

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Barco Autónomo Movido a Energias Renováveis

Tiago Filipe Teixeira Guedes

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Nuno Alexandre Cruz

Co-orientador: José Carlos Alves

14 de Abril de 2015

A Dissertação intitulada

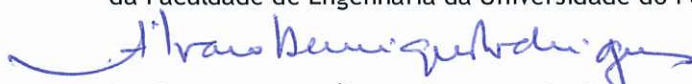
“Barco Autónomo Movido a Energias Renováveis”

foi aprovada em provas realizadas em 26-03-2015

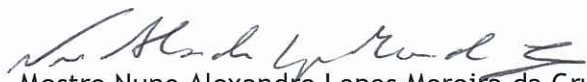
o júri



Presidente Professor Doutor Armando Jorge Miranda de Sousa
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Álvaro Henrique Rodrigues
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto



Mestre Nuno Alexandre Lopes Moreira da Cruz
Assistente 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 - Tiago Filipe Teixeira Guedes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Os veículos robóticos autónomos têm sido alvo de uma grande evolução tecnológica. Inúmeros projetos têm sido desenvolvidos no sentido de monitorizar a vida marinha, concebidos para realizar trajetórias previamente definidas sem intervenção humana. É realizado um estudo dos recursos utilizados nestes veículos como métodos de propulsão.

Nesta dissertação, foi desenvolvida uma vela rígida recorrendo ao catálogo NACA, tendo sido realizados testes experimentais recorrendo a um software que simula um túnel de vento computacional.

De seguida, foi realizado um simulador que teve em conta a modelização da dinâmica do veículo autónomo, no qual é avaliado o desempenho da embarcação com a inclusão da vela rígida. São também descritas diferentes estratégias de controlo de orientação da vela face ao vento.

Por último, é realizado um estudo em que se dá ênfase aos painéis solares flexíveis devido ao seu elevado rendimento e peso reduzido, os quais podem ser colocados na própria vela ou noutra zona da embarcação.

Abstract

The autonomous robotic vehicles have been subject of a major technological evolution. Several designs have been developed to monitor marine life, these are designed to perform pre-defined paths without human intervention.

A study regarding the resources used in these vehicles with propulsion methods.

In this dissertation a rigid sail using NACA catalog is developed. Experimental tests have been carried out using software that simulates a wind tunnel.

Then it is conducted a simulation taking into account the modeling of the dynamics of this autonomous vehicle, this time it is evaluated the boat's performance with the inclusion of the sail and it is also described different control strategies of wingsail's orientation against the wind.

Finally it is conducted a study with emphasis on flexible solar panels because of its high performance and low weight, which can be placed in the wingsail itself or another area of the vessel.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Nuno Cruz, meu orientador, por toda a ajuda que me deu neste projeto, desde a escolha do tema até à sua finalização, orientando-me em todo o processo e principalmente quando precisava de mais ajuda, em seguida agradeço ao meu coorientador Professor José Carlos Alves pelo apoio prestado.

Ao elemento do Departamento de Investigação de Mecânica Tiago Ramos, pela ajuda na área da Engenharia Mecânica

Agradeço também à minha namorada Cátia Bastos pelo apoio incansável demonstrado ao longo dos últimos anos, aos meus amigos que me ajudaram ao longo destes últimos cinco anos de vida académica, e a todos os meus amigos que ouviram as minhas dúvidas durante o desenvolvimento desta dissertação.

Finalmente, aos meus pais Rui Guedes e Fátima Guedes que me acompanharam e ajudaram ao longo de todos estes anos tornando possível este meu percurso académico.

Tiago Guedes

“There are many hypotheses in science which are wrong. This is perfectly acceptable, they are opening to find those that are right”

Carl Sagan

Conteúdo

Resumo	iii
Abstract	v
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Veículos Robóticos Autônomos	5
2.2 Referências	6
2.3 Velas em Veículos Autônomos	7
2.3.1 Velas Tradicionais VS Velas Rígidas (Wingsails)	7
2.3.2 Aerodinâmica das Velas	8
2.3.3 Velas Rígidas	9
2.3.4 Sistemas de Controlo Implementados em Velas para Veículos Autônomos	9
2.4 Sistemas Robóticos que Assentam na Captura de Energias Renováveis	10
2.4.1 Projeto desenvolvido pela Harbor Wing HWT X-1	10
2.4.2 Projeto Desenvolvido pela FEUP - Veleiro Fast	11
2.4.3 Projeto Ocean Aero - Submaran	12
2.4.4 Projeto Desenvolvido pela Saildrone - SD1	13
2.5 Competições de Embarcações Autônomas	14
2.6 Análise de Características Aerodinâmicas	15
3 Projeto da Vela Rígida	17
3.1 Escoamento e Número de Reynolds	17
3.2 Tipos de Velas	18
3.3 Teoria do Perfil Aerodinâmico NACA	18
3.4 Forças Existentes num Perfil Aerodinâmico	20
3.5 Dados Teóricos para os Coeficientes de Arrasto e Sustentação	21
3.6 Utilização das Velas Rígidas	22
4 Implementação de Vela Rígida	25
4.1 Desenvolvimento de Velas	25
4.1.1 Dimensionamento do Perfil NACA	25
4.1.2 Desenvolvimento do Perfil NACA em SolidWorks	26
4.2 Estudo da Vela	27
4.2.1 Validação do Software Utilizado	27

4.2.2	Resultados CFD	28
4.2.3	Interpolação Numérica para o CD e CL	31
4.2.4	Campo de Forças para Diferentes Direções do Vento	35
5	Integração da Vela na Embarcação	37
5.1	Integração da Vela na Embarcação	37
5.1.1	Representação Axial da Embarcação com a Adição da Vela Rígida	37
5.2	Modelização da Dinâmica do ASV	42
5.3	Simulador do Zarco ASV	44
5.3.1	Estratégias para Utilizar a Vela como Método de Propulsão	48
5.3.2	Desenvolvimento do Exemplo 1	48
6	Captura de Energia	53
6.1	Utilização de Painéis Fotovoltaico	53
6.2	Modos de Utilização de Painéis Fotovoltaicos	55
6.3	Controlador MPPT	56
7	Conclusão	57
7.1	Conclusões	57
7.2	Trabalho Futuro	58
	Referências	59

Lista de Figuras

1.1	Métodos para gerar energia.	2
1.2	Módulos do Projeto.	3
2.1	Ilustração da embarcação HWT X-1.	11
2.2	Fotografia da embarcação Fast.	12
2.3	Fotografia da embarcação Ocean aero.	13
2.4	Ilustração da embarcação Sd1.	14
3.1	Ilustração de uma vela rígida.	18
3.2	Características geométricas de um perfil aerodinâmico.	19
3.3	Definição do ângulo de ataque α do perfil aerodinâmico.	19
3.4	Forças atuantes no perfil aerodinâmico.	20
3.5	Relações Trigonométricas e Decomposição das Forças FD e FL em Força de Avanço,FX , e de Deriva,FY.	20
3.6	Curvas teóricas do coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque.	22
3.7	Curvas teóricas do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque.	22
3.8	Uma vela com $\alpha = 60^\circ$	23
3.9	Duas velas distanciadas de 40 cm.	23
4.1	Perfil NACA0015.	25
4.2	Perfil NACA0015.	26
4.3	Montagem da vela.	26
4.4	Embarcação Autônoma Zarco.	27
4.5	Curva teórica do coeficiente de arrasto de um cilindro.	27
4.6	Interpolação para [0;180] graus dos coeficientes de Arrasto em função do ângulo de ataque.	32
4.7	Interpolação para [0;180] graus dos coeficientes de Sustentação em função do ângulo de ataque.	32
4.8	Interpolação para [-180;180] graus dos coeficientes de Arrasto em função do ângulo de ataque.	33
4.9	Interpolação para [-180;180] graus dos coeficientes de Sustentação em função do ângulo de ataque.	33
4.10	Interpolação para [20;35] graus dos coeficientes de Sustentação em função dos ângulos de ataque críticos.	34
4.11	Interpolação para [-180;180] graus dos coeficientes de Sustentação em função dos ângulos de ataque usando interp1(matlab).	34
4.12	Campo de forças da Força resultante para o vento com uma direção de -90 graus.	35
5.1	Representação do ângulo de orientação da embarcação face ao norte do mundo φ	37

5.2	Representação do ângulo da vela β	38
5.3	Representação do ângulo do vento β	38
5.4	Representação do ângulo de ataque α	39
5.5	Exemplo 1 para análise detalhada da direção da Força Resultante da embarcação com ângulo de orientação nulo.	39
5.6	Exemplo 2 para análise detalhada da direção da Força Resultante da embarcação com ângulo de orientação positivo e ângulo de ataque positivo.	40
5.7	Exemplo 3 para análise detalhada da direção da Força Resultante da embarcação com ângulo de orientação positivo e ângulo de ataque negativo.	42
5.8	Modelo em Simulink do Simulador.	45
5.9	Coordenadas do veículo no referencial do barco e no referencial do mundo.	45
5.10	Módulo de conversão de vento real em vento aparente.	46
5.11	Módulos de pesquisa e conversão de forças das velas em forças de atuação no veículo.	46
5.12	Posição do veículo no plano Inercial com a vela fixa a 90 graus.	47
5.13	Gráfico com a vela fixa a 90 graus com a direção do vento observamos a evolução da dinâmica da embarcação	47
5.14	Posição do veículo para o ângulo objetivo de 80 graus.	49
5.15	Primeiro exemplo em que obtemos o ângulo de ataque da vela, ângulo da vela, e ângulo de orientação da embarcação face a norte do referencial Inercial.	49
5.16	Posição do veículo para o ângulo objetivo de 130 graus.	50
5.17	Segundo exemplo em que obtemos o ângulo de ataque da vela, ângulo da vela, e ângulo de orientação da embarcação face a norte do referencial inercial.	50
5.18	Posição do veículo para o ângulo objetivo de -145 graus.	51
5.19	Terceiro exemplo em que obtemos o ângulo de ataque da vela, ângulo da vela, e ângulo de orientação da embarcação face a norte do referencial inercial.	51
6.1	Ilustração de um Painel Solar Flexível	54
6.2	Curva característica de um painel fotovoltaico	55
6.3	Painéis ligados em série e diretamente às baterias	55
6.4	Painéis ligados em série às baterias e aos motores através de um switch	56

Lista de Tabelas

2.1	Notação Utilizada.	6
4.1	Resultados da simulação CFD a 3 m/s.	29
4.2	Resultados da simulação CFD a 5 m/s.	30
4.3	Resultados da simulação CFD a 10 m/s.	31
5.1	Parâmetros do Modelo da Dinâmica.	44

Abreviaturas e Símbolos

ASV	<i>Autonomous Surface Vehicles</i>
AWA	<i>Aparent Wind Angle</i>
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
FR	Força Resultante
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IRSC	International Robotic Sailing Conference
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NED	(North, East, Down)
PI	<i>Proportional-integral</i>
PID	<i>Proportional-integral-derivative</i>
S	área da superfície da asa
WRSC	Word Robotic Sailing Championship
m	Fator de idealidade do díodo
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura absoluta da célula
α	Ângulo de ataque
β	Ângulo do Vento Aparente
φ	Ângulo de desvio face ao norte do referencial da embarcação
ρ	Massa Volúmica
μ	Viscosidade dinâmica do ar
C_L	Coeficiente de sustentação
C_D	Coeficiente de arrasto
$\bar{c}$	Corda média aerodinâmica do perfil
F_L	Força de sustentação
F_D	Força de arrasto
V_{wind}	Velocidade do vento
I_{pv}	Corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa
I_d	Corrente que circula através do díodo
Re	Numero de Reynolds
I_0	Corrente inversa de saturação do díodo
V_D	Tensão aplicada aos terminais do díodo
V_T	Potencial térmico
I	Corrente produzida pela célula fotovoltaica

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O veículo autónomo de superfície, ASV Zarco, assim batizado em homenagem ao navegador Português João Gonçalves Zarco, é uma embarcação de pequena dimensão, ao estilo catamaran, concebido para operações a desempenhar em águas com pouca agitação. Este veículo, com 2 metros de comprimento e 1 metro de largura, é alimentado por um conjunto de baterias que lhe conferem uma autonomia que pode chegar até às três horas, atuado por um conjunto de dois motores colocados na sua popa, atingindo velocidades na ordem dos 2 m/s.

Este veículo pode ser autonomamente controlado, seguindo rotas predefinidas, ou, em alternativa, ser controlado remotamente, através de uma ligação WiFi com uma estação terra. Para o controlo autónomo, o veículo está dotado de sensores de navegação necessários, onde se incluem um recetor GPS de elevada precisão.

A presente dissertação pretende alterar o ASV Zarco ¹ de forma a torná-lo híbrido, de maneira a que este possa operar em longos períodos de tempo, utilizando para isso as energias renováveis. Esta operação assenta na captura de energia do ambiente, quer para atuar diretamente na propulsão, utilizando velas rígidas; quer para acumular energia em baterias recarregáveis, permitindo o fornecimento elétrico dos diferentes subsistemas a bordo.

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.

Uma embarcação autónoma, que utilize a energia do vento para lhe fornecer propulsão e energia solar para gerar energia elétrica para todos os subsistemas, tornar-se-á, teoricamente, autossuficiente[1].

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma embarcação totalmente autónoma movida a energias renováveis. Uma das finalidades deste projeto é a adição de uma ou mais

¹http://oceansys.fe.up/tech_zarco.php

velas à embarcação, atribuindo-lhe assim um modo de propulsão alternativo.

O potencial da sua utilização está diretamente relacionado com a velocidade e direção do vento, bem como a trajetória que se deseja seguir. Dessa forma, salvo exceções, as velas não serão um método de propulsão que irá substituir os motores, mas sim uma alternativa para diminuir a sua utilização. Para complementar a embarcação pretende-se adicionar outra forma de energia, nomeadamente a inclusão de painéis solares, com a intenção de aumentar a autonomia do veículo autónomo, fornecendo-lhe energia para as baterias. Na figura 1.1, é possível observar uma descrição das etapas na inclusão dos novos métodos de gerar energia.

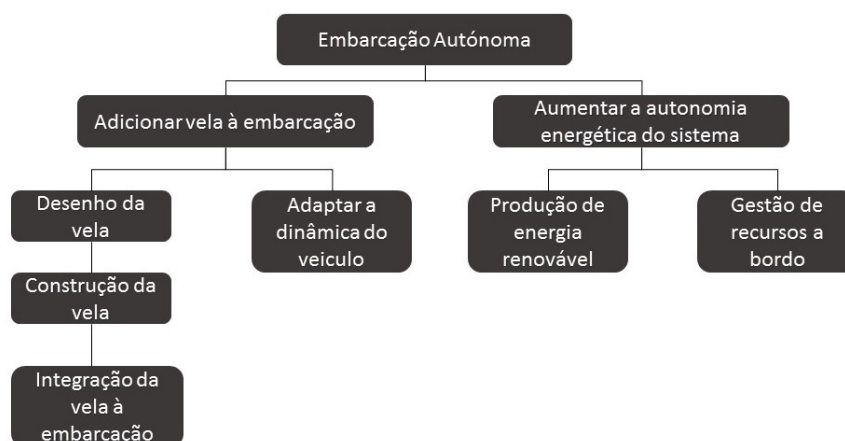


Figura 1.1: Métodos para gerar energia.

Como referido anteriormente a embarcação autónoma não era autossuficiente, continha duas baterias para fornecer energia aos motores e aos seus diversos subsistemas, funcionando apenas enquanto existisse energia nas baterias. Com este projeto pretende-se aumentar a autonomia energética do veículo autónomo. Optou-se por lhe adicionar um painel fotovoltaico para aproveitar a energia solar com a finalidade de recarregar as baterias.

O segundo objetivo é a inclusão de velas no veículo autónomo para reduzir a utilização dos motores e, deste modo, obter outro método de propulsão. Na figura 1.2 é possível observar uma descrição modular do projeto Barco Autónomo Movido a Energias Renováveis.

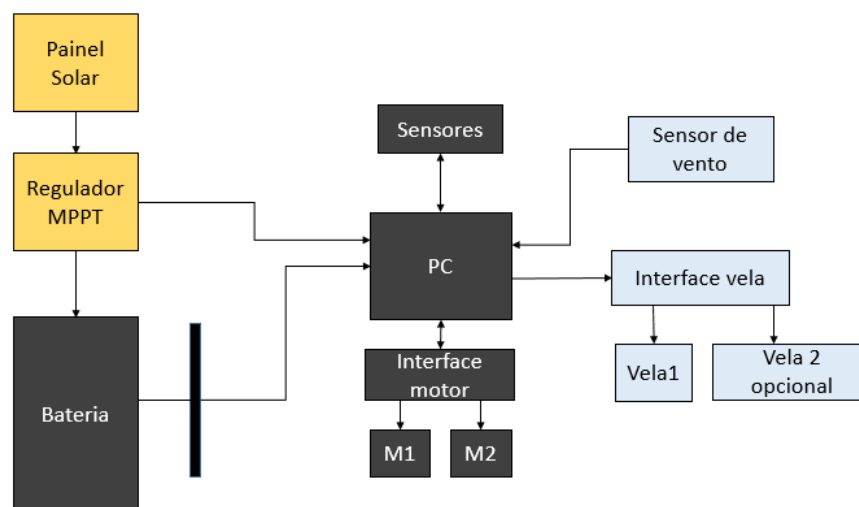


Figura 1.2: Módulos do Projeto.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. O primeiro engloba a introdução, em que se apresentam a motivação, objetivos e estrutura.

No segundo capítulo são discutidos projetos em desenvolvimento na área dos veículos robóticos autônomos, bem como os tipos de velas utilizadas nas embarcações autônomas que aplicam a vela como método de propulsão, assim como sistemas de controlo implementados em velas de barcos autônomos.

Seguidamente, é introduzido o projeto da vela rígida no qual são analisadas as teorias em torno dos perfis aerodinâmicos em forma de asas de avião.

O capítulo quatro pretende demonstrar a implementação da vela rígida. Para tal, apresenta-se o dimensionamento do perfil, a sua implementação no software Solidworks, bem como análises experimentais no software Simulation CFD que simula um túnel de vento.

No capítulo quinto, denominado integração da vela na embarcação, é feita uma abordagem relativa à notação utilizada. De seguida é realizada a modelização da embarcação para criar um simulador que pretende avaliar o desempenho da embarcação com a integração da vela. Finalmente, são apresentadas alternativas de utilização da vela como método de propulsão.

Posteriormente, esboça-se a captura de energia solar, em que é analisada a possibilidade de inserir painéis solares flexíveis na própria vela da embarcação, tendo em conta as restrições de espaço para a inclusão do painel solar.

Por último, no capítulo sete, são apresentadas algumas conclusões gerais sobre o trabalho desenvolvido e, seguidamente, sugeridas algumas indicações de projetos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo será realizada uma abordagem histórica de embarcações movidas autonomamente, também será feito um levantamento das competições e conferências existentes para embarcações movidas à vela, e embarcações movidas autonomamente.

2.1 Veículos Robóticos Autônomos

Ao longo dos últimos 10 anos tem-se assistido a um interesse crescente pelo uso de veículos robóticos para o estudo e exploração dos oceanos. A utilização destes veículos permitirá, no futuro, libertar os operadores humanos de tarefas complicadas e pouco acessíveis, tais como alcançar zonas até agora inalcançáveis, e uma capacidade de operar de forma contínua, sem paragens necessária para reabastecimento das embarcações, permitirá ainda desenvolver sistemas sofisticados para aquisição e transmissão de dados marinhos, assim como para controlo de trajetórias eficientes.

Num mundo de grande evolução tecnológica e de transformações do meio-ambiente, inúmeros projetos têm sido implementados, no sentido de monitorizar as condições climatéricas visando o acompanhamento destas transformações e, principalmente, a antecipação de catástrofes naturais.

Os veículos autônomos aquáticos são projetados para executar tarefas de planeamento de trajetórias capazes de posteriormente serem seguidas sem assistência humana, tendo capacidade para decidir em diversas adversidades. Primeiramente, calcula uma rota baseada em dados meteorológicos através da captação da velocidade e direção do vento; ser capaz de decidir quais os recursos a utilizar para cada instante, tendo a embarcação ao seu dispor diferentes tipos de recursos; e diferentes modos de operar consoante o tipo de missão em questão.

Posteriormente, apresentaremos alguns projetos que se encontram em curso onde é utilizado o vento como fonte de propulsão, com a utilização de velas não rígidas, as tradicionais de pano, ou, mais recentemente, utilizando velas rígidas com formatos de asa de avião.

2.2 Referências

A existência de um modelo para qualquer sistema que se pretende controlar é crucial, já que permite um conhecimento profundo do processo a ser controlado, bem como das suas limitações, permitindo uma avaliação mais rigorosa dos desempenhos do sistema.

No que se refere a veículos marinhos, existem vários estudos relativamente à modelização de barcos autónomos. Estes estudos, em grande parte desenvolvidos por escolas escandinavas, têm por base o grande desenvolvimento dos países do norte da Europa neste ramo da indústria.

É bastante comum considerar um veículo marinho como um corpo rígido, admitindo que não se criam forças entre os seus elementos individuais.

Por outro lado, desprezando forças que possam existir provocadas pelo movimento relativo da terra em relação a um sistema estelar, é então possível admitir a existência de um referencial inercial na terra [2].

Em robótica aquática é comum usar dois referenciais distintos para descrever o movimento dos veículos e derivar a sua dinâmica. Em primeiro lugar define-se um referencial inercial, desprezando-se para isso acelerações. Este referencial deve usar um sistema de coordenadas do tipo NED (North - East - Down) significando isto que o eixo ordenadas aponta para Norte, o eixo das abcissas aponta para Este e o eixo das alturas/cotas aponta para baixo. Deve-se ainda definir um referencial móvel, com origem coincidente com o centro de massa do veículo, com as abcissas orientadas segundo o eixo longitudinal da embarcação, da ré para a proa, sendo as ordenadas segundo o eixo transversal, com direção para estibordo, e as cotas, o eixo normal, orientado do topo para o fundo do veículo [3].

Enquanto o referencial inercial é utilizado para aplicações de localização e orientação, o referencial móvel, solidário com o veículo é útil para derivar a sua dinâmica e as suas equações do movimento, já que permite tirar partido de propriedades geométricas do próprio veículo. Será importante nesta altura também referir a notação que é usada normalmente em aplicações de robótica, sendo também aquela que será aqui utilizada. Na tabela 2.1 podemos observar as relações entre as forças e momentos que atuam sobre cada um dos eixos do referencial [2].

Tabela 2.1: Notação Utilizada.

DOF		Forças e Momentos	Velocidades linear e angular	Posição e Ângulos de Euler
1	trans. na direção x (surge)	X	u	x
2	trans. na direção y (sway)	Y	v	y
3	trans. na direção z (heave)	Z	w	z
4	rot. em torno de x (roll)	K	p	ϕ
5	rot em torno de y (pitch)	M	q	θ
6	rot. em torno de z (yaw)	N	r	φ

Para descrever completamente o movimento de um corpo é necessário determinar a sua posição, e a sua orientação relativamente a um referencial. Dessa forma qualquer modelo que pretenda

representar precisamente o movimento de um corpo terá 6 graus de liberdade, 3 relativos à posição e movimentos de translação, e os restantes 3 relativos à orientação e rotação do corpo[2].

2.3 Velas em Veículos Autônomos

2.3.1 Velas Tradicionais VS Velas Rígidas (Wingsails)

Esta dissertação tem como objetivo principal a adição de um método de propulsão eólico complementar aos propulsores elétricos. O método pensado foi o de incluir uma vela rígida simétrica do tipo asa de avião.

Assim, apresentamos algumas vantagens e desvantagens da utilização de velas rígidas, e das velas de pano tradicionais.

O autor Gabriel Hugh Elkaim defende que as velas rígidas apresentam vantagens que suplantam as vantagens apresentadas pelas velas de pano tradicionais[4].

Velas de Tecido Flexíveis

Vantagens:

- Conseguem ter diferentes propriedades e é possível variar a sua área de projeção face ao vento;
- Podem ser convenientemente reduzidas e arrumadas;
- Existem formas de velejar contra o vento;
- As velas podem ser reparadas e modificadas facilmente;
- A sua forma e curvatura podem ser alteradas por variação da tensão imposta e pelo controlo das linhas de libertação.

Desvantagens:

- Só podem ser assimétricas;
- São difíceis de controlar autonomamente;
- São propensas a rasgar, quando são mal manejadas;
- Perdem a sua forma quando não são mantidas com um ângulo de ataque suficiente, levando a uma consequente perda de eficiência;
- Exigem longarinas estruturais rígidas para manter sua forma, aumentando o arrasto;
- Tendem a torcer o que leva a diferentes ângulos de ataque em pontos distintos na vela, reduzindo a eficiência;

- São bastante instáveis.

Do ponto de vista da concepção de uma vela robótica existem boas razões para utilizar uma vela rígida (Wingsail).

Velas Rígidas

Vantagens:

- Pode ser simétricas ou assimétricas;
- Mantêm a eficiência mesmo a navegar próximo da velocidade do vento;
- Têm melhores desempenhos nos coeficientes de sustentação (sustentação);
- São configuradas para terem um eixo de rotação de 360 graus;
- Pode-se utilizar uma vela rígida secundária com tamanho reduzido para alinhar a direção;
- É uma estrutura única e não requer nenhuma estrutura adicional para apoio.

Desvantagens:

- É difícil concepção;
- A sua construção é complexa, pois têm que ser fortes, leves e rotativas;
- São impossíveis de fechar quando navegamos contra o vento;

Em síntese reparamos que os ganhos na confiabilidade e eficiência superam as desvantagens. Assim concluímos que a utilização de velas rígidas é uma solução com uma melhor performance em relação às velas de pano tradicionais, quando o objetivo é controlar autonomamente o ângulo da vela. A maior desvantagem da utilização de uma vela rígida é quando nos deparamos com a situação de velejar contra o vento, sendo que existe uma solução que é alinhar a vela com a direção do vento de forma a minimizar a força de arrasto provocada.

2.3.2 Aerodinâmica das Velas

Velas rígidas são dispositivos para gerar forças aerodinâmicas no plano horizontal. Na aviação, esta força é conhecida como a força de elevação e o nome do gerador da elevação aerodinâmica é a asa. Todos os aerofólios trabalham mediante o mesmo princípio, o chamado princípio de Bernoulli.

O princípio de Bernoulli afirma que a pressão depende da velocidade de um fluido - quanto menor for a velocidade mais elevada a pressão, e vice-versa.

Quando uma asa é ajustada abaixo de um pequeno ângulo de ataque, o fluxo de ar acima da asa acelera drasticamente em relação ao fluxo abaixo da asa, criando uma zona de aspiração no lado superior e uma zona de pressão no lado inferior.

Esta diferença de pressão é o que mantém todos os elementos voadores no ar. O mesmo processo é desenvolvido quando é utilizada uma vela do tipo wingsail. Neste caso é definido um ângulo de ataque adequado de incidência do vento [5].

2.3.3 Velas Rígidas

As asas são projetadas de acordo com a ciência da aerodinâmica, e existem inúmeros catálogos, nomeadamente o NACA, Goetingen, RAF, Wortmann, EPPLER, Quabeck, Clark, com centenas de sessões que realizam asas eficientes, diferenciadas pela curvatura, espessura máxima, posição de espessura máxima, raio de ponta e os coeficientes de sustentação e arrasto.

Quanto se utilizam velas em formato de asas avião, é normal que tenham um coeficiente de forma (relação entre a envergadura e a corda média da asa) 30:1, o que se traduz numa redução significativa do arrasto induzido.

Alguns especialistas afirmam que a força motriz de uma vela rígida é duas vezes maior do que a de uma vela convencional do mesmo tamanho, com duas vezes menor força de inclinação[6].

A Americas cup é a mais famosa corrida de embarcações movidas a vela, e nela ficou provado que as velas rígidas têm um desempenho melhor relativamente as velas tradicionais.

Os catamarans AC72 têm velas rígidas que são do mesmo tamanho que a asa de um jato Boeing 747 avião de passageiros Jumbo. Com 2.800 m^2 , estas grandes velas capturam uma enorme quantidade de vento, que se moldam da mesma forma que uma asa de um avião, sendo o objetivo é tirar partido do princípio de Bernoulli, que a diferença de pressão em ambos os lados da vela crie elevação, ou neste caso, movimento para a frente através da água.

As velas rígidas funcionam porque o ar atravessa mais rápido na parte extradorso da asa do que na parte intradorso da asa. Essa diferença de velocidade do ar cria baixa pressão no lado da vela pelo qual o vento escoar, e de alta pressão no lado de entrada da vela, essencialmente, levantando a vela para a frente como uma asa de avião gera força. Ao ajustar o ângulo entre os dois elementos da asa, os marinheiros conseguem controlar a força gerada. No entanto, se os marinheiros errarem no ângulo de ataque, podem perder o controlo e a vela perde força, criando efeitos indesejados.

Para controlar a vela existem uma série de linhas e cabos ligados às asas para permitir à tripulação alterar o ângulo de curvatura, enquanto que os flaps são controlados utilizando cabos hidráulicos. As tripulações têm dispositivos eletrónicos para lhes fornecer a atualização dos sensores, nomeadamente, sensores de vento, com o intuito de manter constante a forma ideal, de modo a maximizar a força gerada pela vela[7].

2.3.4 Sistemas de Controlo Implementados em Velas para Veículos Autônomos

Da leitura de diversos artigos relativos a sistemas de controlo implementados para controlar velas, um dos métodos encontrados foi o de controlar o ângulo da vela de forma a obter a máxima

força de sustentação, ou seja, controlar o ângulo de ataque da vela para obter sempre o máximo coeficiente de sustentação. A posição da vela é obtida a partir do ângulo do vento aparente (ângulo entre a direção do vento e o veículo marinho), sendo esse ângulo controlado através da curva de sustentação para o perfil de vela utilizado.

Para controlar a posição o controlador mantém a posição através do comando dado pela bússola do veículo. Utiliza um controlador proporcional integral (PI) que converte a posição em comandos de entrada no modelo do veículo. Utiliza também um PID simples de forma a permitir uma sintonização mais rápida do controlador em tempo real. Este tem um interruptor para alterar entre os modos de funcionamento pilot heading e waypoint tracking.

O controlador de waypoint tracking mantém uma trajetória calculada usando dois pontos, o inicial e o final. O curso a ser seguido é calculado como um vetor entre os waypoints que são dois pontos no espaço sendo um o inicial e outro o final. O erro é calculado como a distância entre a posição geométrica do barco e o vetor de posição. O desvio lateral é traduzido como um erro de posição e é controlado por um controlador PI. O percurso é corrigido e é passado para o controlador heading para a embarcação seguir o rumo desejado[8].

2.4 Sistemas Robóticos que Assentam na Captura de Energias Renováveis

2.4.1 Projeto desenvolvido pela Harbor Wing HWT X-1

Harbor Wing Technologies, desenvolve e desenha embarcações não tripuladas, controladas autonomamente, utilizando como fonte de energia o vento, a propulsão é controlada em função da velocidade desejada, e foi concebida de forma a obter eficiência em todos os pontos da vela, suportando ventos aparentes até 40 nós, é capaz de realizar manobras sem desvios perceptíveis, detém também um GPS o que faz com que seja possível ir para um ponto desejado sem dificuldades.

Recentemente a empresa Harbor Wing Technologies desenvolveu um catamaran HWT X-1 que é baseado na transformação de um navio à vela convencional destinado à vigilância marítima com uma plataforma de sensores em que pode operar tanto em águas litorais como em águas desprotegidas. O novo sistema de propulsão utiliza uma vela vertical em forma de asa suspensa em rolamentos. Demonstrou um desempenho excepcional, em progresso contra o vento em 20-25 graus em relação ao vento real. Além disso, as velocidades de 60% da velocidade do vento real são obtidas rotineiramente sob velocidades de vento 12-25 nós[9].



Figura 2.1: Ilustração da embarcação HWT X-1.

2.4.2 Projeto Desenvolvido pela FEUP - Veleiro Fast

O FAST foi desenvolvido no âmbito de um projeto extra-curricular de estudantes de Engenharia Eletrotécnica e Computadores da FEUP, iniciado em 2007. Mais recentemente, o veleiro tem sido trabalhado no âmbito do programa da Unidade de Robótica e Sistemas Inteligentes (ROBIS) do INESC TEC. O caráter multidisciplinar deste projeto tem contribuído de forma muito positiva para o envolvimento de estudantes do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da FEUP, que têm colaborado ativamente no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos diversos sistemas que o veleiro contém. No seguimento desta atividade, foi recentemente desenvolvido o novo veleiro autónomo que participou recentemente no campeonato mundial de veleiros robóticos.

O FAST com cerca de 3 metros de comprimento, foi desenvolvido através da adaptação de um veleiro comercial de rádio-comando, tem capacidade para velejar de forma completamente autónoma e com um consumo reduzido de energia. Os veleiros autónomos constituem plataformas não tripuladas capazes de cumprir missões programadas e de reagir a variadas condições ambientais, podendo transportar um leque variado de sensores e permitindo assegurar uma presença no oceano durante longos períodos de tempo. A atividade recente da equipa FEUP/INESC TEC tem contado com a colaboração da Marinha Portuguesa através do seu Centro de Investigação Naval (CINAV) e da Escola Naval, que têm também em curso projetos neste domínio[10].



Figura 2.2: Fotografia da embarcação Fast.

2.4.3 Projeto Ocean Aero - Submaran

Oceano Aero representa a próxima geração de sistemas não-tripulados para o mar. Esta empresa desenvolveu um veículo robótico autônomo capaz de navegar tanto à superfície como submerso na água, apresenta-se como uma solução altamente inovadora e ao mesmo tempo que pode mudar a construção de sistemas robóticos autônomos. Alimentado apenas por energia eólica e solar, quando está à superfície funciona como uma embarcação autônoma, quando está submerso, funciona como um submarino autônomo. Tem autonomia para estar no mar em trabalho de pesquisa vários meses, podendo ser configurado por terra, mar e ar, foi personalizado com uma plataforma composta por painéis solares e velas rígidas em forma de asa de avião. Têm uma grande variedade de configurações, está equipado com sistemas de sensores e de observação para fornecer informações a organizações de ciência, dados estes possíveis de ser monitorizados em tempo real com recurso a uma conexão à Internet. Este veículo quando está a operar à superfície funciona como um barco à vela auxiliado por propulsores elétricos, estabiliza-se autonomamente mediante a ondulação marítima. Quando utilizado debaixo de água o veículo autônomo faz com que a vela dobre para baixo e a quilha dobre para cima, ficando o veículo com forma de submarino, e este mergulha para os 75 pés, e assim altera a sua flutuabilidade de planador para poder submergir como um submarino [11].



Figura 2.3: Fotografia da embarcação Ocean aero.

2.4.4 Projeto Desenvolvido pela Saildrone - SD1

Os oceanos cobrem 71% da superfície terrestre. No entanto, são o recurso menos compreendido e mais vulnerável que temos no planeta. Para realizar análises sobre o oceano de forma a compreendê-lo, a empresa Saildrone desenvolveu o SD1, que consiste num veleiro drone não tripulado. O objetivo é velejar sozinho em redor do mundo, operado remotamente, utilizando sistemas de localização GPS, e utilizando como fontes de energia solar, eólica e hidroelétrica. Em 1 de Outubro de 2013, o barco não tripulado partiu de San Francisco com destino ao Hawaii; 34 dias depois, em 4 de Novembro, o SD1 completou com sucesso a navegação autónoma de 3379,6 km, chegando a Kaneohe, Hawaii. O SD1 tem 5,8 metros de comprimento e 2 m de largura; este barco autónomo é alimentado por uma vela de carbono tipo asa de avião que se estende 6 metros acima da água e tem uma capacidade de carga de 100 kg.

Hoje, Jenkins fundador da empresa Saildrone vê o SD1 como uma plataforma de pesquisa flutuante, capaz de carregar instrumentos e recursos para recolher amostras oceanográficas, e da vida marinha para pesquisas académicas e outras levadas a cabo pela National Oceanic and Atmospheric Administration. O SD1 possui sensores e outros instrumentos que recolhem informações de satélites bidirecionais que podem enviar e receber informações da Saildrone. Os dados recolhidos pelo drone também podem ser monitorizados em dispositivos móveis por meio de uma aplicação criada pela equipa de Jenkins. As missões levadas a cabo pelo SD1 podem ser modificadas em tempo real por um operador em terra, por exemplo, no caso de os dados de telemetria mostrarem tendências interessantes que requeiram investigações mais detalhadas. Relativamente ao casco do SD1 está equipado com três flutuadores e cinco unidades de geração de energia; duas estão posicionadas ao nível do mar e as restantes três estão submersas. Juntamente com os sistemas de conversão de energia hidroelétrica, eólica e solar, o SD1 está equipado com uma tecnologia solar, em que os painéis podem ser posicionados em diversos locais dentro da embarcação, bem como comporta a possibilidade de implementar este sistema diretamente na vela.[12].



Figura 2.4: Ilustração da embarcação Sd1.

2.5 Competições de Embarcações Autônomas

Os veículos movidos por velas robóticas poderão contribuir para a monitorização de dados ambientais, ecológicos, meteorológicos, hidrográficos e oceanográficos. Estes dispositivos podem também ser utilizados na monitorização de tráfego, vigilância de fronteiras, segurança, assistência e salvamento.

A dependência de mudança de ventos e as condições do mar representam um desafio considerável para o cumprimento de rotas de curtos e longos períodos de tempo. A construção de uma embarcação autônoma à vela representa um desafio verdadeiramente complexo e multidisciplinar para os designers de barcos, arquitetos navais, engenheiros eletrotécnicos e cientistas da computação.

A pesquisa em barcos à vela totalmente autônomos foi recentemente estimulada pela ideia da Microtransat. Desde então, um número crescente de grupos de pesquisa em redor do mundo tenta ensinar aos seus barcos a complexa tarefa de velejar. O desafio foi originalmente concebido em 2005 pelo Dr. Mark Neal, da Universidade de Aberystwyth e Dr. Yves Briere do ISAE. Foi feita a primeira tentativa em 11 de Setembro de 2010 por Pinta da Universidade de Aberystwyth.

O desafio Microtransat é uma competição que visa projetar e construir um barco robótico autônomo com menos de 4 metros de comprimento, que terá de ser capaz de navegar de forma autônoma para qualquer destino sem controlo humano ou intervenção, bem como reportar a sua posição aos organizadores da competição pelo menos uma vez a cada 6 horas de percurso [13].

Os melhores barcos autônomos do mundo competem a cada ano, a fim de ganhar o campeonato mundial de vela robótica. Este evento anual coincide com uma conferência científica Robotic Sailing Championships (WRSC) que oferece um local ideal para discutir a ampla gama de problemas científicos envolvidos no projeto e desenvolvimento de embarcações autônomas.

Os trabalhos mostram o foco atual da pesquisa na comunidade de vela robótica. Nos últimos anos, a organização do tráfego e algoritmos de controlo inteligente dominou a discussão científica[3]. O International Robotic Sailing Conference (IRSC) fornece aos pesquisadores a oportunidade de apresentar e trocar ideias sobre o seu trabalho em robótica marinha de superfície autônoma [14].

2.6 Análise de Características Aerodinâmicas

Existem várias formas para analisar as características aerodinâmicas de uma vela. Um método clássico utilizado é a experimentação em túnel de vento. Outro método é a análise teórica dos perfis alares e a teoria do fluido perfeito. Porém existe um terceiro método, o CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

O CFD é uma ferramenta numérica poderosa que permite uma comparação entre os resultados teóricos e os práticos, para análise de velas finitas e permite obter resultados para diferentes configurações de forma, com diferentes velocidades para o vento, sem recorrer a dispendiosos túneis de vento.

Na presente dissertação é utilizado o software informático Autodesk Simulation CFD 2015 para analisar as características aerodinâmicas da vela rígida. Este software utiliza uma discretização através de elementos finitos para resolver as equações diferenciais que regem a dinâmica de fluidos.

Os CFD baseiam-se em três princípios fundamentais: a massa de um sistema é conservada, a segunda lei de Newton, $F=ma$ e que a energia de um sistema é conservada[15].

Capítulo 3

Projeto da Vela Rígida

Neste capítulo é feita uma abordagem teórica relativa aos tipos de velas rígidas existentes. Também é realizado um estudo dos fundamentos de aerodinâmica em torno de uma vela rígida finita, em que analisamos dados experimentais fornecidos pelo Sandia National Labs.

3.1 Escoamento e Número de Reynolds

O escoamento em torno de uma vela, quer seja ela convencional ou rígida, é um escoamento tridimensional, sem superfície livre, onde é assumida a estacionaridade do escoamento, e que a velocidade do escoamento não perturbado é constante. A propriedade de estacionaridade do escoamento, segundo a visão Euleriana, indica que a velocidade das partículas num dado ponto do espaço se mantém constante ao longo do tempo, isto é, a variação temporal da velocidade num determinado ponto do espaço é nula. Além de ser um escoamento constante, assume-se que irá ser um escoamento, à partida, turbulento.

Neste tipo de escoamento o parâmetro adimensional que o caracteriza é o número de Reynolds. Este número relaciona a ordem de grandeza das forças inerciais com a ordem de grandeza das forças viscosas e é definido em 3.1, onde v é a magnitude da velocidade característica, coincidente no caso da vela rígida com a velocidade do vento que incide sobre a asa ou a velocidade do escoamento não perturbado, $\bar{c}$ é o comprimento característico, que na análise aerodinâmica de velas e de asas, coincide com o comprimento da corda do perfil utilizado, e finalmente μ é a viscosidade dinâmica do fluido. O número de Reynolds é de extrema importância; deve-se garantir que o escoamento de validação possua o mesmo número de Reynolds que o escoamento real em torno da vela, pois o referido número está intimamente relacionado com o regime de escoamento na camada limite, laminar ou turbulento, em torno da vela e, consequentemente, para validar o modelo de turbulência que permita resolver o regime de escoamento associado ao número de Reynolds do escoamento real em torno da vela rígida, é imperativo que este número seja o mesmo no escoamento de validação [16].

$$R_e = \frac{\rho v \bar{c}}{\mu} \quad (3.1)$$

3.2 Tipos de Velas

Como já referimos existem vários tipos de velas, as velas rígidas com formato de asa de avião, baseiam-se na estrutura adotada na construção de uma asa de avião, esta geometria fornece uma maior força de sustentação, e uma melhor relação sustentação-arrasto, em relação às velas tradicionais. Ao longo deste trabalho será utilizado o catálogo NACA, os seus perfis alares foram desenvolvidos a partir de 1933 pelo National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), hoje em dia denominado National Aeronautics and Space Administration (NASA).

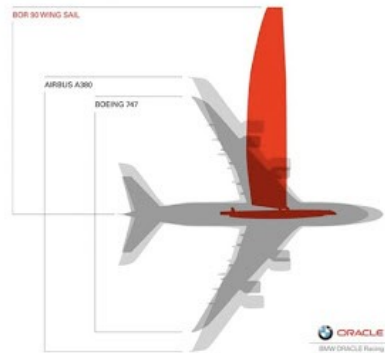


Figura 3.1: Ilustração de uma vela rígida.

3.3 Teoria do Perfil Aerodinâmico NACA

Um perfil aerodinâmico é a superfície projetada com a finalidade de se obter uma reação aerodinâmica, a partir do escoamento do fluido em seu redor. Optou-se pela utilização do perfil NACA pelo facto de ser um catálogo amplamente difundido e utilizado pela comunidade científica e industrial. O catálogo NACA utilizado é composto por 4 dígitos, sendo designado NACA MPXX, onde "M" designa a máxima curvatura em percentagem, o "P" a posição da máxima curvatura dividida por dez e os "XX" a espessura máxima em percentagem. Todas essas medidas são relativas ao comprimento total da corda máxima.

A linha de arqueamento média representa a linha que define o ponto médio entre todos os pontos que formam as superfícies superiores e inferiores do perfil.

A linha da corda representa a linha reta que une o bordo de ataque e o bordo de fuga.

A espessura representa a altura do perfil medida perpendicularmente à linha da corda.

A razão entre a máxima espessura do perfil e o comprimento da corda é designada por razão de espessura do perfil.

O arqueamento representa a máxima distância que existe entre a linha de arqueamento média e a linha da corda do perfil [17] [18].

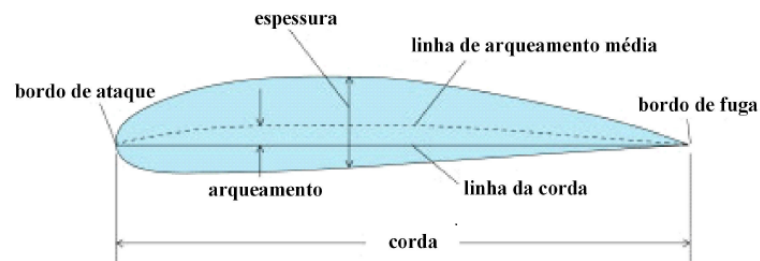


Figura 3.2: Características geométricas de um perfil aerodinâmico.

O ângulo de ataque α é o termo utilizado pela aerodinâmica para definir o ângulo formado entre a linha de corda do perfil e o vento aparente.

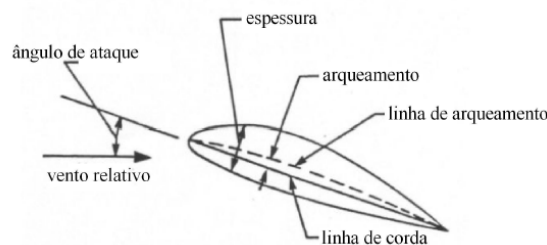


Figura 3.3: Definição do ângulo de ataque α do perfil aerodinâmico.

Todo o perfil possui características aerodinâmicas próprias, que dependem exclusivamente da forma geométrica do perfil, das suas dimensões, do arqueamento, da sua espessura e do ângulo de ataque. As principais características aerodinâmicas de um perfil são o coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto, o coeficiente de momento, a posição do centro aerodinâmico e a sua eficiência aerodinâmica. A área de referência A é a área que resulta da projeção da vela num plano perpendicular à direção do vento. Por vezes são utilizadas diferentes áreas de referência, caso em que se obtêm diferentes coeficientes de arrasto e sustentação correspondentes a cada situação.

3.4 Forças Existentes num Perfil Aerodinâmico

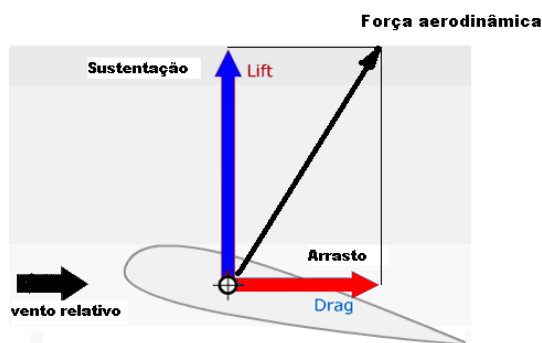


Figura 3.4: Forças atuantes no perfil aerodinâmico.

As velas convencionais ou rígidas são um meio de propulsão para os veleiros, pelo que é conveniente determinar as forças geradas pelas velas que contribuem para o avanço (movimento na direção longitudinal do veleiro, sendo o sentido positivo da popa para a proa) e para a deriva (movimento na direção transversal, sendo o sentido positivo de estibordo para bombordo). A análise aerodinâmica dos perfis bidimensionais fornece as forças geradas pelo perfil; todavia, estas forças são decompostas num referencial cuja orientação é definida pelo ângulo de ataque α , entre a direção do escoamento e a direção da corda do perfil, como é visível na figura 3.4.

Sendo V é o vetor velocidade do escoamento de aproximação, FL é a Força de Sustentação ortogonal ao vetor de velocidade, FD é a Força de Arrasto paralela à velocidade do vento, e finalmente α é o ângulo de ataque. De modo a decompor-se as forças geradas pelo perfil para o referencial do ASV Zarco é necessário introduzir um novo ângulo, o ângulo β , que é definido como o ângulo entre o eixo longitudinal do veleiro e a direção do vento. Este ângulo é frequentemente referido como o Aparent Wing Angle (AWA). As relações trigonométricas entre os ângulos de ataque α e o ângulo β , permitem facilmente decompor as Forças de Resistência (FD) e de Sustentação (FL) em Forças de avanço (FX) e Força de Deriva (FY), através da matriz de rotação do vento relativo para o plano do barco.

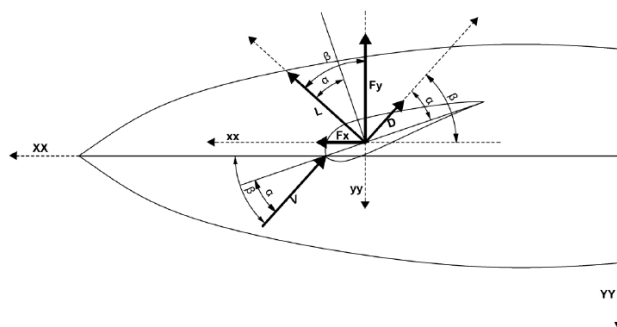


Figura 3.5: Relações Trigonométricas e Decomposição das Forças FD e FL em Força de Avanço, FX , e de Deriva, FY .

$$R_{RW} \rightarrow BA = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Desta decomposição de forças é possível relacionar diretamente a Força de Sustentação e a Força de Arrasto com as Forças de Avanço (FX) e de Deriva (FY), através do ângulo do vento com o eixo longitudinal do navio.

$$\begin{cases} FX = FD\cos(\beta) - FL\sin(\beta) \\ FY = FD\sin(\beta) + FL\cos(\beta) \end{cases} \quad (3.3)$$

A força de sustentação é aquela originária da diferença de pressão entre o extradorso e intradorso da asa. Esta força é perpendicular à direção do vento. Como podemos ver pela equação 3.4, força de sustentação é proporcional ao quadrado da velocidade do vento, à área da vela e ao coeficiente de sustentação da vela. Esta força é sempre perpendicular a direção do vento. Sendo ρ representa a massa volúmica do ar, V_{wind} é a velocidade do vento, S a área da asa e C_L representa o coeficiente de sustentação [19].

$$F_L = \frac{1}{2} V_{wind}^2 C_L \rho S \quad (3.4)$$

A força de arrasto é devido ao atrito que o ar exerce sobre a superfície da asa. O sentido da força de arrasto é sempre paralelo ao sentido da velocidade do vento. Como podemos observar na equação 3.5, a força de arrasto é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do vento em relação à velocidade do vento V_{wind} , ao coeficiente de arrasto C_D e à área de superfície da asa S [20].

$$F_D = \frac{1}{2} V_{wind}^2 C_D \rho S \quad (3.5)$$

3.5 Dados Teóricos para os Coeficientes de Arrasto e Sustentação

Após consulta do livro "Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180 Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines" retiramos os dados teóricos fornecidos pelo Laboratório Sandia National Labs, testes realizados pelo laboratório para determinar os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação para ângulos de ataque entre $[0,180]$ graus face à direção do vento para números de Reynolds de 0.36×10^6 , 0.5×10^6 e 0.68×10^6 . Como utilizamos o catálogo NACA 0015, sendo este um perfil simétrico, então para ângulos $[-180,0]$ os dados irão ser simétricos [21].

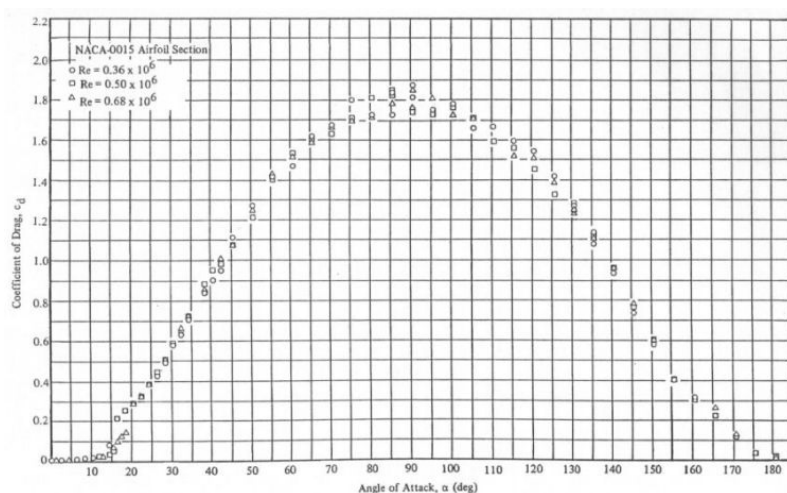


Figura 3.6: Curvas teóricas do coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque.

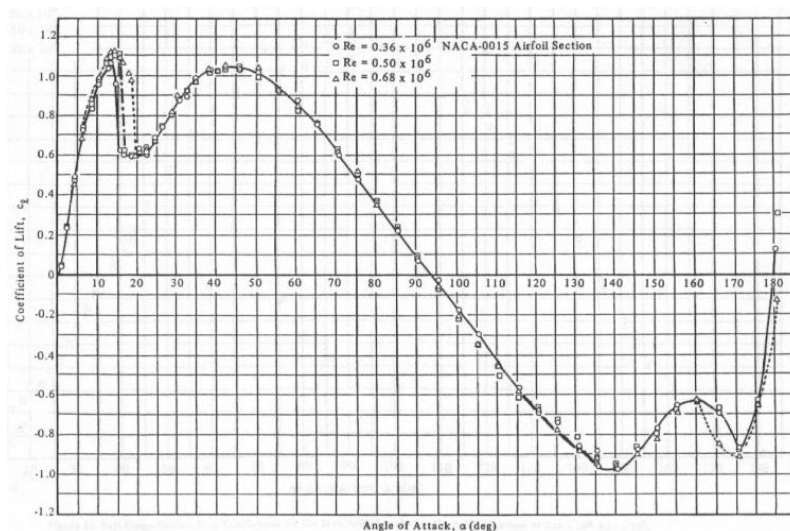


Figura 3.7: Curvas teóricas do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque.

3.6 Utilização das Velas Rígidas

Este projeto utiliza uma vela simétrica rígida do tipo asa de avião, em que para os aviões privilegia-se a diminuição do arrasto e na máxima força de sustentação com o intuito de manter o avião no ar, mas para este projeto isto não se verifica. Porque estando a vela fixada no plano horizontal pode ser útil utilizar o arrasto como força de propulsão, em que a vela é colocada a 90 graus perpendicular à direção do vento, e a força de arrasto é máxima, o que fará com que o barco se movimente recorrendo ao vento reduzindo a utilização dos propulsores. Neste projeto como temos a vela no plano horizontal acoplada a um servomotor com um raio de rotação de 360 graus, conseguimos assim obter uma variedade de direções de forças resultantes, obtendo várias trajetórias que a embarcação pode seguir. Quanto maior for o número de velas incluídas

na embarcação, teoricamente deveria aumentar proporcionalmente o valor da força gerada pelas mesmas, sendo que este fenómeno só se verifica se a distância entre as mesmas não influenciar na vela seguinte, pelo que se conclui que podemos multiplicar a força gerada pelo número de velas a partir do momento em que estas se tornam independentes, enquanto o escoamento de uma vela influenciar a vela seguinte é necessário realizar testes de forma a analisar a influência existente entre elas.

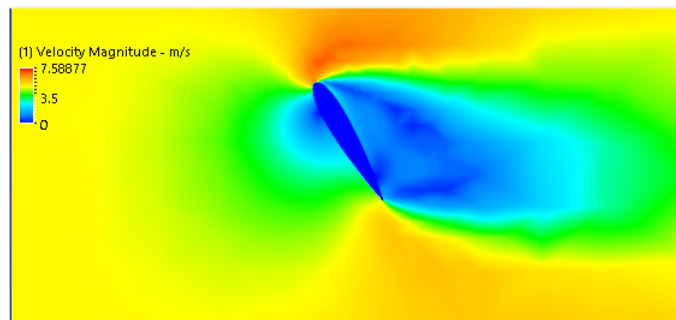


Figura 3.8: Uma vela com $\alpha = 60^\circ$.

Na figura 3.8 podemos ver o escoamento em torno da vela, e podemos observar as zonas de alta e baixa pressão.

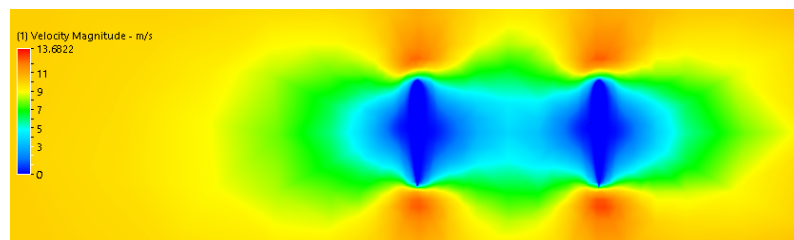


Figura 3.9: Duas velas distanciadas de 40 cm.

Na figura 3.9 é possível constatar, que o valor da força resultante numa vela não vai ser igual na outra, pelo que a força resultante da segunda vela vai ser menor porque a velocidade de contacto da segunda vai ser afetada pela velocidade que sai do escoamento da primeira vela.

Capítulo 4

Implementação de Vela Rígida

Neste capítulo tratamos do dimensionamento de velas rígidas utilizando o catálogo perfil NACA 0015, bem como o dimensionamento das velas no software SOLIDWORKS. Foi realizado um estudo das forças aerodinâmicas de forma numérica aplicando uma metodologia baseada em CFD (Computacional Fluid Dynamics) com o software Autodesk flow simulation. Por fim, é realizada uma interpolação numérica para obtermos os coeficientes de arrasto e sustentação com uma resolução de um grau entre medições.

4.1 Desenvolvimento de Velas

4.1.1 Dimensionamento do Perfil NACA

No decorrer da disciplina de Sistemas de Engenharia - Automação e Instrumentação foi desenvolvido um projeto, em que foi realizada uma vela rígida de perfil simétrico NACA 0015, no qual eu mesmo estava inserido. Para dimensionamento do perfil utilizou-se o software computacional Airfoiltools, com 400 mm de corda e 1000 mm de envergadura. Aplicando a NACA 0015, com estas especificidades, tem-se uma cavidade com largura máxima de 60 mm, sendo esta localizada a 120 mm do comprimento total da base [22].

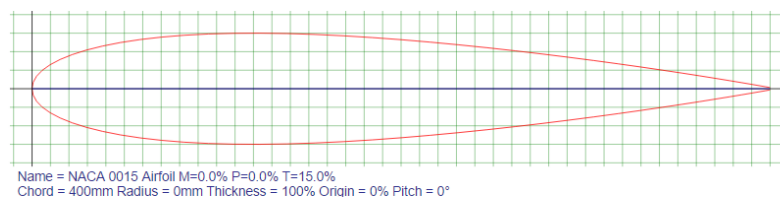


Figura 4.1: Perfil NACA0015.

4.1.2 Desenvolvimento do Perfil NACA em SolidWorks

Após a concretização do dimensionamento do perfil aerodinâmico a utilizar, decidimos realizar a vela em Solidworks. Do software Airfoiltools extraímos para o SolidWorks os valores das coordenadas do perfil NACA 0015. Como se pode observar na figura 4.2 e na figura 4.3 na qual temos uma peça com o formato de cerca de 5 mm de espessura, posteriormente foram empilhadas com intervalos de 95mm entre cada uma, cabendo ao mastro a responsabilidade por manter a estrutura coesa e segura. Por fim, é usada uma manga térmica que envolve a estrutura e lhe fornece o formato pretendido. Com o software SolidWorks© foram feitas alterações e construído um modelo 3D da peça pretendida. Para a construção das peças foi escolhida a madeira de balsa, por ser um material largamente utilizado em modelismo por ser leve, resistente e flexível.

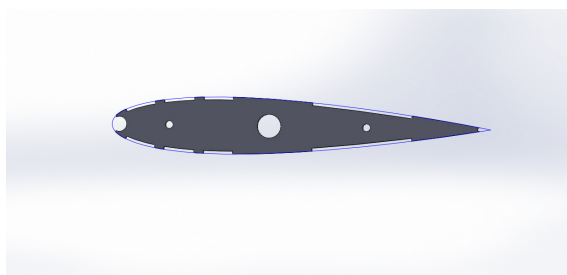


Figura 4.2: Perfil NACA0015.

Como se pode visualizar na 4.3 foram realizados vários cortes circulares no eixo central da peça, sendo que o central é destinado ao mastro e os restantes aos tubos de apoio, que ajudam a manter o formato da vela. Além destes, existem também 4 rasgos de cada lado da peça onde encaixam ripas de balsa e que têm como função aumentar a área de contacto da manga térmica com a madeira para auxiliar na colagem.

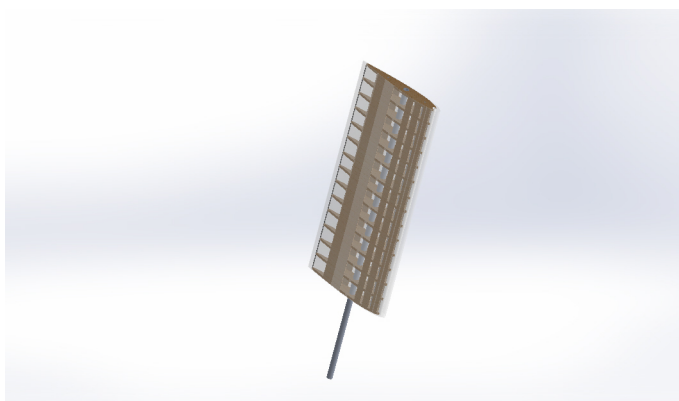


Figura 4.3: Montagem da vela.

Em seguida, foi efetuada a montagem da vela na embarcação Zarco ASV, na imagem 4.4 é possível observar o veículo autónomo com o novo método de propulsão à vela, foram também alterados os flutuadores aumentando a sua dimensão para 2 metros de comprimentos de forma a obter uma melhor estabilidade.



Figura 4.4: Embarcação Autónoma Zarco.

4.2 Estudo da Vela

4.2.1 Validação do Software Utilizado

Anteriormente à realização da análise do perfil NACA 0015, efetuámos um teste para obter o coeficiente de Arrasto de um cilindro, visto que é um sólido com documentação conhecida como podemos ver pela figura 4.5 o coeficiente de Arrasto para $100 < Re < 10^5 \approx 1$, para isso calculamos a velocidade para um número de Reynolds de 1000, um cilindro com $D = 1 \text{ m}$, $\mu = 1.817 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$, $\rho = 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$ e $h = 100 \text{ m}$ [20].

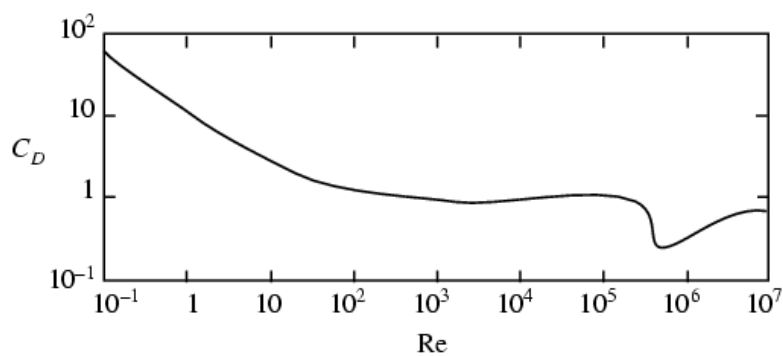


Figura 4.5: Curva teórica do coeficiente de arrasto de um cilindro.

$$v = \frac{Re \times \mu}{D \times \rho} \quad (4.1)$$

Substituindo pelos valores obtemos:

$$v = \frac{1000 \times 1.817^{-5}}{1 \times 1.20473} = 0.015m/s \quad (4.2)$$

Realizamos o teste no programa Autodesk Flow Simulation CFD (Computacional Fluid Dynamics) em que calculamos o valor da Força de arrasto para a qual se obteve o valor de 0.014 N, o coeficiente de arrasto é sempre acompanhado, ou seja, está intrinsecamente ligado ao valor da área considerada, em que pode ser a área de ataque, área projetada, outra qualquer área característica ou de referência, no caso dos cilindros a área utilizada é a área de projeção frontal. Substituindo na equação 3.5 em ordem ao C_D obtemos:

$$C_D = \frac{\left(\frac{0.014}{100}\right)}{\frac{1}{2} \times 1.20473 \times 0.015^2 \times 1} \approx 1 \quad (4.3)$$

Desta forma avaliamos a veracidade do software, em que obtemos os valores pretendidos. Neste momento estamos aptos a realizar os testes para a vela com perfil Naca 0015. Para analisar o comportamento do perfil NACA 0015 utilizou-se a ferramenta CFD (Computacional Fluid Dynamics), para realizar o estudo em túnel de vento computacional, foram efetuadas simulações para obter os valores das forças de arrasto e sustentação, bem como os seus coeficientes para diferentes ângulos de ataque e velocidade do vento, comparando-os com os dados teóricos.

4.2.2 Resultados CFD

Nas tabelas seguintes são apresentados os resultados obtidos na simulação da vela em túnel de vento na ferramenta Autodesk Simulation CFD. São apresentados os valores das Forças de Arrasto e de Sustentação bem como os respectivos coeficientes de Arrasto e Sustentação, para diferentes ângulos de ataque, e diferentes velocidades.

Tabela 4.1: Resultados da simulação CFD a 3 m/s.

<i>3 m/s</i>				
<i>alpha</i>	<i>CD</i>	<i>FD</i>	<i>CL</i>	<i>FL</i>
0	0,087618	0,193197	0	0
10	0,152178	0,335552	0,451922	0,996489
15	0,281299	0,620263	0,894622	1,972641
20	0,299744	0,660936	0,973017	2,145501
22	0,516483	1,138844	1,627843	3,589393
25	0,599489	1,321873	1,475665	3,253841
30	0,659438	1,45406	1,102137	2,430213
35	0,774724	1,708267	1,148252	2,531895
40	0,936125	2,064155	1,152863	2,542063
45	1,120583	2,470886	1,148252	2,531895
50	1,240481	2,73526	1,065246	2,348867
60	1,503334	3,314851	0,922291	2,033651
70	1,563283	3,447038	0,613323	1,352378
80	1,637066	3,60973	0,387362	0,854133
90	1,761575	3,884273	0,110675	0,244038
110	1,480276	3,264009	-0,35508	-0,78296
135	1,128098	2,487457	-0,9269	-2,04382
160	0,424254	0,935479	-0,94996	-2,09466
170	0,124509	0,274543	-0,44731	-0,98632
180	0,06456	0,142356	-0,02306	-0,05084

Tabela 4.2: Resultados da simulação CFD a 5 m/s.

<i>5 m/s</i>				
<i>alpha</i>	<i>CD</i>	<i>FD</i>	<i>CL</i>	<i>FL</i>
0	0,064745	0,396562	0	0
10	0,147751	0,904975	0,458194	2,806438
15	0,215816	1,321873	0,531239	3,253841
20	0,308783	1,891295	0,986113	6,039943
22	0,509658	3,121654	1,645182	10,07674
25	0,597644	3,660571	1,48249	9,08025
30	0,657409	4,026628	1,168727	7,15845
35	0,771957	4,728238	1,172047	7,178787
40	0,974492	5,968765	1,228491	7,524508
45	1,125563	6,894076	1,162086	7,117777
50	1,278295	7,829555	1,052518	6,446673
60	1,377902	8,43965	0,954571	5,846746
70	1,585417	9,710682	0,622546	3,813095
80	1,635221	10,01573	0,390129	2,38954
90	1,743129	10,67667	0,116209	0,711778
110	1,48747	9,110755	-0,35029	-2,1455
135	1,138835	6,975361	-0,96785	-5,92809
160	0,424991	2,603073	-0,90477	-5,5417
170	0,13779	0,843965	-0,40009	-2,45055
180	0,061425	0,376225	-0,02324	-0,14236

Tabela 4.3: Resultados da simulação CFD a 10 m/s.

<i>10 m/s</i>				
<i>alpha</i>	<i>CD</i>	<i>FD</i>	<i>CL</i>	<i>FL</i>
0	0,073045	1,789613	0	0
10	0,14028	3,43687	0,47604	11,66299
15	0,226607	5,551866	0,974492	23,87506
20	0,311273	7,62619	0,997319	24,43431
22	0,510488	12,50695	1,660123	40,67301
25	0,60055	14,71346	1,519428	37,22598
30	0,655334	16,05567	1,218115	29,84382
35	0,791049	19,38069	1,231396	30,16921
40	0,94959	23,26496	1,174122	28,76599
45	1,134694	27,8	1,169557	28,65414
50	1,302367	31,90798	1,076175	26,36628
60	1,428951	35,0093	0,960796	23,53951
70	1,617375	39,62568	0,637072	15,60827
80	1,647257	40,3578	0,40258	9,863206
90	1,764296	43,22525	0,122434	2,999635
110	1,473359	36,0973	-0,37021	-9,07008
135	1,135446	27,81842	-1,15545	-28,3084
160	0,415031	10,16825	-0,90726	-22,2278
170	0,13281	3,253841	-0,39303	-9,62934
180	0,060179	1,474397	-0,02407	-0,58976

4.2.3 Interpolação Numérica para o CD e CL

Depois de obtidos os valores das forças de arrasto e sustentação e respetivos coeficientes de arrasto e sustentação optamos por realizar a interpolação numérica, visto que do software CFD realizamos testes para alguns ângulos, mas para uma análise mais detalhada de forma a obter um intervalo de 1 grau foi feita a interpolação numérica usando a função do Matlab Polyval.

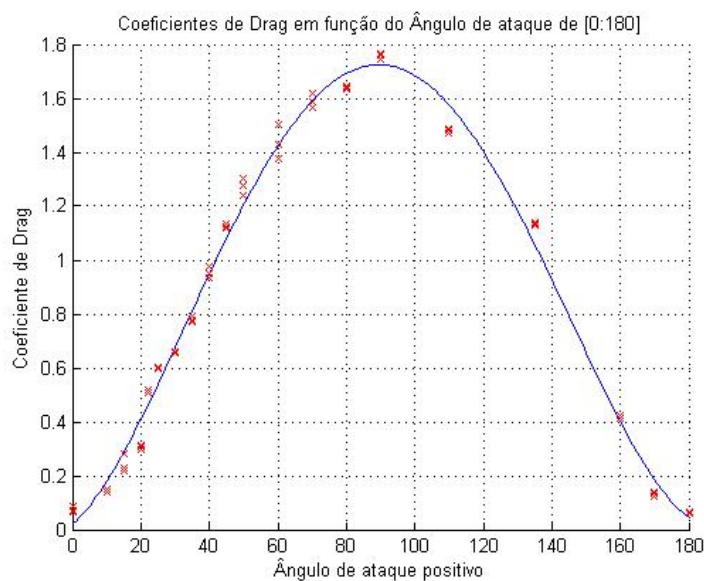


Figura 4.6: Interpolação para [0;180] graus dos coeficientes de Arrasto em função do ângulo de ataque.

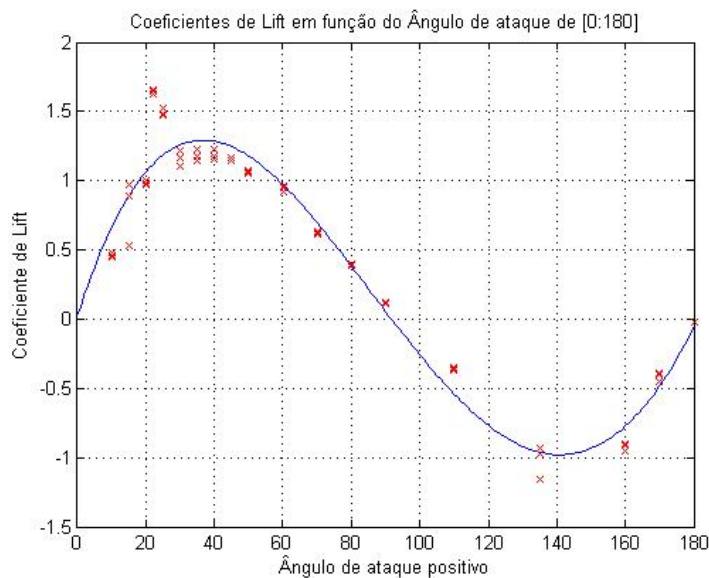


Figura 4.7: Interpolação para [0;180] graus dos coeficientes de Sustentação em função do ângulo de ataque.

Para utilização dos dados foi efetuada uma interpolação numérica de forma a aumentarmos o intervalo do ângulo de ataque α de [-180;180] obtendo os seguintes gráficos.

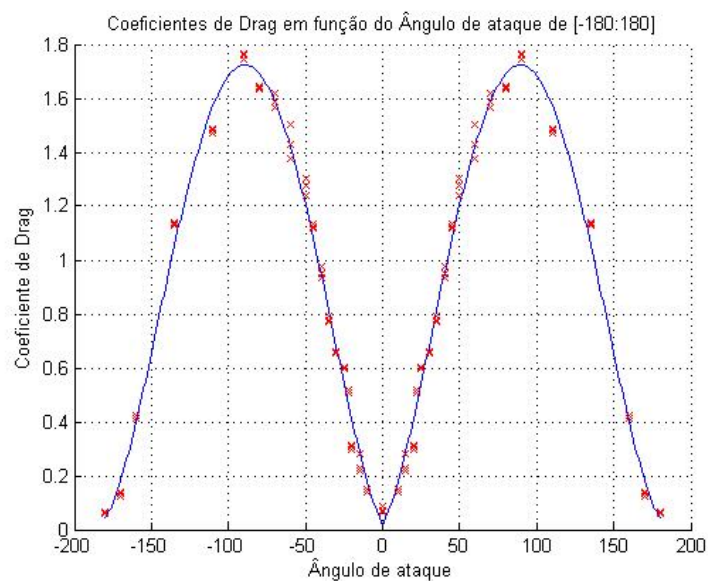


Figura 4.8: Interpolação para [-180;180] graus dos coeficientes de Arrasto em função do ângulo de ataque.

Pela observação da imagem, é possível constatar que a interpolação não tem um erro significativo, pelo que concluímos que para o Coeficiente Arrasto, a interpolação vai apresentar resultados satisfatórios.

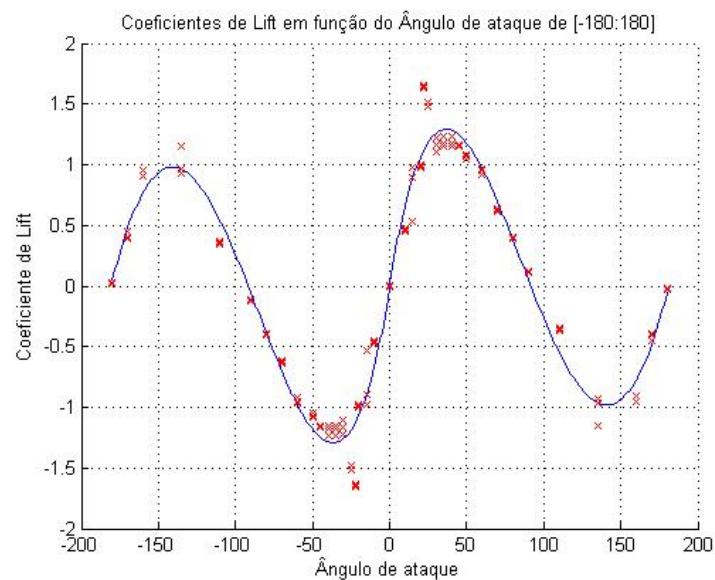


Figura 4.9: Interpolação para [-180;180] graus dos coeficientes de Sustentação em função do ângulo de ataque.

Para a situação da interpolação para os Coeficientes de Sustentação notamos que para ângulos de ataque entre [-35;-20] e [20;35], a interpolação realizada através do comando Matlab Polyval,

apresenta um erro elevado, pelo que será necessário realizar a interpolação numérica recorrendo a outro método.

Em seguida apresentamos o gráfico mais detalhado com os ângulos em que se denota um erro maior.

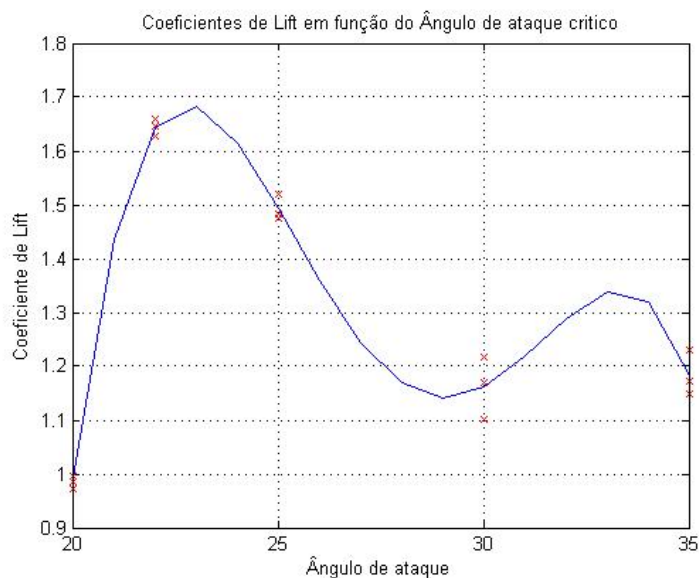


Figura 4.10: Interpolação para [20;35] graus dos coeficientes de Sustentação em função dos ângulos de ataque críticos.

De forma a diminuir o erro, optamos por utilizar a função do Matlab interp1 cúbica, e pela análise do gráfico da figura 4.11 é visível que esta aproximação é melhor que a anterior.

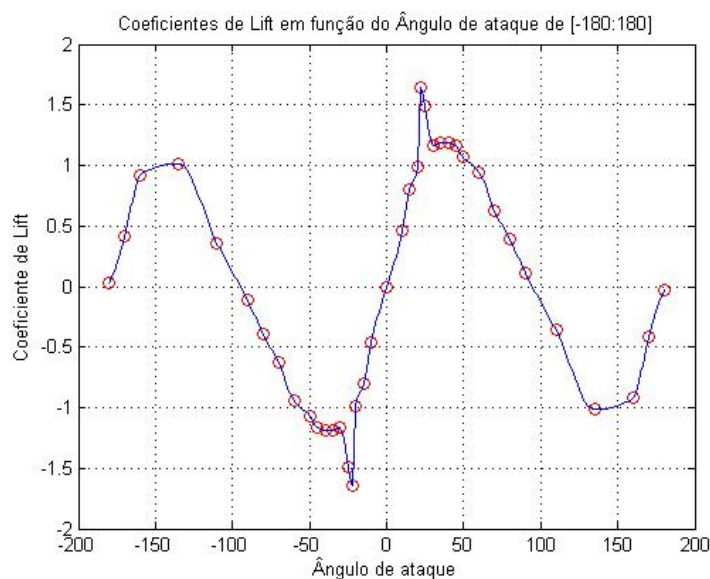


Figura 4.11: Interpolação para [-180;180] graus dos coeficientes de Sustentação em função dos ângulos de ataque usando interp1(matlab).

Em seguida vamos explicar como é que estes gráficos serão utilizados. Para além do ângulo de ataque variar, existe outro parâmetro que varia, que é a velocidade do vento aparente e da análise dos gráficos ilustrados anteriormente podemos concluir que a velocidade tem mais influência para ângulos de ataque críticos, e será nessa zona crítica onde muitas das vezes vamos trabalhar para manejar a vela, porque é onde os coeficientes são mais elevados.

Com as simulações efetuadas anteriormente, em testes CFD para velocidades de 3 m/s, 5 m/s, 10 m/s, com estes resultados realizamos a interpolação para obter dados de um em um grau para o ângulo de ataque, e seguida alocamos os valores dos coeficientes em tabelas *look-up tables* para em tempo real realizarmos a interpolação pelos vizinhos mais próximos, de forma a minimizar o erro e obter os melhores resultados possíveis. Este último método realizado de interpolação pelos vizinhos mais próximos, é utilizado para reduzir o processamento de dados em tempo real.

4.2.4 Campo de Forças para Diferentes Direções do Vento

A vela tem algumas limitações, nomeadamente o facto de ser impossível velejar contra o vento, porque a força de arrasto é sempre contrária à direção do vento, e a força de sustentação forma um ângulo de $+90$ ou -90 graus com a direção da força de arrasto, dependendo se temos um ângulo de ataque positivo ou negativo.

Quando for necessário velejar contra o vento, a melhor solução é alinhar a vela com a direção do vento, de forma à vela ter o menor impacto possível de modo a reduzir o arrasto criado pela mesma.

Na imagem que se segue, é ilustrada a direção do vento aparente a -90 graus, quais são as direções possíveis para a força resultante variando o ângulo de ataque da mesma, ou seja, obtemos todas as possibilidades de direções que o Zarco ASV consegue tomar, por isso em casos mais desfavoráveis teremos a necessidade de optar pela utilização de outro método de propulsão.

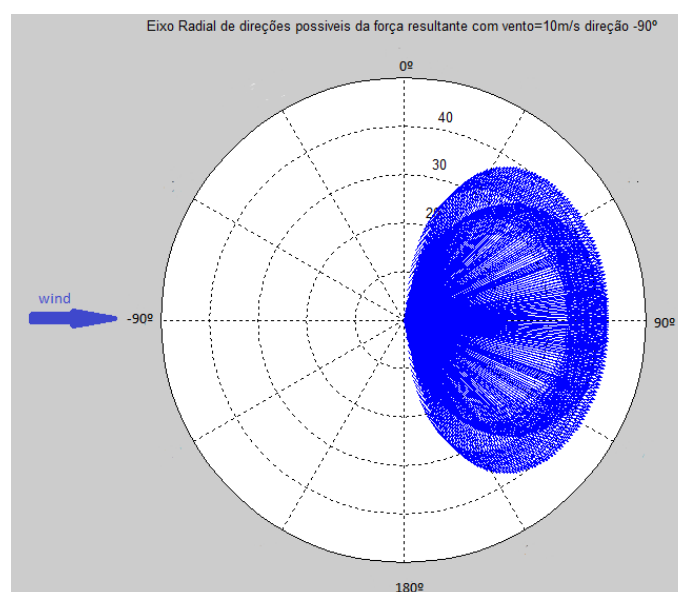


Figura 4.12: Campo de forças da Força resultante para o vento com uma direção de -90 graus.

Capítulo 5

Integração da Vela na Embarcação

Neste capítulo é explicada a notação utilizada nos eixos de coordenadas envolventes, bem como todos os seus ângulos. Em seguida é feita a modelação do veículo autónomo de acordo com as leis da mecânica clássica, para posteriormente construir um simulador do veículo com a inclusão da vela, de forma a avaliarmos o desempenho da evolução da dinâmica do veículo. Por último são apresentadas técnicas de controlo possíveis da utilização da vela como método de propulsão, concluídas com exemplos práticos.

5.1 Integração da Vela na Embarcação

5.1.1 Representação Axial da Embarcação com a Adição da Vela Rígida

Agora vamos exemplificar a notação utilizada nos eixos de coordenadas que envolvem a embarcação para ao longo da dissertação se tornar mais perceptível a interpretação dos resultados.

Na figura 5.1 é possível observar que temos dois referenciais: um referencial Inercial fixo à terra, com coordenadas dadas pelo sistema NED (North, East, Down) em que XWA aponta sempre para norte (do mundo), e outro referencial fixo ao centro de massa da embarcação em que XBA indica a direção em avanço (surge) YBA a direção em deriva (sway). A velocidade de avanço e deriva representam a velocidade do barco em relação ao referencial Inercial expresso no referencial do barco. Em que φ representa a orientação da embarcação face ao norte da orientação terrestre.

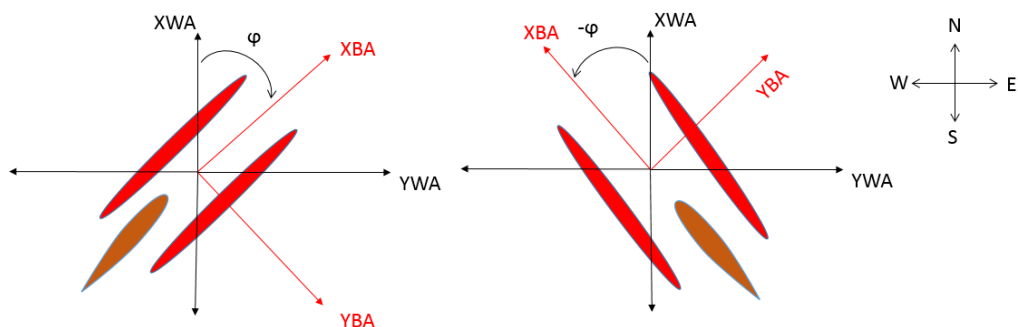


Figura 5.1: Representação do ângulo de orientação da embarcação face ao norte do mundo φ .

Na figura 5.2 observamos o ângulo que a vela (asa) faz com o referencial do barco. Este ângulo é de extrema importância porque posteriormente, este irá ser o ângulo de comando a ser dado ao sensor para este ir para a posição desejada. Nesta projeto por uma questão de coerência limitamos os ângulo de -180 a 180 graus por uma questão de interpretação mais fácil.

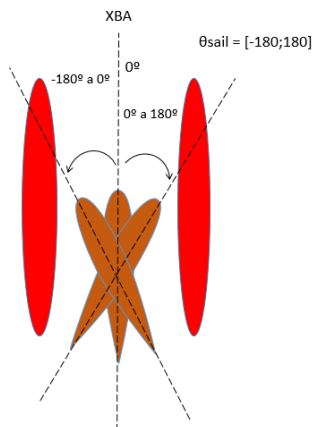


Figura 5.2: Representação do ângulo da vela β .

Na figura 5.3 observamos o AWA (Apresent Wind Angle) que é o ângulo que o vento faz com o barco, em que este ângulo é nos fornecido pelo sensor que está acoplado à embarcação, pelo que como é referido à embarcação e expresso relativo ao XBA da embarcação, em que este valor é atualizado à medida em que a velocidade da embarcação evolui, e quando o barco adquire a velocidade do vento real o valor da velocidade do vento aparente anula.

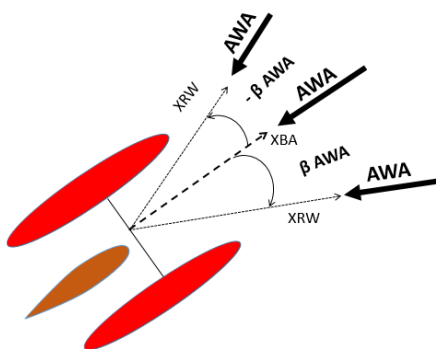
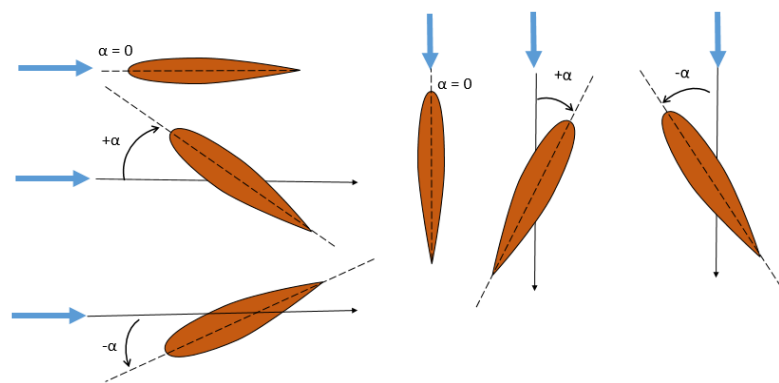


Figura 5.3: Representação do ângulo do vento β .

Na imagem 5.4 observamos o ângulo de ataque que a vela tem em relação ao vento aparente, este é medido pelo ângulo que a corda média da asa faz com a direção do vento aparente.

Figura 5.4: Representação do ângulo de ataque α .

Adiante vamos apresentar alguns exemplos práticos de forma a tornar transparente a análise realizada anteriormente. Em que no exemplo seguinte o barco tem um ângulo de orientação nulo face ao mundo, ou seja, os ângulos relativos ao barco são os mesmo relativos ao mundo, porque os dois planos estão alinhados.

Vamos considerar o exemplos da tabela 4.2 para uma velocidade de 3 m/s e um ângulo de ataque $\alpha = 15^\circ$ em que obtemos um $FD = 0.61$ N e $FL = 1.94$ N.

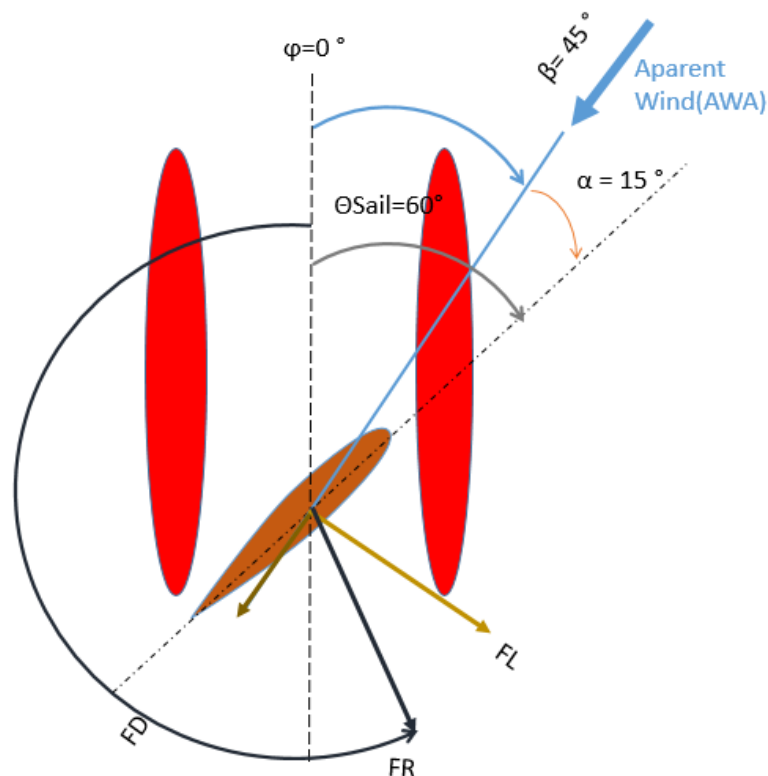


Figura 5.5: Exemplo 1 para análise detalhada da direção da Força Resultante da embarcação com ângulo de orientação nulo.

Para o exemplo considerado vamos agora determinar a direção da força resultante face ao

barco e face ao referencial inercial. Para podermos interpretar com este exemplo qual é a direção da força resultante, vamos calcular o ângulo que a força de Arrasto faz com a Força de Sustentação através da função do Matlab atan2d de forma a obtermos valores em graus nos 4 quadrantes possíveis. Para o ângulo entre as duas forças temos duas possibilidades: $\text{atan2d}(\text{FD}, \text{FL}) = 17,45$ e $\text{atan2d}(\text{FL}, \text{FD}) = 72,545$.

$$\delta \text{FR} = \text{AWA} - 180 - 72,545$$

$$\delta \text{FR} = -207,545$$

Para obtermos valores de -180 a 180.

$$\delta \text{FR} = -207,545 + 360$$

$$\delta \text{FR} = 152,455$$

Ou então:

$$\delta \text{FR} = \text{AWA} + 90 + 17,545$$

$$\delta \text{FR} = 152,455$$

No próximo exemplo é apresentada uma situação em que temos um ângulo de orientação $\varphi = 30^\circ$ do barco face ao mundo, são apresentados os valores para o δFR em relação ao referencial da embarcação e em relação ao referencial mundo, mantendo o ângulo de ataque α do exemplo anterior.

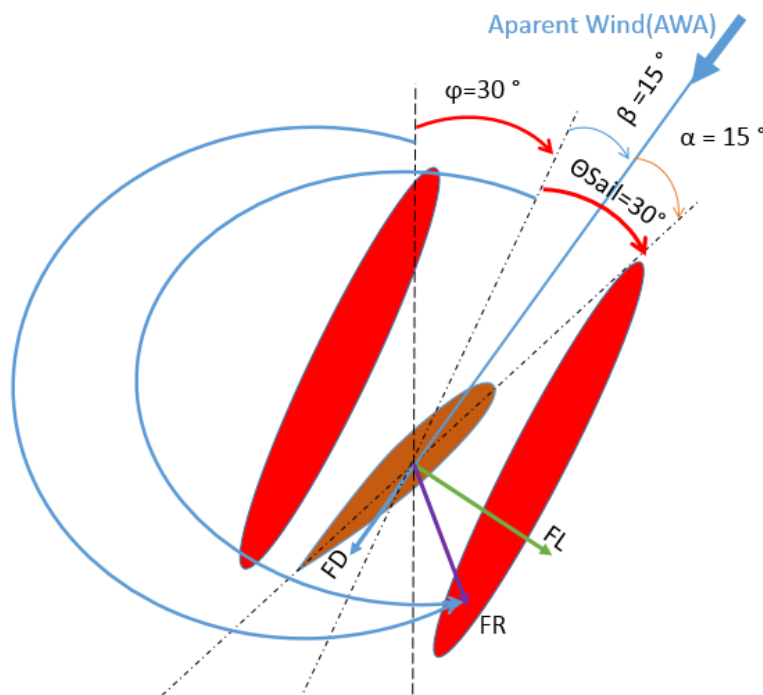


Figura 5.6: Exemplo 2 para análise detalhada da direção da Força Resultante da embarcação com ângulo de orientação positivo e ângulo de ataque positivo.

Agora vamos determinar o δ FR em relação ao referencial do mundo/terra.

$$\delta FR = AWA - 180 - 72.545 + 30$$

$$\delta FR = -207.545$$

Para obtermos valores de -180 a 180.

$$\delta FR = -207.545 + 360$$

$$\delta FR = 152.455$$

Ou então:

$$\delta FR = AWA + 90 + 17.545 + 30$$

$$\delta FR = 152.455$$

Em seguida vamos determinar o δ FR em relação ao referencial da embarcação.

$$\delta FR = AWA - 180 - 72.545$$

$$\delta FR = -237.545$$

Para obtermos valores de -180 a 180.

$$\delta FR = -237.545 + 360$$

$$\delta FR = 122.455$$

Ou então:

$$\delta FR = AWA + 90 + 17.545$$

$$\delta FR = 122.455$$

No próximo exemplo é analisada a situação em que o ângulo de ataque $\alpha = -15$ no qual o sentido da força de Sustentação é contrária. Novamente utilizando a tabela 4.2 em que para $\alpha = -15$ temos uma $FD = 0.61$ e uma $FL = -1.94$, com a função $\text{atan2d}(FD, FL) = 162.5451$ e $\text{atan2d}(FL, FD) = -72.5451$.

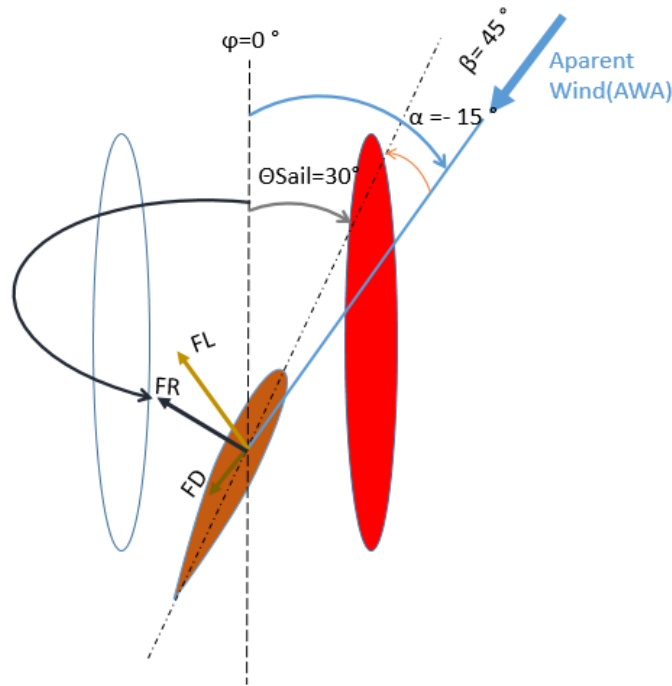


Figura 5.7: Exemplo 3 para análise detalhada da direção da Força Resultante da embarcação com ângulo de orientação positivo e ângulo de ataque negativo.

$$\delta FD = AWA - 180 = -135$$

$$\delta FL = -135 + 90 = -45$$

$$\delta FR = AWA - 180 + 72.545$$

$$\delta FR = -62.545$$

Ou então:

$$\delta FR = AWA + 90 + 162.545$$

$$\delta FR = 297.545$$

Para obtermos valores na gama de $[-180, 180]$

$$\delta FR = 297.545 - 360$$

$$\delta FR = -62.545$$

Com isto concluímos que independentemente do ângulo de orientação da embarcação, se man-tivermos o ângulo de ataque a direção da Força resultante é sempre igual no referencial do mundo, mas quando o ângulo de ataque é negativo face à direção do vento aparente vai alterar o sentido da força de Sustentação.

5.2 Modelização da Dinâmica do ASV

Para a evolução da dinâmica consideramos um referencial Inercial fixado à terra, com coordenadas dadas pelo sistema NED (North, East, Down), bem como um referencial fixado ao centro

de massa da embarcação, com X_{ba} , a indicar a direção em avanço (surge), Y_{ba} direção em deriva (sway), em que a direção de avanço e deriva representam a direção do barco em relação ao referencial Inercial expresso no referencial do barco. De acordo com as leis da mecânica clássica, para este trabalho foi utilizado um modelo com GDL 3, em que são desprezados os termos de amortecimento de alta ordem e as relações cruzadas dos modos remanescentes da hidrodinâmica. Além disso é considerada a simetria geométrica do veículo e assume-se que este se move horizontalmente com o ângulo pitch e roll nulos.

$$m(\dot{u} - vr) = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u u + X_{u|u}|u| + X_{ww} + X_{act} \quad (5.1)$$

$$m(\dot{v} - ur) = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_v v + Y_{v|v}|v| + Y_{ww} + Y_{act} \quad (5.2)$$

$$I_z \dot{r} = N_{\dot{r}}\dot{r} + N_r r + N_{r|r}|r| + N_{ww} + N_{act} \quad (5.3)$$

$$\dot{x} = u \cos \varphi - v \sin \varphi \quad (5.4)$$

$$\dot{y} = u \sin \varphi + v \cos \varphi \quad (5.5)$$

$$\dot{\varphi} = r \quad (5.6)$$

A embarcação é dotada de dois propulsores elétricos localizados na parte traseira (da embarcação), que geram força no eixo X, e um binário de rotação N, agora com a adição de velas ao Zarco ASV, e a inclusão de um sensor de vento capaz de medir a velocidade e a direção do vento, é possível reduzir a utilização dos propulsores, porque cada vela é capaz de gerar forças tanto no eixo do X como no Y bem como um binário de rotação N.

Sendo u e v as componentes de avanço e deriva, no que diz respeito à água e r é a velocidade de guinada do veículo, o que faz que este rode em torno do centro de massa. É considerado que a corrente marítima é constante, gerando forças externas e binários que apenas dependem de u , v , r , e os distúrbios causados pelo vento e as ondas são (X_{ww} , Y_{ww} , N_{ww}), e para atuação do veículo (X_{act} , N_{act}) [23].

Os propulsores elétricos, localizados na parte traseira da embarcação, geram forças nos eixo $X_B(X_{actmotor})$ e um binário ($N_{actmotor}$). Cada vela é capaz de produzir forças em X_B e em $Y_B(X_{actsail}, Y_{actsail})$ e um binário $N_{actsail}$. Com a adição de velas ao veículo autónomo, a sua dinâmica sofre uma alteração, porque cada vela é capaz de gerar forças numa nova componente, aumentando assim um parâmetro no modelo porque a vela é capaz de produzir velocidades em Y_{act} . Para completar o modelo é necessário ter em conta as relações cinemáticas onde $\dot{x}$ e $\dot{y}$ são as coorde-

nadas do veículo no referencial Inercial, e φ é a rotação do veículo face ao norte do referencial Inercial fixado na terra.

Em seguida apresentamos uma tabela com os parâmetros que constituem o modelo do barco.

Tabela 5.1: Parâmetros do Modelo da Dinâmica.

Parâmetros	Descrição	valor
m	Massa do Veículo	40 kg
I_z	Momento de inercia do veiculo	20 kg.m ²
$X_{\dot{u}}$	Massa adicionada em avanço	-40 kg
$Y_{\dot{v}}$	Massa adicionada em deriva	-80 kg
$N_{\dot{r}}$	Massa adicionada em guinada	-20 kg.m
X_u	Coefficiente de ajuste em avanço	50 kg.s ⁻¹
Y_v	Coefficiente de ajuste em deriva	-200 kg.s ⁻¹
N_r	Coefficiente de ajuste em guinada	-60 kg.s ⁻¹
$X_{u u }$	Coefficiente de arrasto da força em avanço	-7 kg.s
$Y_{v v }$	Coefficiente de arrasto da força em deriva	-500 kg.s
$N_{r r }$	Coefficiente de arrasto da força em guinada	-60 kg.s.m
$X_{act}Y_{act}N_{act}$	Atuação do veiculo	N e Nm
$X_{ww}Y_{ww}N_{ww}$	Distúrbios devido a vento e ondas	N e Nm
u, v, r	Velocidade em avanço, deriva e guinada	m.s ⁻¹ e rad.s ⁻¹
$\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$	Aceleração em avanço, deriva e guinada	m.s ⁻² e rad.s ⁻²

5.3 Simulador do Zarco ASV

De modo a validarmos o modelo apresentado anteriormente, foi elaborado um simulador, que simula a evolução da dinâmica da embarcação. Este foi desenvolvido de forma modular em que, separamos a parte de controlo, que se altera mediante o objetivo a controlar, da parte da dinâmica do veículo com a alteração dos parâmetros não controlados. O principal propósito do simulador é avaliarmos o impacto das componentes que contribuem para a atuação do veículo autónomo, nomeadamente as componente X_{act} , Y_{act} e N_{act} , sendo o principal objetivo observar o impacto que a vela tem sobre as diversas componentes do veículo. Na imagem seguinte temos os módulos em que são inseridas as componentes de atuação do veículo, e conseguimos avaliar a dinâmica deste, bem como determinar a sua posição deste no referencial do próprio e no Inercial.

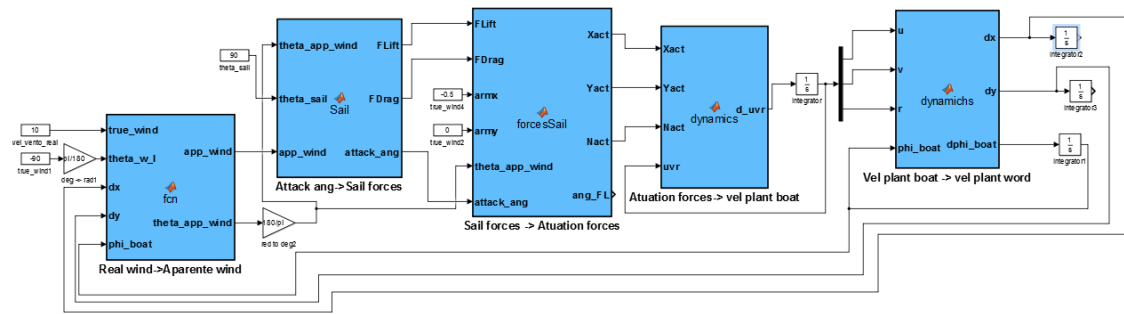


Figura 5.8: Modelo em Simulink do Simulador.

Nas imagens que se seguem são apresentados os módulos em que se converte forças de atuação traduzidas para velocidades, com estas velocidades é possível obter a posição no veículo.

Para essa conversão no modulo plant são utilizadas as equações da modelização da dinâmica do ASV referidas em 5.1, 5.2, 5.3, juntamente com os parâmetros da tabela 5.1 finalmente convertidas em velocidades $[u,v,r]$, podendo estas ser traduzidas para posições, neste caso temos a posição do veículo $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}]$ no próprio referencial do barco. No modulo à direita, plant1 são utilizadas as equações 5.4, 5.5, 5.6, em que estas equações representam as velocidades do veiculo $[u,v,r]$ juntamente com a matriz de rotação no referencial Inercial fixado à terra, em que $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}]$ são as coordenadas do veículo no referencial do mundo.

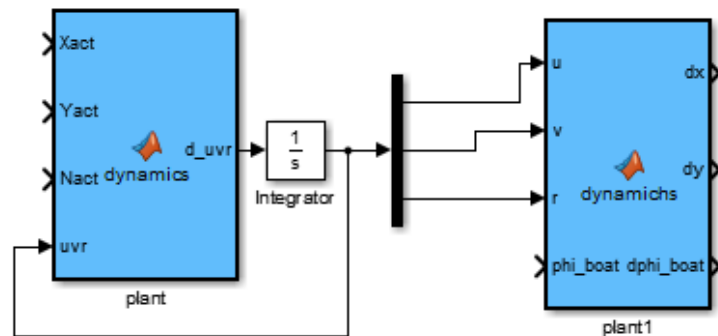


Figura 5.9: Coordenadas do veículo no referencial do barco e no referencial do mundo.

Em seguida apresentamos o módulo em que convertemos o vento real em vento aparente (AWA), em que o vento real é aquele que se faz sentir no mundo, que é diferente daquele que a embarcação sente, visto que à medida que a embarcação adquire velocidade o valor da velocidade do vento aparente diminui, tal como se o barco alterar a sua posição o ângulo do vento aparente (AWA) sofre alterações. Neste modulo os parâmetros de entrada são a velocidade e a direção do vento real, o os parâmetros de velocidade $[u,v,r]$ do veículo no referencial do mundo, é realizada uma subtração vetorial, obtendo a velocidade e a direção do vento aparente.



Figura 5.10: Módulo de conversão de vento real em vento aparente.

Nos modelos seguintes temos os módulos em que transformamos as forças que cada vela produz, em forças de atuação no veículo, à esquerda temos o módulo em que, com um determinado ângulo de ataque, obtemos a força de arrasto e sustentação que a vela produz para isso utilizamos um método de consulta de tabelas, tabelas que são criadas anteriormente, baseadas na interpolação dos dados obtidos a partir do software CFD Simulation, de forma à pesquisa em tempo real ser mais fácil e menos demorada.

À direita está presente o modulo em que convertemos as forças obtidas do módulo anterior em forças de atuação no referencial do veículo $[X_{actsail}, Y_{actsail}, N_{actsail}]$, tendo em conta o posicionamento das velas na embarcação.

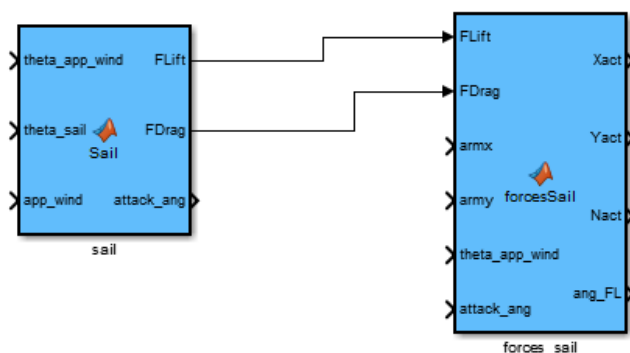


Figura 5.11: Módulos de pesquisa e conversão de forças das velas em forças de atuação no veículo.

Com a junção dos módulos apresentados anteriormente construímos um simulador para avaliar o desempenho da embarcação com a influência da vela rígida. Ficarà a faltar o módulo de controlo da vela face ao objetivo em causa, com esse controlador é determinado o ângulo da vela, bem como o ângulo de comando a ser dado para o servomotor acoplado à vela.

Para validarmos o simulador desenvolvido vamos apresentar alguns exemplos:

No primeiro exemplo ilustramos a situação em que o vento sopra de -90 graus, e a embarcação esta alinhada com o norte do referencial Inercial, e a vela fixa a 90 graus.

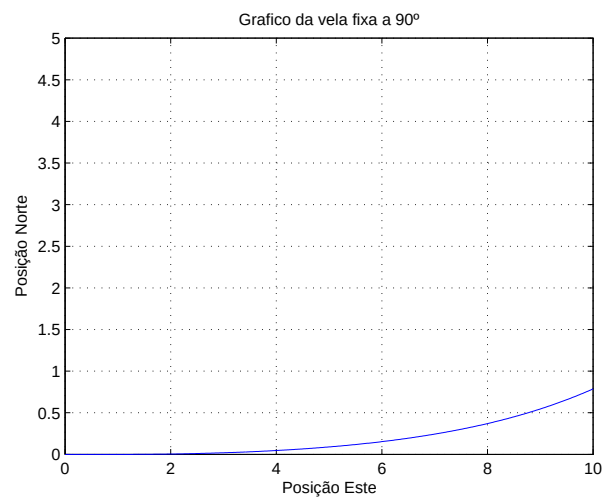


Figura 5.12: Posição do veículo no plano Inercial com a vela fixa a 90 graus.

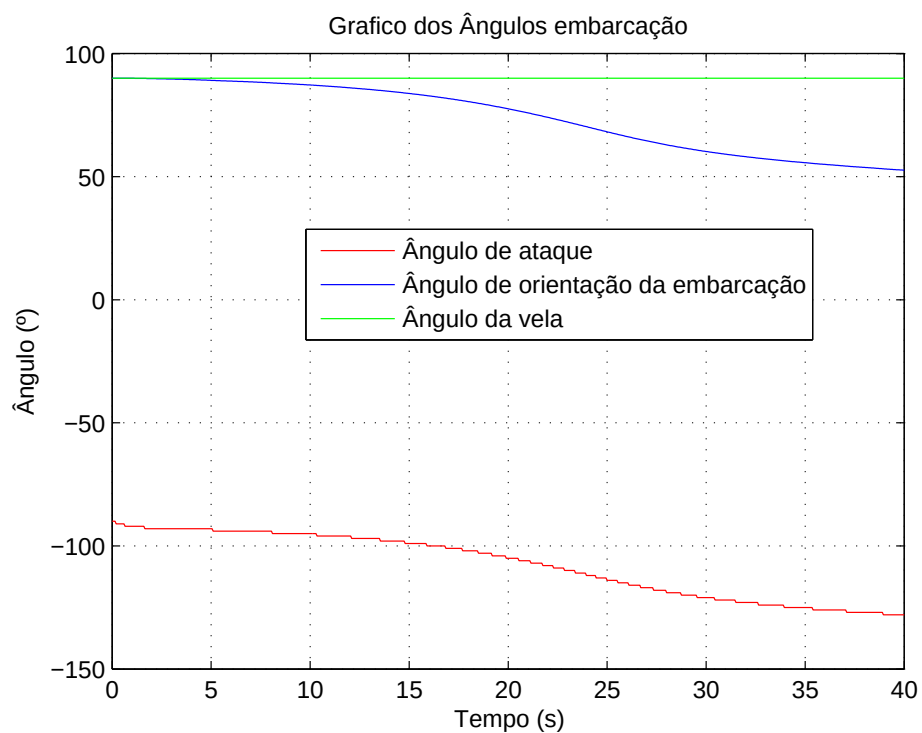


Figura 5.13: Gráfico com a vela fixa a 90 graus com a direção do vento observamos a evolução da dinâmica da embarcação

Pela análise dos gráficos apresentados anteriormente constatamos que para o caso em que fixando a vela na embarcação com um determinado ângulo, a embarcação roda em torno do eixo Z até a mesma se alinhar com a direção do vento, em seguida a mesma, segue a direção contrária à direção do vento, porque com a vela com um ângulo de 90 graus, a força de sustentação é nula e a força de arrasto é máxima.

5.3.1 Estratégias para Utilizar a Vela como Método de Propulsão

Em seguida vamos exemplificar algumas utilizações práticas em que podemos tirar partido da vela como método de propulsão, bem como para auxiliar os propulsores elétricos.

5.3.1.1 Exemplo 1

Uma estratégia que pode ser implementada, no caso do Zarco ASV ficar com problemas nos propulsores elétricos e estes deixarem de atuar porque a bateria acabou ou alguma catástrofe fez com que os motores deixassem de funcionar, seria empregar a vela como método de propulsão, com o objetivo de tentar levar o barco para uma direção de segurança recorrendo unicamente ao vento. Tendo em conta as limitações que este método oferece, nomeadamente a impossibilidade de velejar contra o vento, são utilizados vários pontos de segurança nas diferentes direções do sistema de coordenadas NED, de forma a conseguir mover o Zarco com a utilização da vela.

5.3.1.2 Exemplo 2

Outra aplicação prática que a vela pode ter, é a de contrariar a corrente marítima, com um N_{ref} obter o ângulo de comando para a vela que oponha essa rotação.

5.3.1.3 Exemplo 3

Por último outra estratégia de possível utilização é a partir de uma referência de velocidade $[u_{ref}, r_{ref}]$ serem obtidas as referências de força e binário desejadas $[X_{act}, N_{act}]$ que faça com que $v = [u, r]$ convirja para v_{ref} . Se considerarmos o conjunto de propulsores e cada vela um sistema de atuação, então a soma das forças e binários produzidos por cada um deles deve ser igual àquela do veículo, caso a vela não esteja no centro de massa do veículo, estas forças podem vir a gerar um binário. Então o nosso objetivo é obter o ângulo da vela à qual a potência que será utilizada seja a mais reduzida tendo em conta que nem sempre a máxima força fornecida pela vela é a melhor porque esta pode gerar um binário excessivo o que fará com que os motores sejam necessários para compensar a rotação gerada pela vela na embarcação. Então a estratégia que a vela pode seguir é determinar o seu ângulo de ataque para que dada uma ordem de atuação $[X_{act}, N_{act}]$ esta minimize a potência gasta pelos propulsores elétricos.

5.3.2 Desenvolvimento do Exemplo 1

Depois de desenvolvido o simulador, foi realizado o modulo de controlo para a vela, tendo como objetivo obter o ângulo de ataque desejado e consequentemente o ângulo da vela, este controlo é baseado num método de pesquisa, que inicialmente são calculadas para cada instante todas as direções possíveis que a embarcação consegue tomar, e é escolhido o ângulo de ataque da vela que cumpre o objetivo de referência.

Em seguida vamos exemplificar alguns exemplos conseguidos com o simulador.

Primeiro caso temos o vento real de 5 m/s com direção de -75 graus, e uma direção objetivo de 80 graus, com a embarcação com um ângulo de orientação inicial de $\varphi = -75$.

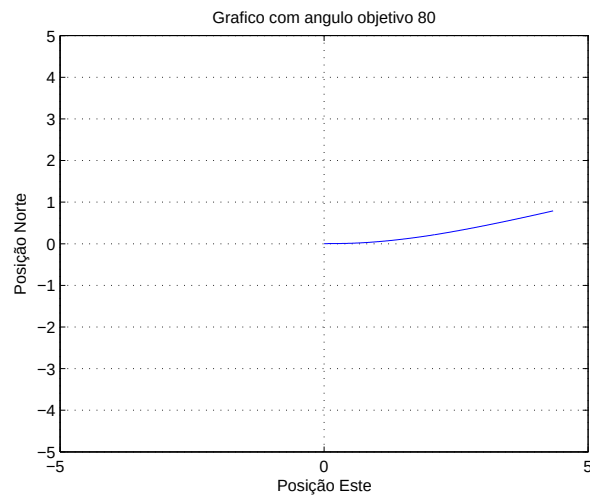


Figura 5.14: Posição do veículo para o ângulo objetivo de 80 graus.

É possível observar que o barco sofre uma ligeira curva devido ao facto de a vela não estar colocada no centro de massa da embarcação, pelo que isto provocara um binário de rotação no veículo autónomo.

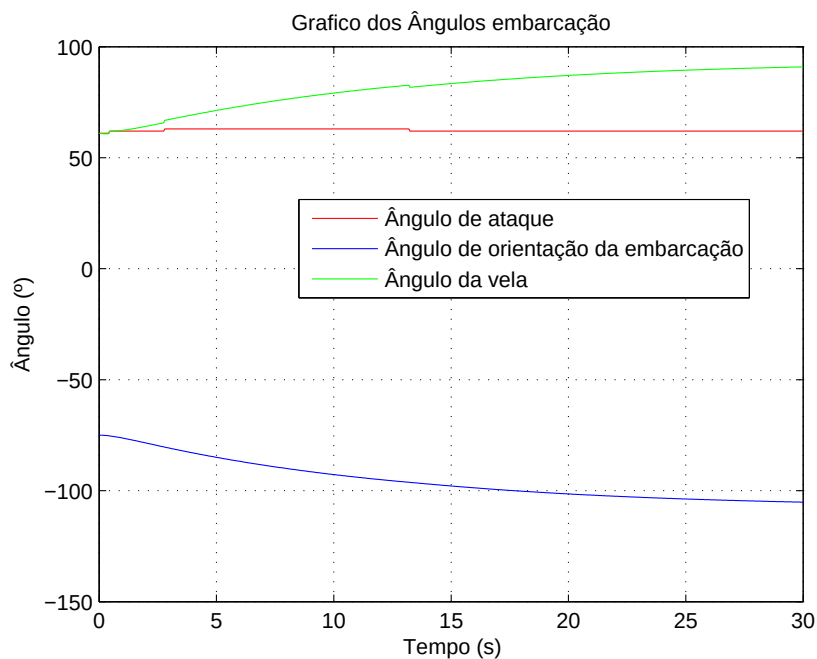


Figura 5.15: Primeiro exemplo em que obtemos o ângulo de ataque da vela, ângulo da vela, e ângulo de orientação da embarcação face a norte do referencial Inercial.

Segundo caso com o vento real de 5 m/s com direção de -30 graus, para uma direção objetivo de 130 graus, com a embarcação com um ângulo de orientação inicial de $\varphi = 0$.

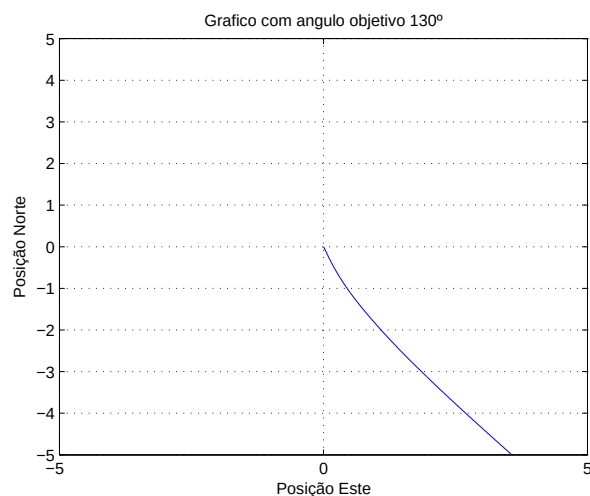


Figura 5.16: Posição do veículo para o ângulo objetivo de 130 graus.

Como o barco não está alinhado com o vento, este gira em torno do centro de massa, até este se alinhar com o vento, quando o veículo se alinha adquire mais velocidade, porque tendo em conta o modelo desenvolvido para a dinâmica do veículo, o Zarco tem uma velocidade mais lenta quando veleja em arrasto (quando está perpendicular ao vento), então ele tenta em ficar paralelo ao vento para adquirir mais velocidade.

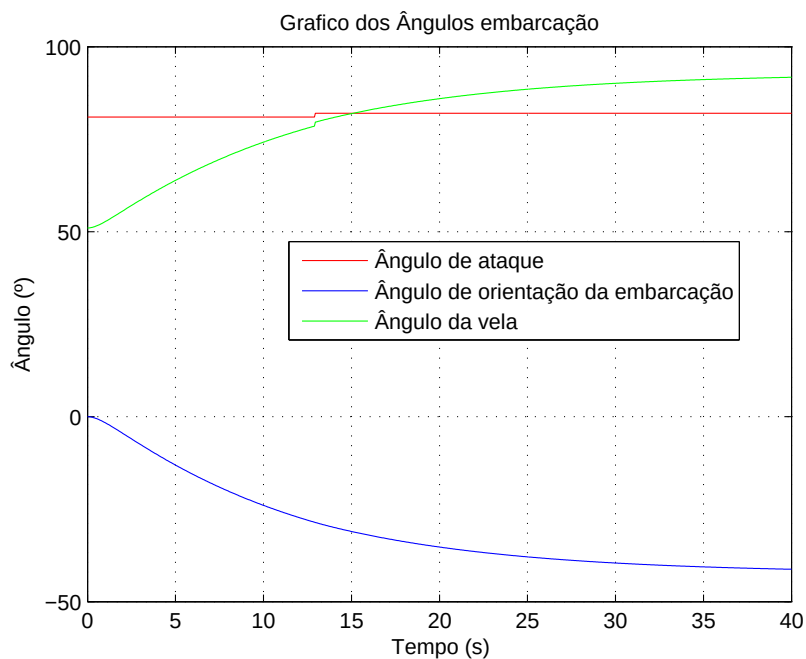


Figura 5.17: Segundo exemplo em que obtemos o ângulo de ataque da vela, ângulo da vela, e ângulo de orientação da embarcação face a norte do referencial inercial.

Terceiro caso com o vento real de 5m/s com direção de 45 graus, para uma direção de referência de -145 graus, com a embarcação com um ângulo de orientação inicial de $\varphi = 0$.

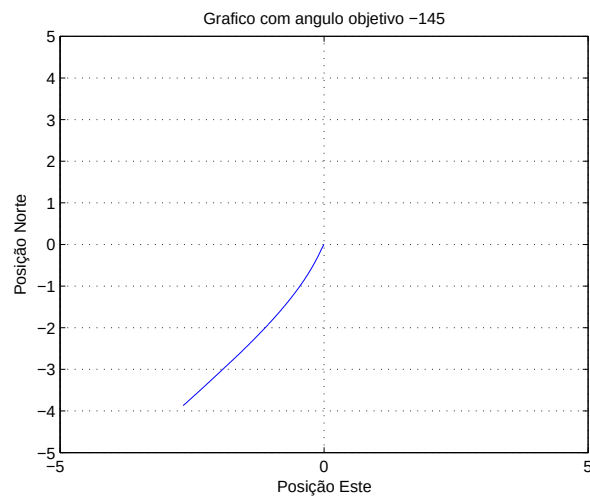


Figura 5.18: Posição do veículo para o ângulo objetivo de -145 graus.

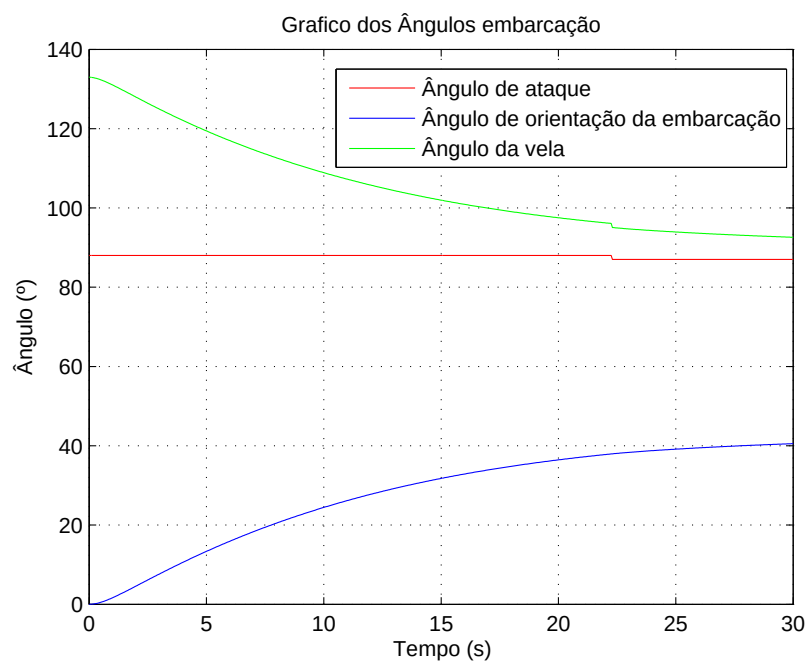


Figura 5.19: Terceiro exemplo em que obtemos o ângulo de ataque da vela, ângulo da vela, e ângulo de orientação da embarcação face a norte do referencial inercial.

Capítulo 6

Captura de Energia

Neste capítulo insere-se a captura de energia de forma a melhorar a autonomia do Zarco ASV, para tal foi proposto o desenvolvimento de uma forma de recarregar as baterias off-grid, se for possível este método de recarregar contribuir diretamente para o acionamento dos motores de forma a aumentar a sua autonomia energética.

6.1 Utilização de Painéis Fotovoltaico

O Zarco ASV está equipado com baterias para fornecer energia para os motores elétricos, mas esta energia não é infinita, estes motores funcionam enquanto as baterias conseguirem fornecer energia para os mesmos. Quando essa energia se esgotar, a embarcação poderia utilizar a vela como método de propulsão, mas caso o vento não exista, ou então este não sobre favoravelmente, a embarcação tornava-se inútil.

Uma solução possível é a inclusão de um método de captura de energia com a utilização de um painel solar com a função de recarregar as baterias.

Um painel fotovoltaico permite transformar a radiação solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Este efeito fotovoltaico é dividido em 3 partes: absorção de luz, através da qual o material fotovoltaico restabelece uma parte do fluxo luminoso absorvido (luz solar ou luz de outras fontes luminosas artificiais) sob a forma de energia elétrica; transferência de energia dos fótons para as cargas elétricas, os materiais semicondutores, como todos os outros, são constituídos por átomos que possuem um núcleo e um conjunto de eletrões que gravitam em seu redor, onde os eletrões periféricos absorvem energia dos fótons libertando-se da influência do núcleo e podendo constituir uma corrente elétrica; e por último criação de corrente elétrica, e os eletrões deverão circular num circuito elétrico (corrente elétrica) tornando-se assim numa fonte de energia elétrica, através da junção de uma foto-pilha de silício, constituída por uma parte com fósforo (denominada de tipo N) e outra parte dopada com boro (denominada de tipo P), são separadas as cargas positivas das negativas, criando-se na fronteira destas duas partes um campo elétrico[24].

As principais vantagens da utilização de um painel solar para realizar a captura de energia são: não consome combustível; não produz poluição nem contaminação ambiental; É silencioso Tem

uma vida útil superior a 20 anos; é resistente a condições climáticas extremas (granizo, vento, temperatura e humidade); não tem peças móveis e, portanto, exige pouca manutenção (só a limpeza do painel); permite aumentar a potência instalada por meio da incorporação de módulos adicionais [25].

Como pretendemos introduzir um painel fotovoltaico na embarcação temos que levar em conta as limitações que esta nos oferece, nomeadamente limitações de peso, e limitações de espaço, e de posicionamento face ao sol.

Mediante uma pesquisa efetuada, verificou-se que surgiram painéis solares flexíveis, podendo ser montados em superfícies curvas ou arqueadas, sendo 70% mais leves que os painéis cristalinos, com cerca de 2 milímetros de espessura, produzindo assim menos ruído de vento, resistentes à água salgada, e em comparação com os painéis rígidos convencionais o rendimento é consideravelmente mais elevado. Foi encontrado um painel do fabricante SUNLOAD com 21 Wp com 995x330x2 mm, com um peso de 750 gramas, pela análise esta solução enquadra-se com os requisitos acima descritos. Com as dimensões da solução apresentada anteriormente o painel poderia ser colocado na própria vela sem deformar a aerodinâmica do perfil pelo facto de o painel ser flexível e moldável ao aspeto da vela [26]. A desvantagem em colocar os painéis flexíveis na própria vela são que só estaria a funcionar um painel de cada vez devido à impossibilidade do sol incidir nas duas faces da vela ao mesmo tempo. Outra possibilidade seria a de colocar os painéis em cima das caixas de eletrotécnica, mas a vela faria sombra ao painel e este iria baixar o seu rendimento.



Figura 6.1: Ilustração de um Painel Solar Flexível

Cada célula produz apenas uma reduzida potência elétrica, logo as células são interligadas formando um painel fotovoltaico. Na figura 6.2 pode-se observar uma representação gráfica da saída de um painel fotovoltaico, através da curva corrente tensão(curva I-V)[27][28].

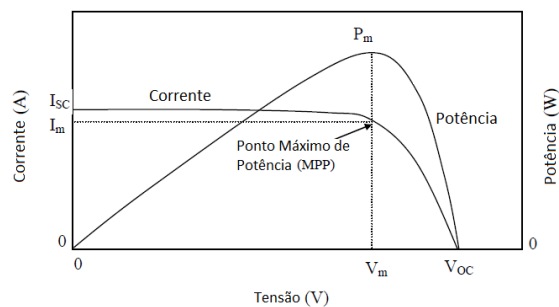


Figura 6.2: Curva característica de um painel fotovoltaico

Através da curva característica do painel vemos que o ponto máximo de potência – o ponto a qual se quer operar, não corresponde aos máximos individuais de tensão e corrente mas sim no ponto em que o produto da corrente com a tensão é máximo. Este MPP (ponto máximo de potência) varia com as condições ambientais, mais concretamente pela temperatura e incidência da radiação solar.

6.2 Modos de Utilização de Painéis Fotovoltaicos

Existem vários modos diferentes de funcionamento dos painéis solares então tornou-se necessário perceber qual seria a configuração adotada para os painéis fotovoltaicos e as baterias, isto é, se os painéis ligariam diretamente as baterias servindo apenas para carregar as mesmas ou se, ligando os mesmos aos motores e às baterias através de um switch, acionava a propulsão da embarcação em situações de emergência.

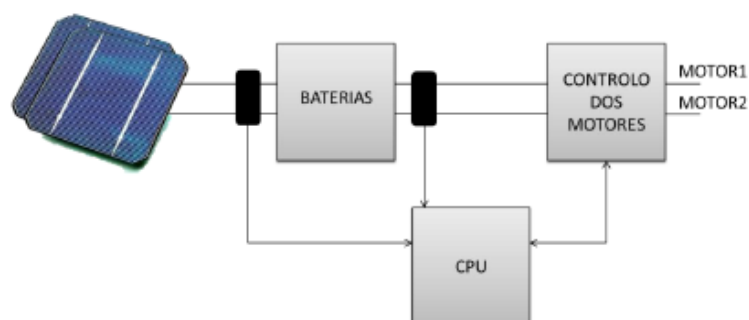


Figura 6.3: Painéis ligados em série e diretamente às baterias

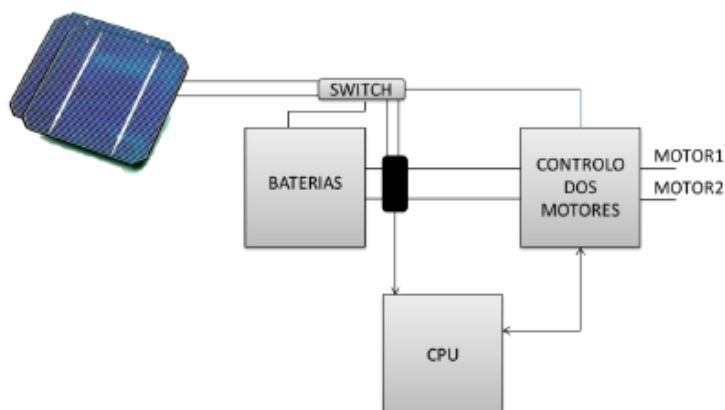


Figura 6.4: Painéis ligados em série às baterias e aos motores através de um switch

É fácil de constatar que o primeiro modelo apresenta como vantagens uma maior simplicidade de implementação, contudo serão necessários mais componentes eletrónicos de forma a fazer a interface entre os painéis e às baterias, enquanto que o segundo modelo apresenta como vantagem uma interface de controlo que permite aos painéis fotovoltaicos ou carregarem as baterias ou acionarem diretamente os motores. Este último método de controlo seria interessante para, por exemplo, situações de emergência. Contudo esta maior robustez dos painéis traduz-se numa maior complexidade de controlo.

6.3 Controlador MPPT

Os painéis fotovoltaicos devem estar otimizados para se retirar sempre a máxima potência possível. O ponto de máxima potência de uma painel depende de vários factores entre eles a radiação e a temperatura como já foi visto anteriormente, deste modo é utilizado o método de controlo "Maximum Power Point Tracking"(MPPT), para se conseguir a cada instante que o painel opere no seu ponto de potência máxima. O controlo MPPT tem como objetivo orientar o funcionamento do conversor com o intuito de extrair, a cada instante, a maior potência possível.

Capítulo 7

Conclusão

Neste último capítulo encontram-se as apreciações finais sobre o trabalho desenvolvido bem como algumas indicações de possíveis melhorias futuras. completar este.

7.1 Conclusões

Em suma, conclui-se que, após análise geral, os objetivos inicialmente propostos foram alcançados.

O objetivo central desta dissertação era o de realizar velas rígidas de atuação de baixo impacto, assim como o seu sistema de orientação face ao vento. Para o cumprimento desse objetivo principal foi feito um estudo em torno dos diferentes tipos de velas rígidas utilizadas em embarcações robóticas autónomas, bem como toda a sua aerodinâmica envolvente. Depois de selecionado o catálogo a utilizar, foi realizado o dimensionamento do perfil e o desenho da vela num software de desenho 3D. Passado esse processo, procedeu-se à elaboração da vela, a qual que foi construída numa empresa de corte e maquinação de madeira, e montada nas oficinas da universidade.

Para analisar o desempenho da vela construída, houve a recorrência a simulações num túnel de vento computacional.

De seguida, foi desenvolvido um modelo para a dinâmica do Zarco ASV, a ser utilizado para realizar um simulador com o intuito de avaliar o desempenho do veículo autónomo com a inclusão deste novo método de propulsão.

Para o seu sistema de orientação face ao vento descreveram-se algumas estratégias possíveis a ser adotadas, tendo sido implementada a estratégia para o caso de emergência em que a vela ficaria a funcionar como único método de propulsão, tendo sido obtidos resultados bastantes satisfatórios.

Por último o foco secundário desta dissertação era o de aumentar a autonomia da embarcação. Foi realizado um estudo em que a melhor solução seria a de utilizar um painel fotovoltaico flexível seguido de um controlador MPPT para este funcionar no seu ponto de máxima potência.

7.2 Trabalho Futuro

Por fim, são apresentadas, nesta secção, algumas indicações de trabalho a desenvolver no futuro e que permitirão obter um estudo mais completo sobre este tema. Em primeiro lugar, seria proveitoso obter mais simulações em túnel de vento computacional, e, se possível, num túnel de vento real, de forma a melhorar as aproximações realizadas para os coeficientes relativos à vela rígida. Outra abordagem que seria relevante era a de fazer as mesmas simulações para várias velas em simultâneo de forma a avaliar o escoamento em torno das mesmas e, por fim, analisar o seu impacto na evolução da dinâmica da embarcação. Uma segunda abordagem seria a de melhorar os sistemas de orientação da vela face ao vento apresentados nas estratégias de utilização da vela como método de propulsão na presente dissertação, bem como a realização de sistemas de controlo de orientação eficientes para várias velas em simultâneo, analisando as direcções possíveis que o veículo autónomo consegue seguir com o aumento do número de velas, em seguida implementá-las no simulador efetuado nesta dissertação, de forma a torná-lo mais próximo da realidade. Do ponto de vista da gestão eficiente da energia eléctrica consumida pelos diversos subsistemas electrónicos, seria importante criar uma aplicação para o Zarco ASV em que são reportados dados relativos a carga das baterias, ou a consumos dos diversos subsistemas em tempo real, e ser desenvolvido um algoritmo que gerisse de forma autónoma quais recursos a utilizar em cada instante. Por ultimo, o subtema da captura de energia do meio ambiente, poderia ser mais explorado, foi realizado um estudo dos tipos de painéis flexíveis existentes no mercado, não tendo sido feita a sua implementação, seria um melhoramento substancial, ficando em aberto a realização dessa implementação e de um algoritmo que gerisse esses recursos em tempo real. Uma vez que estamos perante uma evolução constante, em que surgem novas formas de gerar energia limpa recorrendo ao meio ambiente, o desenvolvimento de uma nova forma de gerar energia limpa de baixo impacto poderia revolucionar a forma de operacionalização dos veículos autónomos robóticos

Referências

- [1] Sérgio Silva Nuno Cruz, Aníbal Matos, Sérgio Cunha. Zarco - An Autonomous Craft For Underwater Surveys. *MTS-IEEE Conference Oceans'2007*. URL: http://oceansys.fe.up.pt/publications/2007_CruzMatosCunhaSilva.pdf.
- [2] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, 1994.
- [3] Tristan Perez e Thor Inge Fossen. Kinematic Models for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels. *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, 28(1):19–30, 2007. URL: <http://www.mic-journal.no/ABS/MIC-2007-1-3.asp>, doi:10.4173/mic.2007.1.3.
- [4] Gabriel Hugh, Elkaim C O Lee, e Boyce Jr. Experimental Aerodynamic Performance of a Self-Trimming Wing-Sail for Autonomous Surface Vehicles.
- [5] Wing Sails Co. Wing Sails Vs. Conventional Sails, 2013. URL: <http://www.wingsails.com/WSvsCS.htm>.
- [6] Wing Sails Co. Aerodynamics of Sails and Implications on Performance and Stability of Sailing Vessels, 2013. URL: <http://www.wingsails.com/perform.htm>.
- [7] America's Cup: how the yachts go faster than the wind. *The Telegraph*, 2013. URL: <http://www.telegraph.co.uk/sport/othersports/sailing/10335496/Americas-Cup-how-the-yachts-go-faster-than-the-wind.html>.
- [8] Corey Ippolito. Modeling and Trajectory Control of an Autonomous Sailboat for Path Planning. páginas 1–9, 2015.
- [9] C O Lee Boyce, Jr Gabriel, e Hugh Elkaim. Control System Performance of an Unmanned Wind - Propelled Catamaran.
- [10] Jose C. Alves e Nuno a. Cruz. FASt - an autonomous sailing platform for oceanographic missions. *Oceans 2008*, páginas 1–7, 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5152114>, doi:10.1109/OCEANS.2008.5152114.
- [11] Unmanned Underwater e Surface Vessel. Submaran.
- [12] Leo Robertson e Richard Jenkins. In this issue ... *Imperial Engineer spring 2014*, páginas 20–24, 2014.
- [13] Yacht Club. IRSC 2008 International Robotic Sailing Conference.
- [14] Galway Host the Seventh Annual World Robotic Sailing Championship and International Robotic sailing Conference. 2014.

- [15] Fernando Joel e Lopes Gamboa. Vela Rígida Aplicando Dinâmica dos Fluidos Computacional Engenharia e Arquitectura Nava l Presidente : Doutor Yordan Ivanov Garbatov Agradecimentos.
- [16] Aplicações A O Projeto Sae-aerodesign. Fundamentos da engenharia aeronáutica aplicações ao projeto sae-aerodesign. páginas 1–320, 2010.
- [17] By Irah Abbott e Albert E. Von Doenhoff. *Theory of Including a Summary of Airfoil Data*. Dover publications, INC New Yord PUBLICATIONS, INC. NEW YORK, New York, 1958.
- [18] S A E Aerodesign. Capítulo 2 fundamentos de aerodinâmica 2.1 –. páginas 15–112.
- [19] Liselotte A. Hoerner. *Fluid-Dynamic Lift*. 1985.
- [20] S. F. Hoerner. *Fluid-Dynamic Drag*. 1965.
- [21] Paul C. Klimas Robert E. Sheidahl. *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil SEctions Trhough 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axil Wind turbines*. 1981.
- [22] NACA 4 digit airfoil generator (NACA 0015 AIRFOIL). URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>.
- [23] Anibal Matos e Nuno Cruz. Positioning control of an underactuated surface vessel. *Oceans 2008*, páginas 1–5, 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5152091>, doi:10.1109/OCEANS.2008.5152091.
- [24] Cole Boulevard. *Basic photovoltaic Principles and Methods*. Technical Information Office, 1982.
- [25] Capitulo Solarterra Energias Alternativas. Energia Solar Fotovoltaica Guia Prático.
- [26] Sunload Mobile e Solutions Gmbh. Hoja de Datos WaveSol Light 1m 12V Sistema de tensión (se recomienda utilizar siempre un cargador solar).
- [27] Miguel Ângelo Silveiro Valente. *Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico*. Tese de doutoramento, Lisboa, Universidade Nova De Lisboa, 2011.
- [28] José Manuel e Antunes Aniceto. Departamento de Engenharia Electrotécnica Conversor DC-DC com busca de ponto de potência máxima (MPPT) para painéis solares. 2010.