous Surface Vehicle</i>
ASVC	<i>Autonomous Surface Vehicle Competition</i>
AUVSI	<i>Association for Unmanned Vehicle Systems International</i>
CM	Centro de Massa
PPR	<i>Pulse Per Rotation</i>
PI	Processamento de Imagem
RC	<i>Radio Control</i>
SBS	<i>System Breakdown Structure</i>
SNAME	<i>Society of Naval Architects and Marine Engineers</i>
VPP	<i>Velocity Made Good</i>
VPP	<i>Velocity Prediction Polar</i>

Lista de símbolos

η_1	Vetor de posição linear segundo referencial inercial Terra
η_2	Vetor de posição angular segundo referencial inercial Terra
v_1	Vetor de velocidade linear no referencial fixo ao corpo
v_2	Vetor de velocidade angular no referencial fixo ao corpo
τ_1	Vetor das forças segundo os eixos do referencial fixo ao corpo
τ_2	Vetor dos momentos angulares segundo os eixos do referencial fixo ao corpo
ϕ, θ, ψ	Ângulos de <i>Euler (roll, pitch, yaw)</i>
u, v, w	Velocidades lineares no referencial de base
p, q, r	Velocidades angulares no referencial de base
$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$	Aceleração linear no referencial de base
$\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$	Aceleração angular no referencial de base
δ_r	Ângulo do leme em relação ao referencial de base
δ_s	Ângulo da vela em relação ao referencial de base

X	Força exercida segundo o eixo x_b
Y	Força exercida segundo o eixo y_b
Z	Força exercida segundo o eixo z_b
K	Momento exercido segundo o eixo x_b (<i>roll</i>)
L	Momento exercido segundo o eixo y_b (<i>pitch</i>)
M	Momento exercido segundo o eixo z_b (<i>yaw</i>)
$R_{x,\phi}$	Matriz de rotação segundo o eixo x
$R_{y,\theta}$	Matriz de rotação segundo o eixo y
$R_{z,\psi}$	Matriz de rotação segundo o eixo z
$J(\eta)$	Matriz de transformação de coordenadas
$R(\eta)$	Matriz de transformação dos vetores lineares
$T(\eta)$	Matriz de transformação dos vetores angulares
$C_A(v)$	Matriz dos termos de <i>Coriolis</i> e centrípetos de massa acrescentada
$C_{RB}(v)$	Matriz dos termos de <i>Coriolis</i> e centrípetos do corpo rígido
D_h	Vetor das forças de amortecimento induzidos pelo casco
D_k	Vetor das forças de amortecimento induzidos pela quilha
$\mathcal{G}$	Matriz das forças e momentos de restabelecimento
g	Aceleração da gravidade
M_A	Matriz de massa acrescentada
M_{RB}	Matriz de inércia do corpo rígido
τ_{RB}	Vetor de forças e momentos induzidos pelo corpo rígido
τ_A	Vetor de forças e momentos induzidos pela massa acrescentada
I	Matriz dos momentos e produtos de inércia
I_{xx}	Momento de inércia do corpo em relação ao eixo x
I_{yy}	Momento de inércia do corpo em relação ao eixo y
I_{zz}	Momento de inércia do corpo em relação ao eixo z
I_{xy}	Produto de inércia do corpo em relação ao plano xy
I_{xz}	Produto de inércia do corpo em relação ao plano xz
I_{yz}	Produto de inércia do corpo em relação ao plano yz
R_e	Número de <i>Reynold</i>
ρ	Densidade
ν	Viscosidade do fluido
C_D	Coefficiente de <i>drag</i>
D	Força de <i>drag</i>
C_f	Coefficiente de <i>fricção</i>
C_L	Coefficiente de <i>lift</i>
L	Força de <i>lift</i>
m	Massa do corpo

m_r	Massa do leme
m_m	Massa do mastro com a vela
m_c	Massa total dos componentes
d_r	Distância da projeção em x da proa ao leme
d_k	Distância da projeção em x da proa à quilha
d_h	Distância da projeção em x da proa ao centro do casco
d_m	Distância da projeção em x da proa ao mastro
x_{CM}	Coordenada do eixo do x do centro de massa
x_m	Coordenada do eixo do x do mastro em relação ao centro de massa
x_{sm}	Distância entre o mastro e o centro de esforço da vela
x_s, y_s, z_s	Coordenadas cartesianas do centro de esforço da vela
x_r, y_r, z_r	Coordenadas cartesianas do centro de esforço do leme
x_k, y_k, z_k	Coordenadas cartesianas do centro de esforço da quilha
x_h, y_h, z_h	Coordenadas cartesianas do centro de esforço do casco
$S_{s,r,k,h}$	Área da superfície da vela, leme, quilha e casco
$AR_{s,r,k,h}$	<i>Aspect ratio</i> da vela, leme, quilha e casco

Capítulo 1

Introdução

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um veleiro totalmente autónomo (ASV) desde a sua modelização e simulação até à infraestruturação do próprio veleiro e a incorporação de todos os componentes necessários à sua automatização. Este deve ser capaz de seguir qualquer rota; permitir controlo remoto; possuir comunicações para troca de telemetria com a *Ground Station*; permitir o envio de comandos durante a missão; os únicos dados a serem transmitidos entre o veleiro e a *Ground Station* serão a sua posição/estado atual e os *waypoints*.

Num Mundo cada vez mais preocupado com o aumento crescente do consumo energético, a utilização de veículos movidos a energia infinita e limpa é vista como o futuro da civilização. Um veleiro apenas depende da energia do vento para lhe fornecer propulsão mas, necessita de energia elétrica para alimentar os sensores, atuadores, microprocessadores que nele contenha a bordo.

Contudo, se este for equipado com células solares para gerar energia elétrica para todos os componentes, torná-lo-á teoricamente autossuficiente.

1.1 - Motivo e Interesse

Com a evolução da capacidade de processamento dos diversos componentes eletrónicos e com a necessidade de automatização de certos processos, os cientistas têm tentado dispensar a ação direta do controlo humano para a realização de determinadas tarefas. O grau de automatização dos processos tem-se alargado de tal maneira que todos os campos científicos são afetados e, para aumentar o interesse e despoletar a criação de robôs totalmente autónomos são realizadas, anualmente, diversas competições que focam essencialmente a orientação, visão e controlo de movimentos por parte dos robôs.

A principal motivação com este projeto é o facto de este ser multidisciplinar e englobar tanto o desenvolvimento de código para a realização de controlo e comunicação como, a

escolha e o mapeamento dos diferentes componentes físicos a serem incorporados no sistema. Deste modo, é possível a criação de um sistema físico para a realização de testes práticos e, assim, o projeto não baseará apenas em simulações.

Outro aspeto importante é a possibilidade de ser organizada uma competição nacional ou até internacional onde o principal objetivo seria promover o gosto pela automatização de veículos, neste caso, veleiros. Os vários institutos universitários poderiam inscrever equipas fomentando o interesse dos estudantes em novas áreas científicas, criando um maior balanceamento entre a aprendizagem teórica e a aplicação prática.

1.2 - Organização do documento

Capítulo 2 apresenta a história do aparecimento da vela e dos veículos movidos com a força gerada pelo vento. Expõe as diferentes classes existentes e as diferenças entre si. É feito o levantamento dos diversos concursos de embarcações e as diferentes relações entre si, tais como, componentes e *software* usados, regras e restrições, missões, prémios, entre outros. Por fim, são mostradas as tecnologias e componentes necessários para tornar tais veículos autónomos.

Capítulo 3 caracteriza o problema e como todos os componentes se interligam, com recurso, a diagramas de Arquitetura Funcional e SBS (*System Breakdown Structure*).

Capítulo 4 mostra o estudo de um modelo matemático que traduz com precisão o comportamento do barco com 4 graus de liberdade quando se movimenta num fluido. São abordadas teorias da física clássica, tais como:

- Segunda Lei de *Newton*;
- Teoria de *Steiner* ou teorema dos eixos paralelos;
- Teoria da massa acrescentada;
- Amortecimento viscoso;
- Aerodinâmica de um corpo.

Capítulo 5 apresenta os diferentes tipos de controlos desenvolvidos em *Matlab*, bem como, resultados e conclusões obtidos para diferentes cenários de teste.

Capítulo 6 caracteriza os vários movimentos passíveis de serem realizados com um barco à vela e introduz noções de manobras, tais como, o *tack* e o *jibe*. É delineado um controlador de alto nível para a vela.

Capítulo 7 aborda os componentes usados, as suas vantagens e características face aos existentes no mercado e o modo como se interagem no seu global. É explicado como foi realizado o desenvolvimento do código para o microcontrolador.

Capítulo 8 expõe uma síntese do trabalho realizado, com as devidas conclusões e sugestões para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo será realizada uma descrição histórica da vela e dos veículos movidos pela ação da mesma; o estado de arte das diferentes competições existentes e as respectivas diferenças entre si; um estudo comparativo entre as diferentes classes de embarcações e os motivos para a necessidade de barcos autônomos.

2.1 - História

A origem da utilização de veleiros como meio de transporte remonta ao ano de 2900 a.C. podendo, assim, ser considerado um dos meios de transporte mais antigos do Mundo. Os mais primitivos eram usados como meio de transporte de pessoas e mantimentos mas também, como embarcações de pesca. Como o seu único meio de propulsão é a força do vento, sem qualquer custo de energia, fez com que fosse possível o transporte de bens entre pontos distantes, mantendo-se durante dezenas de séculos como o único meio de transporte para longas distâncias.

Os primeiros grandes impulsionadores do uso comum dos veleiros foram os Antigos Egípcios. A sua notável habilidade de construção para a época foi encontrada perto da Grande Pirâmide de Gizé em 1954, consistindo num navio totalmente intacto, denominado como *Khufu*, e que tinha aproximadamente 43,5 metros de comprimento e datado de 2500 a.C.

Em 2000 a.C. as embarcações eram um importante fator na economia e sustentabilidade dos Impérios Árabes, Gregos e Fenícios permitindo-os explorar e colonizar o Mediterrâneo. Naturalmente, os avanços nos aparelhos vélicos levou ao aparecimento de velas mais aerodinâmicas e com melhores prestações na navegação, como a vela latina que veio substituir a vela redonda e que foi usada pelos Portugueses na altura dos Descobrimentos.



Figura 2.1 - Navio *Khufu* [1]

Atualmente os veleiros são bastante sofisticados pois, o uso da matemática avançada para o desenho de velas e cascos veio permitir que estes sejam cada vez mais aerodinâmicos e revolucionários.

2.2 - Veleiros autônomos

Os veleiros autônomos têm vindo a ter uma maior procura devido aos acontecimentos recentemente trágicos. O *tsunami* no Oceano Índico em 2004 e o do Japão em 2011, o derramamento de petróleo no Golfo do México em 2010, os acidentes com barcos de refugiados na Itália, Lampedusa, e as atividades pirata no Golfo de Aden têm tido um elevado contributo para a importância de um sistema de observação marítima totalmente autônomo. De acordo com Cruz e Alves [2] os principais motivos para o aparecimento de embarcações autônomas à vela não tripuladas são:

- Missões de longa duração;
- Custos operacionais reduzidos;
- Localização em tempo real;
- Transmissão de dados em tempo real;
- Ruído sonoro praticamente inexistente.

Para além destas tarefas, existem outras aplicações suscetíveis de serem realizadas a longo prazo e que trariam grandes benefícios para a indústria marítima e monitorização dos Oceanos:

- Boias com sensores inteligentes;
- Reconhecimento e vigilância;
- Mapeamento de campos minados;
- Transporte de bens autonomamente.

Os robôs à vela totalmente autônomos têm de executar tarefas e planeamento de trajetórias complexas sem qualquer assistência humana, começando por calcular uma rota ideal com base em dados meteorológicos (força e direção do vento) e evitar colisões de modo a navegar de forma segura e confiável em qualquer tipo de ondulação. Bowditch [3] define essa navegação como: “*the process of monitoring and controlling the movement of a craft or vehicle from one place to another*”. As principais características de um veleiro autônomo ideal resumem-se a:

- A única fonte de propulsão é a força do vento;
- Todo o controlo é realizado a bordo;
- Capacidade de desvio de obstáculos;
- É energeticamente autossuficiente.

Apesar de já terem sido aperfeiçoadas técnicas de navegação para veleiros, o esforço gasto para torná-lo totalmente autônomo é muito reduzido. Têm sido realizadas pesquisas intensivas sobre veículos de superfície autônomos (ASV) que usam motores elétricos ou de combustão pois, o seu controlo é bastante mais acessível e não dependem diretamente de fatores ambientais para se movimentarem. Estão limitados em termos de alcance devido à quantidade de combustível ou capacidade das baterias a bordo, o que traz uma grande desvantagem em relação aos veleiros pois, apenas precisam de uma quantidade mínima de energia para os sensores, atuadores, computador de bordo e ajuste da posição da vela e do leme.

Devido a estas dificuldades, têm sido desenvolvidos sistemas semiautônomos, onde apenas um conjunto de funcionalidades são automatizadas, tais como, engrenagens autodirecionais para controlo do leme e, pequenos ajustes automáticos da vela para que o barco obtenha a máxima velocidade em qualquer direção.

Historicamente, a primeira tarefa a ser automatizada foi o controlo do leme. Os navios e barcos utilizam um dispositivo chamado *self-steering* que mantém a rota pré-definida sem que seja necessária, constantemente, a ação humana. As diferentes formas de engrenagens autodirecionais podem ser divididas em duas categorias: mecânica e eletrónica.

Uma abordagem mecânica sofisticada é o *wind vane* (cata-vento), desenvolvido por Herbert Hasler (1914-1987) que é conhecido como um dos pais criadores do *single-handed sailing*. Este aparelho possui um cata-vento que mede o ângulo aparente da força do vento na

vela e, sempre que este é alterado, um sistema de cordas, roldanas e servos, retornam-no para a posição pré selecionada [4], como está ilustrado na figura seguinte.

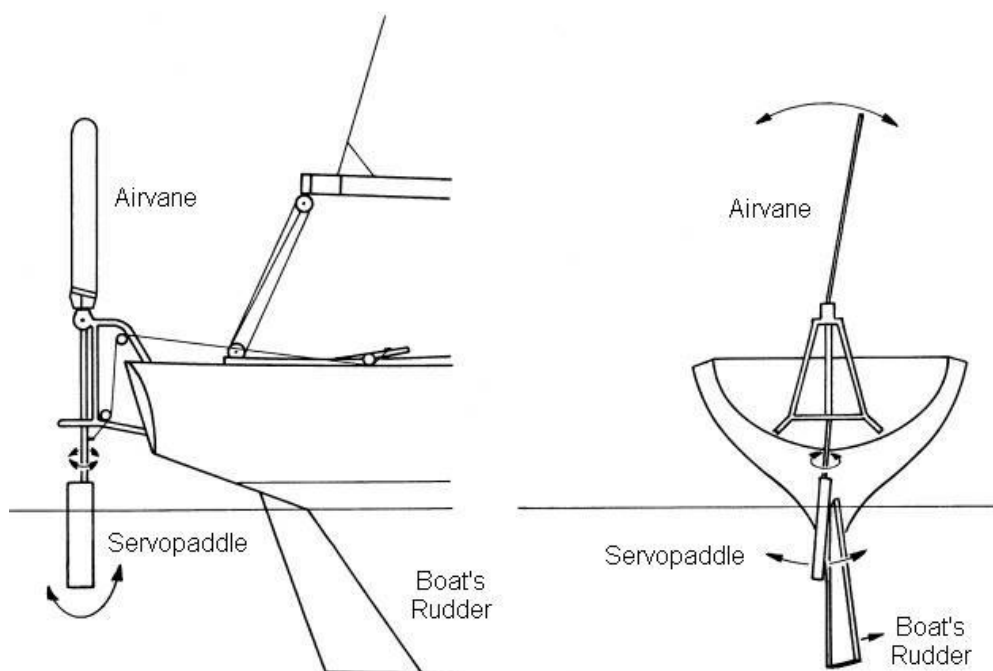


Figura 2.2 - Esquemático do controlo mecânico *wind vane* [5]

O controlo eletrónico tem como base a entrada de valores de vários sensores como a bússola, direção e força do vento, e posição GPS, a fim de calcular a orientação para um dado *waypoint*.

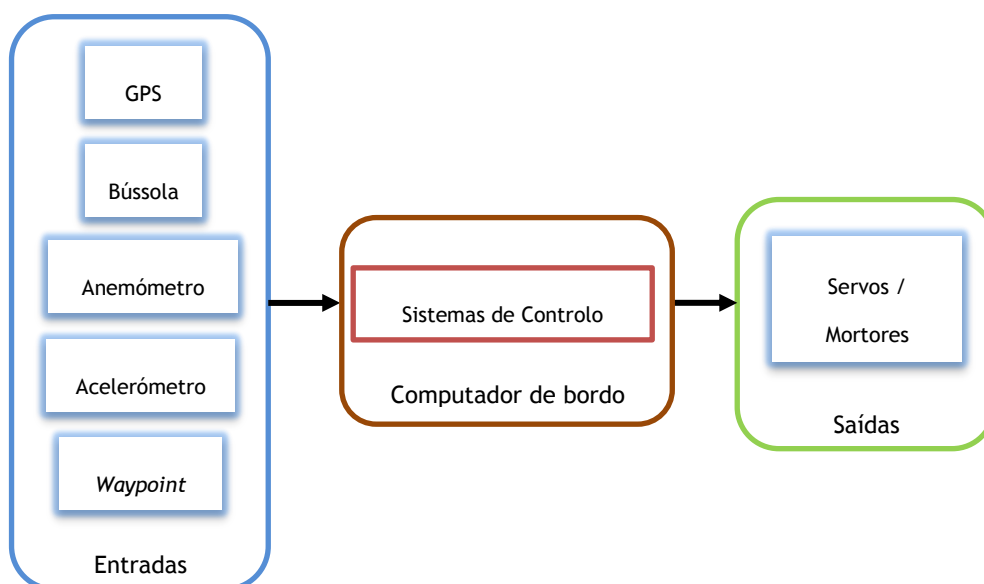


Figura 2.3 - Esquemático do controlo eletrónico

Como o projeto consiste em tornar um veleiro totalmente autónomo e, se já existe no mercado veleiros com rádio controlo e com os respetivos servos, é de bom senso usar um desses modelos como base para a sua automatização. De seguida, é feito um estudo das

diferentes classes existentes no mercado, desde a sua estrutura, tamanho e *design*, até às restrições impostas por cada uma.

2.3 - Classes

Uma classe de veleiros RC não se refere unicamente à sua estrutura, *design* e tamanho, mas também a um grupo de barcos semelhantes. Num primeiro patamar as embarcações estão divididas em 3 grandes categorias:

- *RC Sport Sail*
- *RC Sailing Yachts*
- *RC Scale Sail*



Figura 2.4 - RC Sport Sail - Micro Magic [6]

RC Sport Sail - A maioria dos kits RTR (*ready to run*) de veleiros RC pertencem a esta classe. Esta está entre as classes dos *RC Sailing Yachts* e *RC Scale Sail* pois apresenta algumas semelhanças entre ambas. São utilizados como forma de *hobbies* e construídos com alguns detalhes como um barco de miniatura mas, sem grandes pormenores. Os modelos de baixo custo vêm com casco de ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), enquanto os modelos mais sofisticados possuem casco em fibra de vidro.

RC Sailing Yachts - Esta classe baseia-se em barcos de corrida e consoante as regras da competição estes podem ser divididos em duas classes: construção aberta ou modelo/*design* fechado. A diferença entre ambas é a possibilidade de o barco poder ser construído todo de raiz tendo apenas em consideração o tamanho, no caso de construção aberta, ou então, no caso de *design* fechado, os concorrentes têm que obedecer a regras de construção restritas, tais como, barcos do mesmo molde e peças provenientes de um mesmo fabricante [7].

Alguns tipos de classes de construção aberta:

- *6 Metre - M6R*
- *10 rater - R10r*
- *A class*
- *36" (36 inch)*
- *Marblehead*
- *Footy*

Marblehead - *Marblehead*, também conhecida como 50/800, já não segue a mesma estrutura rigorosa dos *RC Laser*, pois está em contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento, o que torna os barcos mais rápidos mas também mais caros. Por outro lado, os veleiros mais velhos tornam-se obsoletos e perdem valor rapidamente o que traz uma grande desvantagem em competições entre veleiros da mesma classe. O nome 50/800 refere-se às limitações das dimensões da estrutura: 50 *inches long* (1,27 m de comprimento do barco) e 800 *square inches* (0,52 m² de área da vela) [8].

Footy - veleiro RC com comprimento de apenas 12 *inches* (30,5 cm). O casco pode ser construído a partir de um molde de fibra de vidro ou, simplesmente, com barras de madeira encaixadas. Possui dois servos, um para controlar a vela e outro para o leme. Para tornar a competição viva, os *designers* do *Footy* propuseram um conjunto de regras para manter os barcos similares. É uma classe que tem vindo a angariar muitos fãs ao longo dos últimos anos, principalmente, na Nova Zelândia, Reino Unido, Alemanha e EUA [9].

Alguns tipos de classes de *design fechado*:

- *RC Laser*
- *Soling 1 Meter*
- *Fiesta*
- *Tactic*
- *Fairwind - Kyosho*

RC Laser - Uma classe bastante popular em todo o Mundo, principalmente na América do Norte onde conta com mais de 9000 exemplares. Existem bastantes competições onde apenas participam barcos *RC Laser*, pois são todos exatamente iguais, dando um maior equilíbrio na disputa da prova. É uma classe bastante rigorosa na estrutura e *design* dos seus veleiros: os cascos são fabricados com base no mesmo molde; as velas são cortadas seguindo um padrão específico e produzidas apenas por uma loja; os componentes autorizados são fornecidos por um único fabricante, e qualquer modificação dos mesmos não é permitida. No entanto, os

proprietários podem personalizar a aparência, cores dos seus barcos, uma vez que estas modificações não têm qualquer impacto no desempenho do mesmo [10].

RC Scale Sail - Como o próprio nome indica, esta classe representa todos os veleiros construídos a uma escala miniatura, geralmente de 1:48. São obras de arte para colecionadores pois retratam ao mais ínfimo pormenor todos os detalhes do barco em questão. Em contrapartida não são muito estáveis e devem ser usados apenas como exposição.



Figura 2.5 - RC Scale Sail - Collin Archer [11]

Após a análise das várias classes e em conversa com o orientador ficou decidido que o veleiro a usar teria de ter um comprimento de aproximadamente 1 metro. Estudou-se vários casos de barcos com essa característica (Tabela A.1) e chegou-se à conclusão que o veleiro a usar será um *RC Laser*.

A partir deste ponto, foi necessário realizar um levantamento do tipo de automatização existente neste tipo de embarcações e que competições existem atualmente para estimular o conhecimento por esta área. Realizou-se um estudo comparativo com outro tipo de robôs de superfície autónomos, para se avaliar o grau de desenvolvimento existente noutras áreas e os diferentes componentes usados.

De seguida, são apresentadas as três diferentes competições estudadas. São todas de áreas diferentes: *RoboBoat* - veículos de superfície; *RoboSub* - submarinos; *Microtransat* - veleiros. O que se pretende é estudar os diferentes componentes e abordagens usadas para o controlo e navegação do veículo, as maiores dificuldades encontradas e quais os requisitos e missões exigidos pelo concurso.

2.4 - RoboBoat - AUVSI

É uma competição bastante recente, tendo sido realizada pela primeira vez em 2008 e está relacionada com a associação AUVSI (*Association for Unmanned Vehicle Systems International*). Também conhecida como ASVC (*Autonomous Surface Vehicle Competition*) tem contado com um aumento crescente de universidades presentes e é vocacionado essencialmente para os estudantes, pois é uma excelente oportunidade para o desenvolvimento e aplicação das aptidões adquiridas ao longo do percurso académico através da construção de um veículo totalmente autónomo que realize as missões pré definidas pelo concurso.

“The goal of this competition is to provide an opportunity for students to experience the challenges of and develop skills in system engineering by accomplishing realistic missions with autonomous vehicles in the maritime environment and to foster ties between young engineers and the organizations developing Autonomous Surface Vehicle (ASV) technologies”

(*Preliminary Rules, 2012 RoboBoat* [12])

Ao longo das várias competições que se têm organizado, existem três missões que se mantêm: demonstração da força que o barco é capaz de exercer; tempo que este demora a realizar um determinado percurso em linha reta; a capacidade de navegação recorrendo apenas ao auxílio de boias sinalizadoras. Nesta última missão é suposto que ao movimentar-se, este seja capaz de atravessar por entre duas boias (verde e vermelha), contornar as boias amarelas, que representam obstáculos, e no final do trajeto haverá uma boia azul.

De seguida, existe um desafio que difere de ano para ano e que tem como base um determinado tema. Em 2010 o desafio baseava-se na saga senhor dos anéis, em 2011 tinha como tema os incêndios e em 2012 será sobre poker.

Uma das dificuldades realçadas pelas equipas participantes é a versatilidade que o robô tem de possuir, tal como, a capacidade de identificar e agarrar um objeto, a habilidade de identificar um determinado alvo e atingi-lo com água ou tinta.



Figura 2.6 - Veleiro a atingir o alvo com água [13]

RoboBoat

Tipo de competição	Barcos autónomos <i>outdoor</i>
Requisitos	Autónomo: O veículo deve ser totalmente autónomo e todas as decisões devem ser tomadas a bordo. Flutuabilidade: O veículo deve ser capaz de permanecer 30 minutos a flutuar na água. Comunicação: Não pode ser enviado ou recebido qualquer tipo de informação de instrução para o veículo, enquanto este estiver no modo autónomo. Rebocável: A estrutura tem de possuir 3 ou 4 pontos próprios para guindaste. Fonte de energia: Deve ser autossuficiente. Propulsão: É permitido qualquer sistema de propulsão com hélice ou remo mas, os seus constituintes devem ser protegidos. Comando remoto: O veículo deve ser remotamente controlável para que possa ser trazido para o porto em qualquer situação. Segurança: Todas as peças afiadas, pontiagudas, perigosas, sensíveis e que sejam capazes de induzir movimento devem ser cobertas e devidamente identificadas. Tamanho: 6 <i>feet</i> ($\approx 1,82m$) de comprimento e 3 <i>feet</i> ($\approx 0,91m$) de largura e altura. Superfície: O veículo deve ser capaz de flutuar na água e não é permitido submergir ou voar. Design: Deve ser desenhado de modo a ter pontos rebocáveis e cada um desses pontos deve possuir um arnês. Prova de água: O veículo deve ser resistente à água e a prova é realizada “quer faça sol, quer faça chuva”. Peso: Deve ter uma massa igual ou inferior a 140<i>lbs</i> ($\approx 63,5kg$).
Prémios	1º Lugar - \$6,000 2º Lugar - \$4,000 3º Lugar - \$3,000 4º Lugar - \$2,000 5º Lugar - \$1,000 6º Lugar - \$500 7º Lugar - \$500
Extras	<i>Edge of the Envelope for Science and Technology Stretch</i> (\$500) Melhor <i>performance</i> amadora (\$500) Menção honrosa para melhor amador (\$500) <i>Inovação design e performance</i> (\$500)

	Profissionalismo (\$500)
	Melhor artigo (\$500)
Ajudas	• <i>Naval Engineering Support Team</i> – fornece conselhos e empresta equipamentos (Placas da <i>Intel</i>) a equipas da <i>RoboBoat</i> e <i>RoboSub</i>. • <i>Solidworks</i> – licença de estudante de 12 meses para o programa <i>SolidWorks with Simulation</i> (<i>RoboBoat</i>, <i>RoboSub</i>, <i>IGVC</i>, <i>SUAS</i>, and <i>IARC</i>). • <i>SmallParts.com</i> - 15% de desconto em todos os produtos (<i>RoboBoat</i>, <i>RoboSub</i>, <i>IGVC</i>, <i>SUAS</i>, and <i>IARC</i>). • <i>RobotShop</i> - 7% de desconto em todos os produtos (<i>RoboBoat</i>, <i>RoboSub</i>, <i>IGVC</i>, <i>SUAS</i>, and <i>IARC</i>).
Hardware	Microcontrolador <i>ATMega328P</i>, <i>FPGA</i> ou <i>PC104</i> Sensores: • <i>NovAtel OEM4-G2 GPS receiver</i> (GPS) • <i>Microstrain 3DM-GX1</i> (Giroscópio, Acelerómetro) • <i>Unibrain Fire-I firewire</i> (Câmara) • <i>Panasonic MiniDV</i> (Câmara) • <i>Hokuyo UTM-30LX (Laser Rangefinder)</i> • <i>SICK LMS100 (Laser Rangefinder)</i> <i>RC switch board</i> <i>RC receiver</i> Sistema de <i>Software</i> em <i>Python</i>, <i>C++</i> ou <i>Java</i>
Missões	1. Demonstração de força 2. Demonstração de velocidade 3. Percorrer uma determinada trajetória 4. Desafios • <i>The card exchange</i> • <i>The poker chip</i> • <i>The Jackpot</i> • <i>The cheater's hand</i> • <i>The 'hot' suit</i> 5. Retornar ao porto

Tabela 2.1 - Características da competição *RoboBoat* [12] [14] [15]

2.5 - RoboSub - AUVSI

De entre as três competições estudadas é a mais antiga e já conta com 15 edições. É especialmente vocacionada para estudantes de tal modo que há restrições relacionadas com o número de “não estudantes” que podem ser incorporados em cada equipa. Tal como o *RoboBoat*, os temas diferem de ano para ano e são retratados com missões bastantes didáticas, tais como, atravessar uma caixa PVC que está pintada com uma determinada cor, disparar um torpedo para um determinado alvo, entre outros.

O maior desafio presente nas equipas é a aptidão para a navegação autónoma pois, como o veículo se encontra submerso, o sinal do satélite de GPS não é alcançável e, consequentemente, é necessário recorrer a outros métodos/sensores de posicionamento como, por exemplo, girobússolas, sonares, medidores de profundidade.

É uma área em franca expansão pois pode dotar o ser humano de descobrir novos mundos subaquáticos, de realizar operações humanamente inacessíveis e até missões de resgate em caso de acidente.

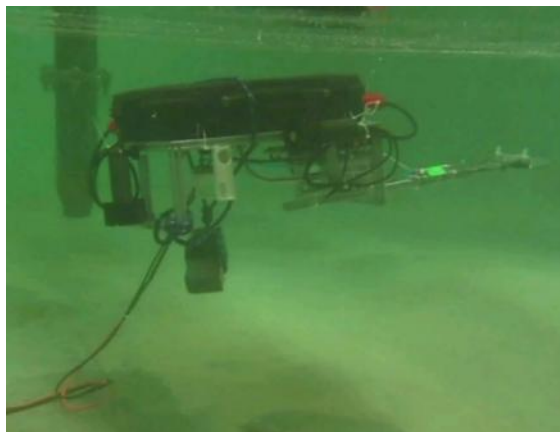


Figura 2.7 - Robô submarino construído pela equipa de Washington State University [16]

RoboSub

Tipo de competição

Submarinos autônomos *outdoor*

Requisitos

Autônomo: Durante a competição o veículo deve operar de forma autônoma, sem controlo, orientação ou comunicação com qualquer computador *off board*.

Rigidez: O veículo e respetivos componentes devem ser capazes de submergir e permanecerem submersos sem que nenhum dos seus constituintes quebre ou fique a flutuar.

Equipas: Podem ser constituídas por professores, parceiros industriais, entre outros. Têm de ser compostas com pelo menos 75% de estudantes a tempo inteiro e estes têm que ter uma contribuição significativa para o desenvolvimento do projeto. Apenas é permitido um veículo por equipa.

Peso: A massa do robô deve ser menor que 110lbs ($\approx 49,9\text{kg}$). Existe bônus abaixo de determinados valores e penalidades àqueles que excederem o peso máximo permitido, podendo levar mesmo à sua desqualificação.

Tamanho: 6 *feet* ($\approx 1,82\text{m}$) de comprimento e 3 *feet* ($\approx 0,91\text{m}$) de largura e profundidade.

Fonte de energia: Todos os veículos devem ser alimentados por baterias. Todas as baterias deverão ser fechadas de modo a reduzir o perigo de derrame de ácido e seus derivados em caso de fuga. Não podem ser carregadas dentro do veículo em qualquer instante da competição e a sua tensão não pode exceder os $60V_{DC}$.

Materiais: Nenhum material (exceto ar comprimido ou marcadores) pode ser libertado no recinto da competição.

Rebocável: Deve possuir pontos próprios para guindaste, mesmo que seja suficientemente leve para ser levado à mão.

Segurança: Todos os robôs têm de dispor um botão visível que pode ser facilmente ativado pelo mergulhador. Este botão serve para desconectar as baterias de todos os componentes de propulsão e dispositivos do veículo mas, o computador de bordo pode manter-se ativo. Após a reativação, o veículo deve retornar a um estado seguro. As zonas pontiagudas têm de ser isoladas.

Prêmios

1º Lugar - \$7,000
 2º Lugar - \$4000
 3º Lugar - \$3,000
 4º Lugar - \$2,000
 5º Lugar - \$500
 6º Lugar - \$500

Extras

Mayor's Cup for Community Outreach (\$1,000)
Second Chance Award (\$1,000)

	<i>Outstanding Technical Mentorship</i> (\$500) <i>Hardware is Hard Award</i> (\$500) Prémio inovação (\$500) Melhor artigo (\$500)
Ajudas	• <i>Naval Engineering Support Team</i> – fornece conselhos e empresta equipamentos (Placas da <i>Intel</i>) a equipas da <i>RoboBoat</i> e <i>RoboSub</i>. • <i>Solidworks</i> – licença de estudante de 12 meses para o programa <i>SolidWorks with Simulation</i> (<i>RoboBoat</i>, <i>RoboSub</i>, <i>IGVC</i>, <i>SUAS</i>, and <i>IARC</i>). • <i>SmallParts.com</i> - 15% de desconto em todos os produtos (<i>RoboBoat</i>, <i>RoboSub</i>, <i>IGVC</i>, <i>SUAS</i>, and <i>IARC</i>). • <i>RobotShop</i> - 7% de desconto em todos os produtos (<i>RoboBoat</i>, <i>RoboSub</i>, <i>IGVC</i>, <i>SUAS</i>, and <i>IARC</i>).
Hardware	Computador embebido <i>Kontron 2.5GHz Core 2 Duo Mini-ITX</i> com 4GB de RAM Sensores: • <i>2x Microstrain 3DM-GX1 Inertial Measurement Units (IMU)</i> • <i>Explorer Doppler Velocity Log (DVL)</i> • <i>2x Unibrain Fire-i Board (Pro cameras)</i> • <i>4x Brüel & Kjær (hydrophones)</i> • <i>Custom passive sonar signal processing board (sonar)</i> • <i>Depth meter</i> (medidor de profundidade) • <i>Active grabbing device</i> Atuadores: • <i>6x Seabotix HPDC1507 brushless thrusters (Motor)</i> • <i>Marker dropping unit</i> (Marcador) • <i>Soft projectile firing unit</i> (Projétil)
Missões	1. Navegar por um portão subaquático. 2. Inspeccionar um oleoduto e percorrê-lo. 3. Localizar e acertar em 2 boias de uma cor específica. 4. Largar 2 marcadores numa caixa com uma forma específica. 5. Navegar por uma pista. 6. Disparar um projétil em forma torpedo e acertar num objeto em forma de coração. 7. Localizar uma boia acústica e navegar até ela. 8. Agarrar uma estrutura de PVC. 9. Transportar a estrutura de PVC até uma boia acústica. 10. Navegar dentro de uma zona específica com a estrutura de PVC. 11. Largar a estrutura de PVC.

Tabela 2.2 - Características da competição *RoboSub* [17]

2.6 - MicroTransat

De entre as outras competições, é aquela que se realiza há menos tempo, contando apenas com 4 edições mas, com a curiosidade de já ter sido realizada em Portugal, mais precisamente em Matosinhos, e organizada pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em colaboração com o Clube Naval de Leça. Além desta competição existe ainda o *Sailboat Competition* e o WRSC (*World Robotic Sailing Championship*).

Os veículos usados nestes concursos são veleiros, pelo que o único modo de propulsão só pode ser realizado com a ajuda da força do vento. O controlo do veículo para seguir uma determinada trajetória requer algoritmos bastantes complexos pois, é necessário verificar a todos os instantes qual é a direção e força do vento. No entanto, este pode não coincidir com a direção que queremos tomar e, consoante a orientação desejada para o robô, este pode correr o risco de perder toda a velocidade.

No caso de sistemas de propulsão com hélices, não existe um fator externo tão significativo para o controlo do movimento do robô. Este é o maior problema encontrado pelas equipas participantes e o movimento do veículo é tão limitado que ainda não existe qualquer controlo/previsão contra choques entre veleiros. Apesar destes obstáculos o número de equipas tem vindo a aumentar desde 2006 como mostra o seguinte gráfico:

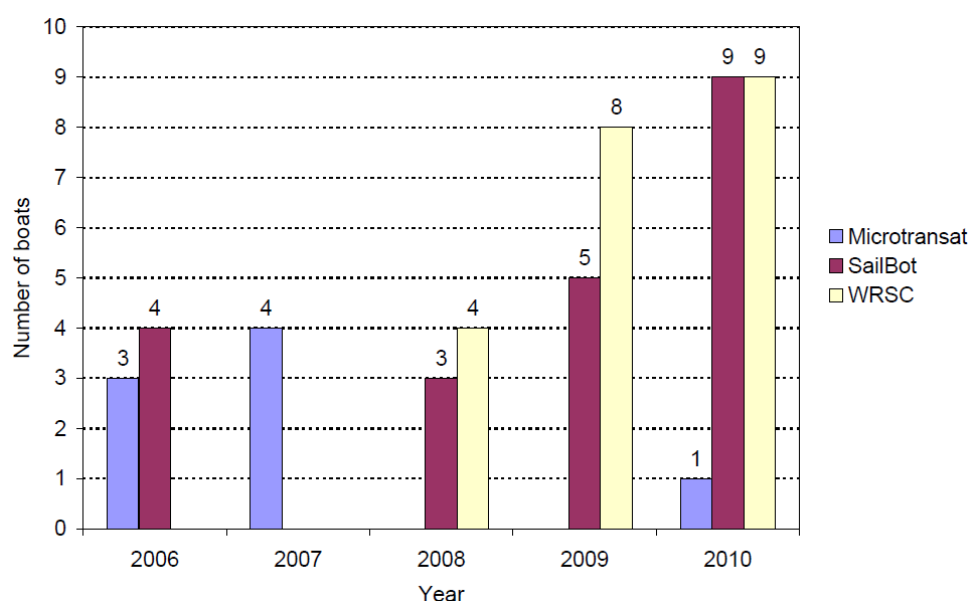


Figura 2.8 - Número de equipas participantes em competições de veleiros desde 2006 [4]

De salientar que em todas as competições, as equipas são constituídas com, pelo menos, 10 a 20 elementos, entre eles, estudantes, doutorados, professores e parceiros industriais.

Microtransat Challenge

Tipo de competiçãoVeleiros autónomos *outdoor*

Requisitos

Dimensões: Comprimento total do casco, incluindo, todos os mastros e velas orientadas em qualquer direção, proa e popa, e suas extensões (no caso de possuírem) não deve exceder 2 metros medidos paralelamente à linha de água. Sensores e respetivas fixações não estão incluídos na medição do comprimento total.

Número de cascos, profundidade, número e altura dos mastros, área velica, e número de velas são irrestritos mas devem seguir as seguintes limitações do evento:

- O projeto em condições normais de vela não deve exceder 1,5 metros.
- Altura total do ponto mais baixo subaquático ao ponto mais alto da maior plataforma não deverá ultrapassar 5 metros. Sensores e suas fixações não são incluídos na medição da altura.

Tamanho: A viga (mastros) não deve exceder os três metros de largura quando tiver no ângulo zero.

Autónomo: O veículo deve ser totalmente autónomo e todas as decisões devem ser tomadas *onboard*.

Comando remoto: O veículo deve ser remotamente controlável para evitar colisões com outros barcos se necessário.

Comunicações: A transferência de dados a partir da *Ground Station* para o barco é ilimitada, mas deve ser realizada numa frequência aprovada pelo concurso.

Frequências: A frequência de rádio utilizada em cada veículo deve cumprir os regulamentos do país onde se realiza o concurso e tem de ser aprovada antes da competição.

Propulsão: O seu deslocamento só pode ser realizado por meio da força exercida nas velas. Qualquer outro meio de propulsão não é permitido.

Materiais: Todos os materiais de construção são permitidos, desde que não causem danos ambientais durante a competição. Em particular, qualquer lastro de chumbo deve ser devidamente selado.

Energia: Os sistemas de controlo de bordo podem ter uma fonte de energia mas esta deve estar totalmente contida dentro do veículo.

Estrutura: A estrutura do barco deve manter-se inalterada desde o início até ao final de todos os eventos. Não podem ser adicionados ou descartados componentes durante a corrida.

Reparação: As peças podem ser substituídas ou reparadas entre eventos se necessário.

Configuração: A alteração (*hoisting / dousing*) da vela é permitida durante uma corrida desde que seja o computador de bordo a iniciar e executar essa ação.

Prémios	-
Extras	1. Maior pontuação no concurso de navegação por classe; 2. Maior pontuação no concurso de navegação no global; 3. Maior pontuação no concurso de manter a mesma posição por classe; 4. Maior pontuação no concurso de manter a mesma posição no global; 5. Maior pontuação na missão de evitar colisões por classe; 6. Maior pontuação na missão de evitar colisões no global; 7. Maior pontuação na corrida por classe; 8. Maior pontuação na corrida no global; 9. Barco mais rápido na corrida no global (se vários barcos tiverem o mesmo tempo, ganha aquele com menor comprimento da parte submergível do mesmo); 10. Maior pontuação na corrida de endurance por classe; 11. Maior pontuação na corrida de endurance no global; 12. Maior distância percorrida na corrida de endurance (número de voltas completas; se vários barcos tiverem o mesmo número de voltas, ganha o barco que tiver completado a última volta mais rápido); 13. Maior pontuação por classe (soma de 1, 3, 5, 7, 10); 14. Maior pontuação em WRSC (<i>World Robotic Sailing Championship</i>) (soma de 2, 4, 6, 8, 11);
Ajudas	-
Hardware	Computador: <i>FPGA / Mini-ITX com Linux, 800 MHz, 512MB RAM, 4GB card</i>; Controlo em <i>Java</i> ou <i>C++</i>; Comunicação: • <i>WIFI</i> • <i>GPRS / UMTS</i> • <i>Iridium satellite modem</i> Sensores: • Posição e velocidade (GPS) • Bateria e consumo instantâneo • Sensor de vento ultrassónico (medir direção e velocidade) • Inclinação vertical e horizontal • Bússola • Humidade • Temperatura do ar e da água • Profundidade • Pressão atmosférica Atuadores: • <i>Sheet linear drive</i> • <i>Tiller linear actuator</i> • Bomba automática do porão • Buzina, luzes Baterias de íões de lítio de 4.6kWh 1,5m² de painéis solares (285Wp)
Missões	Realização de um percurso pré-definido juntamente com outros barcos.

Tabela 2.3 - Características da competição *Microtransat* [18] e *WRSC* [19]

Capítulo 3

Caracterização do Problema

O projeto consiste em converter um veleiro RC num veleiro totalmente autónomo, dando maior ênfase ao controlo da vela pois, ao contrário dos motores de propulsão que podem colocar um robô em qualquer direção e orientação, um veleiro não é dotado dessa capacidade. Apenas é possível esticar ou apertar a corda que está agarrada à vela, dando assim um determinado ângulo, o qual depende da orientação e força do vento e da posição leme. O ideal será torná-lo totalmente autónomo e os únicos dados a serem transmitidos entre o veleiro e a *Ground Station* serão a sua posição/estado atual e os *waypoints*.

O sistema pode ser dividido em 2 grandes subsistemas:

1. Plataforma (Veleiro)
2. *Ground Station*

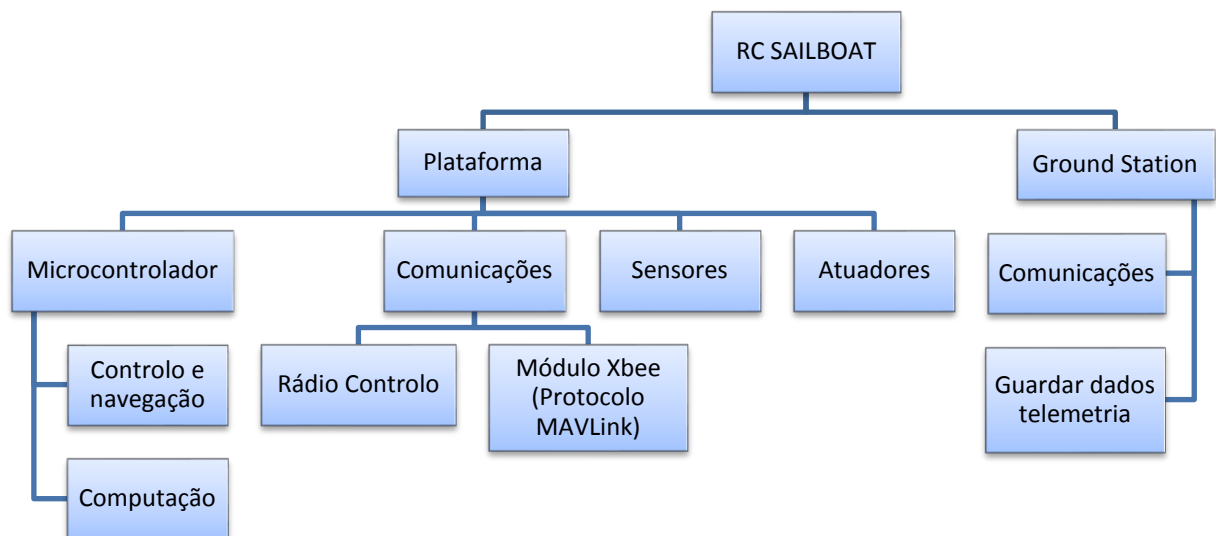


Figura 3.1 - Níveis superiores do SBS

De seguida segue-se um SBS completo mas dividido em plataforma e *Ground Station* que demonstra inteiramente os diferentes subsistemas, de forma hierárquica, a relação entre os vários elementos que compõem a arquitetura do sistema. O *System Breakdown Structure* (SBS) permite decompor o sistema em subsistemas, de modo a que, de uma forma gráfica simples se possa ter uma maior perceção do resultado do projeto, o que veio permitir posteriormente a criação de um planeamento. Ao mesmo tempo, mostra uma visão geral do ciclo de vida do projeto.

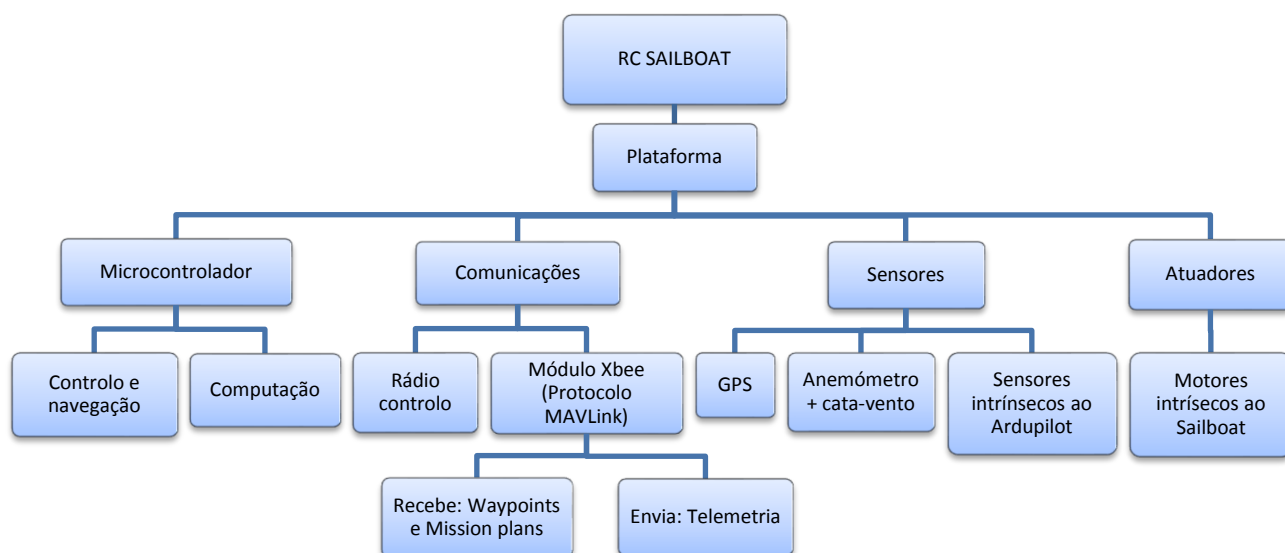


Figura 3.2 - SBS completo Plataforma

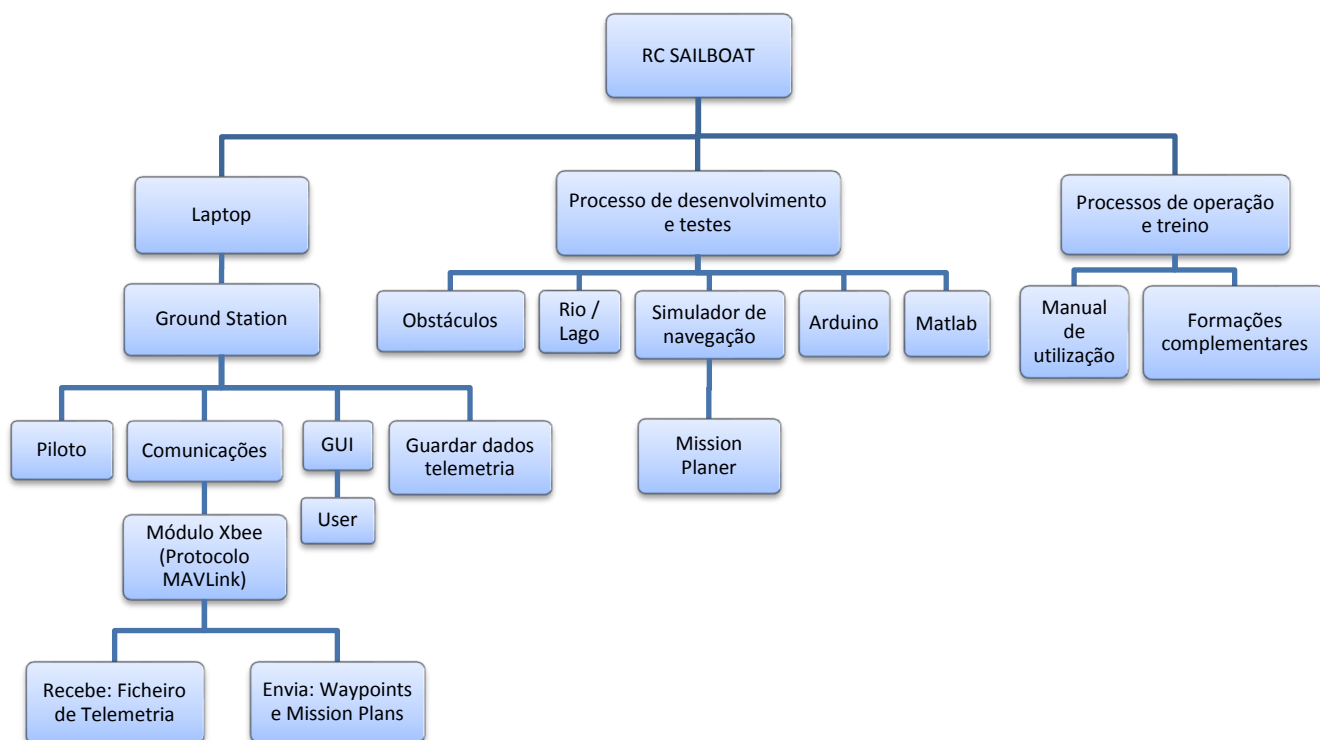


Figura 3.3 - SBS completo *Ground Station*

3.1 - Plataforma

De um modo geral, o funcionamento do barco está representado no seguinte diagrama de Arquitetura Funcional:

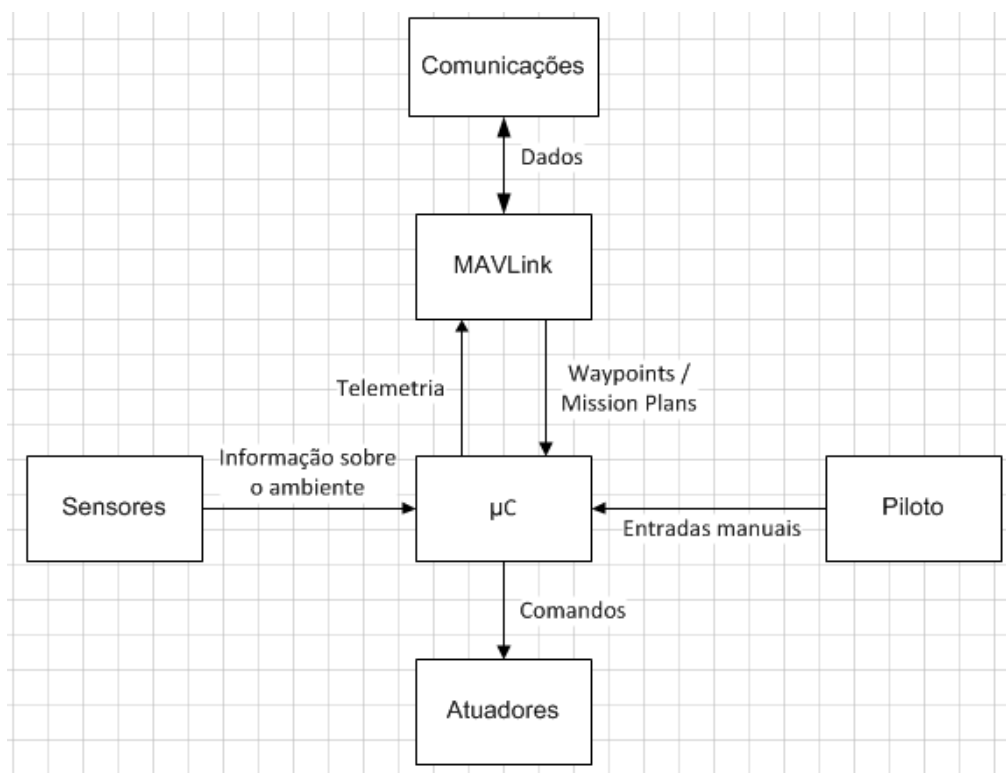


Figura 3.4 - Arquitetura Funcional do veleiro

O módulo de processamento recebe informações dos sensores assim como entradas de rádio controle provenientes do piloto que opera o comando. Realiza o processamento necessário e dá comandos aos atuadores no sentido de produzir alterações de trajetória desejadas.

Paralelamente a este processamento existe permanente troca de informação através do protocolo *MAVLink* sobre *hardware Xbee*, no sentido de enviar dados de telemetria para a estação de terra, assim como, receber comandos da mesma, como os *waypoints* e *mission plans*.

3.2 - Ground Station

Em terra existe um computador que funciona como estação de terra e que permite a comunicação com o veleiro.

A comunicação, como foi já dito acima, será feita sobre um protocolo para a receção de telemetria e envio de *waypoints* e *mission plans*. Para isso, existe uma interface gráfica que dispõe a informação revelante para o seu operador, e ainda para o piloto. Esta aplicação possui mapas 2D e 3D com *Google Earth support* que permite a criação de *waypoints* de uma forma *drag-and-drop* e permite ainda a alteração em tempo real de parâmetros *onboard*. Permite ainda a criação de gráficos de telemetria e informação de sensores.

Toda a operação de comando e monitorização do veleiro de alto nível é realizada através deste *software*, sendo os únicos comandos externos a esta aplicação aqueles provenientes do comando de radio controlo do piloto, caso este deseje controlar a embarcação manualmente.

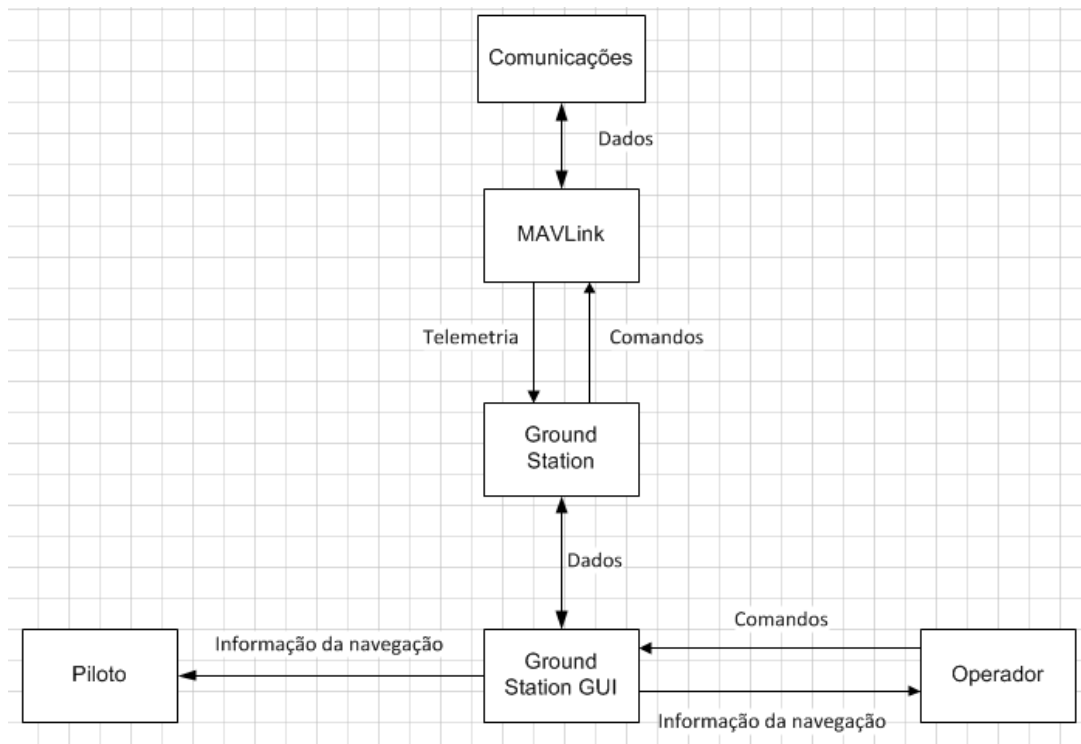


Figura 3.5 - Arquitetura Funcional da *Ground Station*

Capítulo 4

Modelação corpo rígido

Neste capítulo, apresentam-se os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do modelo e dos respetivos controladores. Começa-se por apresentar o barco, as suas características e os seus componentes. De seguida, são estudados os conceitos de posicionamento em robótica, terminando com a dinâmica do corpo rígido e com as diversas forças e momentos que nele atuam.

4.1 - Descrição do veículo

A embarcação automatizada utilizada está representada na figura seguinte e é denominada de *RC Laser*.



Figura 4.1 - *RC Laser*

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Descrição</i>
m_B	4.130 kg	Massa do veleiro
m_k	1.550 kg	Massa da quilha
m_h	2.260 kg	Massa do casco
a_h	1.045 m	Comprimento casco
b_h	0.339 m	Largura casco
c_h	0.074 m	Profundidade casco
a_r	0.184 m	Comprimento leme
b_r	0.062 m	Largura leme
c_r	0.005 m	Espessura leme
a_k	0.179 m	Comprimento da quilha
b_k	0.048 m	Largura quilha
c_k	0.0447 m	Espessura quilha
a_s	1.246 m	Comprimento vela
b_s	0.633 m	Largura da vela
a_m	1.346 m	Comprimento do mastro

Tabela 4.1 - Parâmetros veleiro

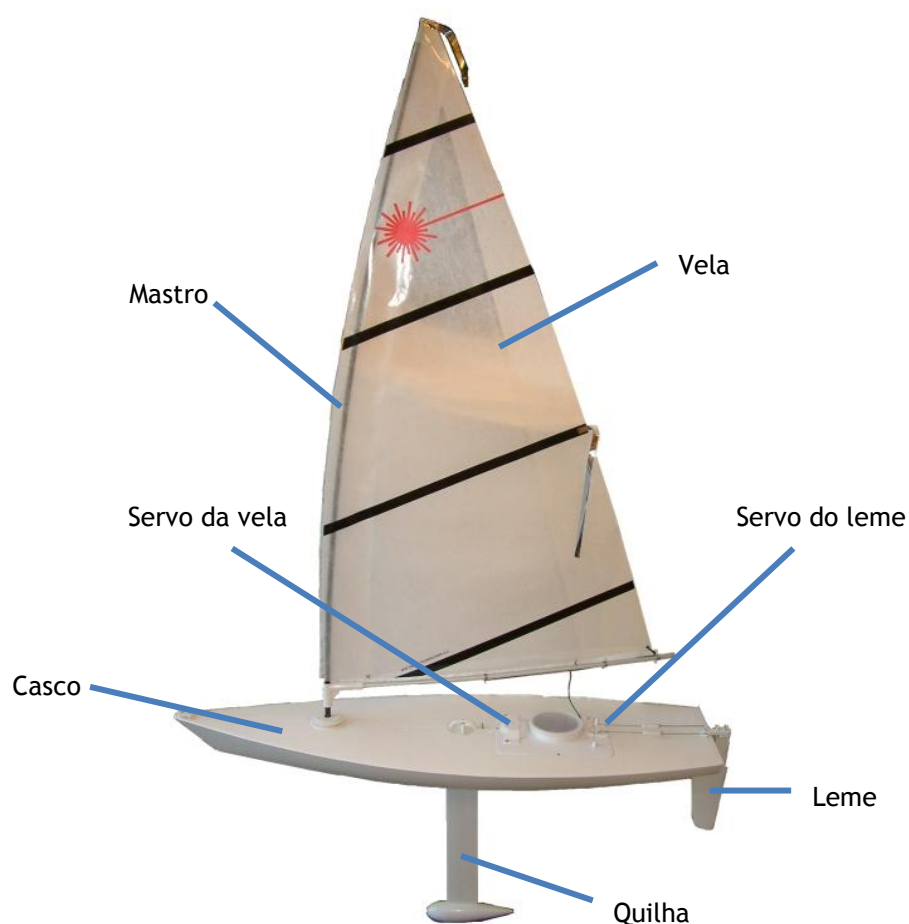


Figura 4.2 - Constituintes básicos de um veleiro

4.2 - Sistema de Coordenadas

Para o estudo da cinemática de um veleiro é usado um sistema de 6 coordenadas independentes como forma de definir a posição e orientação tri-axial. Na robótica, a posição de um corpo é calculada recorrendo a pontos de referência (Siegwart, 2004) [20].

Por motivos de simplificação matemática são usados dois referenciais cartesianos:

- referencial inercial fixo à Terra $\{x, y, z\}$, onde a origem do referencial está localizada no plano tangente à área de interesse;
- referencial fixo ao corpo $\{x_b, y_b, z_b\}$, em que este sofre translação e rotação consoante o movimento do corpo e a origem geralmente coincide com o centro de massa do veículo.

$$\eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

<i>Movimento / Rotação</i>	<i>Posição e Ângulo de Euler</i>	<i>Velocidade Linear / Angular</i>	<i>Força / Momento</i>
Movimento em x (<i>surge</i>)	x	u	X
Movimento em y (<i>sway</i>)	y	v	Y
Movimento em z (<i>heave</i>)	z	w	Z
Rotação em x (<i>roll</i>)	ϕ	p	K
Rotação em y (<i>pitch</i>)	θ	q	M
Rotação em z (<i>yaw</i>)	ψ	r	N

Tabela 4.2 - Notação SNAME [21] usada em veículos marítimos

onde η_1 e η_2 são, respetivamente, a posição e a orientação do referencial fixo ao corpo relativamente ao referencial inercial Terra; v_1 e v_2 são as velocidades lineares e angulares no referencial fixo ao corpo; τ_1 e τ_2 são as forças e os momentos exercidos sobre o corpo.

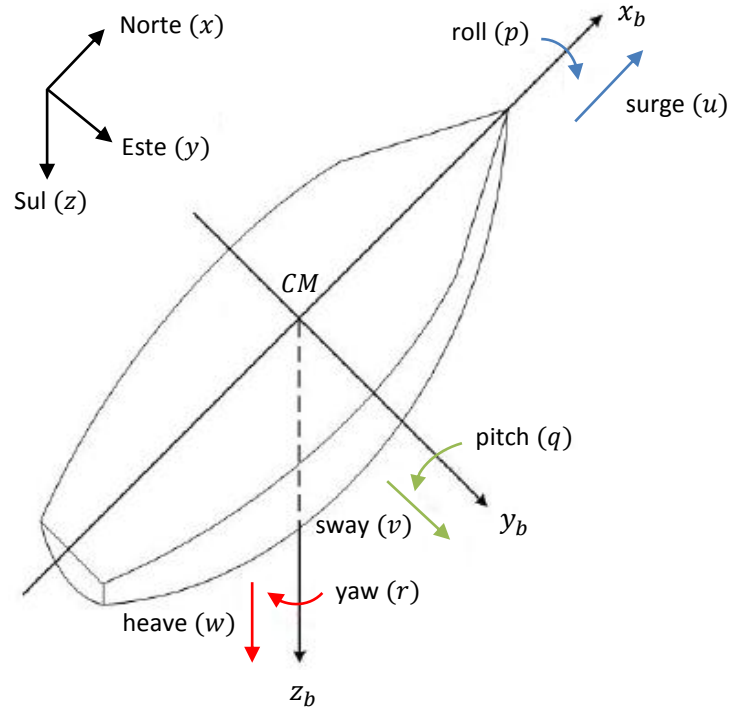


Figura 4.3 - Representação do sistema de coordenadas

4.3 - Cinemática

Dada a orientação do referencial do corpo relativamente ao referencial inercial Terra, é possível obter-se qualquer uma delas através de três rotações elementares segundo o referencial em questão.

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A matriz de transformação segundo a nomenclatura em (Fossen, 1994) [22] é dada por:

$$\begin{aligned} R(\eta_2) &= R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\theta)\cos(\phi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) & \sin(\psi)\sin(\phi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\theta)\cos(\phi) + \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.7)$$

A ordem destas três rotações não é arbitrária e em aplicações de orientação e controlo é comum utilizar-se a convenção -zyx- para descrever o movimento do corpo. A matriz de rotação é dada por $R_{z,\psi}R_{y,\theta}R_{x,\phi}$ quando se pretende obter o referencial $\{x,y,z\}$ através de três rotações segundo cada eixo do referencial fixo ao corpo $\{x_b,y_b,z_b\}$. Caso se pretenda o oposto, é necessário inverter a ordem da matriz de transformação, sendo esta dada por $R_{x,\phi}R_{y,\theta}R_{z,\psi}$.

Seguindo esta linha de raciocínio, o vetor de velocidades lineares no referencial fixo ao corpo pode ser transformado relativamente a outro referencial, sendo no nosso caso, o referencial Terra, da seguinte forma:

$$\dot{\eta}_1 = R(\eta_2)v_1 \Leftrightarrow v_1 = R^T(\eta_2)\dot{\eta}_1 \quad (4.8)$$

O vetor da velocidade angular $v_2 = [p,q,r]^T$ no referencial do corpo e a velocidade angular do corpo $\dot{\eta}_2 = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ no referencial fixo à Terra estão relacionados através de uma matriz de transformação $T(\eta_2)$, de acordo com:

$$\dot{\eta}_2 = T(\eta_2)v_2 \quad (4.9)$$

O vetor de velocidades angulares v_2 não pode ser integrado diretamente para obter as coordenadas angulares atuais, devido ao facto de $\int_0^t v_2(\tau)d\tau$ não ter qualquer interpretação física imediata. No entanto, este pode ser representado como:

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x,\phi}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x,\phi}^{-1} R_{y,\theta}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Desta forma, a matriz de transformação é dada por (Fossen,1994):

$$T(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\psi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

A expressão geral é dada por:

$$\dot{\eta} = R(\eta_2)v \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

4.4 - Dinâmica

O desenvolvimento de um modelo matemático de uma embarcação é feito através da computação de equações complexas e não lineares de movimento. Estas equações podem ser descritas com 6 graus de liberdade: *surge*, *sway* e *heave* para os movimentos de translação, e *roll*, *pitch* e *yaw* para movimentos rotacionais. Mas consoante o objectivo que desejarmos para o controlo, o modelo pode tornar-se mais simples, com menor grau de liberdade até chegar à cinemática linear, pois pressupõe-se mudança de velocidade e posição lenta. “*These control objectives can be roughly divided into slow speed positioning or high speed steering. Slow speed monitoring or dynamical positioning includes station keeping, position mooring and slow speed reference tracking* ([Strand, 1999] e [Lindegard, 2003]), *for high speed steering, it includes automatic course control, high speed position tracking and path following*” ([Lefebvre, 2003] e [Fossen, 1994]) [23].

Numa análise a priori podemos excluir a altura (*heave*) e a rotação em y (*pitch*) pois são residuais face às restantes componentes e fará com que o modelo dinâmico tenha apenas 4 graus de liberdade e, consequentemente, se torne mais simples. O vector $v = [u, v, p, r]^T$ representa o vector velocidade no referencial fixo ao corpo e $\eta = [x, y, \phi, \psi]^T$ é o vector que representa, respectivamente, a posição do veleiro no referencial fixo ao corpo rígido e os ângulos *roll* e *yaw*.

Todos os cálculos vão ter em consideração que o barco estará em águas calmas, ou seja, o efeito da corrente e da ondulação face à força do vento é desprezável.

4.4.1 - Modelação do corpo rígido

Através da segunda Lei de *Newton* podemos derivar as equações dinâmicas do corpo rígido da seguinte forma:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (4.13)$$

O somatório das forças e dos momentos (τ_{RB}) que nele atuam, em cada eixo, seguindo a nomenclatura em (Fossen, 1994) são dados por:

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} - vr + wq - x_{CM}(q^2 + r^2) + y_{CM}(pq - \dot{r}) + z_{CM}(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} - wp + ur - y_{CM}(r^2 + p^2) + z_{CM}(qr - \dot{p}) + x_{CM}(qp + \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} - uq + vp - z_{CM}(p^2 + q^2) + x_{CM}(rp - \dot{q}) + y_{CM}(rq + \dot{p})] \\ K &= I_x\dot{p} + (I_x - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ &\quad + m[y_{CM}(\dot{w} - uq + vp) - z_{CM}(\dot{v} - wp + ur)] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$M = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ + m[x_{CM}(\dot{u} - vr + wq) - x_{CM}(\dot{w} - uq + vp)]$$

$$N = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\ + m[x_{CM}(\dot{v} - wp + ur) - y_{CM}(\dot{u} - vr + wq)]$$

A matriz de inércia $M_{RB} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ do corpo rígido com 6 graus de liberdade é dada por:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_{CM} & -my_{CM} \\ 0 & m & 0 & -mz_{CM} & 0 & mx_{CM} \\ 0 & 0 & m & my_{CM} & -mx_{CM} & 0 \\ 0 & -mz_{CM} & my_{CM} & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_{CM} & 0 & -mx_{CM} & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_{CM} & mx_{CM} & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

A matriz dos termos de *Coriolis* e centrípetos $C_{RB} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ do corpo rígido com 6 graus de liberdade é dada por:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_{CM}q + z_{CM}r) & -m(x_{CM}q - w) & -m(x_{CM}r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_{CM}p + w) & m(z_{CM}r + x_{CM}p) & -m(y_{CM}r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_{CM}p - v) & -m(z_{CM}q - u) & m(x_{CM}p + y_{CM}q) \\ -m(y_{CM}q + z_{CM}r) & m(y_{CM}p + w) & m(z_{CM}p - v) & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_{zz}r & -I_{yz}r + I_{xy}p - I_{yy}q \\ m(x_{CM}q - w) & -m(z_{CM}r + x_{CM}p) & m(z_{CM}q - u) & -I_{yz}q + I_{xz}p - I_{zz}r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_{xx}p \\ m(x_{CM}r + v) & m(y_{CM}r - u) & -m(x_{CM}p + y_{CM}q) & -I_{yz}r - I_{xy}p + I_{yy}q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Admitindo que a origem do referencial fixo ao corpo coincide com o seu centro de massa e que a sua massa é simétrica ao longo dos seus eixos conclui-se que: $x_{CM} = y_{CM} = z_{CM} = 0$ e $I_{xy} = I_{yz} = 0$ [24]. Devido a todas as restrições mencionadas anteriormente, o barco terá apenas 4 graus de liberdade, sendo que as matrizes (4.12), (4.15) e (4.16) são simplificadas, obtendo-se:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{xx} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & -I_{xz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & -mr & 0 & 0 \\ mr & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi\cos\phi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi\cos\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

4.4.2 - Momento de Inércia

A inércia é uma propriedade da física que considera que qualquer força aplicada a um corpo fará com que este tente contrariá-la, pois um corpo é pouco recetível a mudança de estado. Em termos mecânicos o momento de inércia mede a distribuição da massa por todo o volume do corpo em torno de um eixo de rotação e, assim, quanto maior for o momento de inércia, menor será a capacidade de o fazer girar, daí um barco à vela possuir uma quilha. A matriz de inércia $I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ é dada por [25]:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

onde,

$$I_{xx} = \int_V (y^2 + z^2) \rho_B dV \quad ; \quad I_{yy} = \int_V (x^2 + z^2) \rho_B dV \quad ; \quad I_{zz} = \int_V (x^2 + y^2) \rho_B dV \quad (4.21)$$

$$I_{xy} = - \int_V xy \rho_B dV \quad ; \quad I_{xz} = - \int_V xz \rho_B dV \quad ; \quad I_{yz} = - \int_V yz \rho_B dV$$

Considerando uma elipsoide as equações (4.21) podem ser descritas como [26]:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= abc\rho_B \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (a^2 r^2 \cos^2 \theta \sin^2 \phi + b^2 r^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi) r^2 \sin \phi d\phi d\theta dr \\ &\Leftrightarrow I_{xx} = abc\rho_B \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta) r^4 \sin^3 \phi d\phi d\theta dr \\ &\Leftrightarrow I_{xx} = \frac{4}{15} \pi \rho_B abc (a^2 + b^2) \end{aligned} \quad (4.22)$$

onde,

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3} \pi xyz} \quad (4.23)$$

Substituindo temos:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \frac{1}{5} m(b^2 + c^2) \quad ; \quad I_{yy} = \frac{1}{5} m(a^2 + c^2) \quad ; \quad I_{zz} = \frac{1}{5} m(a^2 + b^2) \\ I_{xy} &= -\frac{1}{5} mab \quad ; \quad I_{xz} = -\frac{1}{5} mac \quad ; \quad I_{yz} = -\frac{1}{5} mbc \end{aligned} \quad (4.24)$$

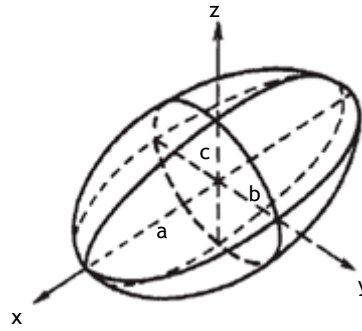


Figura 4.4 - Representação de uma elipsoide

Outro factor a ter em atenção é o efeito inercial da quilha, que faz com que o veleiro não tome um ângulo *roll* superior a 90°. Para calcular o seu momento de inércia relativo ao CM do robô é usado o teorema de *Steiner* ou o teorema dos eixos paralelos. O teorema permite calcular o momento de inércia de um sólido rígido relativo a um eixo de rotação que passa por um ponto *P*, quando se conhece o momento de inércia relativo a um eixo paralelo ao anterior que passa pelo CM do sólido, e a distância entre os eixos [27] [28].

$$I_{xx} = I_{CM} + Md^2 \quad (4.25)$$

onde, I_{CM} é o momento de inércia do sólido no seu centro de massa, M é a massa do sólido e d é a distância perpendicular aos dois eixos.

Considerando que a quilha pode ser aproximada em termos de cálculo da densidade volumica a uma elipsóide e o casco a meia elipsóide (daí o termo para cálculo da inércia do casco ser 2/5 pois a densidade passou a ser o dobro), podemos então escrever as equações como:

$$I_{xx} = \frac{2}{5}m_h(b_h^2 + c_h^2) + \frac{1}{5}m_k(b_k^2 + c_k^2) + m_k\sqrt{y_k^2 + z_k^2}^2 \quad (4.26)$$

$$I_{yy} = \frac{2}{5}m_h(a_h^2 + c_h^2) + \frac{1}{5}m_k(a_k^2 + c_k^2) + m_k\sqrt{x_k^2 + z_k^2}^2 \quad (4.27)$$

$$I_{zz} = \frac{2}{5}m_h(a_h^2 + b_h^2) + \frac{1}{5}m_k(a_k^2 + b_k^2) + m_k\sqrt{x_k^2 + y_k^2}^2 \quad (4.28)$$

$$I_{xy} = -\frac{2}{5}m_h a_h b_h - \frac{1}{5}m_k a_k b_k - m_k x_k y_k \quad (4.29)$$

$$I_{xz} = -\frac{2}{5}m_h a_h c_h - \frac{1}{5}m_k a_k c_k - m_k x_k z_k \quad (4.30)$$

$$I_{yz} = -\frac{2}{5}m_h b_h c_h - \frac{1}{5}m_k b_k c_k - m_k y_k z_k \quad (4.31)$$

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor (kg.m²)</i>
I_{xx}	0.3495
I_{yy}	0.6081
I_{zz}	0.3182
I_{xy}	-0.0920
I_{xz}	-0.0181
I_{yz}	-0.0044

Tabela 4.3 - Valores dos momentos e produtos de inércia

4.4.3 - Hidrodinâmica: Massa acrescentada

Quando um corpo inserido num fluido se desloca, gera o movimento das partículas que o rodeiam, designando-se este fenómeno como a força e momento de massa acrescentada. Isto deve-se ao facto de que quando o barco se move, uma porção do fluido que se encontra imediatamente após a proa, tenha de se movimentar para a popa, induzindo forças e momentos contrários ao movimento do corpo (Hoerner, 1985) [29].

O modelo dinâmico tem de ter em conta a energia cinética gerada com o movimento do fluido, o que pode ser compreendido como um aumento da pressão em redor do veleiro e, consequentemente, um aumento aparente da massa do mesmo. Em suma, as forças e momentos da massa acrescentada induzidos devem ser proporcionais à aceleração do corpo, podendo ser calculados como:

$$\tau_A = -M_A \ddot{v} - C_A(v)v \quad (4.32)$$

onde $\tau_A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ é o vetor das forças e momentos de massa acrescentada totais.

A matriz de massa acrescentada $M_A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ é dada por [30]:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

A matriz dos termos de *Coriolis* e *centrípetos* $C_A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ é dada por:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -c_A^1 & c_A^2 \\ 0 & 0 & 0 & c_A^1 & 0 & -c_A^3 \\ 0 & 0 & 0 & -c_A^2 & c_A^3 & 0 \\ 0 & -c_A^1 & c_A^2 & 0 & -c_A^4 & c_A^5 \\ c_A^1 & 0 & -c_A^3 & c_A^4 & 0 & -c_A^6 \\ -c_A^2 & c_A^3 & 0 & -c_A^5 & c_A^6 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned}
c_A^1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\
c_A^2 &= X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\
c_A^3 &= X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\
c_A^4 &= X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\
c_A^5 &= X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\
c_A^6 &= X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + N_{\dot{r}}r
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Geralmente, o movimento de um veleiro a altas velocidades é altamente não linear mas, como este apenas se desloca a baixas velocidades, alguns elementos fora da diagonal das matrizes M_A e $C_A(v)$ podem ser rejeitados, devido ao facto de nem todas as forças e momentos terem o mesmo impacto. Por exemplo, é possível considerar que estas são simétricas em relação ao plano $x_b z_b$ e, conseqüentemente as matrizes são simétricas $M_{Aij} = M_{Aji}$. Outro exemplo, a aceleração do veículo segundo qualquer eixo que não seja x_b , ou seja, o sentido em que este se movimenta, é desprezável. Todas estas simplificações continuam a manter a simulação próxima do modelo real. As matrizes (4.33) e (4.34) podem ser descritas então como [31]:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & Y_{\dot{p}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{r}} \\ 0 & Y_{\dot{r}} & K_{\dot{r}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{\dot{v}}v & -X_{\dot{u}}u & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

Considerando a simetria e a aproximação do casco a uma elipsoide, as variáveis das matrizes M_A e C_A podem ser calculadas segundo (Fossen, 1994):

$$X_{\dot{u}} = -\frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0} m \tag{4.39}$$

$$Y_{\dot{v}} = -\frac{\beta_0}{2 - \beta_0} m \tag{4.40}$$

$$K_{\dot{p}} = -\frac{1}{5} \frac{(c^2 - b^2)^2 (\alpha_0 - \beta_0)}{2(c^2 - b^2) + (c^2 + b^2)(\beta_0 - \alpha_0)} m \tag{4.41}$$

$$N_{\dot{r}} = -\frac{1}{5} \frac{(b^2 - a^2)^2 (\alpha_0 - \beta_0)}{2(b^2 - a^2) + (b^2 + a^2)(\beta_0 - \alpha_0)} m \quad (4.42)$$

A excentricidade e é dada por:

$$e = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (4.43)$$

As constantes α_0 e β_0 podem ser calculadas através de:

$$\alpha_0 = \frac{2(1 - e^2)}{e^3} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{1 + e}{1 - e} - e \right) \quad (4.44)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1 - e^2}{2e^3} \ln \frac{1 + e}{1 - e} \quad (4.45)$$

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
a	0.5225 m
b	0.1695 m
c	0.074 m
e	0.8948
α_0	0.3065
β_0	0.8468
$X_{\dot{u}}$	-0.7475 kg
Y_v	-3.0324 kg
$Y_{\dot{p}}$	0.00156 kg
$Y_{\dot{r}}$	0.00183 kg
$K_{\dot{p}}$	0.00370 kg.m ²
$K_{\dot{r}}$	0.00120 kg.m ²
$N_{\dot{r}}$	-0.0818 kg.m ²

Tabela 4.4 - Coeficientes para o cálculo da massa acrescentada

4.4.4 - Amortecimento viscoso

O amortecimento viscoso é um fenómeno que ocorre devido à pressão criada pelo movimento do corpo. Esta deve-se essencialmente à contribuição linear e quadrática da fricção na camada exterior do corpo e ao arrastamento devido aos vórtices criados pelo movimento relativo do fluido na superfície do corpo (White, 1999) [32].

O veleiro para se mover na água tem de fazer com que esta se desloque da proa para a popa do barco e a este movimento de partículas dá-se o nome *drag*, força de arrasto ou amortecimento viscoso.

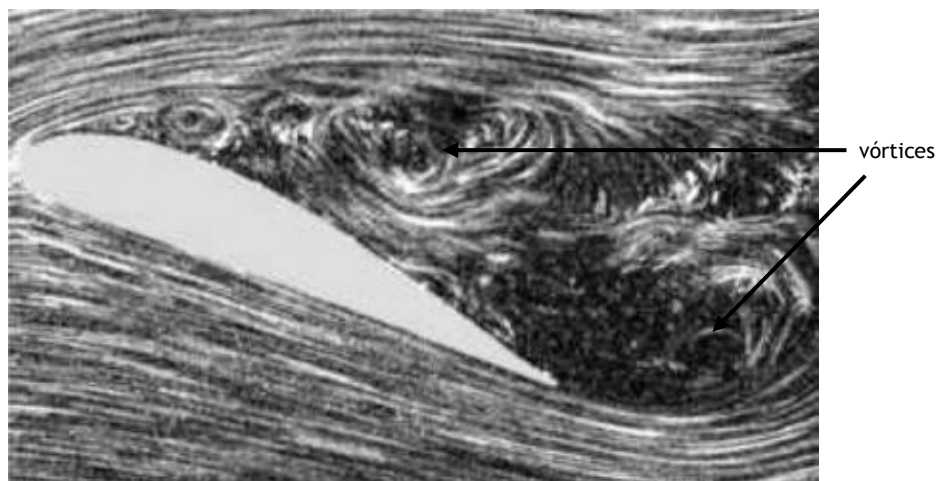


Figura 4.5 - Efeito do vento num aerofólio com ângulo de ataque alto (Faltinsen 2005) [33]

Na mecânica dos fluidos, a medida da razão de forças cinemáticas ou inerciais para as forças viscosas no fluido, ou seja, a proporção de força necessária para mover o fluido, é dado pelo número adimensional de *Reynold* Re .

$$Re = \frac{Ul}{\nu} \quad (4.46)$$

onde U é a velocidade aparente do fluido, l é o comprimento do sólido e ν é a viscosidade cinemática do meio. Considerando o corpo elipsoidal com velocidade não nula e usando a teoria do fluxo laminar podemos deduzir a seguinte expressão (White, 1999):

$$C_D = 0.44 \frac{d}{l} + 4C_f \frac{l}{d} + 4C_f \left(\frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.47)$$

onde o coeficiente de fricção C_f é dado por:

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.48)$$

por fim, a força *drag* é calculada por:

$$D = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D \quad (4.50)$$

Viscosidade cinemática	Valor m ² /s
Ar (26.85°C)	1.004 x 10 ⁻⁶
Água (20°C)	15.68 x 10 ⁻⁶

Tabela 4.5 - Valor da viscosidade em diferentes meios

4.4.5 - Lift

Quando um corpo se movimenta cria nas suas extremidades diferentes velocidades aparentes em relação ao meio onde se encontra. A este fenómeno dá-se o nome de *lift*, e é mais compreensível na aeronáutica, pois é a força que faz sustentar o avião a uma dada altitude. Quando um avião perde a força do *lift* cai em queda livre. A fórmula teórica é dada por [34]:

$$L = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_L(\alpha) \quad (4.51)$$

onde ρ é a densidade do meio, A é a área do corpo, v é a velocidade do corpo C_L é o coeficiente de *lift* para um dado ângulo de ataque.

Na figura seguinte está representado um teste realizado por engenheiros da NASA onde se pode visualizar o efeito *lift*. A água colorida quando atravessa o aerofólio, devido à sua geometria e ao ângulo de ataque, gera uma diferença de pressão e de velocidade nas suas extremidades. O que se pretende é que este fluxo seja o mais suave possível por toda a superfície do aerofólio para que se tenha a melhor performance e aproveitamento da força de *lift* [35].



Figura 4.6 - Representação da força lift em laboratório

Quando o ângulo de ataque começa a ser elevado (acima de $20^\circ - 25^\circ$) o fluxo de ar que atravessa o aerofólio já não é linear e suave, o que gera uma zona de baixa pressão e, consequentemente, vórtices, como se pode observar na figura 4.8. À medida que o ângulo de ataque aumenta o *lift* diminui até valores próximos de zero:

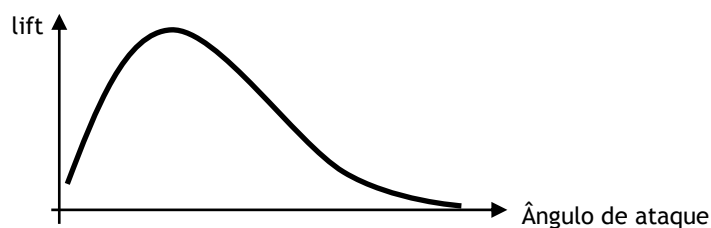


Figura 4.7 Gráfico da força *lift* em função do ângulo de ataque

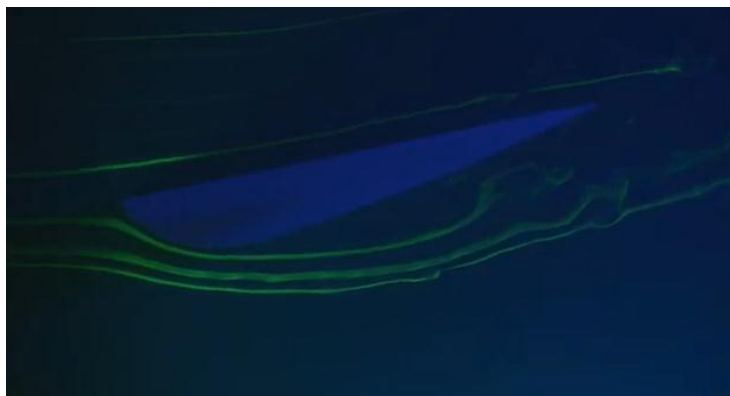


Figura 4.8 - Representação da força lift em laboratório

Devido ao facto de C_L ser calculado teoricamente a partir do C_D , com $C_D = C_L(\alpha)^2/\pi AR$, este não considera aspetos mecânicos e físicos pois, para determinados ângulos de ataque o *lift* é zero e o *drag* nunca é zero, se a força do vento no corpo ou o ângulo de ataque não forem nulos. Deste modo, determinou-se uma aproximação de uma possível curva para o coeficiente de *lift* em função do ângulo de ataque e parametrizou-se para se obter a equação polinomial:

α (rad)	C_L
0,698	0,05
0,524	0,2
0,436	0,5
0,349	0,9
0,262	1,2
0,175	1
0,087	0,6
0,000	0,1

Tabela 4.6 - Valores de coeficientes de lift em função do ângulo de ataque

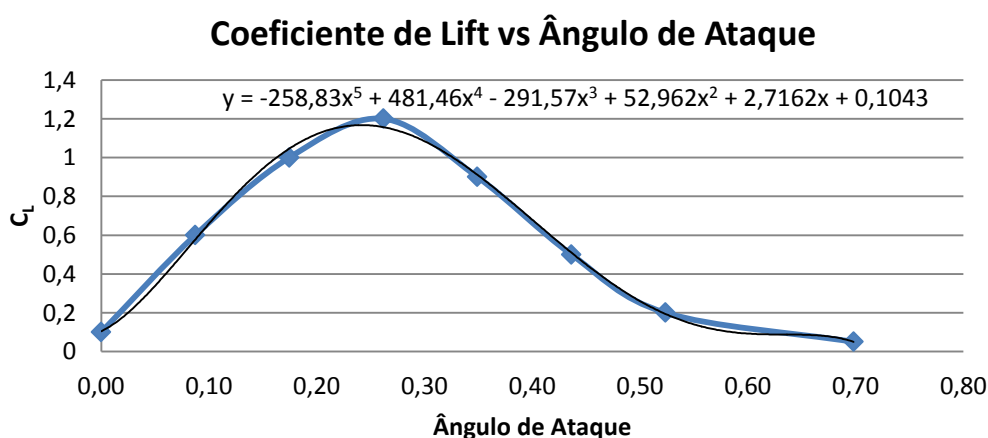


Figura 4.9 - Coeficiente de Lift vs ângulo de ataque

A curva foi aproximada a uma equação polinomial de 5ª ordem dada por:

$$y = -258.83x^5 + 481.46x^4 - 291.57x^3 + 52.962x^2 + 2.7162x + 0.1043 \quad (4.52)$$

A força gerada pelo vento para propulsionar o barco depende maioritariamente do ângulo que este faz com a vela. Na figura seguinte estão representados vários ângulos consoante os referenciais em questão. O ângulo do vento aparente v_{aw} visto pela vela é a soma do vetor do vento verdadeiro com a velocidade do veleiro, ou seja, $v_{aw} = v_{tw} - v$. Nos próximos cálculos será considerado que o vento vem de Norte a uma dada velocidade v_{tw} , sem qualquer tipo de perdas, ou seja, $v_{tw} = [-v_{tw}, 0]^T$.

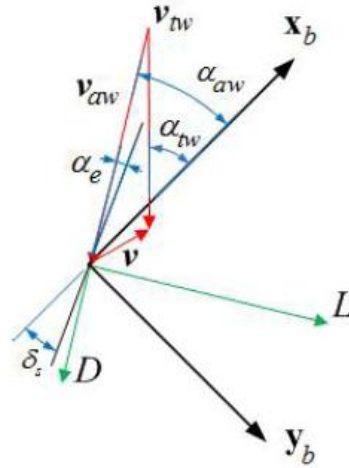


Figura 4.10 - Representação dos ângulos do vento em relação ao barco [31]

Num referencial a 3 dimensões tem-se que considerar o eixo z_b , pois a velocidade aparente deve conter o efeito induzido pela rotação do corpo:

$$v_{aw} = v_{tw} - v - w \times [x_s, y_s, z_s]^T \quad (4.53)$$

As matrizes de rotação em *roll* e *yaw* são dadas por:

$$R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_{tw}) & -\sin(-\alpha_{tw}) & 0 \\ \sin(-\alpha_{tw}) & \cos(-\alpha_{tw}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\phi) & -\sin(-\phi) \\ 0 & \sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Reescrevendo a equação (4.53) em relação ao plano $x_b y_b$ temos:

$$\begin{aligned} v_{awu} &= -v_{tw}(1) \cos(\alpha_{tw}) - u + ry_s \\ v_{awv} &= v_{tw}(2) \sin(\alpha_{tw}) \cos\phi - v - rx_s + pz_s \end{aligned} \quad (4.56)$$

onde v_{awu} e v_{awv} são as componentes da velocidade do vento aparente segundo o eixo longitudinal e lateral em relação ao referencial fixo ao corpo. A velocidade e o ângulo aparentes do vento em relação ao referencial do corpo rígido são dadas por:

$$\begin{aligned} v_{aw} &= \sqrt{v_{awu}^2 + v_{awv}^2} \\ \alpha_{aw} &= \arctan2(v_{awv}, -v_{awu}) \end{aligned} \quad (4.57)$$

As forças e os momentos gerados pela vela são expressos da seguinte forma:

$$\tau_s = \begin{bmatrix} -L_s \sin(\alpha_{aw}) - D_s \cos(\alpha_{aw}) \\ L_s \cos(\alpha_{aw}) + D_s \sin(\alpha_{aw}) \\ -(L_s \cos(\alpha_{aw}) + D_s \sin(\alpha_{aw}))z_s \\ -(L_s \sin(\alpha_{aw}) - D_s \cos(\alpha_{aw}))x_{sm} \sin(\delta_s) + (L_s \cos(\alpha_{aw}) + D_s \sin(\alpha_{aw}))(x_m - x_{sm} \cos(\delta_s)) \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

De forma similar à anterior, podemos calcular a velocidade e o ângulo aparentes da água em relação ao leme por:

$$\begin{aligned} v_{aru} &= -u + ry_r \\ v_{arv} &= -v - rx_r + pz_r \\ v_{ar} &= \sqrt{v_{aru}^2 + v_{arv}^2} \\ \alpha_{ar} &= \arctan2(v_{arv}, -v_{aru}) \end{aligned} \quad (4.59)$$

$$\quad (4.60)$$

As forças e os momentos gerados pelo leme são dados por:

$$\tau_r = \begin{bmatrix} L_r \sin(\alpha_{ar}) - D_r \cos(\alpha_{ar}) \\ L_r \cos(\alpha_{ar}) + D_r \sin(\alpha_{ar}) \\ -(L_r \cos(\alpha_{ar}) + D_r \sin(\alpha_{ar}))z_r \\ -(L_r \sin(\alpha_{ar}) - D_r \cos(\alpha_{ar}))x_r \sin(\delta_r) + (L_r \cos(\alpha_{ar}) + D_r \sin(\alpha_{ar}))(x_r - x_r \cos(\delta_r)) \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Continuando pela mesma linha de raciocínio, a quilha e o casco também vão ter influência nas forças e momentos gerados para o movimento do veleiro e, por isso, não devem ser desprezados. A velocidade e o ângulo aparentes da água em relação à quilha são calculados como:

$$\begin{aligned} v_{aku} &= -u + ry_k \\ v_{akv} &= -v - rx_k + pz_k \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$v_{ak} = \sqrt{v_{aku}^2 + v_{akv}^2}$$

$$\alpha_{ak} = \arctan2(v_{akv}, -v_{aku})$$
(4.63)

As forças e os momentos geradas pela quilha são expressos da seguinte forma:

$$D_k(v) = \begin{bmatrix} -L_k \sin(\alpha_{ak}) + D_k \cos(\alpha_{ak}) \\ -L_k \cos(\alpha_{ak}) - D_k \sin(\alpha_{ak}) \\ -(-L_k \cos(\alpha_{ak}) - D_k \sin(\alpha_{ak}))z_k \\ (-L_k \cos(\alpha_{ak}) - D_k \sin(\alpha_{ak}))x_k \end{bmatrix}$$
(4.64)

A velocidade e o ângulo aparentes da água em relação ao casco são calculados por:

$$v_{ahx} = -u + ry_h$$

$$v_{ahy} = (-v - rx_h + pz_h)\sec\phi$$

$$v_{ah} = \sqrt{v_{ahx}^2 + v_{ahy}^2}$$

$$\alpha_{ah} = \arctan2(v_{ahy}, -v_{ahx})$$
(4.65)
(4.66)

Para o cálculo das forças que atuam no casco é preciso ter em consideração o método *Extended Keel*, onde afirma que a força supostamente gerada pelo casco já está considerada nos cálculos usados para o leme e a quilha [36]. Com isto, a força resultante do casco é dada apenas pela componente de arrasto (*drag*) dando-se o nome de *hull resistance*, e pode ser calculada por:

$$D_h(v) = \begin{bmatrix} D_h \cos(\alpha_{ah}) \\ -D_h \sin(\alpha_{ah})\cos\phi \\ -(-D_h \sin(\alpha_{ah})\cos\phi)z_h \\ (-D_h \sin(\alpha_{ah})\cos\phi)x_h \end{bmatrix}$$
(4.67)

4.4.6 - Forças e momentos de restabelecimento

A componente física que a quilha exerce no barco é denominada de momento de restabelecimento e faz com que este não oscile continuamente.

$$\mathcal{G}(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_r(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_k * z_k * g * \sin(\phi) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(4.68)

4.4.7 - Forças e momentos totais

As forças e momentos que atuam no corpo rígido são dadas por:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + \mathcal{G}(\eta) = \tau$$

$$\Leftrightarrow (M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB}(v) + C_A(v))v + (D_k(v) + D_h(v))v + \mathcal{G}(\eta) = \tau_s + \tau_r$$
(4.69)

4.4.8 - Cálculo de parâmetros adicionais

Para o cálculo do centro de esforço da vela, foi considerado que este estará a um terço da altura máxima da mesma. No esquema representado asseguir estão ilustrados os cálculos realizados para o cálculo das coordenadas do centro de esforço: x_s e y_s .

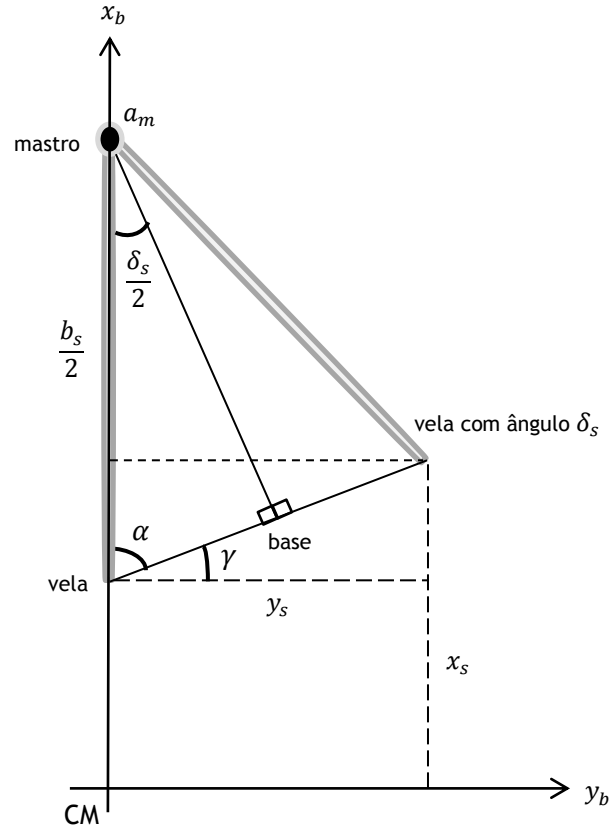


Figura 4.11 - Esquema representativo do cálculo do centro de esforço da vela

$$base = 2 \sin\left(\frac{\delta_s}{2}\right) * \frac{b_s}{2} \quad (4.70)$$

$$\alpha = \pi - \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\delta_s}{2}\right) \quad (4.71)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (4.72)$$

$$x_s = x_{CM} - \left(x_m + \frac{b_s}{2}\right) + base * \sin(\gamma) \quad (4.73)$$

$$y_s = base * \cos(\gamma) \quad (4.74)$$

$$z_s = (a_m - a_s) + \frac{1}{3}a_s \quad (4.75)$$

Cálculo do centro de massa do corpo:

$$x_{CM} = \frac{d_m m_m + d_k m_k + d_h(m_h + m_c) + d_r m_r}{\sum m} \quad (4.76)$$

Cálculo aproximado da área de uma elipsóide:

$$S \approx 4\pi \left(\frac{a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p}{3} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4.77)$$

onde $p = 1.6075$.

Cálculo *Aspect Ratio* corpo:

$$AR = \frac{a^2}{S} \quad (4.78)$$

Cálculos dos ângulos de ataque para o leme, vela, quilha e casco respetivamente:

$$\begin{aligned} \alpha_{er} &= \alpha_{ar} - \delta_r \\ \alpha_{es} &= \alpha_{as} - \delta_s \\ \alpha_{ek} &= \alpha_{ak} \\ \alpha_{eh} &= \alpha_{ah} \end{aligned} \quad (4.79)$$

Cálculos usados para centro de esforço do leme, vela, quilha e casco respetivamente:

$$\begin{aligned} x_r &= x_{CM} - a_h \\ y_r &= b_r \sin(\delta_r) \\ z_r &= -\frac{c_h}{2} - \frac{a_r}{2} \\ x_k &= x_{CM} - d_k \\ x_h &= x_{CM} - d_h \\ z_h &= -\frac{c_h}{2} \\ x_m &= x_{CM} - d_m \\ x_{sm} &= \frac{b_s}{2} \end{aligned} \quad (4.80)$$

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
m_r	0.070 kg
m_m	0.150 kg
m_c	0.100 kg
d_r	1.045 m
d_k	0.568 m
d_h	0.661 m
d_m	0.310 m
x_{CM}	0.6199 m
x_m	0.3099 m
x_{sm}	0.3165 m
z_s	0.5153 m
x_r	-0.4251 m
z_r	-0.1290 m
x_k	0.0519 m
y_k	0.0 m
z_k	-0.45 m
x_h	-0.0411 m
y_h	0.0 m
z_h	-0.0370 m
S_s	0.4130 m ²
S_r	0.0114 m ²
S_k	0.0210 m ²
S_h	0.3319 m ²
AR_s	3.7587
AR_r	2.9677
AR_k	0.3820
AR_h	0.8226

Tabela 4.7 - Parâmetros adicionais do veleiro

Capítulo 5

Simulação e Controlo

Neste capítulo será apresentado o diagrama de blocos que traduz o modelo do sistema em estudo e explicado os controladores implementados. De seguida, são estudados vários cenários de possíveis percursos para o veleiro, tanto com controlador como em malha aberta, e mostrados e explicados os resultados obtidos.

5.1 - Diagrama de blocos

Como foi estudado no capítulo 4 o modelo matemático que representa o comportamento do barco é dado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} (M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB}(v) + C_A(v))v + (D_k(v) + D_h(v))v + g(\eta) &= \tau_s + \tau_r \\ \Leftrightarrow (M_{RB} + M_A)\dot{v} &= \tau_s + \tau_r - (C_{RB}(v) + C_A(v))v - (D_k(v) + D_h(v))v - g(\eta) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Existem certas restrições intrínsecas ao veleiro:

$$\begin{cases} \tau_s \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ \tau_r \in \left[-\frac{\pi}{3.5}, \frac{\pi}{3.5}\right] \end{cases} \quad (5.2)$$

Todos os ângulos serão estudados numa gama de $[-\pi, \pi]$ para não haver problemas com a orientação e no caso de mudança de direção do barco, ele rode sempre pelo menor ângulo. Transpondo a equação (5.1) para o *Simulink* do *Matlab* obtemos o seguinte diagrama de blocos em malha aberta:

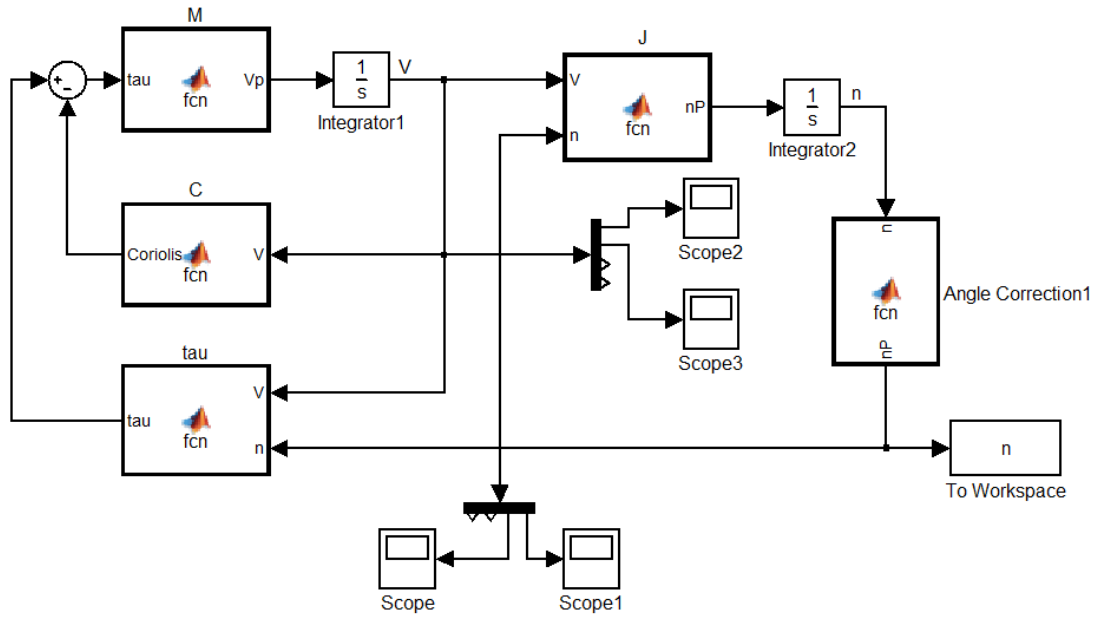


Figura 5.1 - Diagrama de blocos do sistema global em malha aberta

5.2 - Sistema em Malha Aberta

Para testar se o comportamento do modelo corresponde à realidade, foram realizadas simulações em que o corpo parte do repouso, com uma orientação de $-\pi \text{ rad}$ e com $v_{tw} = [-5, 0]^T$. Em primeiro lugar colocou-se o leme a 0 rad e para diferentes valores de ângulos da vela estudou-se o trajeto efetuado pelo barco. Por fim, deduziu-se empiricamente qual o valor do ângulo que o leme teria de ter, para um ângulo da vela de $\pi/6 \text{ rad}$, de forma a que este mantivesse uma orientação de $-\pi \text{ rad}$.

5.2.1 - Caso nº1

$$\begin{cases} \tau_s = \frac{\pi}{6} \text{ rad} \\ \tau_r = 0 \text{ rad} \end{cases} \quad (5.3)$$

Fazendo uma análise apriori podemos concluir que o veleiro irá virar para um dos lados, pois a força que o vento faz na vela tem uma componente em u e outra em v , e como podemos observar pela figura 5.2 ele virou para a esquerda. Como o leme está com um ângulo de 0 rad e como a componente v da força da vela é pequena, o veleiro apenas vira 10 cm .

Pela figura 5.3 e 5.4 podemos observar respetivamente que, o barco manteve uma orientação de sensivelmente $-\pi \text{ rad}$ e a sua oscilação em *roll* foi muito reduzida pois estava a favor do vento e, consequentemente, o ângulo do vento aparente é praticamente 0 rad .

Por fim, a figura 5.5 vem sustentar a análise, pois verifica-se que a componente em u da velocidade do barco é a que tem maior influência na trajetória do mesmo. A componente em v é praticamente residual, daí este só ter virado 10 cm .

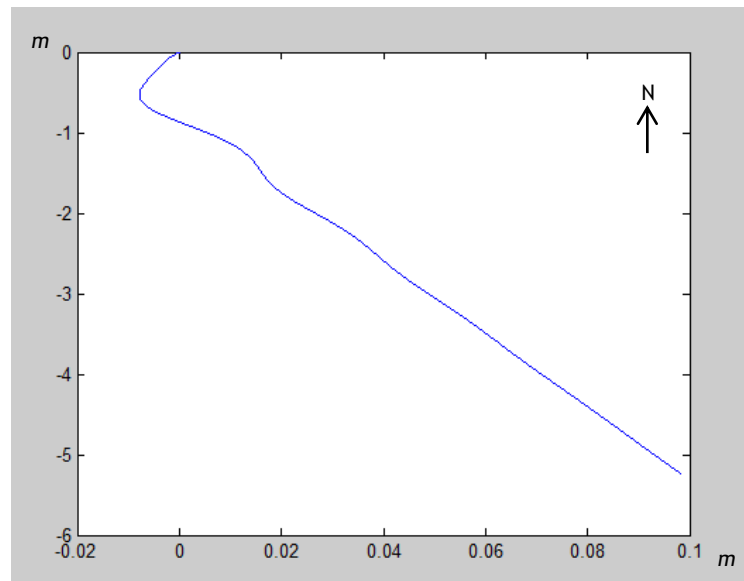


Figura 5.2 - Percurso efetuado pelo barco (x,y)

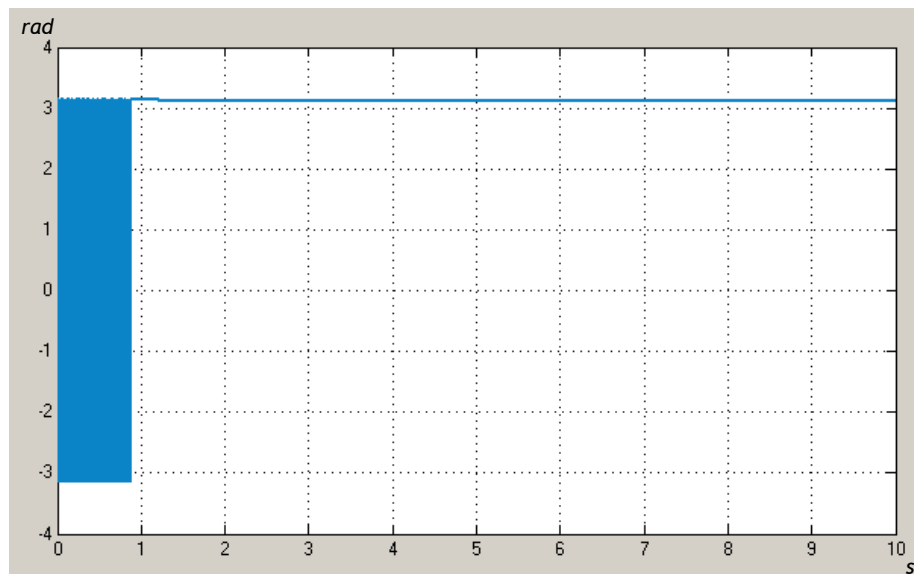


Figura 5.3 - Representação gráfica do ângulo yaw

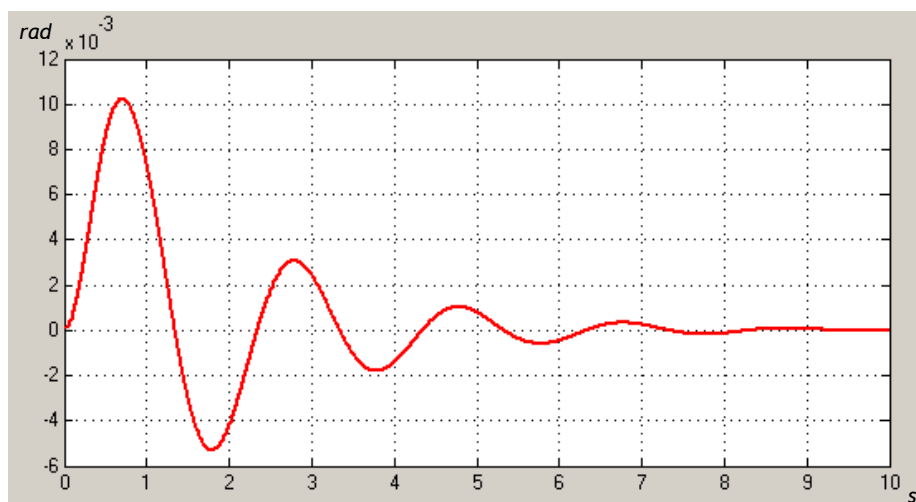


Figura 5.4 - Representação gráfica do ângulo roll

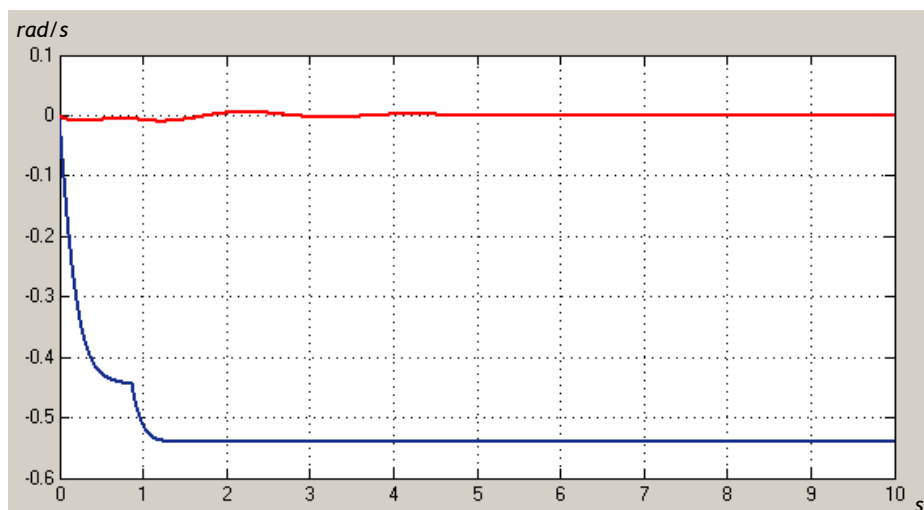


Figura 5.5 - Representação gráfica das componentes da velocidade u e v (linha a azul e vermelho respetivamente)

5.2.2 - Caso nº2

$$\begin{cases} \tau_s = -\frac{\pi}{6} \text{ rad} \\ \tau_r = 0 \text{ rad} \end{cases} \quad (5.4)$$

Seguindo o raciocínio do caso nº1, o que podemos prever é que o barco terá um comportamento simétrico, ou seja, este virará para a direita (como podemos analisar na figura 5.6) e todos os restantes parâmetros em estudo também terão um procedimento semelhante.

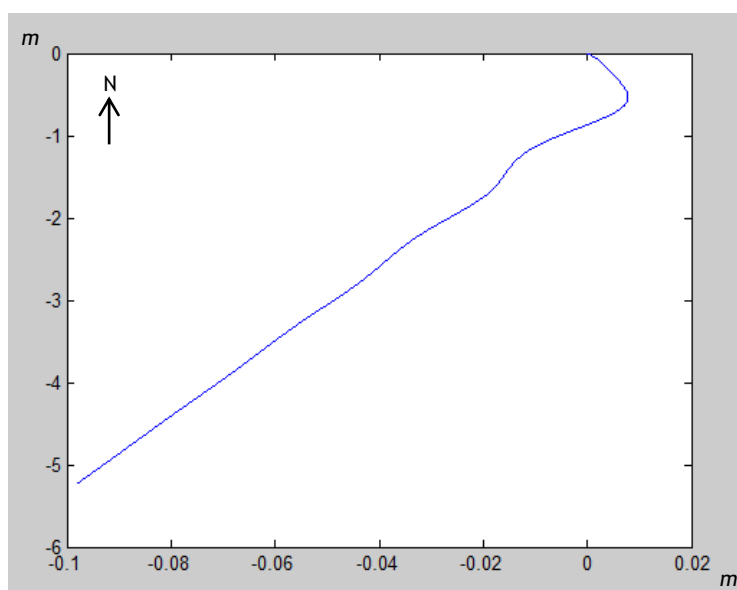


Figura 5.6 - Percurso efetuado pelo barco (x,y)

5.2.3 - Caso nº3

$$\begin{cases} \tau_s = \frac{\pi}{4} \text{ rad} \\ \tau_r = -\frac{\pi}{4} \text{ rad} \end{cases} \quad (5.5)$$

Neste caso o leme já terá uma forte influência na direção da trajetória que o veleiro tomará e, será suposto que com os ângulos introduzidos para a vela e leme, este tenha no final uma orientação de $3\pi/4 \text{ rad}$, ou seja, uma mudança de $\pi/4 \text{ rad}$.

$$\alpha \approx \tan\left(\frac{0.98 - (0.42)}{0.55 - (0.02)}\right) \approx 0.758 \text{ rad} \approx 43.5^\circ$$

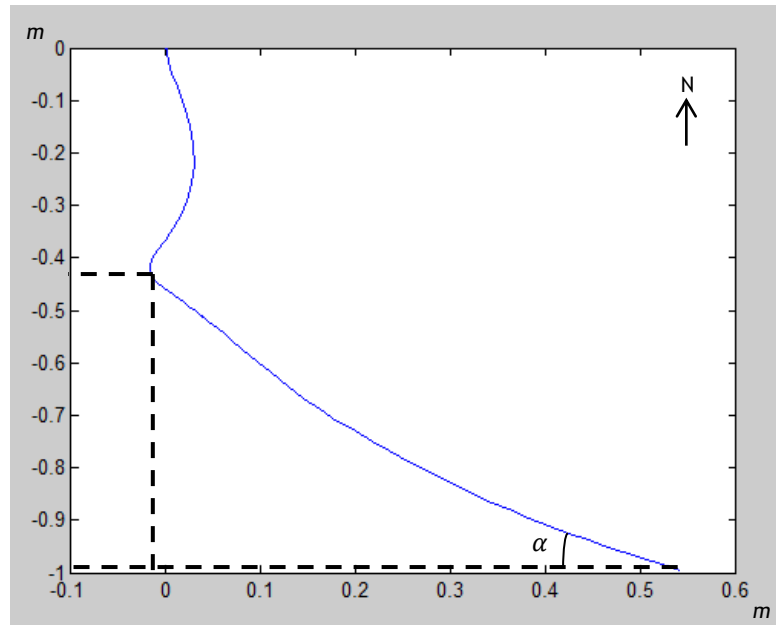


Figura 5.7 - Percurso efetuado pelo barco (x,y)

5.2.4 - Caso nº4

$$\begin{cases} \tau_s = \frac{\pi}{6} \text{ rad} \\ \tau_r = \frac{\pi}{15.5} \text{ rad} \end{cases} \quad (5.6)$$

Através de uma análise empírica foi possível deduzir o ângulo que o leme teria para que o barco mantivesse uma trajetória de $-\pi \text{ rad}$ e com um ângulo para a vela de $\pi/6 \text{ rad}$. Após várias simulações, o leme teria de ter um ângulo de aproximadamente $\pi/15.5 \text{ rad}$ e apenas se afastaria no máximo 1.75 cm da sua trajetória.

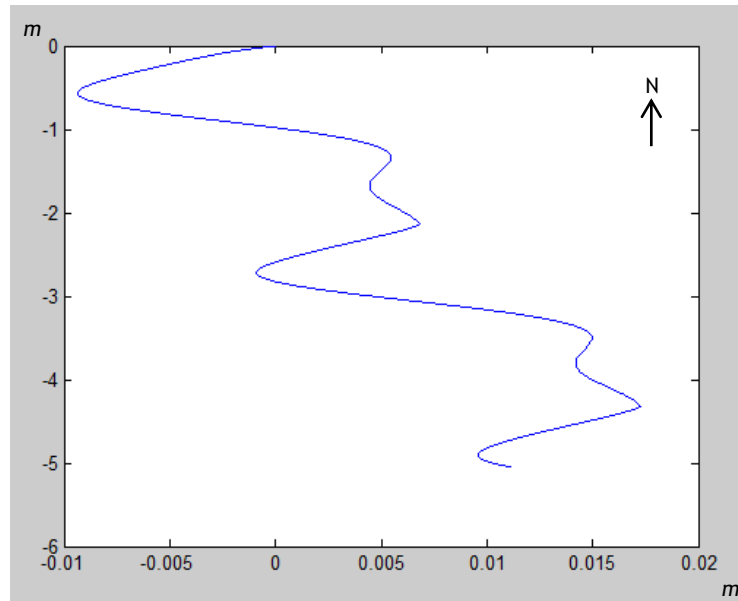


Figura 5.8 - Percurso efetuado pelo barco (x,y)

5.3 - Sistema em Malha Fechada

Para o controle do leme foi concebido um controlador PID (*Proportional - Integral - Derivative*) em que a entrada é o erro da orientação (orientação desejada menos a orientação atual). Foram usadas as três componentes para o cálculo do ângulo do leme (saída) pois:

Proporcional - P

- Ação imediata e proporcional ao valor do erro corrente;
- Acelera a resposta de um processo controlado;
- Reduz o tempo de subida e o erro máximo.

Integrador - I

- Ação de controle gradual, proporcional ao integral do erro;
- Responde ao passado do erro enquanto este for diferente de zero;
- Elimina o *offset* e reduz o tempo de subida.

Derivador - D

- Ação antecipatória, resposta proporcional à derivada do erro;
- Reduz o *overshoot*, o erro máximo e o período de oscilação.

Os valores para cada componente foram obtidos usando uma análise empírica do comportamento do veleiro e com recurso ao *Tune* do *Matlab* e com um *snapshot* para 10 segundos (pois como o modelo é não linear, é necessário indicar o tempo de linearização ao *Matlab* para que consiga obter os valores) foi possível obter os seguintes ganhos:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = 0.68 \\ K_I = 0.125 \\ K_D = -0.130 \\ N = 25 \end{array} \right. \quad (5.7)$$

Para o controlo da vela, estudou-se primeiramente o comportamento dos movimentos do robô para uma dada orientação (de acordo com o caso 1,2,3 e 4 apresentados anteriormente e com mais casos estudados mas não apresentados neste relatório), para de seguida se construir um controlador baseado em lógica difusa capaz de representar e controlar esses movimentos.

A escolha do método de inferência recaiu sobre o *Takagi-Sugeno* pelo facto de as saídas se basearem em funções ao qual são dadas vários pesos para as variáveis de entrada do sistema, contudo, é bastante mais complexo que o *Mandani*. Este controlador terá duas entradas (o erro da orientação e a respetiva derivada) e uma saída que vai ser o ângulo da vela, em termos práticos, o quanto apertada ou esticada deve estar a corda da vela. O tipo de função de pertença utilizada para as entradas foi do tipo *Bell* que se rege pela seguinte equação:

$$\text{bell}(x; a, b, c) = \frac{1}{a + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.8)$$

As funções de pertença estão representadas de seguida:

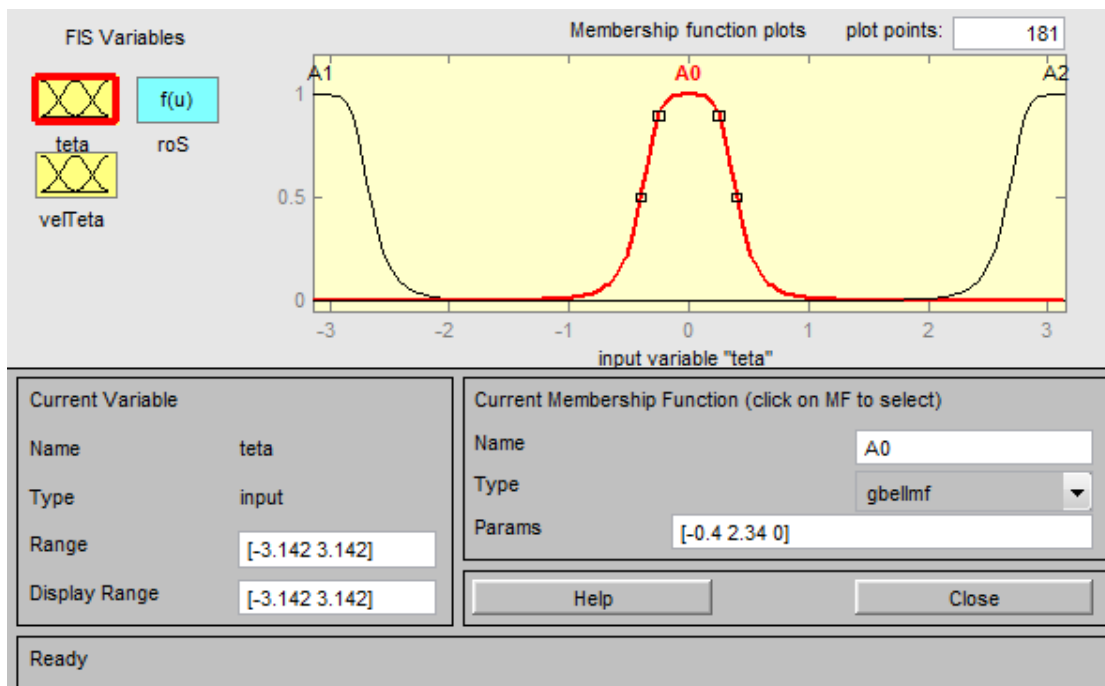


Figura 5.9 - Funções de pertença para a entrada *teta*

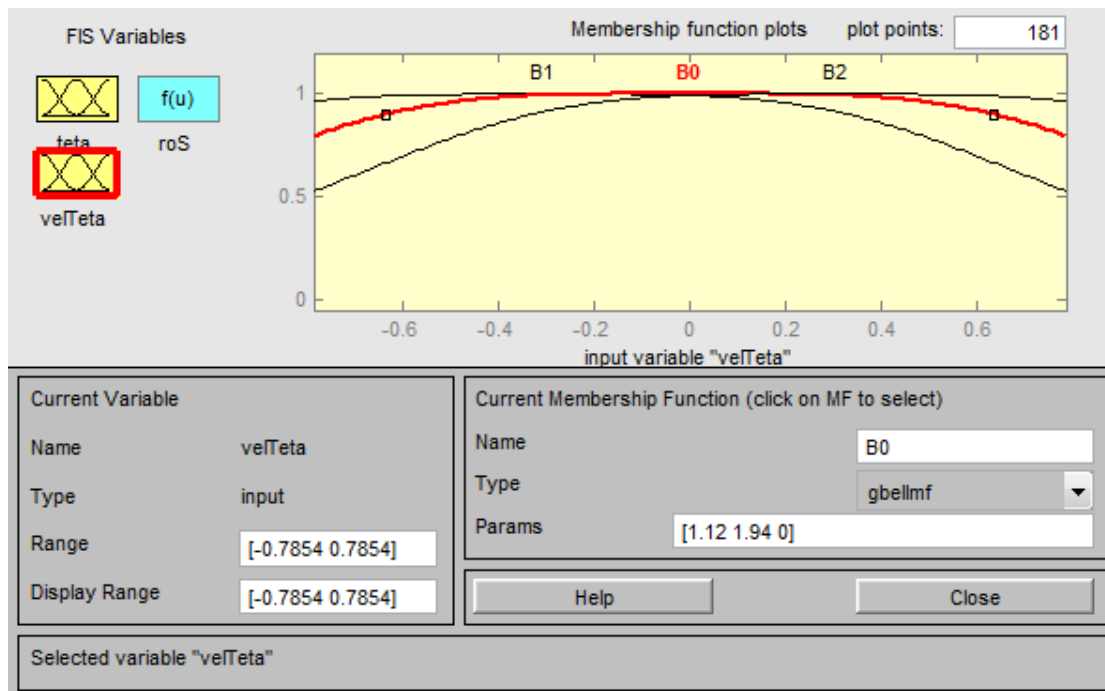


Figura 5.10 - Funções de pertença para a entrada *velTeta*

O conjunto de regras do controlador implementado está representado abaixo:

1. *If (teta is A₁) and (velTeta is B₁) then (roS is roS₁) (1)*
2. *If (teta is A₁) and (velTeta is B₂) then (roS is roS₂) (1)*
3. *If (teta is A₂) and (velTeta is B₁) then (roS is roS₃) (1)*
4. *If (teta is A₂) and (velTeta is B₂) then (roS is roS₄) (1)*

A saída do controlador é composta por quatro equações distintas que fazem a desfuzificação. Estas equações são do tipo $A\psi + B\dot{\Delta}\psi + C$, em que A é um coeficiente que vai multiplicar pelo erro, B um coeficiente que vai multiplicar pela derivada do erro e C uma constante. Assim sendo, a saída vai tomar o valor do resultado da equação anterior. De seguida apresentam-se as quatro equações de saída do nosso sistema:

$$\begin{aligned}
 roS_1 &= 0.01602\psi + 0.01646\dot{\psi} + 1.09 \\
 roS_2 &= 0.0353\psi + 0.0219\dot{\psi} + 0.19 \\
 roS_3 &= 0.0353\psi + 0.0219\dot{\psi} - 0.19 \\
 roS_4 &= 0.01062\psi + 0.01646\dot{\psi} - 1.09
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Os valores de A , B e C foram primeiramente retirados dum controlador para um braço humano, realizado para a Unidade Curricular, Sistemas Baseados em Inteligência Computacional, tendo sido depois ajustados após várias experiências, por forma a melhorar a resposta do controlador.

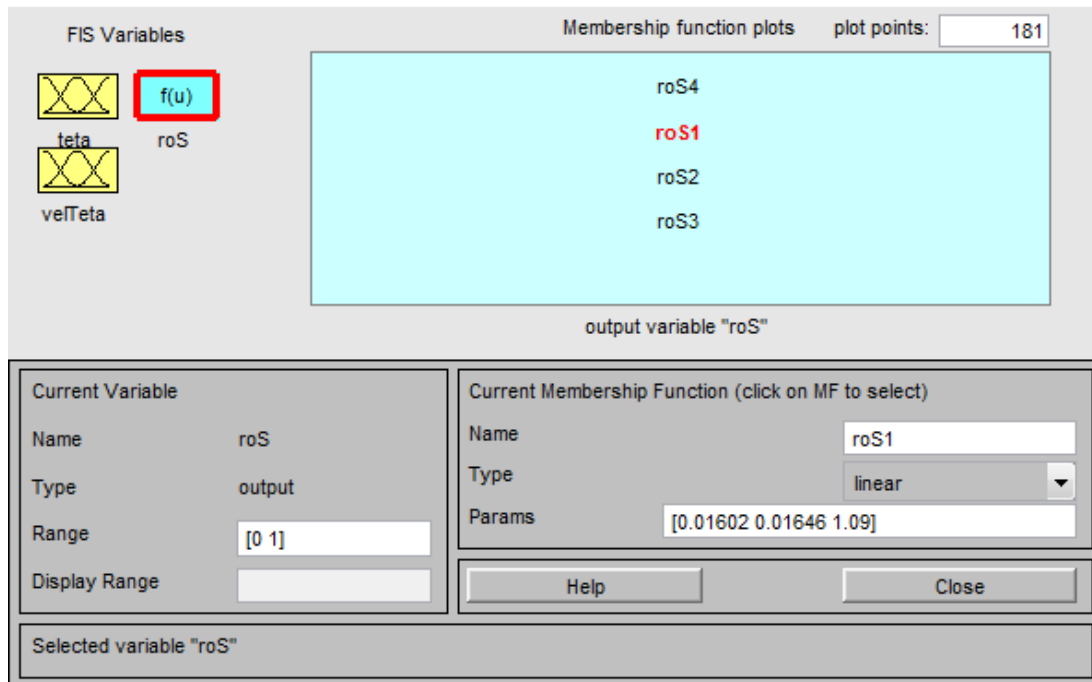


Figura 5.11 - Equações da saída do controlador implementado

A simulação e o controlador foram implementados em ambiente *Matlab* e o diagrama de blocos do sistema está representado em baixo:

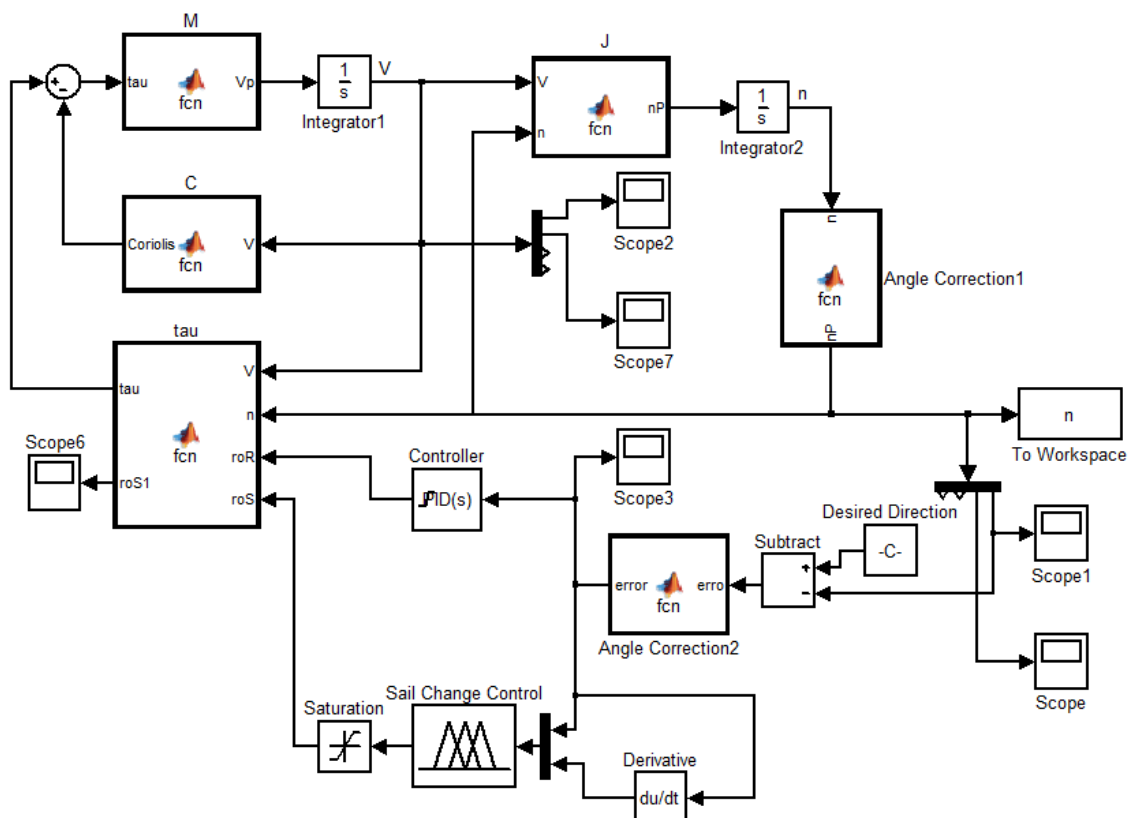


Figura 5.12 - Diagrama de blocos em *Matlab* do modelo global em malha fechada

5.3.1 -Caso nº1

Na primeiro caso com controle de leme e vela foi colocada uma orientação desejada de $\pi + \pi/4 \text{ rad}$. Como podemos visualizar na figura 5.13, o veleiro tem uma trajetória que cumpre os requisitos, com um erro residual de 0.7° . Da figura 5.14 à 5.18 estão representados vários parâmetros intrínsecos ao veleiro.

$$\alpha \approx \tan\left(\frac{24 - (4.5)}{20.5 - (0.5)}\right) \approx 0.773 \text{ rad} \approx 44.3^\circ$$

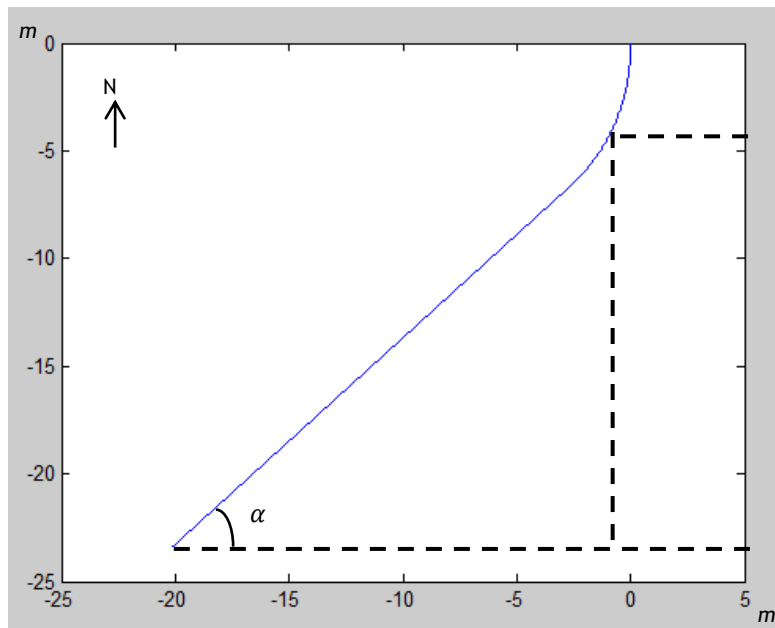


Figura 5.13 - Percurso efetuado pelo barco (x,y)

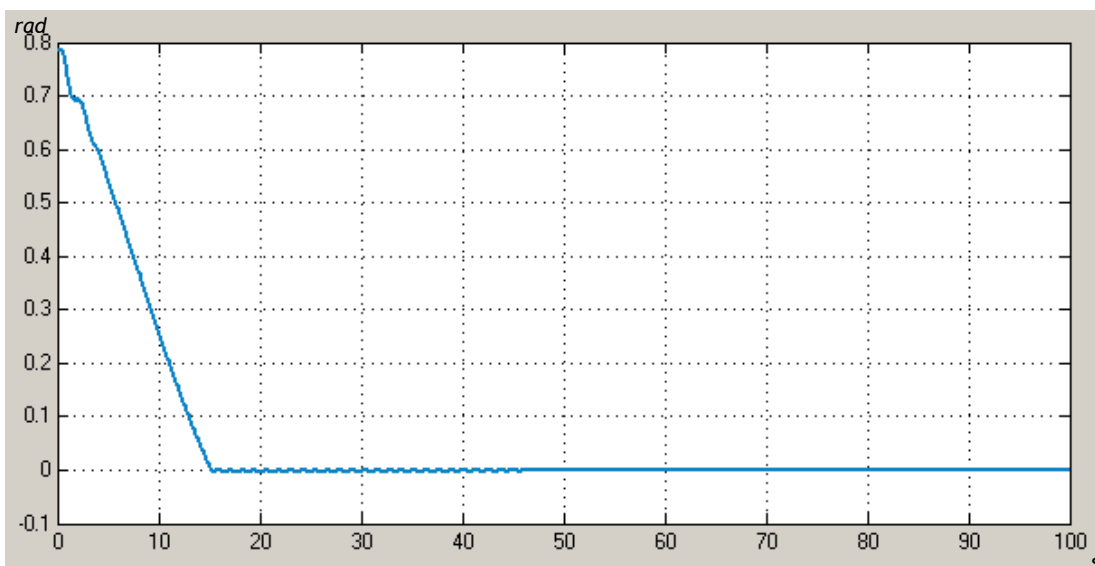


Figura 5.14 - Representação gráfica do erro do ângulo yaw desejado

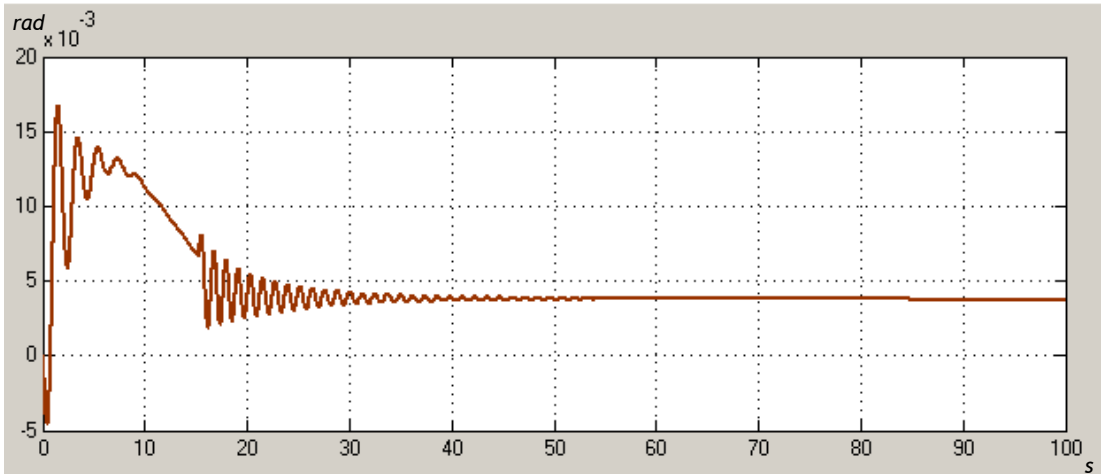


Figura 5.15 - Representação gráfica do ângulo roll

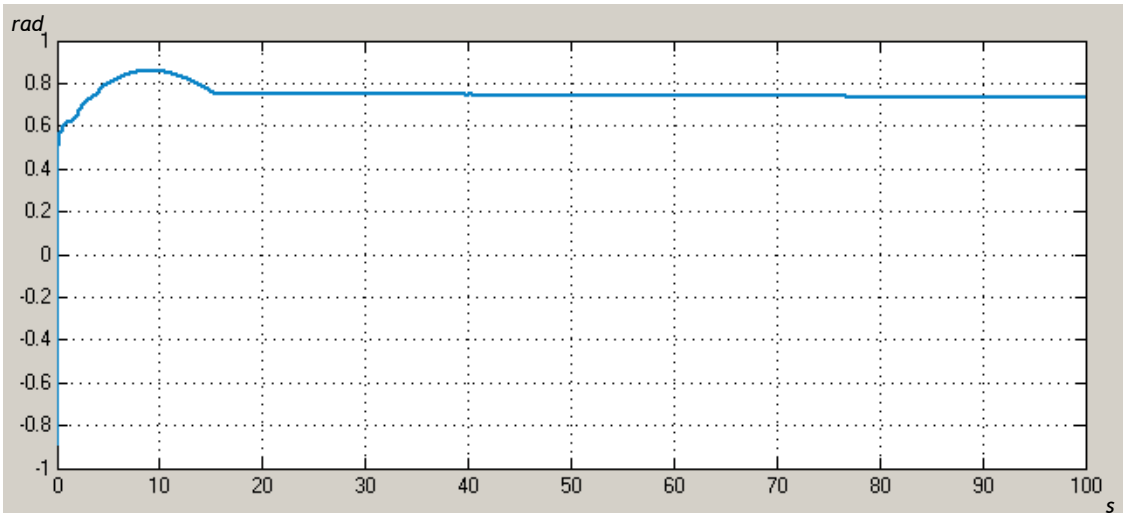


Figura 5.16 - Representação gráfica do ângulo do leme

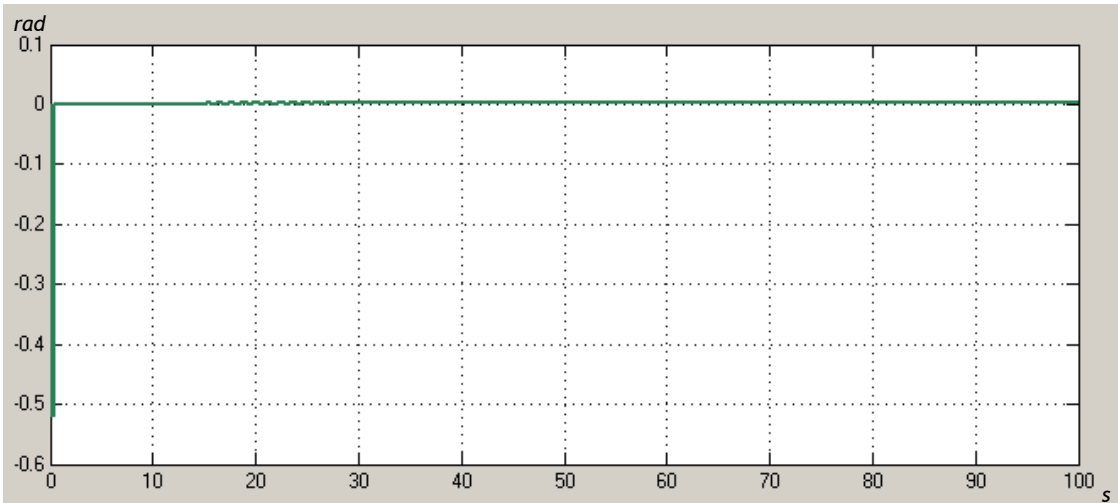


Figura 5.17 - Representação gráfica do ângulo da vela

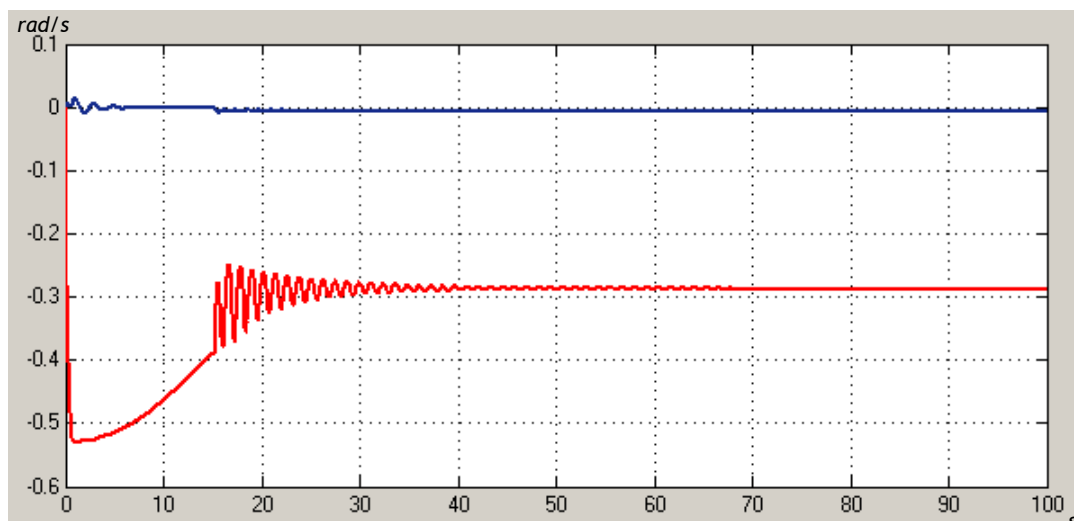


Figura 5.18 - Representação gráfica das componentes da velocidade u e v (linha a vermelha e azul respetivamente)

5.3.2 - Caso nº2

Neste caso, foi colocada uma orientação desejada de $\pi - \pi/4 \text{ rad}$. Seguindo o raciocínio do caso nº1, o que podemos prever é que o barco terá um comportamento simétrico, como podemos analisar na figura 5.19, bem como, todos os restantes parâmetros em estudo.

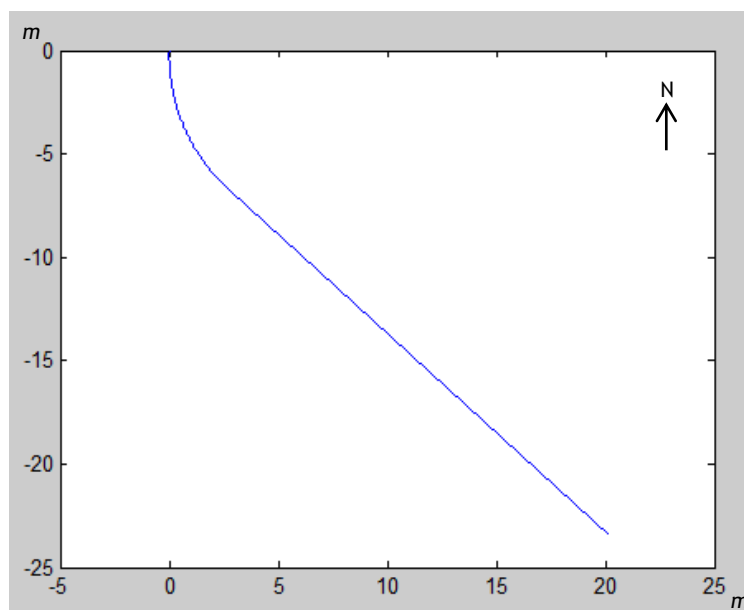


Figura 5.19 - Percorso efetuado pelo barco (x,y)

5.3.3 - Caso nº3

No terceiro caso foi colocada uma orientação desejada de $-\pi/2 \text{ rad}$. Como podemos analisar pela figura 5.20, o veleiro roda para a orientação desejada, depois este oscila em torno 0.1 rad ($\approx 5.8^\circ$) pois o controlador *fuzzy* é pouco sensível a mudanças tão pequenas de orientação.

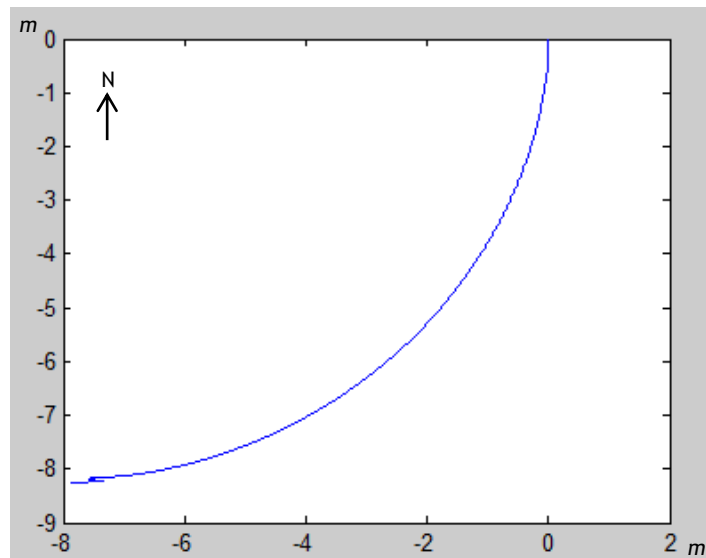


Figura 5.20 - Percurso efetuado pelo barco (x,y)

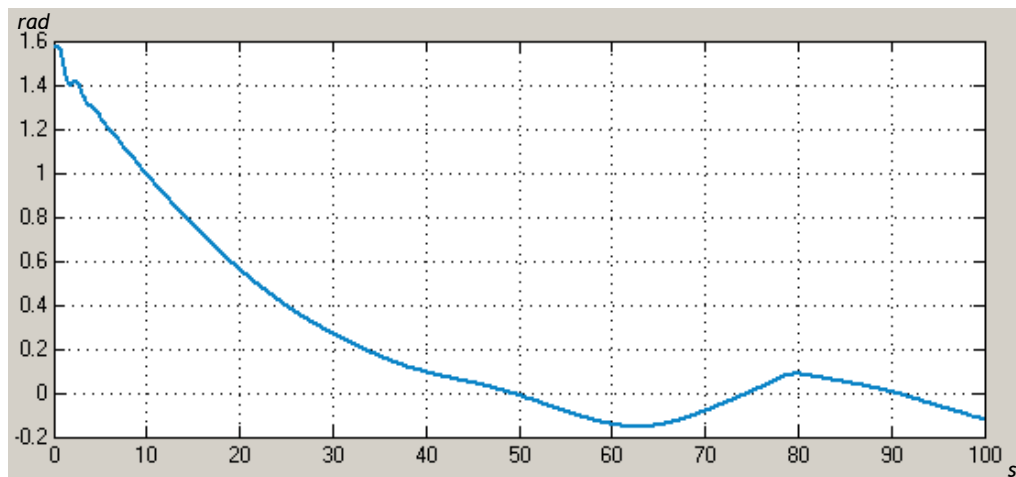


Figura 5.21 - Representação gráfica do erro do ângulo yaw desejado

5.3.4 - Caso nº4

Para uma orientação desejada de π rad obteve-se o seguinte gráfico:

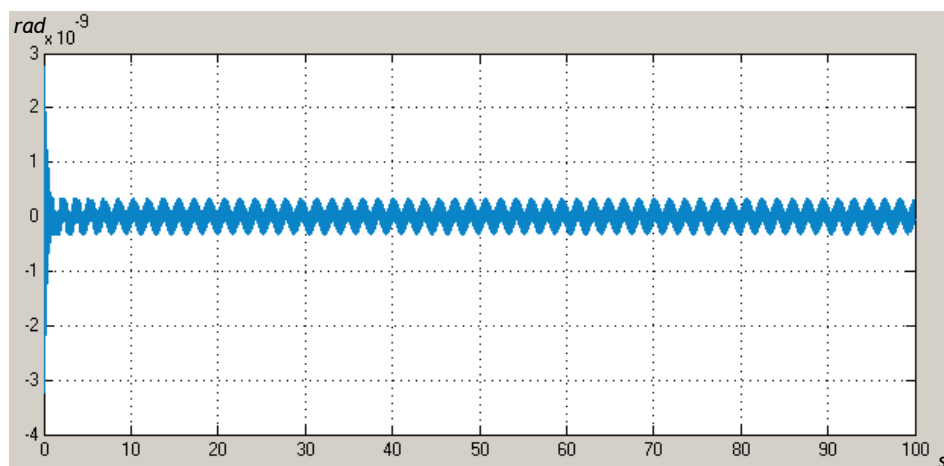


Figura 5.22 - Representação gráfica do erro do ângulo yaw desejado

Depois de realizada uma análise cuidada dos controladores aquando da sua implementação na prática, chegou-se à conclusão que o controlo através do erro da orientação e da sua derivada era insuficiente pois apesar de estes funcionarem na simulação, na pratica tal não iria acontecer para algumas orientações desejadas. É necessário de um planeamento de alto nível para realizar certas manobras. No capítulo seguinte será realizado um estudo profundo das manobras passíveis de serem realizadas por um veleiro.

Capítulo 6

Movimentos

Neste capítulo será dado ênfase às possíveis manobras que um barco à vela pode efetuar. Por não possuir qualquer motor para o propulsionar, os seus movimentos ficam reduzidos à força que o vento exerce na vela e à velocidade que o mesmo possui num dado momento e, por isso, é necessário realizar um pré-planeamento da rota de acordo com a direção e intensidade do vento. Na figura seguinte estão representadas as zonas navegáveis:

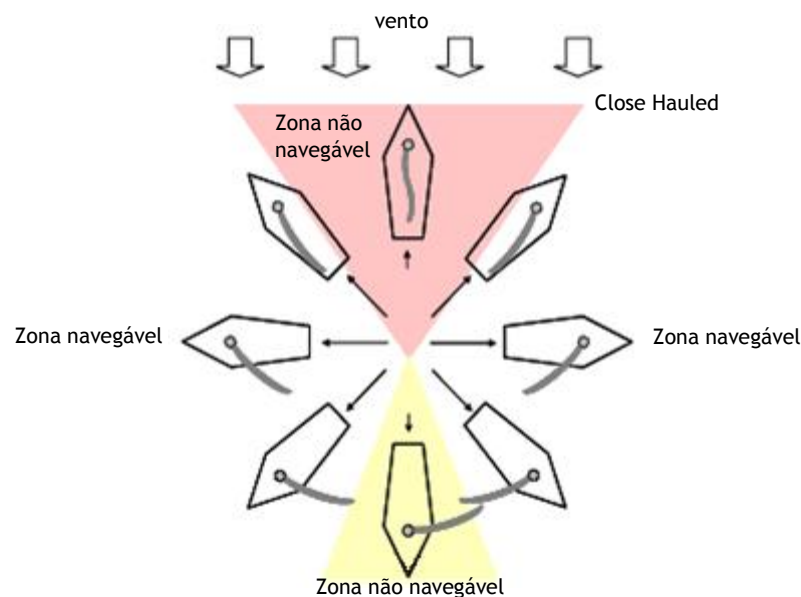


Figura 6.1 - Representação das zonas navegáveis e não navegáveis

Como podemos observar existem duas zonas na qual o veleiro não se deve dirigir: contra e a favor do vento. Na prática o barco pode ir completamente a favor do vento só que não é tão eficaz como andar aos ziguezagues, em termos técnicos dá-se o nome de *jibe*. Em relação a movimentar-se contra o vento, o veleiro não pode estar numa certa gama de valores em relação à direção do vento, caso contrário, a velocidade dele diminui e torna-se incapaz de se deslocar na direção pretendida. Para contornar este obstáculo o barco tem que, a

determinados instantes, alterar a sua orientação de modo a que a direção do vento aparente mude de maneira a que a vela também vire, o que se vai traduzir em manobras de ziguezague mas, em termos técnicos dá-se um nome diferente: *tack*.

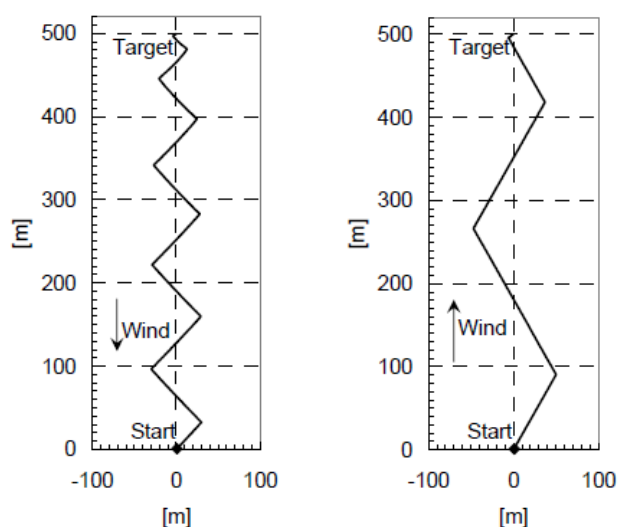


Figura 6.2 - Manobra de *jibe* e *tack* respetivamente [37]

6.1 - Controlador

Para a realização das manobras é necessário um controlo de alto nível que analise se é possível ou não o barco realizar uma determinada manobra e como a realizar. Um barco tradicional com motor, pode deslocar-se para qualquer orientação e as condições meteorológicas não têm um impacto significativo na sua deslocação. No máximo pode ser executada uma pequena correção da rota pré definida porque podem ocorrer desvios devido às correntes ou ao vento. Num barco à vela tal não acontece porque é o vento que comanda o seu rumo, o que torna o seu controlo mais complexo.

Abstraindo da lógica de programação, podemos prever as variáveis necessárias para o controlo. Estas estão representadas na figura seguinte:

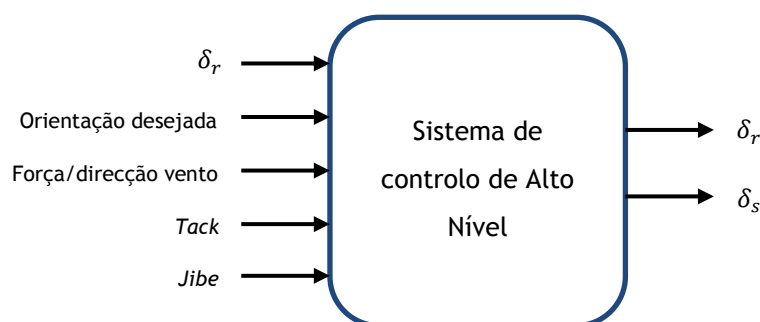


Figura 6.3 - Entradas / saídas do controlo de alto nível para vela

Para uma dada direção e velocidade do vento é possível deduzir qual o ângulo máximo que a vela deve ter para se obter o máximo de velocidade recorrendo a diagramas VPP

(*Velocity Prediction Polar diagram*). Estes diagramas ajudam os velejadores a tomar as melhores decisões para maximizar a velocidade do seu barco consoante as condições climáticas [39]. A figura seguinte mostra um diagrama polar de previsão de velocidade onde estão esboçadas três linhas: azul, verde e cor-de-rosa que representam as velocidades máximas do veleiro para ventos de 0.5, 1.5, 2.5 m/s, respetivamente. Os números de 0 a 345 representam o ângulo que o vento faz com o barco em graus. Os números de 0.40 a 1.20 representam a velocidade máxima do veleiro em metros por segundo.

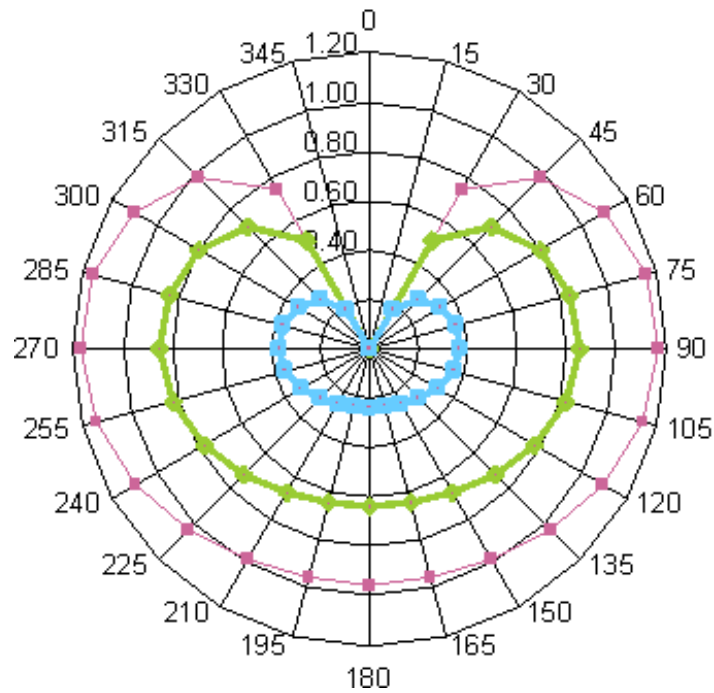


Figura 6.4 - Diagrama VPP

Estes diagramas são obtidos através da conjugação de diversos fatores: velocidade e direção do vento, ângulo do veleiro com o vento real, velocidade do veleiro, ângulo de ataque da vela com o vento aparente, fator de fricção, *drag*, *drive*, coeficiente de *lift* e *drag*, entre outros.

Com recurso a folhas de cálculo como a apresentada a seguir é possível obter os valores de saída: ângulo máximo da vela e velocidade máxima. Após uma análise profunda dos resultados obtidos e considerando as restrições que foram mencionadas no capítulo 4, o robô será colocado num meio controlado, com forças de correntes baixas e sujeito a rajadas de vento fracas (na ordem dos 0-10 m/s), foi realizado um gráfico com os valores médios dos ângulos máximos da vela desde 1 a 10 m/s e foi realizada a respetiva parametrização da curva, tendo-se obtido a seguinte equação:

$$\delta_{s\max} = 0.0986\alpha_{tw}^2 + 0.555\alpha_{tw} - 0.1362 \quad (6.1)$$

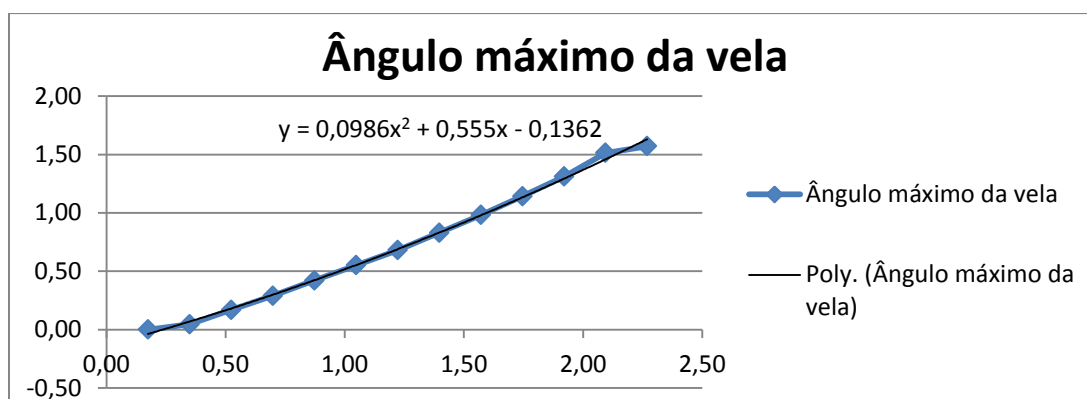


Figura 6.5 - Gráfico do Ângulo máximo da vela em função da orientação do veleiro com o vento

True wind speed = 5				Increment = 0,1							
Heading = 90 degrees											
Boat		Drag forces			On the wind						
Speed	Fric	Wave	Total								
				App wind speed		AW angle	Sheet angle	Sail Drive	Diff Accel		Near max
0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	90,00	90,00	70,00	234,92	234,92	0	
0,10	0,15	0,00	0,15	5,00	88,85	88,85	68,85	233,26	233,11	0	
0,20	0,60	0,03	0,63	5,00	87,71	87,71	67,71	231,69	231,06	0	
0,30	1,35	0,16	1,51	5,01	86,57	86,57	66,57	230,21	228,69	0	
0,40	2,40	0,51	2,91	5,02	85,43	85,43	65,43	228,81	225,90	0	
0,50	3,75	1,25	5,00	5,02	84,29	84,29	64,29	227,50	222,50	0	
0,60	5,40	2,59	7,99	5,04	83,16	83,16	63,16	226,27	218,28	0	
0,70	7,35	4,80	12,15	5,05	82,03	82,03	62,03	225,13	212,97	0	
0,80	9,60	8,19	17,79	5,06	80,91	80,91	60,91	224,06	206,26	0	
0,90	12,15	13,12	25,27	5,08	79,80	79,80	59,80	223,06	197,79	0	
1,00	15,00	20,00	35,00	5,10	78,69	78,69	58,69	222,14	187,14	0	
1,10	18,15	29,28	47,43	5,12	77,59	77,59	57,59	221,28	173,85	0	
1,20	21,60	41,47	63,07	5,14	76,50	76,50	56,50	220,49	157,42	0	
1,30	25,35	57,12	82,47	5,17	75,43	75,43	55,43	219,76	137,29	0	
1,40	29,40	76,83	106,23	5,19	74,36	74,36	54,36	219,10	112,86	0	
1,50	33,75	101,25	135,00	5,22	73,30	73,30	53,30	218,49	83,49	0	
1,60	38,40	131,07	169,47	5,25	72,26	72,26	52,26	217,93	48,46	0	
1,70	43,35	167,04	210,39	5,28	71,22	71,22	51,22	217,42	7,03	0	7,03 -41,59
1,80	48,60	209,95	258,55	5,31	70,20	70,20	50,20	216,97	-41,59	1	
1,90	54,15	260,64	314,79	5,35	69,19	69,19	49,19	216,55	-98,24	1	
2,00	60,00	320,00	380,00	5,39	68,20	68,20	48,20	216,18	-163,82	1	
2,10	66,15	388,96	455,11	5,42	67,22	67,22	47,22	215,85	-239,26	1	
2,20	72,60	468,51	541,11	5,46	66,25	66,25	46,25	215,56	-325,56	1	
F scale	15,00	F exp	W exp	Cl max		Attack	51,22	R exp	S scale		1,71
W scale	20,00	2,00	4,00	1,50		20,00	Sheet	2,00	10,00	OK	Max
at max											speed

Tabela 6.1 - Cálculos para se obter o valor do ângulo máximo da vela e velocidade máxima [39]

Pelas restrições dinâmicas e cinemáticas do barco, este não pode navegar diretamente para todas as direções desejadas. É necessário realizar manobras dependendo do ângulo do vento e da orientação desejada. Através da figura 6.4 é possível observar que o veleiro não deve ter um ângulo em relação ao vento de $[-30^\circ, 30^\circ]$ pois corre o risco de perder toda a velocidade. Também é uma prova do que foi referido anteriormente, o barco não deve seguir em linha reta a favor do vento, pois não obtém a velocidade máxima. Deve realizar ziguezagues em torno de $[-60^\circ, 60^\circ]$.

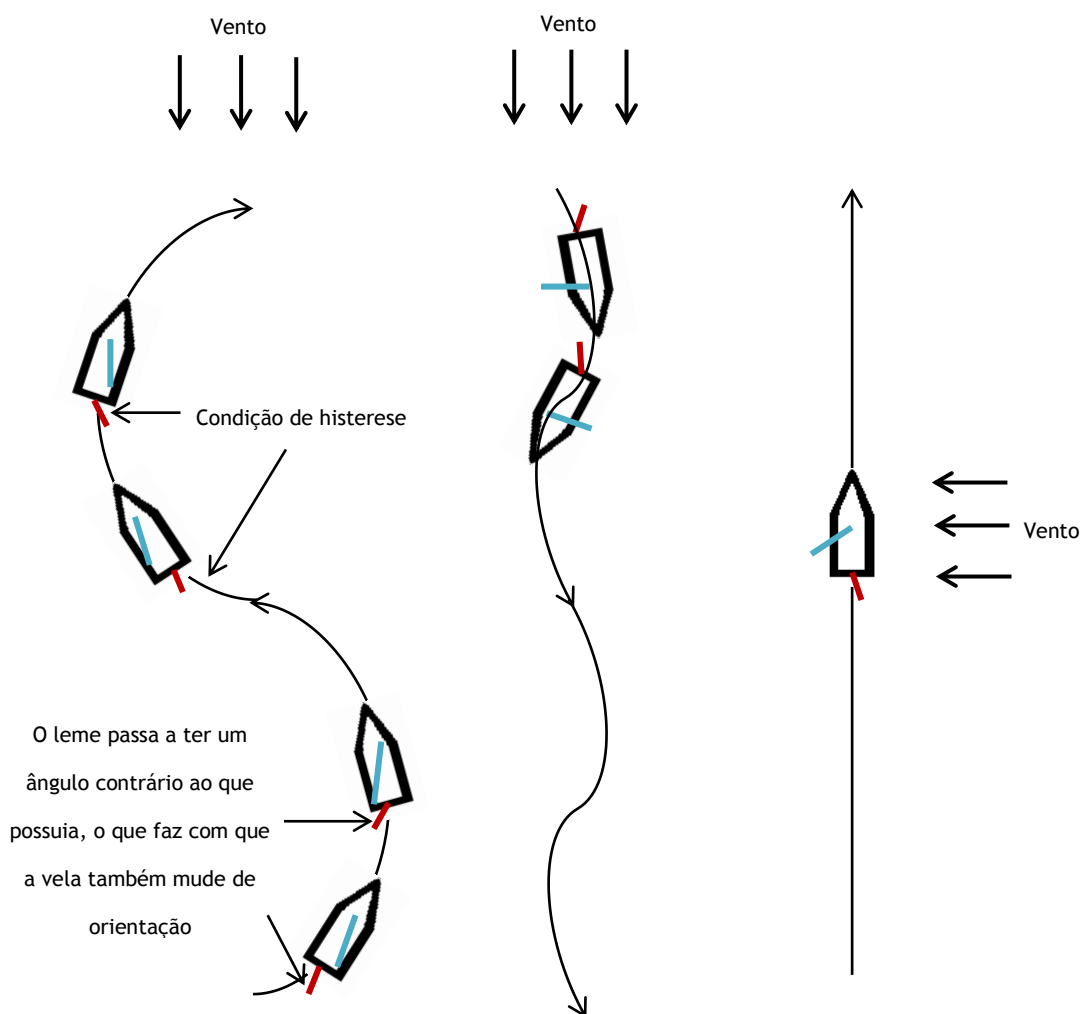


Figura 6.6 - Manobras possíveis de serem realizadas num veleiro

Ao navegar num barco à vela é bastante comum não se fazer um trajeto diretamente em linha reta para o destino pois a direção e velocidade do vento pode dar mais velocidade ao barco (como se pode observar pela figura 6.4), consoante o ângulo do vento aparente que está a incidir na vela. Ocasionalmente, esta mudança de percurso pode trabalhar a favor do velejador e compensar a distância extra que navegou através da velocidade máxima que conseguiu obter. Em outras ocasiões, a velocidade extra ganha pode não ser suficiente e acaba-se por demorar mais tempo no trajeto do que o previsto.

De seguida são apresentados alguns conceitos e variáveis que serão usadas ao longo deste capítulo:

Rhumb Line - é a linha reta a partir do ponto de partida até ao nosso destino, ou seja, a menor distância possível entre os dois pontos.

VMG (Velocity Made Good) - é o progresso que estamos realmente a fazer em direção ao nosso destino, e que se traduz pela componente da velocidade paralela à *Rhumb line*. O que se pretende é que este valor seja o máximo possível ao longo de todo o percurso.

Velocidade do barco - é a velocidade que o veleiro tem num dado instante ao longo do seu trajeto.

Course Offset - é o ângulo entre a direção do barco e a *Rhumb line*.

Cross Track Error (XTE) - é a menor distância entre o ponto atual do barco e a *Rhumb line*, traduzindo por outras palavras, é o quão longe estamos da *Rhumb line* a qualquer momento.

Com o intuito de melhorar a performance dos navegadores foi criada uma simples tabela que pode ser usada em situações práticas de navegação para o ajudar a decidir sobre o melhor curso para dirigir.

Para começar, vamos ignorar os efeitos das correntes de maré e considerar que o veleiro está num espaço bastante amplo para realizar qualquer manobra. De seguida está representado um esquema com as variáveis explicadas anteriormente:

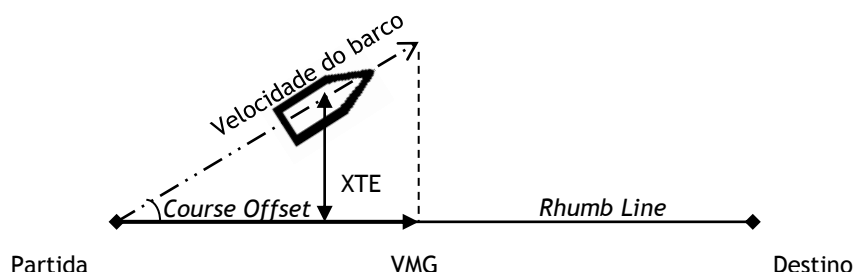


Figura 6.7 - Representação das variáveis introduzidas anteriormente

Por exemplo, se o nosso destino é numa direção a favor do vento, então podemos, como é lógico, navegar em linha reta e ao longo da *Rhumb line*. Mas ao contrário de uma análise efetuada a priori, este não é o trajeto mais rápido. Este não é o caso onde o barco possui o máximo de força *drag* produzida na sua vela. Este conceito aplicasse mais para veleiros com duas ou mais velas pois, quando estes se afastam da linha de rumo, o ângulo do vento nas velas é mais favorável pois fornece um fluxo de ar sobre ambos os lados das velas, de modo que o barco irá navegar mais rápido e com um trajeto bem mais previsível [40].

Para se manter na trajetória pretendida o barco terá de ser capaz de realizar um percurso em *jibe*.

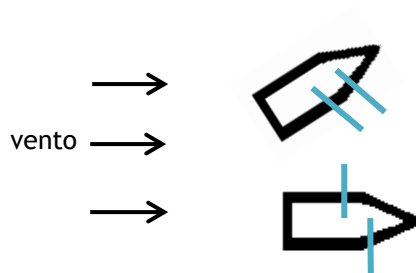


Figura 6.8 - Explicação visual para o facto de um veleiro não se deslocar diretamente a favor do vento

Quando se está a navegar com um barco à vela existem três aspetos que convém salientar:

- Não navegar o mais rápido possível;
- Não navegar pelo percurso com menor distância;
- Mas encontrar o melhor balanceamento entre a distância percorrida e a velocidade obtida de modo a chegar ao destino o mais rápido possível.

Deste modo, surgiu o conceito de VMG e para se obter o VMG num dado momento, apenas é necessário realizar um cálculo trigonométrico:

$$VMG = v * \cos(Course Offset) \quad (6.2)$$

Através desta equação são criadas as tabelas VMG:

Ângulo	Porcentagem	Velocidade do Barco												
		2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
5	0.4 %	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
10	1.5 %	2	2.5	3	3.6	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1
15	3.5 %	2.1	2.3	3.1	3.6	4.1	4.7	5.2	5.7	6.2	6.7	7.2	7.8	8.3
20	6.4 %	2.1	2.7	3.2	3.7	4.3	4.8	5.3	5.9	6.4	6.9	7.4	8	8.5
25	10.3 %	2.2	2.8	3.3	3.9	4.4	5	5.5	6.1	6.6	7.2	7.7	8.3	8.8
30	15.5 %	2.3	2.9	3.5	4	4.6	5.2	5.8	6.4	6.9	7.5	8.1	8.7	9.2
35	22.1 %	2.4	3.1	3.7	4.3	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	7.9	8.5	9.2	9.8
40	30.5 %	2.6	3.3	3.9	4.6	5.2	5.9	6.5	7.2	7.8	8.5	9.1	9.8	10.4
45	41.4 %	2.8	3.5	4.2	4.9	5.7	6.4	7.1	7.8	8.5	9.2	9.9	10.6	
50	55.6 %	3.1	3.9	4.7	5.7	6.2	7	7.8	8.6	9.3	10.1	10.9		
55	74.3 %	3.5	4.4	5.2	6.1	7	7.8	8.7	9.6	10.5				
60	100.0 %	4	5	6	7	8	9	10						
65	136.6 %	4.7	5.9	7.1	8.3	9.5	10.6							
70	192.4 %	5.8	7.3	8.3	10.2									
75	286.4 %	7.7	9.7											

Tabela 6.2 - Velocidade que um veleiro tem de atingir para um dado VMG [41]

A tabela apresenta as velocidades suscetíveis de serem obtidas por um barco à vela num dado momento por forma a adquirir um dado VMG com um dado ângulo de *offset* (*Course offset*). Cada linha da tabela representa um determinado ângulo de *offset* a que corresponde um grupo de colunas que traduzem a velocidade que barco necessita de alcançar para obter o VMG (2ª linha da tabela). A 2ª coluna mostra a diferença, em percentagem, entre a velocidade do barco e o VMG correspondente.

Por exemplo, se o veleiro estiver a navegar a 6 km/h em direção ao seu destino (ao longo da *Rhumb line*), se se alterar o curso em 30° do seu rumo, a velocidade que o barco precisa de atingir para fazer 6 km/h_{VMG} é de 6,9 km/h.

Visualizando a coluna “Percentagem” da tabela, podemos concluir que, para afastamentos do curso até 15°, apenas é necessário um aumento da velocidade de menos de 4%, para manter a mesma velocidade em VMG. Até mesmo a 25° deslocado do curso o veleiro tem de “ganhar” pouco mais de 10% de velocidade. Para valores acima dos 30° de distância da linha de rumo, a velocidade que o veleiro precisa de atingir começa a aumentar rapidamente, em 60°, precisamos de uma velocidade do barco de duas vezes o VMG e, além disso, é improvável que consiga atingir e ultrapassar essa velocidade por forma a ter vantagem em relação à rota anterior.

Quando nos afastamos da linha de rumo temos de decidir para onde vamos virar. Às vezes, isso poderá ser decidido por restrições territoriais, quando navegamos por um rio ou riacho e não queremos ir contra as margens. Considerando que estamos livres para escolher qualquer direção, temos que ter em atenção alguns aspetos:

Uma boa regra de navegação é escolher a direção que nos mantém mais próximo da *Rhumb line*, pois se não nos afastarmos em demasia da linha de rumo, significa que não devemos perder muito tempo, caso essa mudança de trajetória seja pior que a anterior.

Analisando a figura seguinte, um veleiro a deslocar-se exatamente sobre a *Rhumb line* com um vento de bombordo (esquerda) de 5° pode alterar a sua rota de duas maneiras para obter um ângulo de vento de 10°. Se virar para estibordo, vai afastar-se da rota, e transitará por duas fases: primeiro, o ângulo do vento nas velas diminuirá até atingir o *dead run* (veleiro está a deslocar-se exatamente a favor do vento) até que depois, começa novamente a aumentar e a ganhar cada vez mais velocidade. Quando atingido um ângulo de vento de 10°, o veleiro já estará 15° deslocado da linha de rumo. Em contrapartida, se o veleiro virar para bombordo, apenas terá de se deslocar 5° da sua rota e terá um ângulo de vento real de 10°, o que se traduzirá num aumento da velocidade do barco com apenas um desvio 5°. Em suma, quando o ângulo do vento não coincide com a nossa rota, é melhor escolher o rumo que está no lado oposto ao vento pois é o rumo que nos dá o ângulo do vento que precisamos, mantendo o veleiro o mais próximo da rota. É este tipo de análise que um velejador tem de ser capaz de realizar para maximizar a sua performance e diminuir o tempo de percurso [42].

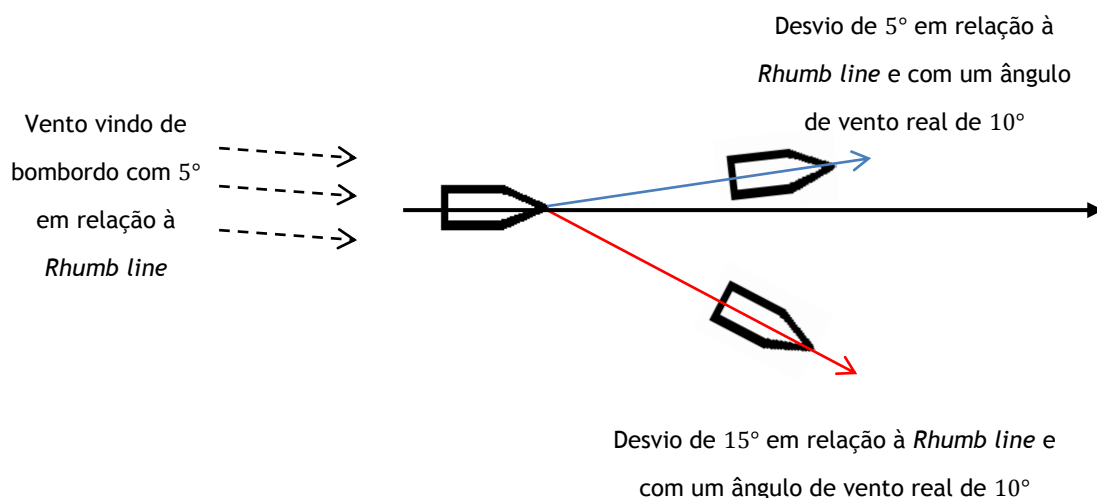


Figura 6.9 - Exemplo de escolha entre duas rotas

De seguida está apresentado outro exemplo onde podemos observar que se se escolher o caminho a azul, estamos a realizar um *tack*, ou seja, não existe um fundamento teórico para a determinação de uma pré-rota a favor ou contra o vento, tudo depende das condições ambientais naquele instante.

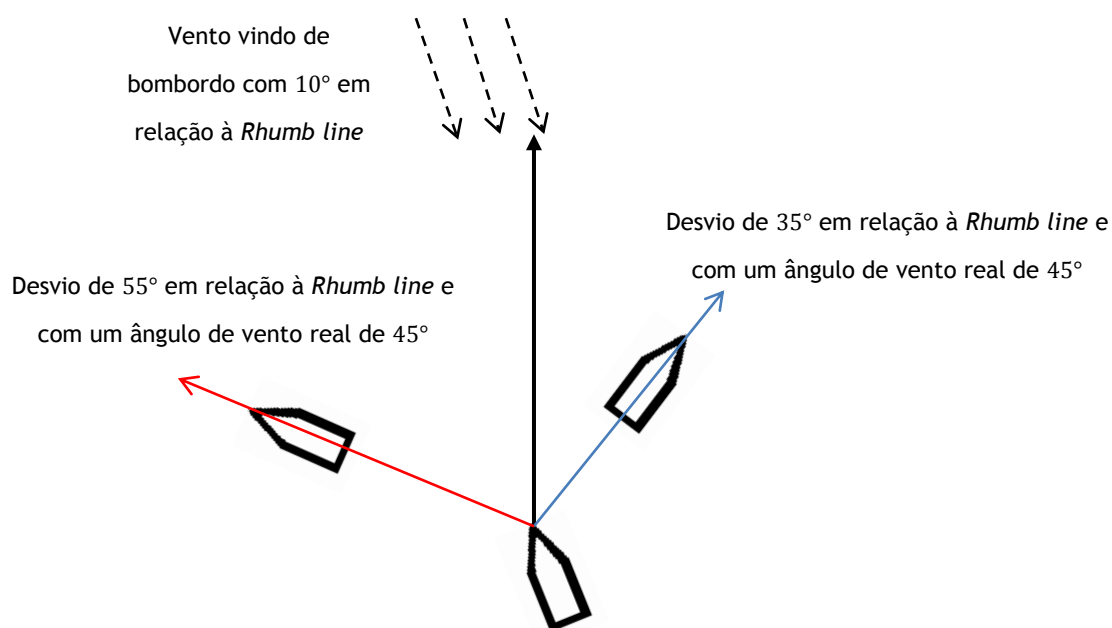


Figura 6.10 - Exemplo de escolha entre duas rotas

À medida que nos afastamos da *Rhumb line* estamos a acumular erro de progresso e num dado momento temos de mudar de rota e realizar um *tack* ou *jibe*. Quando é realizada esta manobra, o veleiro tem de alterar o valor de ângulo do leme de modo a que o vento que incida nas velas seja contrário, fazendo com que o fluxo de ar que nelas transita as faça

mudar para o ângulo oposto. Na figura seguinte está ilustrado um exemplo de *jibe* onde se pode observar que após a manobra o ângulo do vento na vela é o mesmo em valor mas com sinal contrário.

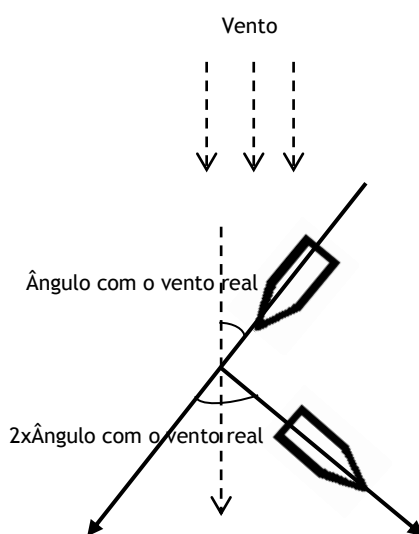


Figura 6.11 - Execução da manobra *jibe*

Para tomar uma decisão exata sobre quando mudar de rumo é preciso ser-se capaz de prever qual a velocidade que o barco tem de atingir na nova rota proposta. Para tal, recorre-se a diagramas polares VMG. Estes diagramas têm como base testes práticos exaustivos realizados com o barco a várias velocidades, com várias gamas de ângulos de vento real e aparente. Os diagramas são praticamente simétricos em relação ao eixo vertical mas devido à estrutura antissimétrica dos veleiros pode haver certas diferenças como se pode observar na figura 6.12.

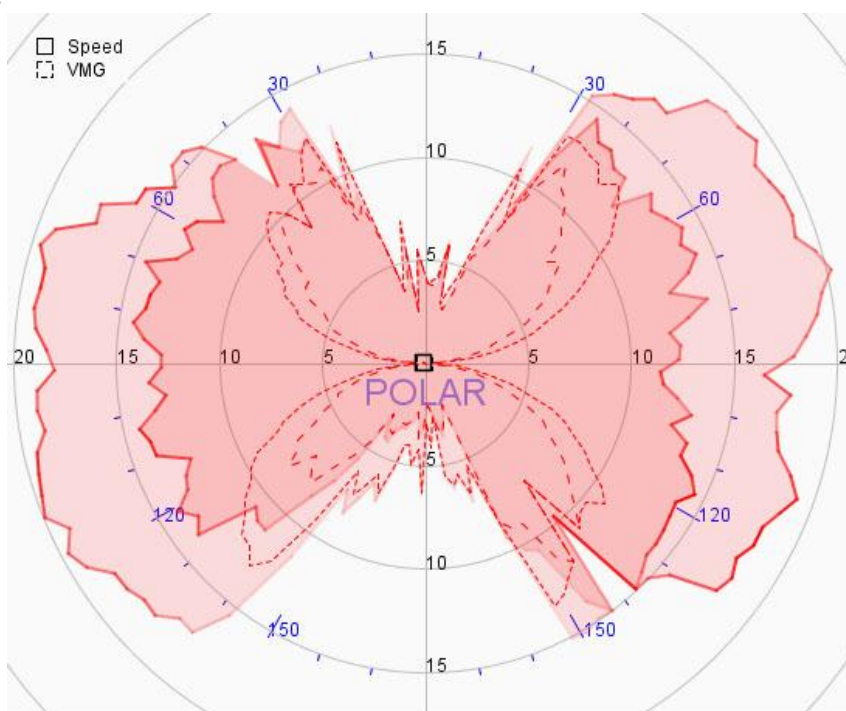


Figura 6.12 - Diagrama Polar VMG [43]

A distância máxima que o barco se pode afastar da rota ou não, é um parâmetro que não pode ser calculado teoricamente e depende do estilo de cada velejador. Uma forma de limitar o XTE aquando da utilização do robô em modo autónomo é definir um ângulo máximo no qual este se pode afastar, a partir do ponto de destino. Essa linha denomina-se de *Lay Line*. Quando este navega a favor do vento, tem um valor entre os 10° e 20° ; 30° até 45° quando se desloca contra o vento.

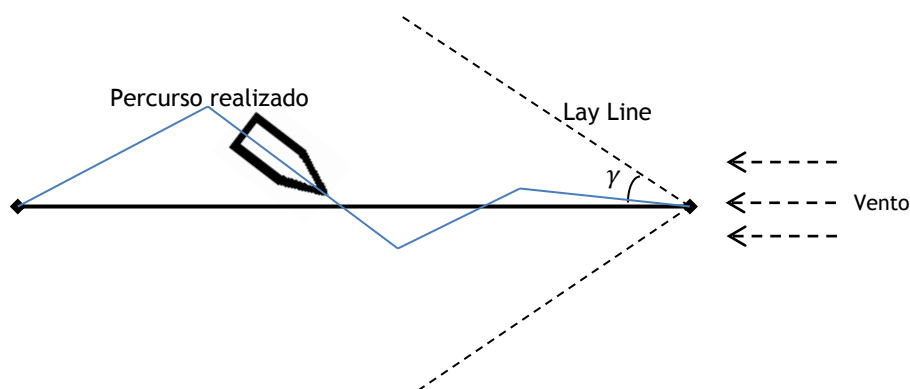


Figura 6.13 - Execução de manobras tack

Para cada *tack* ou *jibe* é necessário estabelecer uma nova *Rhumb line* a partir desse ponto. Caso não se defina uma nova linha de rumo, o veleiro pode deslocar-se paralelamente à *Rhumb line* estabelecida anteriormente e não atingir o *waypoint* final.

Em suma, com toda a análise realizada à cinemática do barco e da vela, é possível deduzir o tipo de controlo a realizar. Com as variáveis de entrada orientação do barco, força e direção do barco é possível deduzir através da equação 6.1 o ângulo da vela. O que foi mostrado anteriormente representa o máximo de performance que um veleiro pode ter, mas é necessário partir-se de algo mais simples para se realizar um controlador. Deste modo, podem ser arbitrados *waypoints* para a realização das manobras de *tack* e *jibe*.

De seguida, é necessário inferir se o barco está numa situação de *jibe* ou *tack* através das respetivas variáveis. As condições fronteira são: $\alpha_{tw} = -45^\circ \cup \alpha_{tw} = 45^\circ$ (estes pontos designam-se como *Close Hauled*), para o caso de *tack* e $\alpha_{tw} = -60^\circ \cup \alpha_{tw} = 60^\circ$ no caso de *jibe*. No caso de se encontrar numa destas situações o leme passa a adquirir um determinado ângulo de modo a que o vento incidente na vela altere. Por exemplo, se tiver numa situação de *tack* diretamente contra o vento (orientação desejada = 0°), quando este atingir o $\alpha_{tw} = -45^\circ$, o leme passará a ter um valor de $-\delta_r$, o que fará com que o veleiro dê uma guinadela para o lado que o leme virou e, um dado tempo depois, o ângulo do vento com a vela terá um valor contrário ao que tinha antes de começar esta sucessão de movimentos e, consequentemente, a vela terá um ângulo de $-\delta_s$.

Passando agora para a lógica de programação, o programa deve ser construído com base em três estados: normal, *tack*, *jibe*.

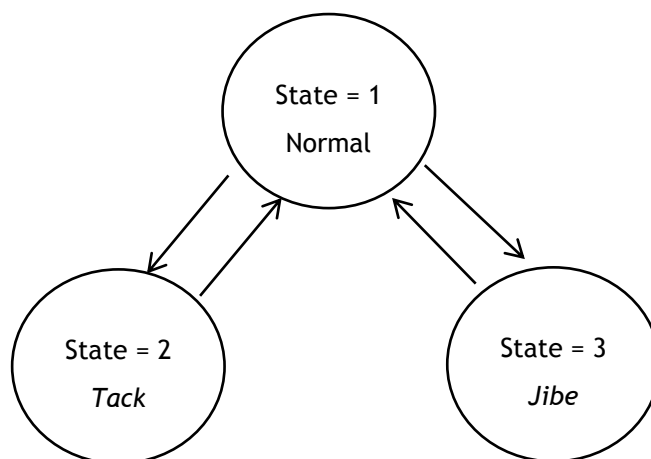


Figura 6.14 - Representação dos estados do programa

O estado *Normal* corresponde a todos os movimentos que o veleiro tem de realizar quando tem uma orientação desejada em relação ao vento real de entre $[45^\circ, 120^\circ]$ e $[-120^\circ, -45^\circ]$. Neste caso apenas é necessário calcular o valor do ângulo da vela através da equação 6.1, e o valor do leme é calculado pelo PID para seguir um determinado *waypoint*.

Quando a orientação desejada em relação ao vento real está entre $[-45^\circ, 45^\circ]$, o programa entra no modo *tack*. Em primeiro lugar calculam-se os valores de histerese, de modo a que sejam calculados os *waypoints* (marcados com círculo preto). Por exemplo, para uma orientação desejada de 30° a janela de histerese deve ser:

$$|30^\circ - 45^\circ| = 15^\circ$$

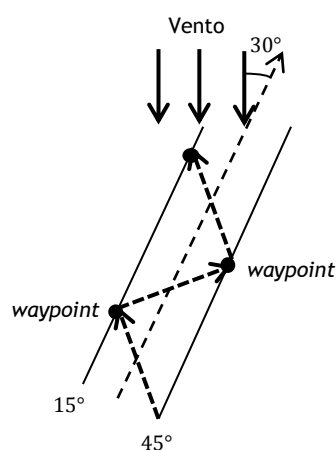


Figura 6.15 - Janela de histerese para uma orientação desejada de 30°

Por fim, são calculados os valores de δ_r e δ_s . Quando a orientação desejada em relação ao vento real está entre $[120^\circ, 240^\circ]$, o programa entra no modo *jibe* e é deduzida a janela de histerese do mesmo modo que para o *tack* e calculados os respetivos valores de δ_r e δ_s .

Capítulo 7

Sistema computacional e sensores

Neste capítulo são referenciados os diferentes sistemas e subsistemas existentes no veleiro, é explicado o sistema computacional e sensores incorporados, e como se interagem entre si.

A solução final pode ser dividida em dois grupos principais:

Plataforma - corresponde ao veleiro e a todos os componentes/sensores que o constituem.

Ground Station - inclui o subsistema de comunicação, de telemetria e comandos entre o operador e a Plataforma.

A figura seguinte representa uma visão abrangente e simplificada da arquitetura funcional de todo o sistema com os subsistemas anteriormente referidos:

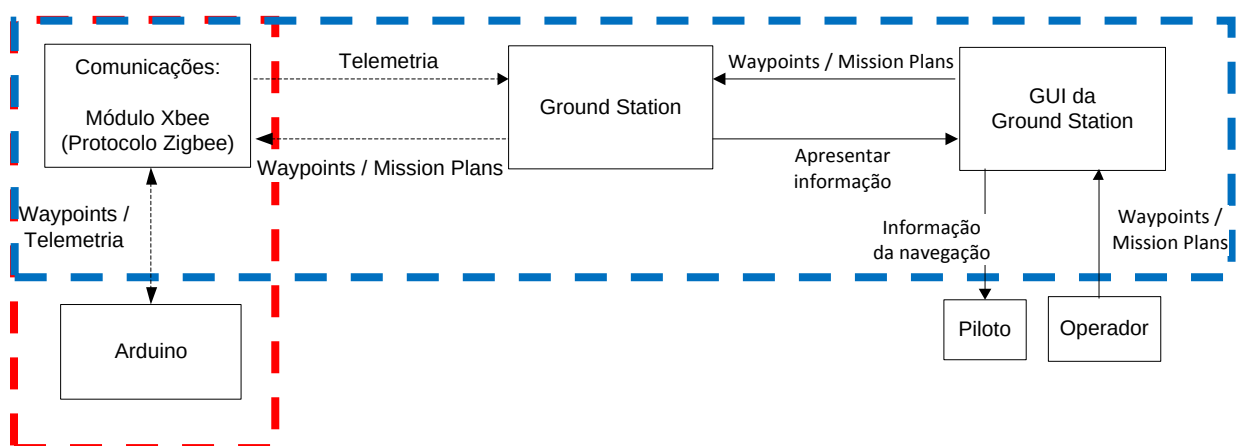


Figura 7.1 - Arquitetura funcional, visão abrangente (vermelho - Plataforma ; azul - Ground Station)

7.1 - Arduino

O modelo é controlado por um *Ardupilot MEGA 2.0*, uma plataforma de *hardware open source*, que contém um microcontrolador *ATMEGA 2560*, tem capacidade para 30 *I/O* e é programado numa linguagem baseada *wiring*, descendente do *C/C++* [44]. A placa de *hardware* possui sensorização incorporada, tal como acelerómetros, giroscópios, compasso digital, recetor GPS e altímetro.

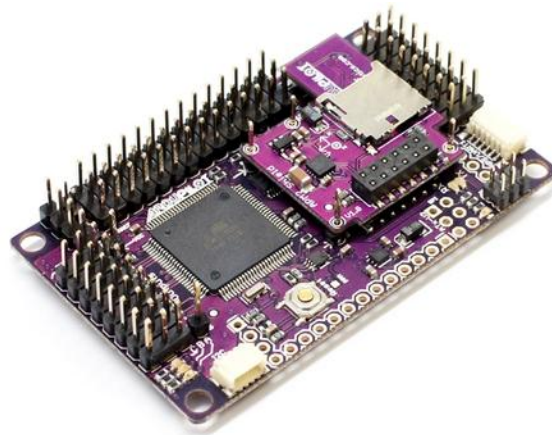


Figura 7.2 - Ardupilot MEGA 2.0

7.2 - Sensor direcção do vento

Para sensorização da direcção do vento foi usado um *encoder* rotativo com um resolução de 512 PPR (*pulse per rotation*). Através dele é possível deduzir a orientação do vento num dado momento.

Pino	Saída
1	<i>Pulse</i>
2	<i>Direction</i>
3	GND
4	<i>Index</i>
5	VCC
6	<i>Chip Select</i>

Tabela 7.1 - Configuração dos pinos

O pino 1 transmite pulsos, 512 pulsos por cada rotação e, consoante o valor da saída do pino 2 é necessário incrementar ou decrementar a contagem dos pulsos. O pino 4 dá um impulso cada vez que o sensor passa numa posição específica. Na figura representada a seguir está explícito o que foi descrito anteriormente:

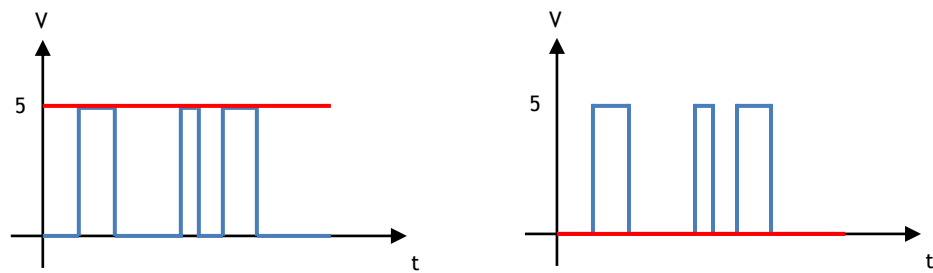


Figura 7.3 - Representação das formas de ondas do pino 1 e 2 (azul e vermelho respetivamente)

Para conseguir ler todos os pulsos foi necessário configurar *interrupts* para que nenhum deles fosse descartado. De seguida está apresentado um excerto do código produzido para leitura do encoder:

```
ISR(PCINT2_vect)
{
  if (digitalRead(A6) == HIGH) pulse = 0;

  if (STATE == 0 && digitalRead(A8) == HIGH){
    if (digitalRead(A7) == HIGH) pulse = pulse + 1;
    else if (digitalRead(A7) == LOW) pulse = pulse - 1;
    Serial.println(pulse);
    STATE = 1;
  }

  if (STATE == 1 && digitalRead(A8) == LOW) STATE = 0;

  if (pulse == 513) pulse = 0;

  if (pulse == -1) pulse = 512;
}
```



Figura 7.4 - Encoder rotativo (EMS22D51-B28-LS5)

De seguida, são apresentados os cálculos teóricos para deduzir qual a velocidade do vento necessário para que este seja detetável pelo *encoder*:

$$Tl = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D \quad (7.1)$$

onde, T é o torque, l o comprimento da secção, ρ é a densidade do meio, A é a área do corpo, v é a velocidade do corpo C_D é o coeficiente de *drag*.

$$43e^{-3} * 13e^{-2} = \frac{1}{2} * 1.204 * 12e^{-4} * v^2 * 1 \quad (7.2)$$

$$v \approx 2.78 \text{ m/s} \approx 10.01 \text{ km/h}$$

Será necessário um vento de 10.01 km/h, no pior caso, para o arranque do movimento do *encoder*. Por fim, construiu-se um cata-vento que permite deduzir a direção do vento a qualquer instante, como está apresentado na figura seguinte, o qual será colocado no topo da estrutura fornecida pela base Naval de Lisboa (figura 7.6):



Figura 7.5 - Cata-vento construído

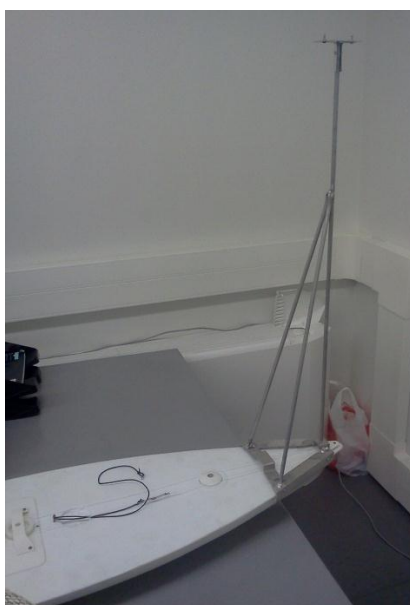


Figura 7.6 - Estrutura na proa do veleiro para suporte do cata-vento e anemómetro

7.3 - Sensor força do vento

O sensor de vento baseia-se num anemómetro térmico, o qual consiste em aquecer um elemento a uma dada temperatura e medir a energia eléctrica necessária para mantê-lo a essa temperatura aquando da mudança de intensidade do vento. A esta técnica é dada o nome de *hot-wire*. A saída (*Out*) é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do vento [45]. A utilização deste sensor recai sobretudo pelo facto de ser extremamente pequeno (1.5x4.0x0.6cm), leve e barato.



Figura 7.7 - Sensor de vento termo resistivo

Realizaram-se testes práticos com recurso a um automóvel a várias velocidades para provar se a saída é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do vento. O valor da saída do sensor, pino 3 (*Out*), é ligado a uma entrada analógica do arduino que, através de um ADC (*Analog Digital Converter*) converte a tensão de 0 a 5V num valor de 10 *bits*, ou seja, de 0 a 1023, o qual pode ser lido através da porta série do arduino ligada a um computador.

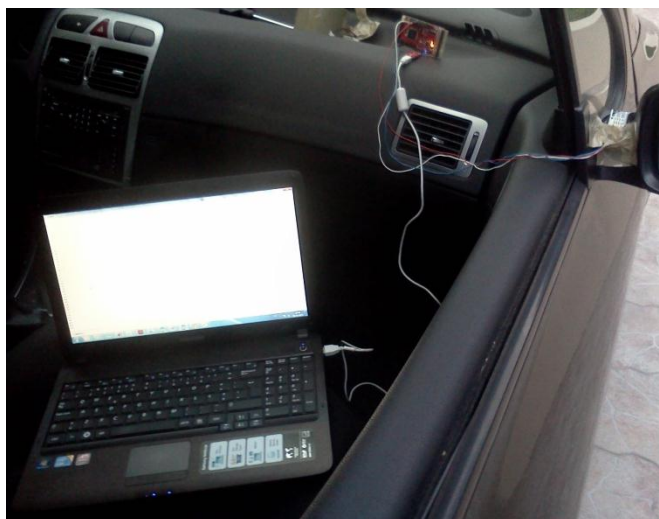


Figura 7.8 - Teste prático realizado com o sensor de vento

Como se pode observar na tabela seguinte o valor teórico anda perto do prático com erros máximos na ordem dos 13% mas também é preciso ter em atenção que o teste não foi realizado num ambiente controlado, e o facto de o carro deslocar-se, por exemplo, a 10km/h

não significa que esse fosse o valor que o sensor estava a medir pois, também havia a velocidade do vento a interferir. O valor teórico e prático do sensor no seu estado inicial representa o valor obtido dentro do carro e, a partir daí, obtiveram-se os restantes valores teóricos ($16 + v^2$).

Velocidade (km/h)	Velocidade (m/s)	Valor Teórico	Valor Prático	Erro (%)
0	0,00	16	16	0,00%
10	2,78	23,72	27	13,85%
20	5,56	46,86	49	4,56%
25	6,94	64,23	60	6,58%
30	8,33	85,44	77	9,88%
35	9,72	110,52	115	4,05%
40	11,11	139,46	141	1,11%
45	12,50	172,25	175	1,60%
50	13,89	208,90	212	1,48%
60	16,67	293,78	280	4,69%
70	19,44	394,09	391	0,78%
80	22,22	509,83	512	0,43%
90	25,00	641,00	660	2,96%
100	27,78	787,60	saturou	-

Tabela 7.2 - Valores de saída do sensor de vento para várias velocidades

Como a variação dos valores de saída é muito baixa numa escala de 0 a 30 *km/h* (aquela a que o veleiro geralmente estará sujeita), recalibrou-se o sensor de modo a conceder uma maior margem nessa gama. Esta calibração consiste em alterar o valor do potenciómetro R_9 para dar um *offset* na saída e, consequentemente torná-lo mais sensível a baixas velocidades.

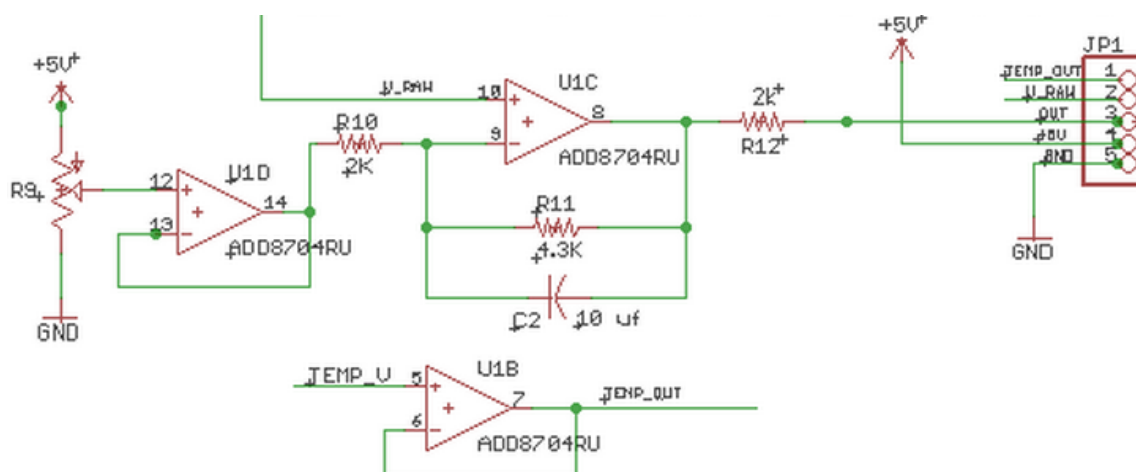


Figura 7.9 - Circuito elétrico do sensor de vento [46]

Os valores médios obtidos na realização de quatro testes práticos foram:

Velocidade (km/h)	Velocidade (m/s)	Valor Prático
0	0,00	15
10	2,78	317
20	5,56	374
25	6,94	396
30	8,33	428
35	9,72	471
40	11,11	526
45	12,50	540
50	13,89	565
60	16,67	613
70	19,44	641
80	22,22	701
90	25,00	730
100	27,78	Saturou

Tabela 7.3 - Valores médios da saída do sensor de vento para várias velocidades

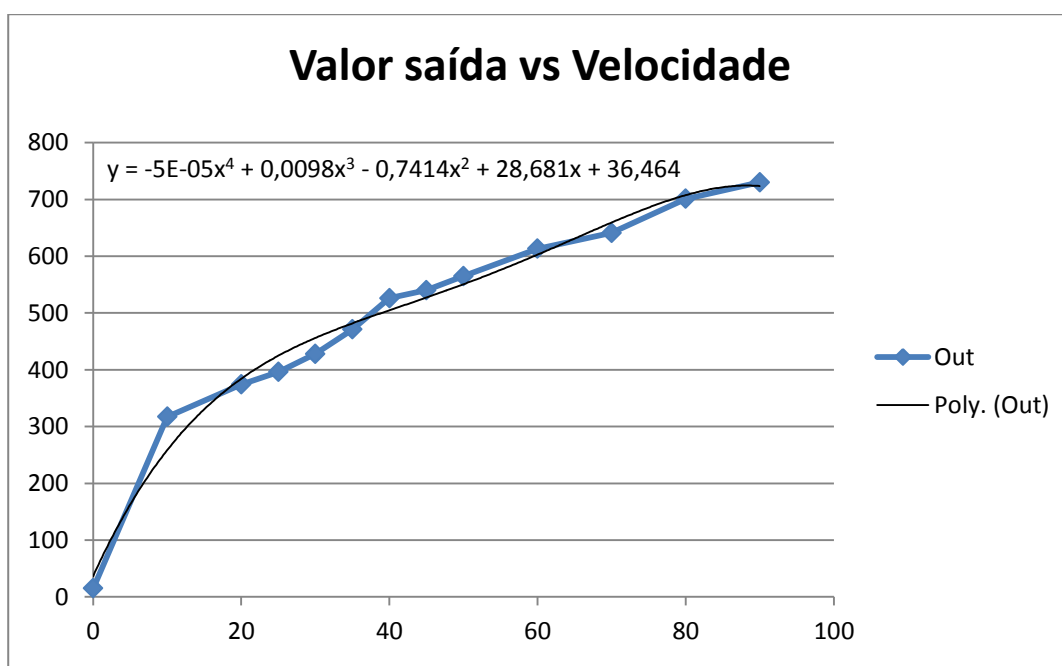


Figura 7.10 - Valores médios da saída do sensor de vento para várias velocidades

Fazendo a parametrização dos valores do gráfico obteve-se a seguinte equação:

$$Out = -5e^{-5}v^4 + 0.0098v^3 - 0.7414v^2 + 28.681v + 36.464 \quad (7.3)$$

7.4 - Xbee

Para que seja possível a comunicação entre a plataforma e a *Ground Station*, é usado o *hardware Zigbee* (da marca *Xbee*) que permite a permanente troca de informação através do protocolo *MAVLink*, no sentido de enviar dados de telemetria para a estação de terra, assim como, receber comandos da mesma, como os *waypoints* e *mission plans*.

O *Xbee PRO 2.4* surge como uma norma de rede sem fios que oferece: reduzido consumo de potência; pilha protocolar de implementação simplificada (código de tamanho reduzido); conduzindo a interfaces de baixo custo; funciona por radiofrequência (RF) com *data rate* de 250Kbps; potência de transmissão de 100mW; *outdoor range* de pelo menos 1 milha (1.5km); antena de alto ganho (4.9dBi); frequência de funcionamento de 2.4GHz; sensibilidade do recetor -100dBm.

A comunicação é feita através de uma frequência de rádio de 2.4GHz e com uma potência de transmissão de 10mW pois é a frequência permitida em praticamente todo o Mundo para a transmissão de dados com veículos controlados por radiofrequência (RC) [47].



Figura 7.11 - Módulo Xbee 2.4GHz

7.5 - Servos

Os servos que controlam os movimentos do leme e da vela funcionam através de ondas PPM (*Pulse per Minute*). Desta forma, tanto o comando de rádio controlo como o arduino têm de enviar sinais que sejam reconhecidos pelos servos, ou seja, determinado pulsos por minuto consoante a posição desejada. Os valores limites dos servos estão apresentados na tabela seguinte:

PPM			
Servo	Mínimo	Médio	Máximo
Vela	1044	1457	1879
Leme	1280	1592	2002

Tabela 7.4 - Valores PPM mínimos, médio e máximo do leme e da vela

Estes valores foram calibrados com recurso aos sinais enviados pelo comando para os servos e da leitura dos mesmos através do programa *Mission Planner*, o qual será explicado com maior detalhe na secção 7.9.

7.6 - Comando e Recetor

O comando usado para a realização de testes práticos foi o *Futaba 7C*. Este utiliza uma frequência para comunicações de 2.4 GHz, a mesma que o *Xbee*, o que poderá trazer futuras complicações pois os sinais podem interferirem-se. No entanto, foi usado este comando porque era o único disponível pela Faculdade para o projeto. O recetor está encarregue de receber os sinais PPM do comando enviá-los para o arduino [48].



Figura 7.12 - Comando RC de 2.4 GHz e respetivo recetor

7.7 - Bateria e regulador

A bateria usada tem uma capacidade de armazenamento de carga de 2200 mAh e uma tensão nominal de 11.1V. Como o arduino deve ser alimentado com 5V, existe um regulador de tensão de 5A e 4.8V após a bateria. Esta capacidade quer dizer que a bateria pode fornecer uma corrente de 2200 mA durante uma hora até se esgotar.



Figura 7.13 - Regulador à direita e bateria à esquerda

7.8 - Incorporação dos módulos

De seguida está representado detalhadamente o modo como são incorporados todos os componentes:

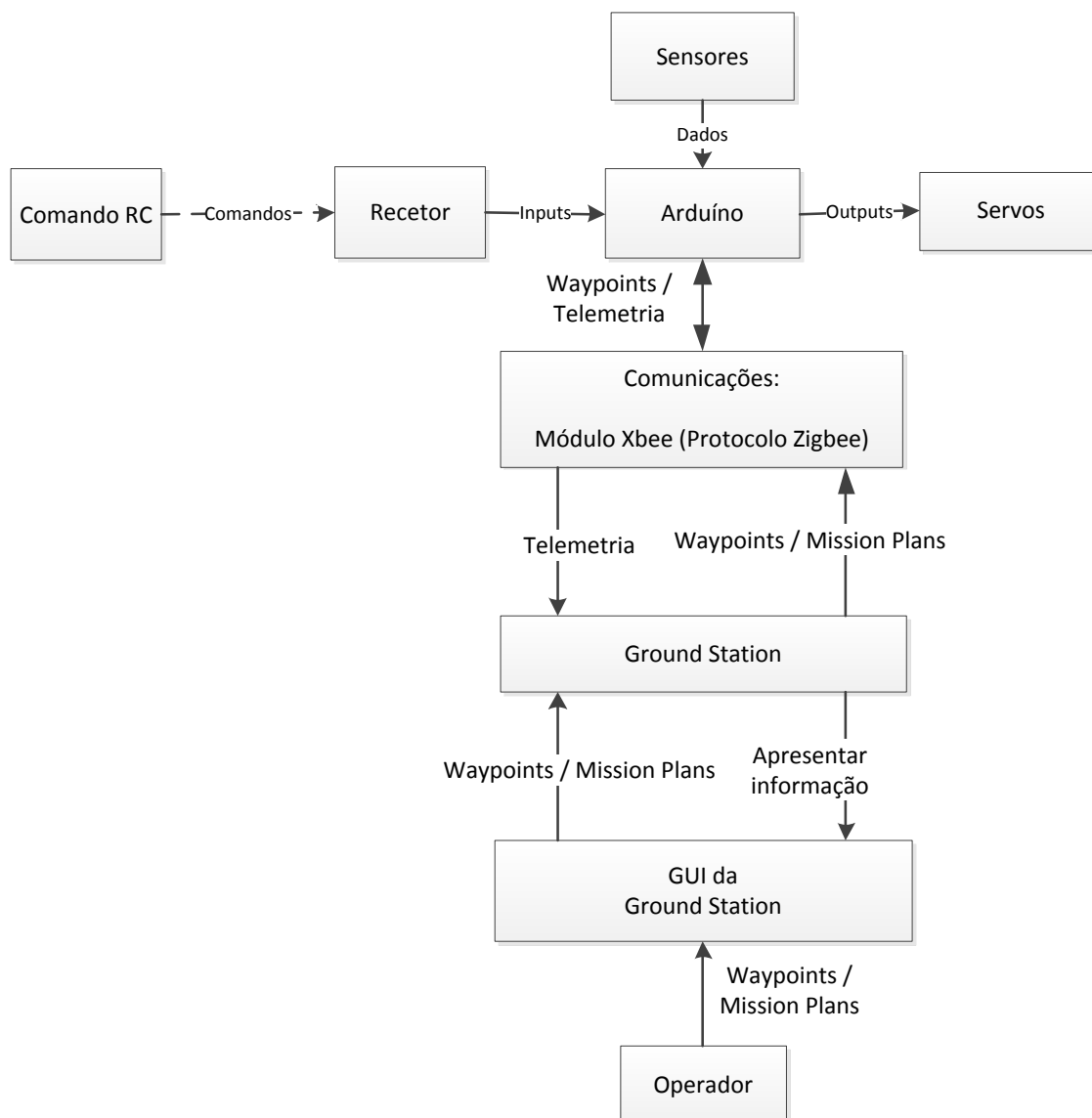


Figura 7.14 - Esquemático das ligações / comunicações do sistema no global

Caso o modo do comando RC ou da *Ground Station* estiver em *Manual*, os *inputs* do arduino são lidos do recetor, que por sua vez, analisa os sinais enviados pelo comando e coloca na saída (*outputs*) o valor da entrada (*inputs*). Se o modo escolhido for *Auto*, é o arduino que processa todos os dados provenientes dos vários sensores e calcula quais as ondas PPM a colocar nas saídas para os servos.

Nas figuras seguintes estão representadas as ligações efetuados na prática e a forma como se interagem e interfaceiam todos os componentes:

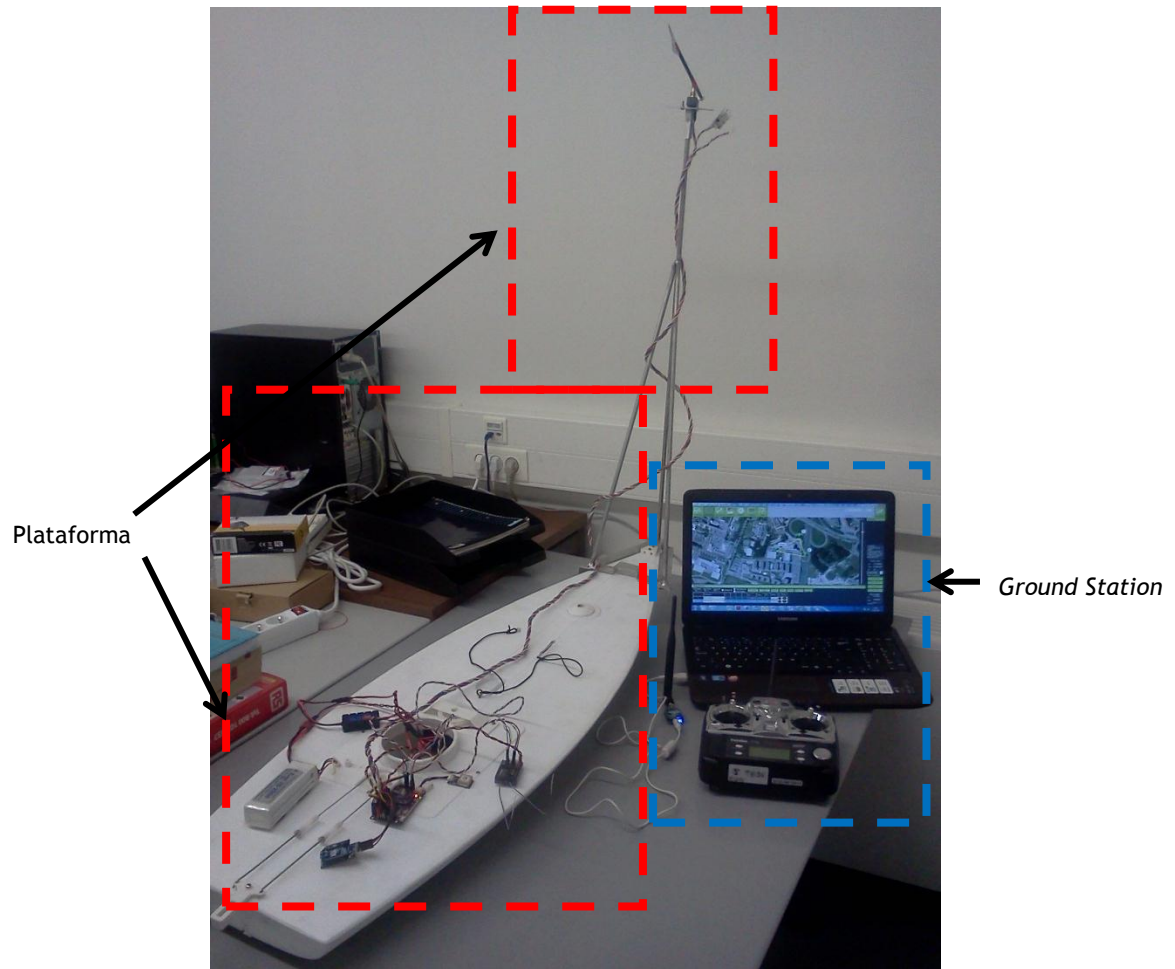


Figura 7.15 - Montagem de todos os componentes

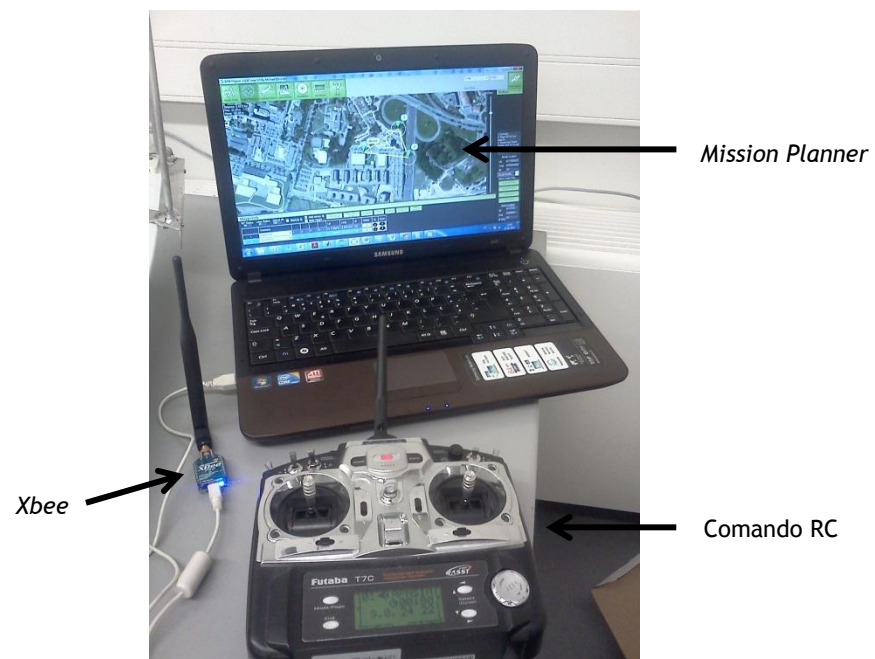


Figura 7.16 - Componentes da Ground Station

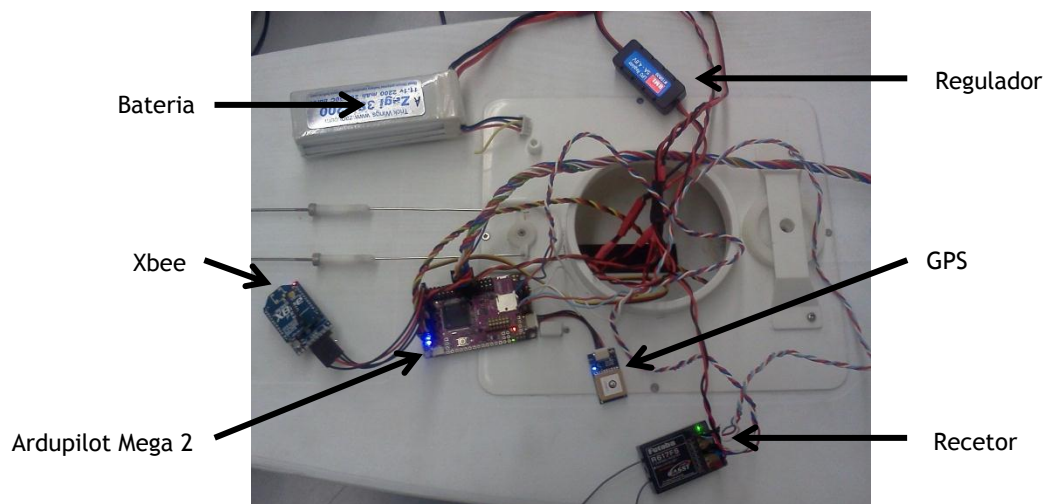


Figura 7.17 - Componentes da Plataforma

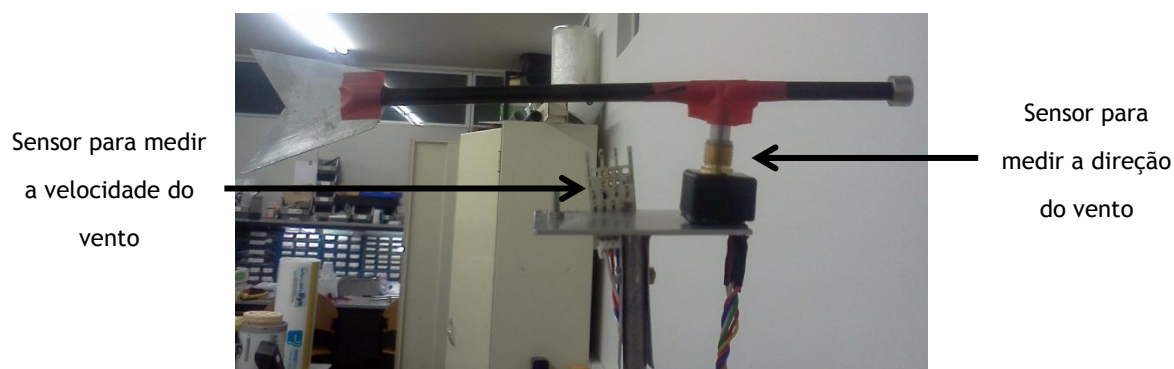


Figura 7.18 - Restantes componentes da Plataforma

7.9 - Programação

Para tornar o veleiro totalmente autónomo foi produzido código a partir de um pré existente, designado por *ArduPlane*. Após o estudo de todas as funções e bibliotecas foram feitas as seguintes alterações:

- Programar e incorporar os sensores de vento no código;
- Alteração das mensagens *MavLink* para ser possível a visualização dos valores dos sensores em tempo real na *Ground Station*;
- Controlador PID para o leme;
- Controlador por parametrização de uma curva para a vela;
- Configuração dos *Xbee* para suportar *baudrate* 57600 bits/s;
- Introdução de novos *define* por ser um microprocessador recente.

7.10 - Mission Planner

Mission Planner é um *software* [49] que dispõe de uma interface gráfica que mostra informação relevante para o seu operador e para o piloto. Esta aplicação possui mapas 2D e 3D com *Google Earth support* que permite a criação de *waypoints* de uma forma *drag-and-drop* e permite ainda a alteração em tempo real de parâmetros *onboard*, tais como, os ganhos do PID para os diferentes servos, *waypoints*, modo de comando (Manual ou Auto), entre outros.

Permite a criação de gráficos de telemetria, perceber o estado real do veleiro e das baterias, saber a informação proveniente dos sensores de aceleração, posição, vento, orientação. Todas as informações dos componentes podem ser analisadas pelo utilizador, desde que o código do arduino seja programado de modo a ser “percebido” pelo *Mission Planner*.

É uma ferramenta eficaz no tratamento e gestão de missões, permitindo ao piloto saber todos os dados do seu UAV em tempo real.



Figura 7.19 - Interface do *Mission Planner*

Interface gráfica dos
movimentos do UAV

Informação de todos os sensores e
atuadores

Planeamento e estado
da missão

Capítulo 8

Conclusões

Nos capítulos anteriores, determinou-se um modelo não linear do veículo, expondo todas as expressões de determinação e respetivos valores dos coeficientes. Deve salientar-se que existe alguma incerteza em alguns dos parâmetros, nomeadamente nos de *drag* e *lift*, tendo em conta que o seu cálculo assenta em fórmulas semi-empíricas e com recurso a parametrização de curvas, apoiadas em resultados experimentais, como se verifica em (Hoerner, 1965), (White, 1999) e em [37]. No entanto, o modelo retrata exaustivamente as forças que atuam no veleiro, e os resultados das simulações permitiram validar alguns termos do modelo, embora seja ainda preciso afinar certos parâmetros.

No capítulo 5 começou-se por realizar um controlador PID para o leme e um controlador *fuzzy Takashi-Sugeno* para a vela. Tal veio a ser infortúnio pois apenas considerava o erro da orientação e a respetiva derivada, não tendo em atenção o aspeto mais importante num barco à vela, o vento.

Para tornar então os controladores mais robustos, foram feitas pesquisas para se conhecer as limitações dos movimentos de um veleiro e, a partir desses estudos, foi realizado um controlo de alto nível para a determinação do ângulo da vela e do leme, consoante o estado do controlo: *normal*, *jibe* ou *tack*, e consoante a orientação desejada, velocidade e direção do vento e posição angular do leme.

Em termos práticos foram estudados, escolhidos e adquiridos todos os componentes necessários para a tornar o robô autónomo. Realizou-se uma análise do modo como iriam interfaciar-se e realizou-se a configuração e programação de alguns subsistemas, tais como: *xbee*, sensor de direcção e força do vento, comando RC. Todos os componentes foram ligados em simultâneo para validar as ligações e para testar as comunicações, tendo sido realizados com êxito.

Por fim, o arduino foi programado com base em códigos pré-existentis (código produzido para outros UAV's, tais como, aviões, planadores, rovers, entre outros, e com recurso a bibliotecas de comunicação, controlo e interface) para validar todo o projeto na prática,

tendo os resultados sido inconclusivos pois, ocorreram trajetórias não esperadas pelo veleiro. Por terem sido realizados poucos testes, não foi possível afinar com precisão os controladores.

8.1 - Perspetivas de trabalho futuro

8.1.1 Determinação dos coeficientes de *drag* e *lift*

Embora tenha existido esforços no decorrer deste projeto para determinação o mais exata possível dos coeficientes de *drag* e *lift*, não foi possível obter resultados sólidos, por falta de meios, o que impossibilitou uma modelização e a produção dos respetivos controladores mais rigorosos. O ideal seria determinar estes coeficientes de forma experimental, recorrendo a um ambiente controlado que simulasse o movimento das ondas e do vento e a incorporação de sensores de força no leme, casco, vela e quilha para medição desses parâmetros. O teste deveria ser realizado para diversos ângulos de ataque de vento, bem como, da corrente. A partir daí, efetuava-se uma parametrização dos valores obtidos por forma a descrever o comportamento do barco.

8.1.2 Veleiro totalmente autossuficiente

A introdução de células solares para gerar energia elétrica a todos os componentes, torná-lo-ia teoricamente autossuficiente. A utilização de uma fonte de energia limpa e infinita (solar) teria uma forte procura no mercado, o que permitiria, por exemplo, a realização de missões em alto mar por longos períodos de tempo e o transporte de mercadorias de forma autónoma e autossuficiente. Neste momento, o robô com todos os componentes interligados consome $73mA$ e é alimentado com uma tensão de $4.8V$, o que perfaz um consumo de $350.8mW$ por hora. Não estão a ser considerados os movimentos dos servos, o que pode fazer este valor disparar para o dobro, $700.8mW$ por hora. Admitindo também que seria preciso carregar uma bateria durante o dia, para permitir a navegação durante a noite, seria necessário pelo menos um conjunto de células solares capazes de gerar $2W$. Sabendo que $1kW$ de painéis policristalinos ocupa cerca de $7m^2$ [50], seria preciso colocar um painel com $140cm^2$.

8.1.3 Incorporação de uma câmara a bordo

A bordo do veleiro poderia ser incorporada uma câmara que estaria conectada ao microcontrolador. Este processaria a imagem a bordo, ou poderia enviá-la para a *Ground Station* através de, por exemplo, um sistema de vídeo *wireless* com frequência de $5GHz$, e processá-la com recurso a *Matlab* ou *OpenCV*. O objetivo seria dotar o robô da capacidade de detetar obstáculos e de delinear uma nova trajetória de navegação de modo a contorná-los.

De seguida é apresentada uma possível Arquitetura Funcional de todo o sistema para se compreender melhor todas as componentes envolvidas e quais as relações entre cada uma:

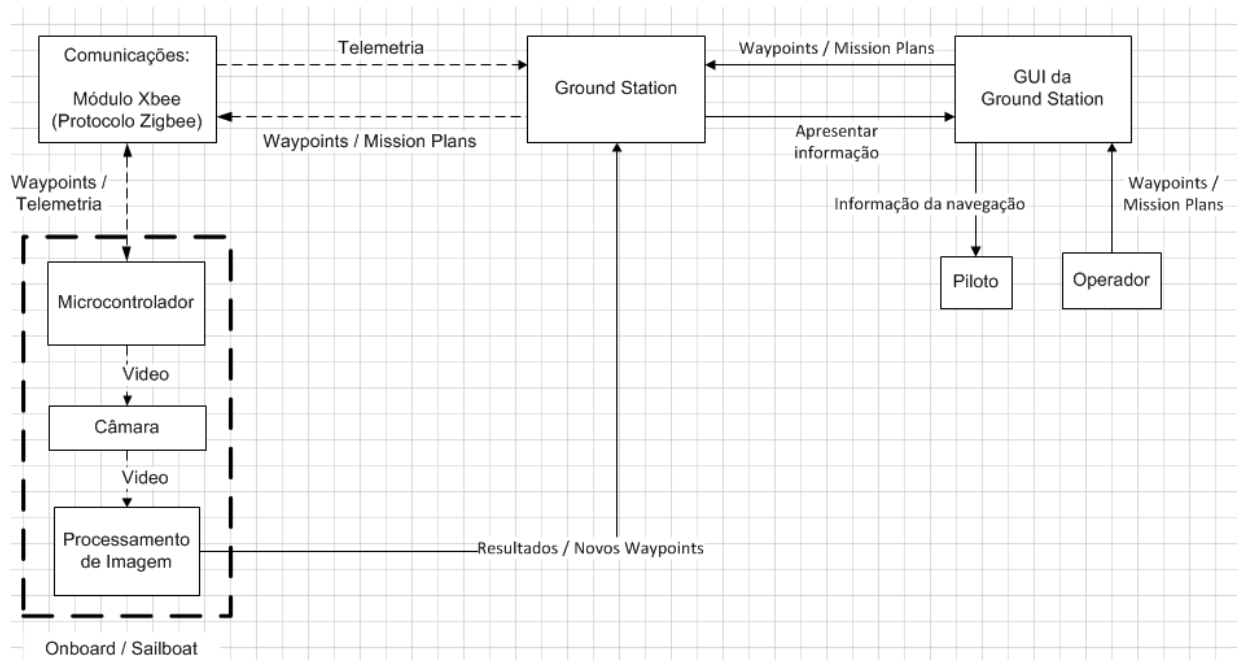


Figura 8.1 - Arquitetura Funcional Global

8.1.4 Melhoria do código produzido

Neste caso existem duas soluções: partir do código existente e retirar todo o excesso de funções implementadas, tais como: determinação das saídas de *pitch* e *throttle*, velocidade do ar, configuração e utilização do sensor barométrico, entre outros.

Por outro lado, poderia ser produzido todo o código de raiz, implementando-se as funções estritamente necessárias, deixando assim em aberto a possibilidade de ser realizado o processamento de imagem a bordo pois, este requer uma grande capacidade de processamento e de memória.

Referências

- [1] <http://www.1worldtours.com/Temples&PyramidsTour.htm> Acesso em 13/Abril/2012
- [2] N. A. Cruz and J. C. Alves, “*Autonomous sailboats: an emerging technology for ocean sampling and surveillance*” in *Proceedings of the MTS-IEEE Conference Oceans’2008*, 2008.
- [3] Bowditch, N.: *The American Practical Navigator*. Paradise Cay Publications, 2010
- [4] http://www.cci.dmu.ac.uk/administrator/components/com_jresearch/assets/publications/1314085634.pdf Acesso em 24/Janeiro/2012
- [5] <http://www.selfsteer.com/windvanes101/auxiliary.php> Acesso em 25/Janeiro/2012
- [6] <http://www.rcuniverse.com/market/item.cfm?itemId=729478> Acesso em 12/Junho/2012
- [7] <http://www.building-model-boats.com/rc-sailboats.html> Acesso em 27/Abril/2012
- [8] <http://www.theamya.org/boats/marblehead/> Acesso em 27/Janeiro/2012
- [9] <http://footy.rcsailing.net/> Acesso em 27/Janeiro/2012
- [10] <http://www.sailrc.com/sailrclaser/home.html> Acesso em 27/Janeiro/2012
- [11] <http://www.freetimehobbies.com/images/products/detail/BILBB414.jpg> Acesso em 27/Janeiro/2012
- [12] http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/fb9a8da0-2ac8-42d1-a11e-d58c1e158347/UploadedImages/Downloads/RoboBoat_2012_prelim_rules2.pdf Acesso em 04/Dezembro/2011
- [13] <http://www.kplu.org/post/ws-students-build-robosub> Acesso em 1/Maio/2012
- [14] https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/ASVC_2010_prelim_rules.pdf.pdf?AWSAccessKeyId=1RMAN8YH8YCNBW6KAZG2&Expires=1323651018&Signature=BhTLDCTNgpADUQvUX3uiF%2FnegOo%3D Acesso em 04/Dezembro/2011
- [15] http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/fb9a8da0-2ac8-42d1-a11e-d58c1e158347/UploadedImages/RoboBoat_2011_final_rules.pdf Acesso em 03/Dezembro/2011
- [16] <http://www.kplu.org/post/ws-students-build-robosub> Acesso em 1/Maio/2012

- [17] http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/fb9a8da0-2ac8-42d1-a11e-d58c1e158347/UploadedImages/RoboSub_Mission_Final_2011.pdf Acesso em 09/Dezembro/2011
- [18] <http://www.microtransat.org/tracking-2010.php> Acesso em 07/Dezembro/2011
- [19] http://www.wrsc2011.org/sailing_instructions.pdf Acesso em 07/Dezembro/2011
- [20] Hendrik Erckens, Gion-Andri Beusser, Cedric Pradalier and Roland Y. Siegwart. /Navigation Strategy and Trajectory Following Controller for an Autonomous Sailing Vessel. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2010.
- [21] SNAME, The Society of Naval Architects and Marine Engineers. *Nomenclature for Treating the Motion of submerged Body Through a Fluid*. Technical and Research Bulletin No, 1-5. 1950.
- [22] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons Ltd, England. 1994.
- [23] Tristan Perez, Thor I. Fossen. *Kinematic Models for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels*, 1994.
- [24] <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/808914/1/Tese%20de%20Mestrado%20de%20Fernando%20Joel%20Lopes%20Gamboa.pdf> Acesso em 25/Abril/2012
- [25] http://pt.wikipedia.org/wiki/Momento_de_in%C3%A9rcia Acesso em 15/Maio/2012
- [26] <http://pt.scribd.com/doc/50500827/6/Momentos-e-Produtos-de-Inercia> Acesso em 15/Maio/2012
- [27] http://pt.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_Steiner Acesso em 15/Maio/2012
- [28] <http://pt.scribd.com/doc/47364004/71/Teorema-de-Steiner> Acesso em 15/Maio/2012
- [29] Hoerner, S. F. 1965. *Fluid-dynamic drag*. USA, 1965.
- [30] F. H. Imlay. *The complete expressions for Added Mass of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid*. Technical report, Washington D.C. 1961.
- [31] Xiao, Lin; Jouffroy, Jerome. *Modeling and nonlinear heading control for sailing yachts*. University of Southern Denmark, IEEE Journal Of Oceanic Engineering, 2011.
- [32] White, F. M. 1999. *Fluid mechanics*. 4th edition. Boston: McGraw-Hill, 1999.
- [33] Faltinsen, O. M. 2005. *Hydrodynamic of high speed marine vehicles*. Cambridge, USA, 2005.
- [34] Hoerner, S. F. 1965. *Fluid-dynamic lift*. 2º edition, USA, 1985.
- [35] <http://www.youtube.com/watch?v=yqwb4HlORM&feature=related> Acesso em 02/Junho/2012
- [36] <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0184.shtml> Acesso em 30/Março/2012
- [37] R. Stelzer, T. Proell, and R. I. John. *Fuzzy logic control system for autonomous sailboats*, in *Proceedings of IEEE International Conference in Fuzzy Systems*. 2007.

- [38] Fabian Jenne, *Simulation & Control Optimization of an autonomous sail boat. Master's thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich - Dept. Autonomous Systems Lab.* Zurich. 2010.
- [39] <http://www.onemetre.net/design/VPP/PoorVPP.htm> Acesso em 12/Junho/2012
- [40] <http://www.oceansail.co.uk/Articles/VMGArticle.html> Acesso em 15/Maio/2012
- [41] http://en.wikipedia.org/wiki/Sailing_faster_than_the_wind Acesso em 22/Maio/2012
- [42] <http://nbnjrotc-sail.blogspot.pt/2011/01/lets-begin-at-beginning-how-boats-sail.html> Acesso em 29/Maio/2012
- [43] <http://i41.servimg.com/u/f41/17/01/51/91/polar210.jpg> Acesso em 22/Junho/2012
- [44] <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/APM2Quick> Acesso em 22/Junho/2012
- [45] <http://shop.moderndevise.com/products/wind-sensor> Acesso em 12/Junho/2012
- [46] <http://cdn.shopify.com/s/files/1/0038/9582/files/WindSensorSchematicRevC1.png?100218> Acesso em 12/Junho/2012
- [47] <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee> Acesso em 11/Junho/2012
- [48] <http://www.futaba-rc.com/downloads/manual-7c.html> Acesso em 20/Maio/2012
- [49] <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Mission> Acesso em 11/Junho/2012
- [50] Cláudio Monteiro, Aula 5 - Dimensionamento de sistemas FV, EESO

Bibliografia

Nuno Cruz, José Alves, *Auto-Heading Controller for an Autonomous Sailboat*, *Proceedings of the IEEE Conference Oceans'10*, Sydney, Australia, May 2010.

Gion-Andri Busser, *Design and Implementation of a navigation algorithm for an autonomous Sailboat*. Bachelor's thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich - Dept. Autonomous Systems Lab. Zurich. 2009.

J. Sliwka, P. Reilhac, R. Leloup, P. Crepier, H. D. Malet, P. Sittaramane, F. L. Bars, K. Roncin, B. Aizier, and L. Jaulin. *Autonomous robotic boat of ensieta*. In *.2nd International Robotic Sailing Conference.*, Matosinhos, Portugal, 2009.

Fahimi, Farbod. *Autonomous Robots Modeling, Path Planning, and Control*. 1st Ed.. Springer. Canada. 2009.

Hendrik Erckens, Gion-Andri Busser, Dr. Cedric Pradalier and Prof. Dr. R. Siegwart and. *Navigation Strategy and Trajectory Following Controller for an Autonomous Sailing Vessel*. IEEE Trans. RAM. Zurich. 2009.

Sang-Min Lee, Kyung-Yub Kwon. *A Fuzzy Logic for Autonomous Navigation of Marine vehicles Satisfying COLREG Guidelines*. International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 2, No. 2, June 2004.

Abril, J. Salom, and O. Calvo. *Fuzzy Control of a Sailboat*. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 16, pp. 359- 375. 1997.

T.W. Vaneck. *Fuzzy Guidance Controller for an Autonomous Boat*. IEEE Control Systems Magazine, vol. 17, pp. 43-51. 1997.

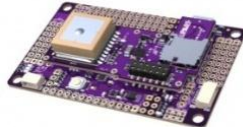
Edge C. Yeh and Jenn-Cherng Bin. *Fuzzy Control for Self-steering of a Sailboat*. In SICICI 1992

W. H. Warden. *A control system model for autonomous sailboat navigation*. In IEEE Proceedings of Southeastcon, vol. 2, pp. 944- 947, School of Industry and System Engineering, Georgia Inst. Of Technol., Atlanta. 1991

N. Davies. *A real time yacht simulator*. MSc Thesis. The University of Auckland. 1990.

MARCHAJ, C. A. *Aero-Hydrodynamics of Sailing*. Camden, Maine: International Marine Publishing. 1988.

Anexos

Componente	Referência	Característica	Preço
Arduíno	Mega2560	- Powered via USB Connection 256 KB of Flash Memory - SRAM 8 KB - EEPROM 4 KB http://www.farnell.com/datasheets/810077.pdf	59,29 €
	UNO	- Powered via USB Connection 2KB of SRAM 1KB of EEPROM - Flash Memory 32 KB http://www.farnell.com/datasheets/810076.pdf	25,64 €
Ardupilot	 Mega	- Based on a 16MHz Atmega2560 processor. - Built-in hardware failsafe that uses a separate circuit (multiplexer chip and ATmega328 processor) to transfer control from the RC system to the autopilot and back again. - Supports 3D waypoints and mission commands 256k Flash Program Memory, 8K SRAM, 4K EEPROM - Comes with a 6-pin GPS connector (EM406 style). 16 spare analog inputs (with ADC on each) and 40 digital input/outputs to add additional sensors - Four dedicated serial ports for two-way	48.43 €
	 Mega2.0	- Three processors - Invensense 6DoF MPU-6000 - Ready to fly, with GPS, magnetometer and dataflash included. - Can autonomously control planes, multicopters, regular helicopters, rovers, even boats, with just a one-click firmware change. - SD card slot, Native USB, with all new PPM encoder software.	150.60 €

Ardupilot	Mega kit 	• 1 x "Ardupilot Mega IMU Shield/OilPan Rev-H V1.0 (With Pins)" (\$159.95) • 1 x "Ardupilot Mega - Arduino Compatible UAV Controller w/ ATmega2560" (\$64.00) • 1 x "EM-406/uBlox/MTK Adapter Cable 5 cm" (\$1.50) • 1 x "MediaTek MT3329 GPS 10Hz + Adapter Basic" (\$37.95) • 1 x "3x16 Right Angle Pin Headers" (\$2.50) • 5 x "Servo Extension Cable 5cm Female-Female" (\$6.25) • 2 x "Conn Header Male 36. Straight" (\$4.50) • 1 x "Conn Header Female 02POS .1" GOLD" (\$0.99) • 1 x "Conn Header Female 2x03POS .1" GOLD" (\$1.50) • 1 x "Conn Header Female 08POS .1" GOLD" (\$1.20) • 1 x "Conn Header Female 11POS .1" GOLD" (\$1.40) • 1 x "Conn Header Female 2x13POS .1" GOLD" (\$2.50) • 1 x "Conn Header Female 14POS .1" GOLD" (\$1.60) • 1 x "USB Connector, Type A to Mini Type B" (\$5.00)	190.04 €
FPGA	Spartan 3E Breakout and Development Board 	• The Spartan-3E Evaluation card is a full breakout of almost every pin of the Spartan 3E 500,000 gate FPGA in a PQ208 Package • 3 power supplies • An AT45DB161D SPI prom to store the FPGA configuration image • RS232 level shifter for easy serial communications. • RS232 and power board can be sheared off for a completely isolated breakout board. • Comes with a 50MHz oscillator. http://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/FPGA/Spartan3E_DS_rev1-1.pdf	75.98 €
PC104	PCM-4153F-L0A2E 	• AMD low power LX800/500 MHz processor Built-In • 1 GB Flash and 512MB DDR memory onboard • Supports dual 10/100 Mbps Ethernet • 24-bit TFT LCD interface. • Supports three RS-232, one RS-232/422/485, and four USB 2.0 ports • PC/104-Plus expansion connector • Supports AC97 2.0 compliant Audio	€301.00

Xbee	Telemetry kit 	• 1x XstreamBee Board, including the two female connectors and right angle connectors. • 1x XBee-PRO 900 extended range module w/ RPSMA connector. • 1x XBee-PRO 900 extended range module w/ wire antenna. • 1x XstreamBee USB Adapter (USB adapter for the Xbee module!) • 1x Duck antenna optimized for 900Mhz. • 1x Xbee-Oil Pan connector cable.	113.52 €
WiFi	RN-XV WiFly Module - Wire Antenna 	• Based on common 802.15.4 XBee footprint • Ultra low power: 4uA sleep mode, 38mA active • Onboard TCP/IP stack includes DHCP, UDP, DNS, ARP, ICMP, HTTP client, FTP client and TCP • Firmware configurable transmit power: 0dBm to 12dBm • Hardware interfaces: TTL UART • Host data rate up to 464Kbps over UART • Supports Adhoc and infrastructure networking • 8 general purpose digital I/O • 3 analog sensor inputs • Real-time clock for time-stamping, auto-sleep, and auto-wakeup modes • Accepts 3.3VDC regulated power supply • Wire antenna	26.45 €
GPS	GeoHelix Antenna 	• Medium gain - 18dB typical • Rejects conducted noise from application • Wide cardioid beamwidth (>135° typical) • Negligible detuning close to human body • SMT compatible • Low current consumption	17.37 €
	Multi-band Antenna GPS/GSM/WiFi 	• 1575.42MHz (GPS) • 824 to 894 MHz (GSM) • 890 to 960 MHz (GSM) • 1710 to 1890 MHz (DCS) • 1850 to 1990 MHz (PCS) • 2400 to 2483MHz (WiFi)	34.02 €

Sailboat	<i>Proboat Serenity</i> 1-Meter Sailboat RTR 	• High quality, fiberglass composite hull provides high durability levels and great looks • Includes Spektrum 2.4Ghz 2-stick radio system (DX2M and MR200 receiver) • Highly detailed scale appearance looks great on the water or display • Easy rig sails • Keel is molded into hull versus being separately mounted improving rigidity, stability and waterproofing • High-torque sail winch servo provides high powered, precision sail manipulation • Includes 4.8V NiMH Battery (PRB3478)	227.80 €
	<i>T52 Racing Yacht</i> 	• Includes all of the RC Gear with powerful drum winch sail control. • Everything is included in the kit for building and sailing your Radio Controlled T52 Model Yacht except for paint, varnish and batteries. • All of the parts are precut to an accuracy of 1000th of an inch. T • The T52 is remarkably fast and powerful. • It is very maneuverable and sails beautifully in winds from the very lightest breezes up to winds over 20 mph. • 52 inches long (1.32 m de comprimento), 6.5 feet tall overall.	322.73 €
	<i>T37 RC Racing Sloop</i> 	• 37 inches long (94 cm de comprimento), 5 feet high, total weight 4 lb., ballast casting 2 lb. • Both the kit and the finished boat come with all the Radio Control equipment included (except for batteries). • The hull is very light and strong, built from 1/8 inch mahogany plywood. • In the kit everything is included: precut pieces, epoxe resin, presewn sails, cast ballast. • All you need to finish the kit is paint and varnish, or just paint.	201.23 €

	CR-914 	• 36 inches long (91 cm de comprimento) • Two piece Aluminum mast and booms • 2.4GHz Radio System • Quarter scale winch servo • Electronic mounting board assembly • Dacron Rigging line • Velcro • Antenna Conduit • Electronics come with a limited one year warranty • Kit components covered for one year against manufactures defects • All you need to add is whatever color paint you choose and 12 AA batteries.	375.88 €
Sailboat	RC Laser 	• Hull and deck molded in one piece Polypropylene • Mast is tapered fiberglass composite, two piece • Full On Board electronics to include class approved servos for sail and steering. • Two channel AM Radio system (drum sail winch, steering servo installed) • Batteries not included - requires 8 or 12 AA batteries, either alkaline or rechargeable. • Boat is corrosion resistant and salt water safe. • Length Deck 1.05 meters • 5 channel, 2.4 ghz spread spectrum radio technology	430.19 €

Tabela A.1 - Levantamento dos diversos componentes existentes no mercado

Componente	Preço	Observações
Arduíno + Ardupilot	190.04€	Apenas suporta processamento de imagem muito básico mas já vem com alguns componentes necessários para o projeto, tais como, sensor de pressão, temperatura, acelerómetro e rotação angular.
Arduíno Mega 2.0	150.60€	Modelo bastante recente que contém giroscópio, acelerómetro, sensor de pressão e temperatura. Possui um <i>triple core</i> o que poderá permitir processamento de imagem, mas como é um produto recente, não existe informação suficiente.
PC-104	301.00€	Consegue realizar todas as funções que são necessárias mas o seu consumo energético é elevado o que pode ser um entrave para a escolha do mesmo.
Rabbit 3000	220.32€	É vocacionado especialmente para controlo, comunicação e conexão Ethernet mas também tem a capacidade de realizar processamento de imagem, apesar de essa informação ser reduzida.
FPGA	75.98€	Consegue realizar todas as funções que são necessárias e o consumo energético é menor que o PC-104.
Blackfino	222€ - 1000€	Possui uma capacidade de processamento bastante elevada e consegue realizar o pretendido. Consumo energético e processamento dependente da gama do produto.
ARM9	259,52€	Não tem tanta capacidade de processamento como o Blackfino mas consegue realizar todas as funções.

Tabela A.2 - Estudo de mercado dos vários microcontroladores