

# **DIMENSIONAMENTO DE UMA BÓIA MARÍTIMA ENERGETICAMENTE AUTOSSUSTENTÁVEL**

**Rui Miguel da Silva de Faria**

Relatório da Dissertação Final Submetida a  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Energias Renováveis e Eficiência Energética**

**Dezembro 2015**

# **DIMENSIONAMENTO DE UMA BÓIA MARÍTIMA ENERGETICAMENTE AUTOSSUSTENTÁVEL**

**Rui Miguel da Silva de Faria**

Relatório da Dissertação Final Submetida a  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Energias Renováveis e Eficiência Energética**

Orientador:

Professor Doutor Luís Frólén Ribeiro

**Dezembro 2015**

# Agradecimentos

O projeto que aqui apresento não seria possível sem a ajuda e o apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de mostrar os devidos agradecimentos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Frólén Ribeiro, ao Professor Doutor Carlos Casimiro da Costa, e a todo o grupo Enhanced WT, por todos os conhecimentos que me transmitiram, pelo tempo dispensado para a conclusão deste projeto, pelas análises críticas e pela confiança depositada durante a elaboração deste projeto.

Aos meus pais, por me terem dado esta hipótese de moldar um futuro melhor para mim e pelo apoio que nunca faltou por parte deles, mesmo fazendo um enorme esforço.

À minha namorada pelo incentivo, compreensão, confiança depositada que me levou sempre a avançar e por tudo que ela representa para mim durante todo este tempo que passamos juntos.

Por fim, a todos os meus amigos que me apoiaram sempre durante este percurso e pela amizade construída durante a minha vida académica.

# Resumo

O principal objetivo deste projeto passou pela modelação e dimensionamento de uma bóia marítima energeticamente autossustentável que fosse capaz de fazer uma recolha e transmissão de dados em alto mar e de produzir a eletricidade através de um aerogerador, armazenando-a em baterias.

O aerogerador deve ter capacidade de produção suficiente para alimentar um equipamento designado por *Manta*, um equipamento de recolha de dados que comunica remotamente com vários operadores, que neste caso são UAV's (Unmanned Aerial Vehicle) . O rotor foi dimensionado propositadamente para este projeto utilizando estudos da velocidade do vento em alto mar e teoremas aerodinâmicos. O aerogerador tem de produzir eletricidade suficiente para alimentar a *Manta* e uma luz de sinalização, um total de 17 W.

O aerogerador e a *Manta* estão instalados numa plataforma flutuante em alto mar. Esta plataforma, com uma massa de 470 kg, foi dimensionada para ser estável e para conseguir aguentar o peso da *Manta* e baterias (35 kg), do grupo gerador (6 kg) e da equipa que fosse fazer a manutenção (decidido que seria cerca de 150 kg) quando necessário. Para além da fonte de energia renovável foi também decidido que a plataforma seria construída com um material sustentável, neste caso o *CoreCork*, um composto feito com cortiça e resinas naturais.

Para que a plataforma fosse ainda mais sustentável em termos de materiais, a flutuação será proveniente de câmaras-de-ar, com uma proteção em borracha reciclada, o mesmo material do piso dos parques infantis. Neste projeto não foi efetuada uma estimativa de custos financeiros.

O resultado final consiste no desenho de uma plataforma com a capacidade de produzir energia elétrica própria, estável, para uso em alto mar e feita com materiais sustentáveis, podendo a sua utilização explorada para outras atividades.

Palavras chave: bóias Marítimas; Concentrador-Difusor; *CoreCork*.

# Abstract

The main objective of this project was the design of an energetically self-sustaining sea buoy capable of collecting and transmitting data at high seas, and produce it's own electrical energy using a wind turbine, storing the electricity in batteries.

This wind turbine must have the capability of producing enough energy to feed an equipment called *Manta*, that collects data and communicates remotely with diferente types of operators, in this case are UAV's, and a signaling light, for a total of 17W .

The wind turbine and the *Manta* will be installed on a floating plataform at high seas. This platform, that weighs 470kg, was dimensioned to be stable and to support the weigth of the *Manta* and batteries (35 kg), the wind generator (6 kg) and maintenance crew (decided to be about 150kg). Beside the platform having a renewable energy source it was also decided that it should be made of a sustainable material, in this case *CoreCork*, a compound made with cork and natural resins.

In order for the platform to be even more sustainable in terms of materials, the buoyancy is to be provided by air tubes and it will have a side protection made of recycled rubber, the same material used on the floor of childrens playgrounds. In this project an estimate of cash costs was not made.

With the conclusion of this project, it was obtained a model of a platform capable of producing it's own energy, stable in high seas and made with sustainable materials, that can be used in others aplicaciones.

Keywords: Sea Bouys; Concentrator-Diffuser; *CoreCork*.

# Conteúdo

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                       | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento . . . . .                                 | 1         |
| 1.2      | Estado da Arte . . . . .                                | 3         |
| 1.3      | Organização . . . . .                                   | 6         |
| <b>2</b> | <b>Fundamentação Teórica</b>                            | <b>7</b>  |
| 2.1      | Desenho de uma pá . . . . .                             | 7         |
| 2.2      | Perfil Alar . . . . .                                   | 8         |
| 2.3      | Teoria Elementar da Pá . . . . .                        | 9         |
| 2.4      | Convergente-Divergente . . . . .                        | 12        |
| 2.5      | Geradores DC . . . . .                                  | 13        |
| 2.6      | <i>Manta Communications Gateway</i> . . . . .           | 13        |
| 2.7      | Centro de Massa . . . . .                               | 15        |
| 2.8      | Força de Impulsão . . . . .                             | 16        |
| 2.9      | Estabilidade . . . . .                                  | 17        |
| 2.10     | <i>CoreCork</i> . . . . .                               | 18        |
| <b>3</b> | <b>Caso de Estudo</b>                                   | <b>19</b> |
| 3.1      | Modelação da Pá . . . . .                               | 19        |
| 3.2      | Seleção do Gerador DC e do Regulador de Carga . . . . . | 22        |
| 3.3      | Dimensionamento do Banco de Baterias . . . . .          | 24        |
| 3.4      | Desenho e dimensionamento da plataforma . . . . .       | 27        |
| 3.5      | Dimensionamento das câmaras-de-ar . . . . .             | 33        |
| <b>4</b> | <b>Conclusões</b>                                       | <b>34</b> |
| 4.1      | Conclusão . . . . .                                     | 34        |
| 4.2      | Trabalhos Futuros . . . . .                             | 35        |
| <b>5</b> | <b>Anexos</b>   | <b>38</b> |
| 5.1      | Anexo1 . . . . .  | 39        |
| 5.2      | Anexo 2 . . . . .                                       | 41        |

*CONTEÚDO*

v

|     |                   |    |
|-----|-------------------|----|
| 5.3 | Anexo 3 . . . . . | 43 |
| 5.4 | Anexo 4 . . . . . | 45 |

# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Princípio de funcionamento de uma central de energia das marés (Neves (2010)). . . . .                     | 3  |
| 1.2  | Características da SEAWATCH Wind LiDAR (Furgo (2012)). . . . .   | 5  |
| 1.3  | Protótipo da bóia da WavEC (Offshore Wind (2014)). . . . .   | 6  |
| 2.1  | Relação entre o tipo de aerogerador e os valores de <i>Tip Speed Ratio</i> e o $C_p$ (Hau (2000)). . . . . | 8  |
| 2.2  | Caraterísticas dos perfis aerodinâmicos (Adaptado de E. L. Houghton & P. W. Carpenter (2005)). . . . .     | 9  |
| 2.3  | Modelo dos elementos da pá (Kulunk (2011)). . . . .  | 10 |
| 2.4  | Convergente-Divergente (vistas lateral e frente) (Paulo (2013)). . . . .                                   | 12 |
| 2.5  | Convergente-Divergente (perspetiva isométrica)(Paulo (2013)). . . . .                                      | 12 |
| 2.6  | Componentes de um gerador DC (Mohan (2003)). . . . .   | 13 |
| 2.7  | <i>Manta Communications Gateway</i> (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)). . . . .     | 14 |
| 2.8  | <i>Manta</i> montada numa bóia (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)). . . . .          | 14 |
| 2.9  | Força de impulsão sobre um corpo imerso (White (2008)). . . . .  | 16 |
| 2.10 | Equilíbrio estático de um corpo flutuante (White (2008)). . . . .  | 17 |
| 2.11 | Cálculo do metacentro M de um corpo flutuante (White (2008)). . . . .                                      | 18 |
| 3.1  | Distribuição de <i>Weibull</i> dos dados recolhidos. . . . .   | 20 |
| 3.2  | Desenho da pá. . . . .   | 21 |
| 3.3  | Desenho do rotor (vista de frente). . . . .  | 22 |
| 3.4  | <i>Windstream Permanent Magnet DC Generator (#443540)</i> (WindStream (2015)). . . . .                     | 23 |
| 3.5  | Curvas de potência do gerador (WindStream (2015)). . . . .   | 23 |
| 3.6  | <i>Flexcharge NC25A-12</i> (WindStream (2015)). . . . .  | 24 |
| 3.7  | Luz de navegação Hella Marine (Nauti4u (2015)). . . . .  | 25 |
| 3.8  | Diagrama de carga. . . . .   | 26 |
| 3.9  | Diagrama de Blocos da Instalação. . . . .  | 27 |

|  |    |
|--|----|
| 3.10 Esboço inicial da plataforma (desenhado por Carlos Casimiro da Costa (2014)). . . . . | 28 |
| 3.11 Primeiro modelo da plataforma . . . . .   | 29 |
| 3.12 Segundo modelo da plataforma. . . . .   | 30 |
| 3.13 Desenho final da plataforma com aerogerador e câmaras-de-ar. . . . .                  | 31 |
| 3.14 Vista explodida da plataforma. . . . .  | 32 |

# Lista de Tabelas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Características da <i>Manta</i> (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)). . . . .  | 15 |
| 3.1 | Segmento, Ângulo de Ataque, Corda e <i>Twist</i> . . . . .  | 20 |
| 3.2 | Características de operação do <i>Flexcharge NC25A-12</i> (Adaptado de WindStream (2015)) . . . . . | 24 |
| 3.3 | Características do Banco de Baterias . . . . .  | 26 |
| 3.4 | Tipos de peças. . . . .   | 32 |

# Nomenclature

C-D Convergente-Divergente

EDP Energias de Portugal

ISA International Standard Atmosphere

LED Light-emitting diode

UAV Unmanned Aerial Vehicle

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

À medida que a utilização de combustíveis fósseis no mundo é cada vez mais criticada, o interesse em fontes alternativas de energia tem tido um grande aumento. A maior parte desse interesse vem de entidades comerciais que procuram novas tecnologias para que as grandes centrais de produção de energia elétrica através de fontes não renováveis sejam completamente postas de parte. Este tipo de tecnologias utilizam a conversão da energia do vento, solar, dos oceanos e a geotérmica, sempre com os mesmos objetivos, a produção de energia elétrica de forma sustentável e acabar com a dependência dos combustíveis fósseis.

A microprodução ou a produção localizada também são fatores a ter em conta, uma vez que permitem que cada um seja responsável pela produção da energia elétrica que consome, e este termo pode ser utilizado tanto para a população mundial (como por exemplo, a produção de eletricidade em habitações próprias) como para equipamentos instalados em locais remotos ou de difícil acesso. Ao longo dos anos foram propostos vários modelos de bóias de extração de energia, alguns desses modelos chegaram mesmo a ser construídos, sendo objetivamente orientados para a produção comercial de energia (McCormick (2007)). Este tipo de bóias têm pouco em comum com as bóias que serão abordadas neste projeto, uma vez que produzem energia elétrica para a rede comercial em vez de estarem orientadas primeiramente para recolha de dados ou apoio à navegação.

De notar também que, se os combustíveis fósseis deixassem de ser utilizados na produção de eletricidade, surgiria o fim do monopólio energético dos poucos países que exportam este tipo de combustíveis. Este é um aspeto um pouco menosprezado, mas bastante significativo uma vez que a produção localizada de energia implica sempre uma redução de custos a médio ou longo prazo, independentemente que seja de uma cidade ou de uma bóia oceânica. Isto acontece pois ao produzir a energia no local onde vai ser consumida são evitados os custos do transporte e, conseqüentemente, as perdas desse mesmo

transporte.

Torna-se então lógico que as bóias marítimas sejam uma aplicação natural para as fontes renováveis de energia devido aos baixos requisitos de potência. A troca de baterias é um processo caro e perigoso, processo este que seria facilmente evitado aproveitando o facto de estarem localizadas num ambiente onde existe muito potencial de energia. Ao produzirem a sua própria energia, as bóias marítimas têm perdas de transporte de energia praticamente inexistentes e deixa de ser necessário uma manutenção assídua. O custo de manutenção das bóias marítimas *offshore* é bastante elevado, e estes custos advêm da substituição de baterias que precisam apenas de serem recarregadas. A guarda costeira dos E.U.A gasta anualmente cerca de mil milhões de dólares (Department of Homeland Security (2011)) em manutenção de bóias, e a maior parte desse processo passa pela simples substituição de baterias. Devido à maioria das bóias marítimas serem propriedade de agências governamentais, nunca existiu muito interesse na investigação de produção localizada de energia e em equipar as bóias com este tipo de tecnologia. Felizmente é um cenário que começa a alterar-se. Devido aos cortes nos orçamentos e ao aumento do preço dos combustíveis fósseis, estas agências começam a ganhar interesse em explorar tecnologias capazes de tornarem as bóias marítimas autossustentáveis energeticamente.

O objetivo deste projeto é a criação de uma bóia capaz de fornecer cerca de 17 W de potência elétrica para alimentar uma bóia de comunicação, designada de *Manta*. Teve de ser desenhada a partir do zero, o que envolveu o dimensionamento de um aerogerador equipado com um Convergente-Divergente (C-D), dimensionamento das baterias e o desenho da plataforma que irá incluir todo o equipamento, onde foi também dimensionada a sua capacidade de flutuação.

Como este projeto poderá vir a ser utilizado futuramente no mundo real, é necessário que o produto final seja uma solução viável, logo foi também escolhido um material que torna possível a construção de uma estrutura resistente e duradoura, sendo ao mesmo tempo leve e derivado de recursos renováveis e sustentáveis. Foi então decidido que o material utilizado neste projeto seria o *CoreCork*, um material derivado de um aglomerado de cortiça.

## 1.2 Estado da Arte

Devido à falta de fundos e interesse em investigação, as bóias marítimas mantiveram-se num estado relativamente rudimentar, sendo que os avanços neste tipo de tecnologia foram dados apenas em anos recentes. Uns dos primeiros passos dados para melhorar estes equipamentos passou por perceber que tipo de energia está disponível em alto mar. Obviamente que o sol e o vento são fontes viáveis neste ambiente mas também é possível aproveitar a energia da própria água.

A energia das marés, também denominada de energia maremotriz, ocorre devido à interação gravitacional entre a terra, o sol e a lua. Existem dois tipos de energia disponível através desta interação, a energia potencial derivada da variação do nível do mar (marés), e a energia cinética proveniente das correntes marítimas e das ondas.

A energia das marés é aproveitada através da construção de barragens e reservatórios, que enchem e esvaziam em conformidade com a subida e a descida das marés. A água é forçada a passar por uma turbina acoplada a um gerador, produzindo energia elétrica (Neves (2010)). A Figura 1.1 representa um esquema deste tipo de tecnologia :

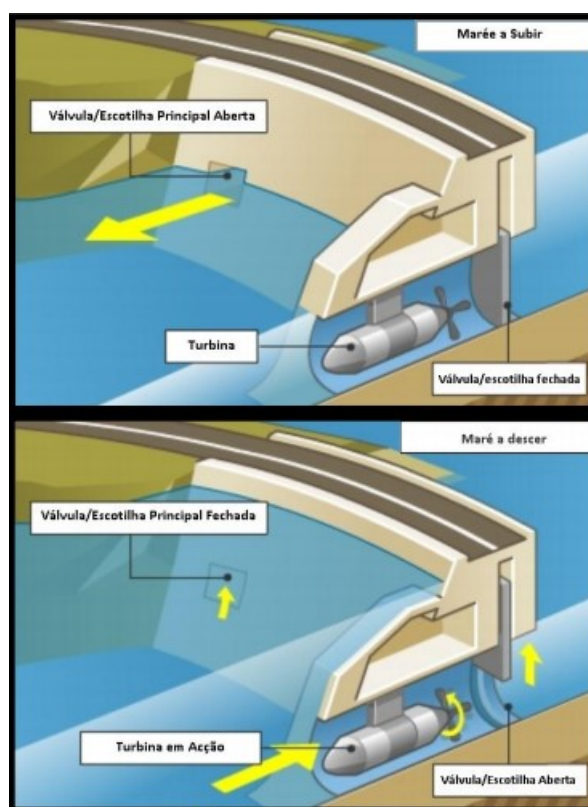


Figura 1.1: Princípio de funcionamento de uma central de energia das marés (Neves (2010)).

Este tipo de tecnologia poderia ser utilizada neste projeto, no entanto faria com que o desenho da plataforma fosse demasiado complexo e que a plataforma tivesse de aguentar as cargas horizontais elevadas associadas a este tipo de equipamento, o que iria fazer com

que os custos fossem demasiado elevados.

A energia solar fotovoltaica foi também posta de parte devido ao risco de acumulação de sal nos módulos fotovoltaicos, o que tornaria o sistema pouco eficiente. No entanto seria o único fator a ter em conta no que toca a manutenções regulares. Foi então decidido a utilização de energia eólica por diversas razões: o vento é um recurso abundante em alto mar, a utilização de apenas uma fonte de energia torna o projeto mais robusto e com custos mais baixos, e, em alto mar, é dos recursos que necessita de menos manutenção.

Existem no mercado diversos tipos de bóias marítimas, que fazem desde recolha de dados meteorológicos a sinalização, sendo que são todas utilizadas em missões temporárias mas algumas já estão equipadas com uma forma de produção de energia elétrica própria. Uma dessas bóias é a *SEAWATCH Wind LiDAR* da Fugro. É uma bóia feita de alumínio e aço inoxidável equipada para a recolha de dados de vento e de marés e é alimentada por um banco de baterias com 248 Ah de capacidade carregado por painéis solares fotovoltaicos com uma potência de 180 W. Com uma altura de 6,1 metros, dos quais 3,5 estão acima da linha de água, e um diâmetro de 2,8 metros, tem uma massa de 1200 kg e tem uma capacidade de flutuação de 2500 kg.

Utilizando anemómetros montados num mastro com uma altura até 5 metros e um sistema de LiDAR com um alcance até 300 metros é capaz de medir perfis de vento com grande precisão. Estes dados são enviados diretamente para um servidor onde são processados em tempo real (Furgo (2012)). A Figura 1.2 mostra o aspeto e as características desta bóia:

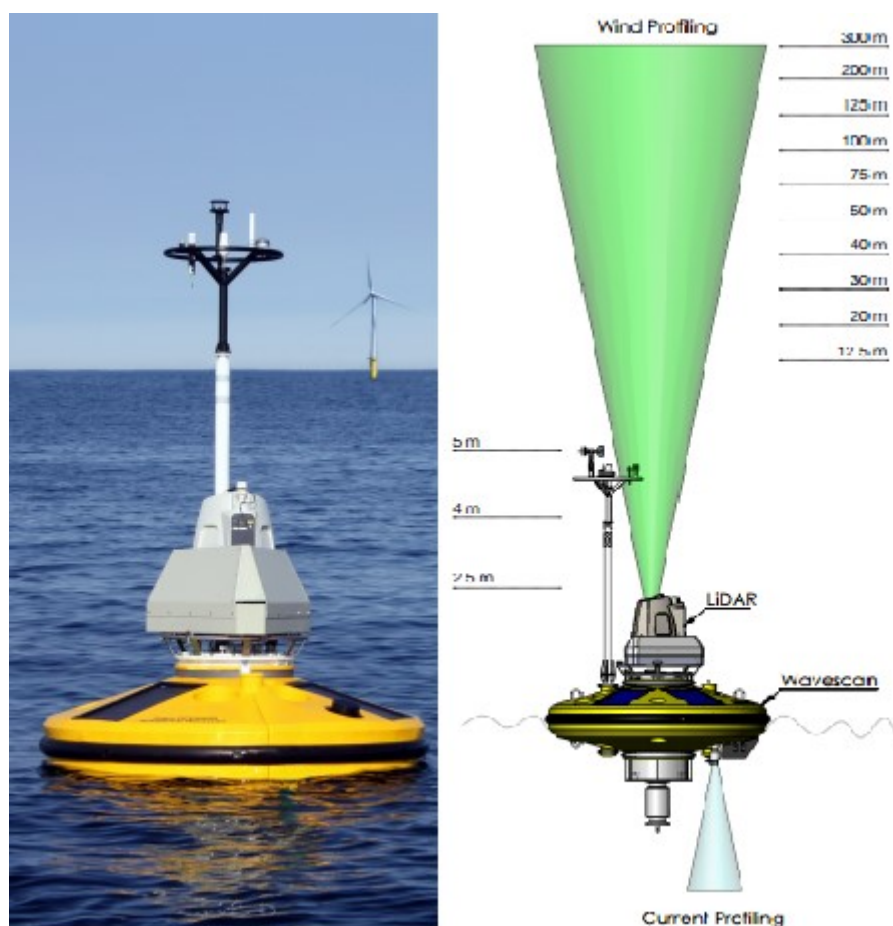


Figura 1.2: Características da SEAWATCH Wind LiDAR (Furgo (2012)).

Em julho de 2014 a *WavEC Offshore Renewables* lançou o primeiro protótipo de uma bóia de monitorização *offshore* em Algés, Portugal. Esta bóia foi projetada e equipada com o objetivo de recolha de dados para o auxílio à otimização da construção de parques eólicos *offshore*, fornecendo também dados para questões de impacto ambiental a longo prazo. Este projeto tem o auxílio de diversas entidades, incluindo a EDP Inovação e o Instituto Superior Técnico (Offshore Wind (2014)). A Figura 1.3 mostra a bóia colocada no local de teste:



Figura 1.3: Protótipo da bóia da WavEC (Offshore Wind (2014)).

### 1.3 Organização

Este relatório é composto por 5 capítulos. No Capítulo 1 é feito o Enquadramento do projeto e o revisão do Estado da Arte atual das bóias marítimas. No Capítulo 2 é abordada a Fundamentação Teórica de todos os conceitos teóricos mecânicos, eletromecânicos e eletrotécnicos de interesse para este projeto. No capítulo 3 é descrito o Caso de Estudo, onde foram explicados os processos de modelação, dimensionamento e seleção dos equipamentos. O Capítulo 4 apresenta as Conclusões e os Trabalhos Futuros referentes a este projeto. Por fim, os Anexos estão presentes no Capítulo 5.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo é feita a revisão da literatura para todos os conceitos utilizados neste projeto.

### 2.1 Desenho de uma pá

Para modelar uma pá aerodinâmica é necessário seguir um processo iterativo.

Primeiramente é necessário saber o comprimento da pá para produzir a energia necessária para este projeto.

Segundo Hansen (2008), a potência característica de um aerogerador pode ser retirada a partir da Expressão (2.1):

$$P = C_P \times \mu \times \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^2 \times V_o^3 \quad (2.1)$$

Sendo,

- $C_P$ – Coeficiente de potência;
- $\mu$ – Eficiência mecânica e elétrica expectável, geralmente na ordem dos 90%;
- $\rho$ – Massa volúmica do ar (kg/m<sup>3</sup>);
- $R$ – Raio da pá (m);
- $V_o$ – Velocidade média do vento (m/s).

Na Figura 2.1 estão relacionados os coeficientes de potência ( $C_P$ ) em relação às diferentes *tipspeeds* ( $\lambda$ ), considerando vários tipos de turbinas.

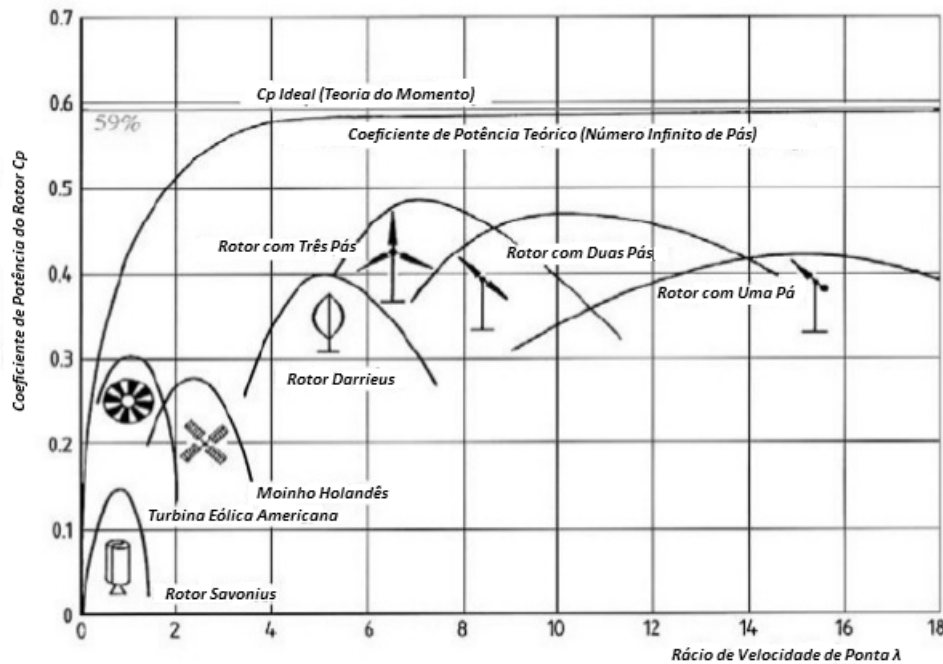


Figura 2.1: Relação entre o tipo de aerogerador e os valores de *Tip Speed Ratio* e o  $C_p$  (Hau (2000)).

A massa volúmica do ar é uma importante variável na dinâmica da atmosfera. O aquecimento e arrefecimento do ar alteram a sua massa volúmica provocando o deslocamento de ar formando assim brisas e ventos. A densidade do ar, assim como a pressão do ar, diminui com o aumento da altitude, variando com a temperatura e a humidade. Segundo a ISA (International Standard Atmosphere), ao nível do mar e a  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , a densidade do ar é cerca de  $1,225\text{ kg/m}^3$ .

Após seleccionar o Perfil Alar utiliza-se a Teoria Elementar da Pá para calcular as dimensões.

## 2.2 Perfil Alar

Um perfil alar, ou perfil aerodinâmico, é uma secção bidimensional desenhada para provocar variações de direcção e de velocidade do ar. Existem diversos tipos de perfis, sendo projetados para diversos tipos de aplicações como asas de aviões, hélices de helicópteros ou pás de aerogeradores. A Figura 2.2 mostra as principais características de um perfil alar:

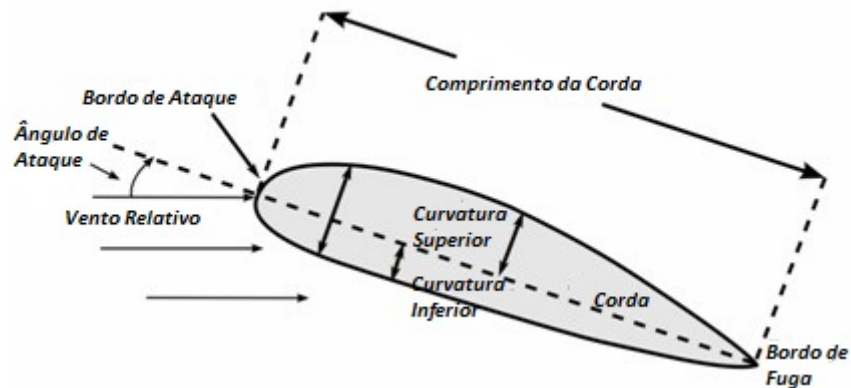


Figura 2.2: Características dos perfis aerodinâmicos (Adaptado de E. L. Houghton & P. W. Carpenter (2005)).

Cada perfil tem características únicas, normalmente diferenciados pela relação das diferentes medidas que influenciam as forças aerodinâmicas relacionadas com a circulação, a massa específica e a velocidade de escoamento do fluido quando atravessa o perfil. Ou seja, quando um aerogerador é atingido por uma massa de ar em movimento (vento), são formadas depressões e sobrepressões no extradorso e no intradorso, provocando um movimento circular no rotor. As medidas que influenciam o desenho de uma pá são o ângulo de ataque ( $\beta$ ), a torção ( $\sigma$ ) e a corda ( $C$ ) (Hansen (2008)).

### 2.3 Teoria Elementar da Pá

A Teoria Elementar da Pá (*Blade Element Theory*) possui dois pressupostos fundamentais:

- Não há interações aerodinâmicas entre diferentes elementos da pá;
- As forças nos elementos da pá são exclusivamente determinados pelo coeficiente de arrasto e de sustentação, constantes nos diferentes elementos.

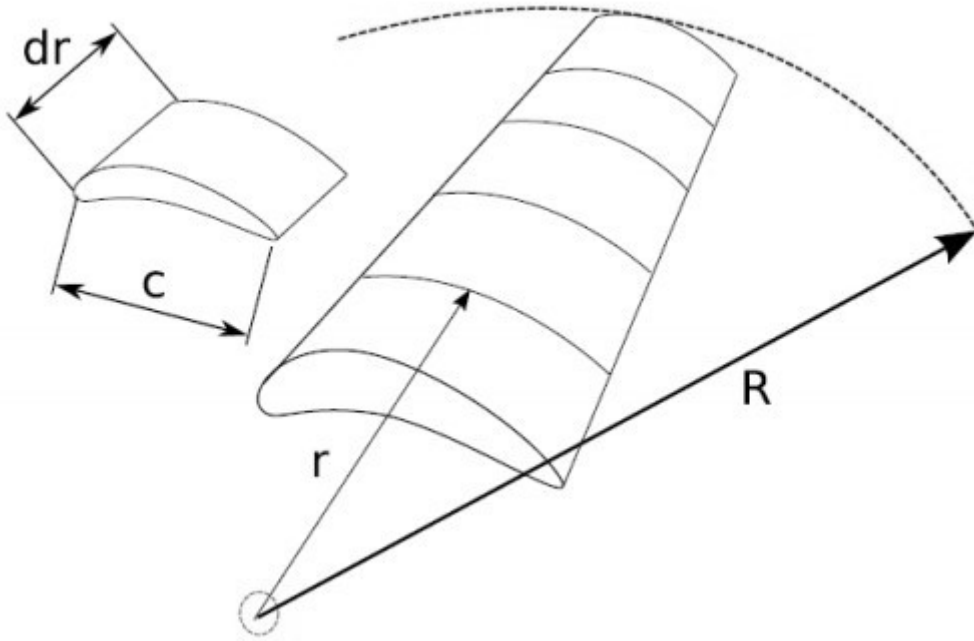


Figura 2.3: Modelo dos elementos da pá (Kulunk (2011)).

Considera-se que a pá está dividida em  $N$  elementos de igual comprimento com, Figura 2.3. Cada um dos elementos constituintes da pá sofrem um fluxo um pouco diferente visto que possuem velocidades de rotação diferentes, diferentes cordas e diferentes ângulos de torção. A Teoria Elementar da Pá consiste na divisão da pá num número suficiente de elementos (geralmente entre 10 a 20 elementos) e calcular o fluxo em cada um deles.

Para se efetuar o desenho da pá do aerogerador é necessário fazer um processo iterativo, onde se deve seguir os seguintes passos (Hansen (2008)):

1. Efetuar o dimensionamento do raio do rotor ( $R$ ) mediante as condições pretendidas de potência a extrair, coeficiente de potência e velocidade do vento através da Expressão 2.1;
2. Escolher o *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) mediante o número de pás ( $B$ ) pretendidas para o aerogerador recorrendo-se à Figura 2.1;
3. Selecionar um perfil aerodinâmico para a pá.;
4. Dividir a pá em  $N$  elementos (neste caso 10).
5. Calcular para cada um deles o ângulo de ataque do segmento ( $\beta$ ) através da Expressão (2.2):

$$\beta = 90 - \frac{2}{3} \times \tan^{-1} \left( \frac{1}{\lambda_r} \right) \quad (2.2)$$

em que  $\lambda_r$  é obtido por:

$$\lambda_r = \frac{\Omega \times \pi \times r}{30 \times V_0} \quad (2.3)$$

Em que  $r$  é o raio local de cada elemento, e  $\Omega$  é dado por:

$$\Omega = \frac{30 \times \lambda \times V_0}{\pi \times R} \quad (2.4)$$

6. Calcular  $\Phi$ :

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{(1-a) \times V_0}{(1+a) \times \omega_r} \right) \quad (2.5)$$

$$\omega_r = \frac{\lambda \times V_0}{r} \quad (2.6)$$

7. Calcular  $\alpha$ :

$$\alpha = \Phi - \theta \quad (2.7)$$

8. Calcular através dos dados do perfil aerodinâmico o valor dos coeficientes de sustentação ( $C_L$ ) e de arrasto ( $C_D$ ). Estes dados podem ser consultados no *website airfoiltools.com* (Airfoiltools (2015)).

9. Calcular os valores de  $a$  e  $a'$  com as seguintes equações:

$$a = \left( 1 + \frac{4 \times \cos\beta \times \cos\beta}{\sigma * C_L \times \sin\beta} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

$$a' = \frac{1 - 3 \times a}{4 \times a - 1} \quad (2.9)$$

10. Recalcular  $a$  e  $a'$ . A partir da 2ª iteração o cálculo de  $\beta$  e de  $a'$  são obtidos pelas Expressões 2.10 e 2.11;

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_r \times (1+a')}{1-a} \right) \quad (2.10)$$

$$a' = \left( \frac{\sigma \times C_L}{4 \times \lambda_r \times \cos\beta} \right) \times (1-a) \quad (2.11)$$

$$\sigma = \frac{B \times c}{2 \times r \times \pi} \quad (2.12)$$

Estes passos devem ser seguidos até que a diferença entre  $a$  e  $a'$  seja o mais próximo de 0 possível.

## 2.4 Convergente-Divergente

Um C-D é um equipamento que, segundo Paulo (2013), aumenta a velocidade do vento nas pás do aerogerador. Como já foi referido anteriormente, a velocidade do vento é um fator com grande influência na extração de potência do vento, e com este C-D são possíveis aumentos de potência máxima de cerca de 87%, e de potência média de 24%, devido a um aumento da velocidade do vento de cerca de  $2 \text{ ms}^{-1}$ . As Figuras 2.4 e 2.5 mostram o aspeto deste equipamento:



Figura 2.4: Convergente-Divergente (vistas lateral e frente) (Paulo (2013)).



Figura 2.5: Convergente-Divergente (perspetiva isométrica)(Paulo (2013)).

Este equipamento obtém melhores resultados com baixas velocidades do vento, sendo mais utilizado para pequenas eólicas, em locais urbanos ou em pequenas produções próprias, como é o caso deste projeto, melhorando da eficiência total do aerogerador.

## 2.5 Geradores DC

O gerador é o componente responsável pela produção de energia elétrica. Converte o momento da energia mecânica do vento captada nas pás do aerogerador em energia elétrica. Neste caso foi escolhido um gerador de corrente contínua (DC), mais utilizados em aplicações de baixa potência e o ideal para o carregamento de baterias.

Um gerador DC é constituído por duas partes, o rotor e o estator. O rotor é a parte girante, montado no eixo do gerador, construído com material ferromagnético que quando está mergulhado num campo magnético fica sujeito a uma força eletromagnética que o faz girar. O estator, como o próprio nome indica, é a parte estática do gerador. É responsável pela criação do campo magnético no qual está mergulhado o rotor, campo magnético este que é criado através de um enrolamento ou através de ímanes permanentes. A Figura 2.6 mostra as partes de um gerador e o campo magnético criado por ímanes permanentes ou por enrolamentos (Mohan (2003)):

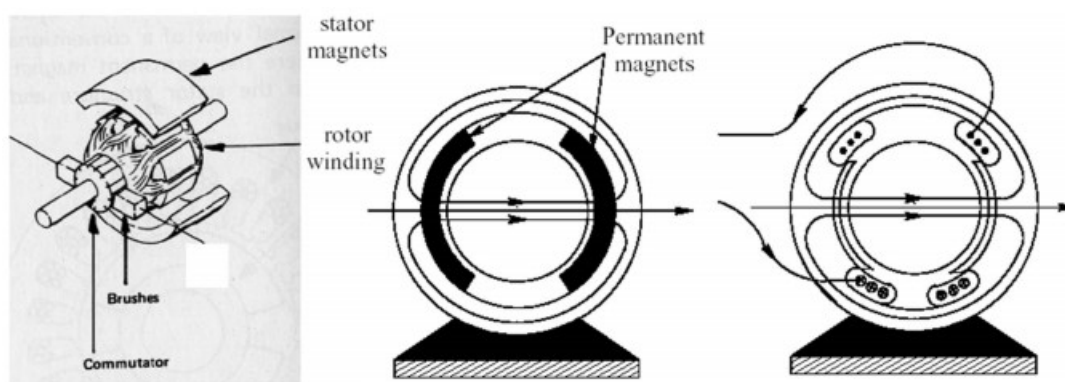


Figura 2.6: Componentes de um gerador DC (Mohan (2003)).

## 2.6 Manta Communications Gateway

O aerogerador será dimensionado para alimentar um equipamento chamado de *Manta Communications Gateway*, que permite a vários operadores o controlo e o monitoramento de múltiplos veículos, como UAV's. As Figuras 2.7 e 2.8 mostram o aspeto da *Manta*:



Figura 2.7: *Manta Communications Gateway* (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)).



Figura 2.8: *Manta* montada numa bóia (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)).

Este dispositivo é alimentado por baterias, que serão carregadas pelo aerogerador, e permite a sua instalação numa bóia. Os dados recolhidos pela *Manta* são depois armaze-

nados numa servidor tipo *Cloud*. A Tabela 2.1 mostra as principais características deste equipamento (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)):

Tabela 2.1: Características da *Manta* (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015)).

|                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| Dimensões              | 43 x 25 x 34 cm                   |
| Massa                  | 9 kg                              |
| Autonomia              | 8 horas                           |
| Wi-Fi                  | 2,4 e 5 Ghz (alcance até 4,5 km)  |
| GSM/HSDPA              | Módulo Quad-band 3G/4G            |
| Comunicações Acústicas | Micro-Modem WHOI, EvoLogics S2C R |
| GPS                    | Módulo GPS                        |
| Satélite               | Iridium SBD                       |

## 2.7 Centro de Massa

Para se determinar o centro de massa de um objeto é aplicado o conceito de carregamentos equivalentes. Mais especificamente, é determinada a posição da massa total do objeto ( $m$ ) de forma a que a que o total da massa colocada naquela posição gere um momento equivalente ao momento total gerado por todas as partículas de massa.

Em primeiro lugar considera-se que o objeto posicionado num sistema de eixos  $Xm$ ,  $Ym$ ,  $Zm$  é submetido a uma força gravítica uniforme no sentido negativo à direção  $z$ . É possível determinar  $Xm$ , estabelecendo que o momento em torno do eixo  $y$  deve ser igual à soma dos momentos criados pelos pesos distribuídos  $dP(= \rho g dV)$ , como mostra a Expressão (2.13):

$$X_m = \frac{\int_{volume} x \rho g dV}{m} \quad (2.13)$$

Da mesma forma, através de momentos equivalentes em torno do eixo  $x$  determinamos  $Ym$  (Expressão (2.14)):

$$Y_m = \frac{\int_{volume} y \rho g dV}{m} \quad (2.14)$$

Por fim, através dos momentos equivalentes em torno do eixo  $y$  determinamos  $Zm$  (Expressão (2.15)):

$$Z_m = \frac{\int_{volume} z \rho g dV}{m} \quad (2.15)$$

Concluindo, o centro de massa de um objeto está na posição determinada por  $Xm$ ,  $Ym$  e  $Zm$ . Com estas informações passou-se à construção do desenho, com o material escolhido (Sheri D. Sheppard & Benson H. Tongue (2010)).

## 2.8 Força de Impulsão

Para calcular a força de pressão sobre um corpo submerso ou flutuante são usados os mesmos princípios de cálculo das forças hidrostáticas sobre superfícies, duas leis da impulsão descobertas por Arquimedes no século III a.C. (Figura 2.9) (White (2008)):

1. Um corpo imerso num fluido está sujeito a uma força vertical igual ao peso do fluido deslocado pelo próprio;
2. Um corpo flutuante desloca o seu próprio peso no fluido em que flutua.

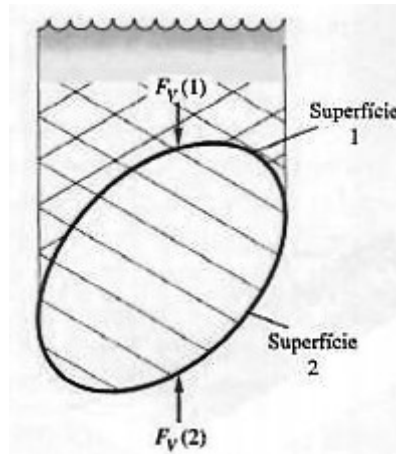


Figura 2.9: Força de impulsão sobre um corpo imerso (White (2008)).

As Leis de Arquimedes são deduzidas observando a Figura 2.9, que mostra um corpo que está entre duas superfícies curvas, a superior 1 e a inferior 2. Com a Expressão (2.16) para a força vertical, é possível determinar que o corpo está sujeito a uma força vertical direcionada para cima (White (2008)):

$$F_E = F_v(2) - F_v(1) \quad (2.16)$$

= (peso do fluido acima de 2) – (peso do fluido acima de 1)

= peso do fluido equivalente ao volume do corpo

É possível também integrar as forças verticais que atuam sobre as camadas verticais por meio do corpo imerso:

$$F_E = \int_{\text{corpo}} (p_2 - p_1) dA_H = (\gamma_{\text{fluido}}) \times (\text{volume do corpo}) \quad (2.17)$$

A linha de ação da força de impulsão passa pelo centro do volume deslocado, no chamado centro de impulsão, indicado por  $E$  ou  $C_E$ . Obviamente este ponto pode ou não corresponder ao centro de massa real do corpo, dependendo de se o corpo está totalmente submerso ou a flutuar. Com a Expressão (2.17) é possível calcular a força de impulsão exercida num corpo imerso num fluido:

A Figura 2.10 mostra os centros de gravidade e de impulsão e as forças que atuam num corpo flutuante:

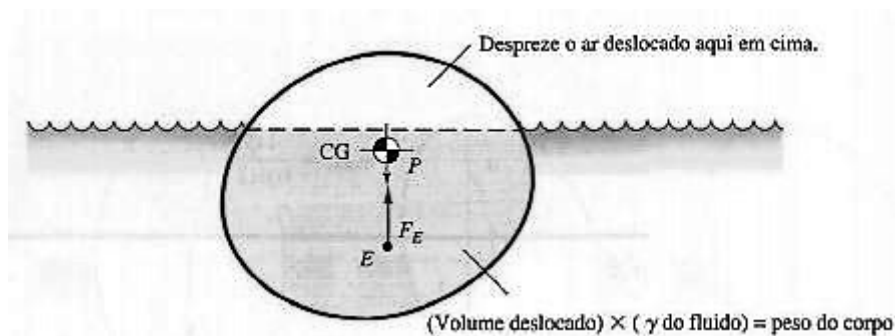


Figura 2.10: Equilíbrio estático de um corpo flutuante (White (2008)).

Devido ao peso relativamente elevado de líquidos,  $1000 \text{ kg/m}^3$  no caso da água (*International Standard Atmosphere*), é possível sentir a força de impulsão exercida. Os corpos flutuantes são um caso especial, uma vez que apenas uma parte do corpo está submersa, essa parte tem de mover um volume de água suficiente para que a força de impulsão seja suficiente para manter o corpo estático.

## 2.9 Estabilidade

Um corpo flutuante pode não manter-se na posição em que está, o que fará com que este mude de posição para uma mais estável. Mesmo que se mantenha estático numa posição instável, um pequeno distúrbio fará com que o corpo “procure” uma posição de equilíbrio mais estável. Para determinar se um corpo flutuante é estável é necessário provocar uma pequena perturbação no corpo com uma quantidade matematicamente pequena e determinar se o corpo desenvolve um momento restaurador que o coloque na sua posição inicial. Os passos a seguir são os seguintes (White (2008)):

1. Calcular o centro de massa ( $G$ ) e o centro de impulsão do corpo ( $E$ );
2. Inclinarm o corpo com um pequeno ângulo  $\Delta\theta$  e estabelecer uma nova linha de água para o corpo a flutuar com esse ângulo. Seguidamente é calculado o novo centro de impulsão ( $E'$ ) e traçada uma linha imaginária vertical que intercete a linha de simetria, determinando o metacentro ( $M$ );
3. Se o ponto  $M$  estiver acima de  $G$ , ou seja, se a altura metacêntrica  $MG$ , for positiva, é criado um momento restaurador que levará o corpo flutuante para a posição original, tornando-o estável. Se a altura metacêntrica for negativa o corpo irá acabar por virar se a perturbação for grande o suficiente. Quanto maior for  $MG$  maior terá de ser essa força, maior é a estabilidade.

Este processo é mostrado na Figura 2.11:

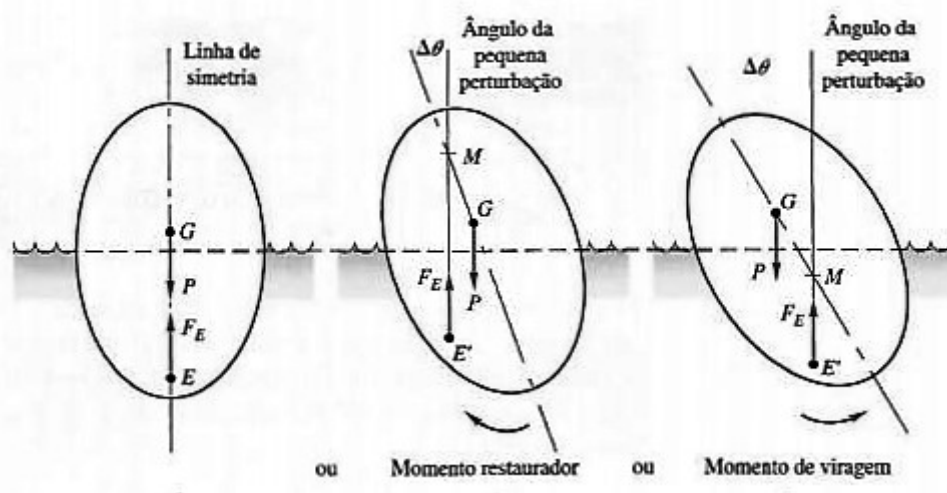


Figura 2.11: Cálculo do metacentro \$M\$ de um corpo flutuante (White (2008)).

Com estes conceitos foram desenvolvidos equações simples para o cálculo da estabilidade, envolvendo momentos de inércia da área da linha de água em torno do eixo de inclinação. As equações (2.18) e (2.19) mostram essas deduções (White (2008)):

$$\frac{x}{\tan\theta} = ME = \frac{I_0}{V_{submerso}} = MG + GE \quad (2.18)$$

Ou:

$$MG = \frac{I_0}{V_{submerso}} - GE \quad (2.19)$$

Nestas equações, \$x\$ representa o movimento do centro impulsão e \$I\_0\$ é o momento de inércia da área da linha de água. De notar também que se a distância \$GE\$ for negativa, ou seja, se o centro de impulsão estiver acima do centro de gravidade, o corpo será sempre estável (White (2008)).

## 2.10 CoreCork

O material escolhido para a construção da plataforma foi o *CoreCork*, um material feito com base em cortiça laminada com camadas de resina, como por exemplo, poliéster ou vinil.

Este material é principalmente utilizado na construção civil servindo com isolamento de habitações, devido à sua elevada capacidade de isolamento térmico e acústico. O método de fabrico do *CoreCork* torna este material bastante leve, relativamente a materiais como o alumínio ou o plástico, e com uma rigidez muito elevada.

Neste projeto a propriedade física mais interessante é a massa volúmica deste material, \$860 \text{ kg/m}^3\$ (Amorim Cork Composites (2013)).

# Capítulo 3

## Caso de Estudo

Neste capítulo são abordados os passos necessários para o dimensionamento e desenho das pás, responsáveis pela captação da energia do vento, a escolha do gerador DC e do regulador de carga, o dimensionamento do banco de baterias e o processo de desenvolvimento da plataforma.

### 3.1 Modelação da Pá

Da Expressão (2.1) é possível calcular o raio da pá para a potência necessária, neste caso 17 W, mas são necessários outros dados.

Para este projeto foi definido que o aerogerador será de 3 pás, o que faz com que o  $C_p$  tenha, de acordo com a Figura, um valor entre 0,3 e 0,5.

Devido à imprevisibilidade do vento, para determinar a velocidade média é necessário uma recolha de dados para obter o valor mais preciso possível. Neste caso foram utilizados dados medidos numa estação em Murtosa, na ria de Aveiro, onde a cada 10 minutos eram retirados os valores da velocidade e da direção do vento a uma altura de 10 metros, numa operação com a duração de 4 anos. Com esta amostra é possível determinar a velocidade média do vento com uma precisão bastante elevada. Utilizando o *software MatLab*, foi feita uma distribuição de *Weibull* de todos os dados recolhidos que mostra essa informação (Figura 3.1):

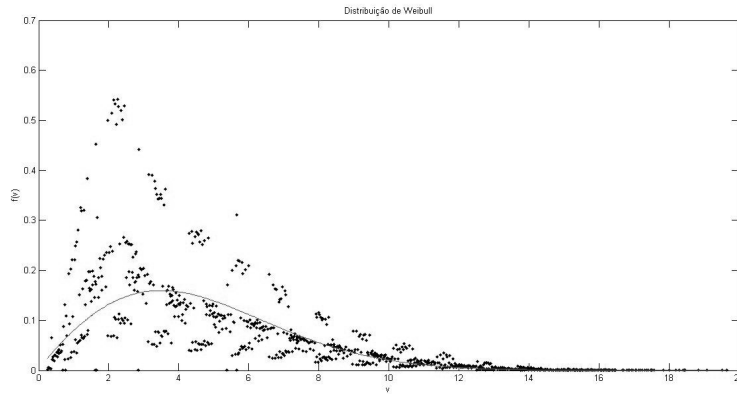


Figura 3.1: Distribuição de *Weibull* dos dados recolhidos.

Com esta experiência conclui-se que a velocidade média do vento é de  $4,4 \text{ ms}^{-1}$  com uma frequência de 55%. Uma informação importante também retirada desta experiência é que no local existe sempre vento.

Recorrendo novamente à Expressão (2.1) calcula-se para uma velocidade média do vento de  $6,4 \text{ ms}^{-1}$ , devido ao C-D, e para uma potência de 17 W um raio do rotor de 0,31 m. No entanto para garantir uma produção de energia suficiente para a *Manta* em alturas de velocidades do vento mais baixas, foi determinado que a pá deste projeto teria um raio de 0,35 m, que resulta numa potência de 22 W. Neste caso foi escolhido o perfil NACA 64 a010, sendo um perfil indicado para baixas velocidades do vento.

A Tabela 3.1 mostra as medidas calculadas, seguindo este método, para este projeto:

Tabela 3.1: Segmento, Ângulo de Ataque, Corda e *Twist* .

| $N$ | $\alpha$ (°) | $C$ (m) | $\sigma$ (°) | $\Delta\left(\frac{a-d}{a}\right) \times 100\%$ |
|-----|--------------|---------|--------------|---|
| 1   | 34,61        | 0,115   | 1,57         | 0%  |
| 2   | 54,15        | 0,082   | 0,56         | 0%  |
| 3   | 64,32        | 0,061   | 0,28         | 0%  |
| 4   | 70,21        | 0,047   | 0,16         | 0%  |
| 5   | 73,99        | 0,039   | 0,11         | 0%  |
| 6   | 76,61        | 0,032   | 0,07         | 0%  |
| 7   | 78,51        | 0,028   | 0,05         | 0%  |
| 8   | 79,97        | 0,024   | 0,04         | 0%  |
| 9   | 81,11        | 0,022   | 0,03         | 0%  |
| 10  | 82,02        | 0,019   | 0,03         | 0%  |

Com estes dados é possível modificar o perfil escolhido para que tenha as características desejadas para este projeto. Para isso é necessário aceder ao *website airfoiltools.com* (Airfoiltools (2015)), procurar o perfil selecionado e introduzir os dados calculados para cada segmento. Com isto é possível descarregar um ficheiro *.txt* com as coordenadas dos pontos de cada segmento. Com as coordenadas dos 10 segmentos fez-se um desenho em *SolidWorks* da pá, representado nas Figuras 3.2 e 3.3:

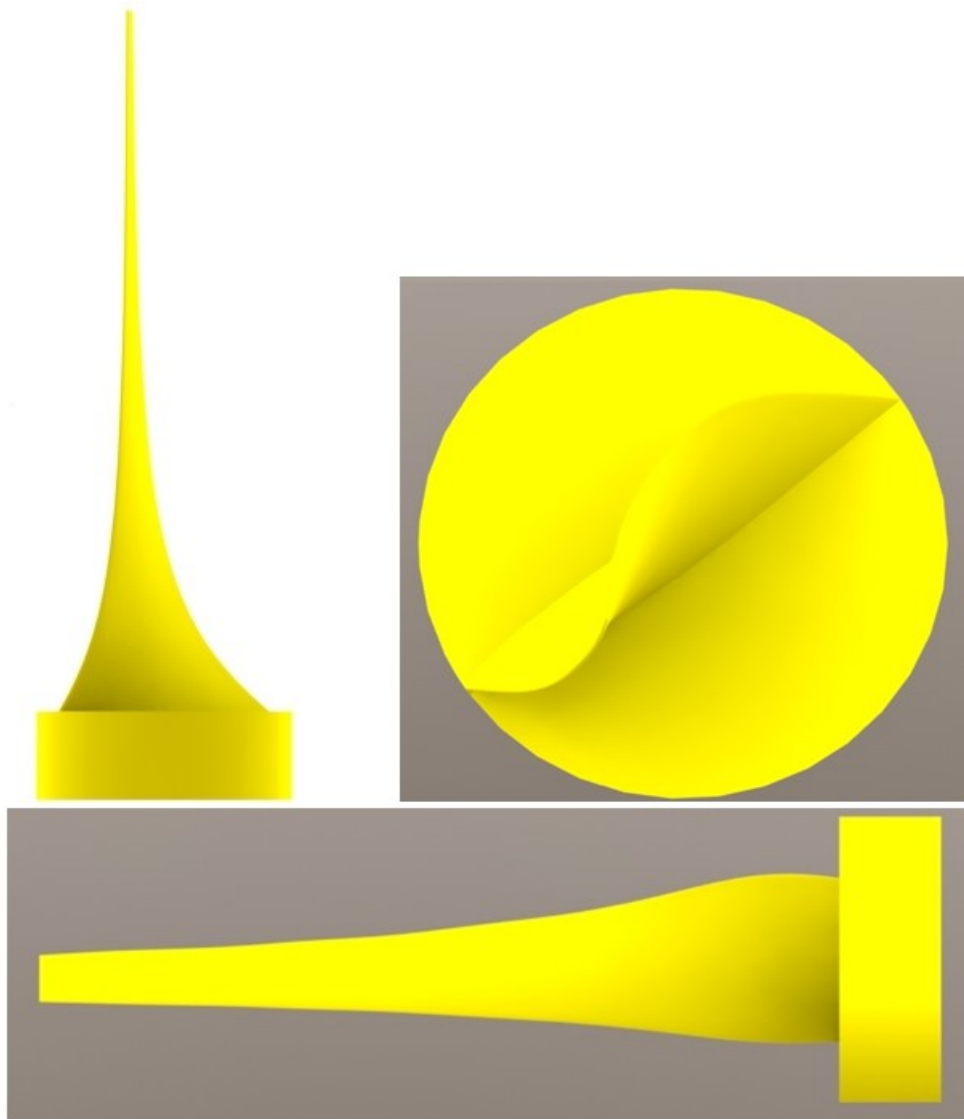


Figura 3.2: Desenho da pá.

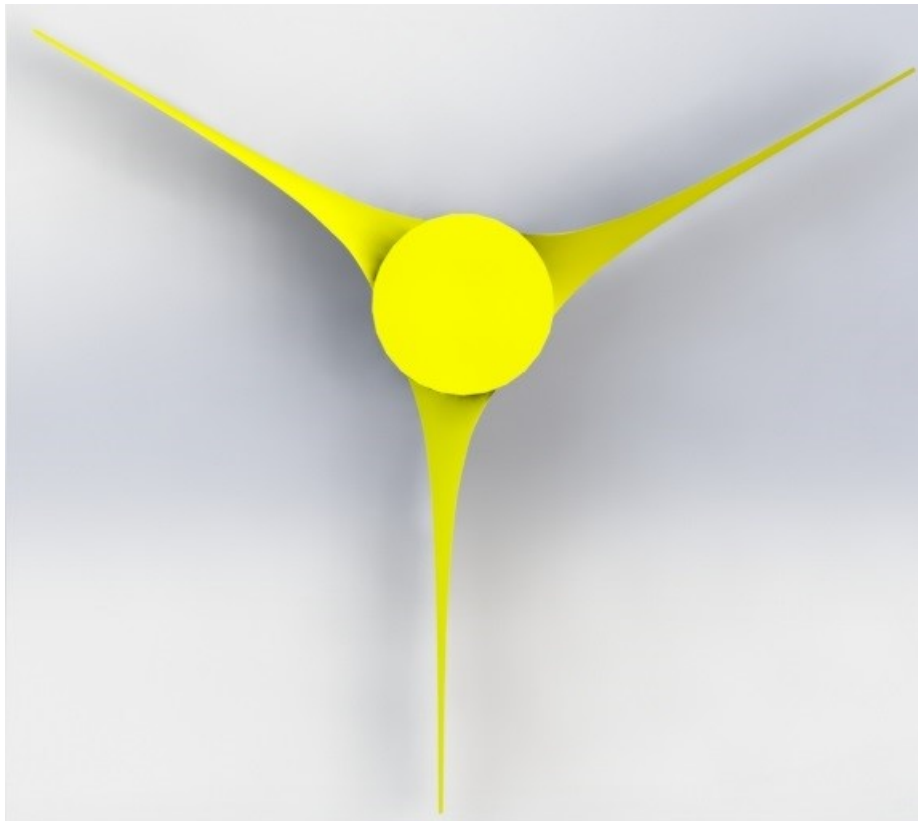


Figura 3.3: Desenho do rotor (vista de frente).

## 3.2 Seleção do Gerador DC e do Regulador de Carga

Existem no mercado várias soluções de geradores DC para pequenos aerogeradores, variando entre baixas e altas potências. A empresa *Windstream* tem uma pequena oferta deste tipo de gerador, criados especificamente para aerogeradores de baixa potência. Para este projeto o ideal seria o gerador DC de ímãs permanentes, modelo #443540, mostrado na Figura 3.4 (WindStream (2015)):



Figura 3.4: *Windstream Permanent Magnet DC Generator (#443540)*(WindStream (2015)).

Este gerador produz 1,5 A em trabalho contínuo com uma tensão de cerca de 14 V, os valores de referência para o carregamento de baterias de 12 V. A Figura 3.5 mostra as curvas de potência e de corrente deste gerador (WindStream (2015)):

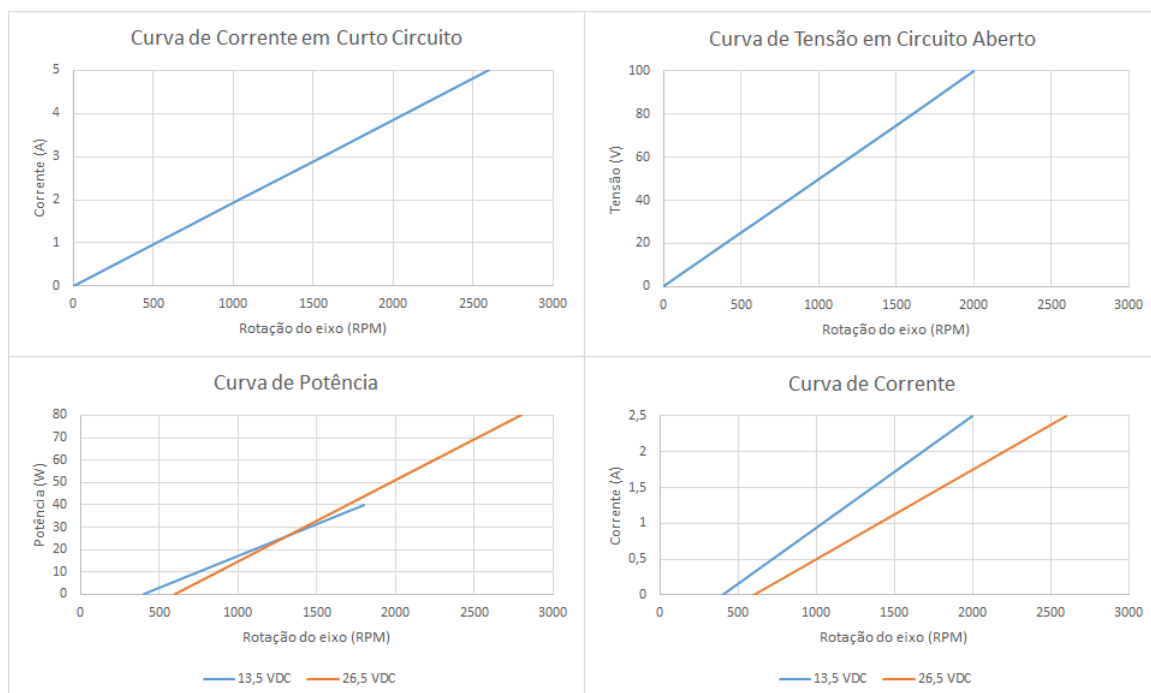


Figura 3.5: Curvas de potência do gerador (WindStream (2015)).

Devido à intermitência do vento o gerador pode produzir demasiada corrente e atingir tensões demasiado elevadas, o que pode danificar as baterias. Para evitar que isto aconteça é necessário instalar um regulador de carga. O regulador de carga é um componente responsável pelo bom estado das baterias. Faz isto medindo o nível de carga do banco de

baterias e permitindo que a energia do gerador alimente as baterias, mudando o gerador para um circuito aberto quando as baterias estão completamente carregadas.

O regulador de carga é um componente responsável pelo bom estado das baterias. Faz isto medindo o nível de carga do banco de baterias e permitindo que a energia do gerador alimente as baterias, mudando o gerador para um circuito aberto quando as baterias estão completamente carregadas. Novamente recorrendo ao catálogo da empresa *Windstream*, a escolha certa para este projeto e o regulador de carga *Flexcharge NC25A-12*, contruído para instalações ao ar livre ou marítimas, mostrado na Figura 3.6 (WindStream (2015)):

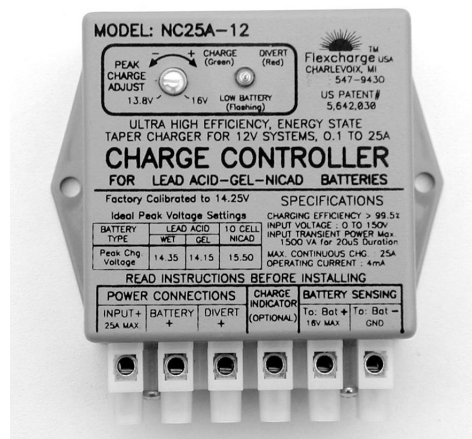


Figura 3.6: *Flexcharge NC25A-12* (WindStream (2015)).

Este regulador é compatível com baterias de gel de chumbo, o mesmo tipo que são utilizadas na *Manta* e é capaz de aguentar a corrente e tensão máximas produzidas pelo gerador em qualquer cenário. Na Tabela 3.2 estão indicadas as características de operação deste regulador de carga:

Tabela 3.2: Características de operação do *Flexcharge NC25A-12* (Adaptado de WindStream (2015))

| <i>Flexcharge NC25A-12</i> | Min.    | Máx.    |
|----------------------------|---------|---------|
| Tensão de Entrada          | 0 VDC   | 140 VDC |
| Tensão de Carga            | 0 VDC   | 16 VDC  |
| Corrente de Carga          | 0,005 A | 25 A    |
| Eficiência de Carga        | 98,9 %  | 99,8 %  |

### 3.3 Dimensionamento do Banco de Baterias

Para que a bóia seja sustentável é necessário armazenar a energia produzida pelo aerogerador. Um banco de baterias é a solução, uma vez que armazena a energia para que possa ser utilizada pelo equipamento elétrico acoplado à plataforma. O dimensionamento de um banco de baterias é feito através da Expressão (3.1) (Vicente & Batista (2013)):

$$C_{Bat} = \frac{E \times nda}{V \times DOD_{m\acute{a}x} \times \eta_{inv} \times \eta_{cabos}} \quad (3.1)$$

- $C_{Bat}$  – Capacidade mínima da(s) bateria(s) [Ah];
- $E$  – Energia necessária por dia [Wh];
- $nda$  – número de dias de autonomia do sistema (tipicamente 3 a 5 dias);
- $V$  – Tensão do sistema [V];
- $DOD_{max}$  – valor máximo da profundidade de descarga (0.3 a 0.9);
- $\eta_{inv}$  – Rendimento do inversor (se não existir = 1);
- $\eta_{cabos}$  – Rendimento dos cabos que ligam as cargas à bateria.

A energia necessária é calculada através da potência instalada. Neste caso o equipamento da *Manta* tem uma potência de 15 W, mas a plataforma terá de ter também uma luz de sinalização. Estão disponíveis no mercado vários tipos de lâmpadas LED (Light-emitting diode) que podem ser utilizadas neste caso.



Figura 3.7: Luz de navegação Hella Marine (Nauti4u (2015)).

Esta luz de navegação (Figura 3.7) possui uma vida útil superior a 50.000 horas e um consumo inferior a 2W. Com a tecnologia *Multivolt™*, opera assim de 9 a 33V e tem um alcance de 2 milhas náuticas. Adicionalmente cumpre com as normas IMO COLREG, RINA e USCG, é à prova de água, resistente ao choque e aos raios ultra-violeta (Nauti4u (2015)). Assim, o diagrama de carga do sistema é o seguinte (Figura 3.8):



Figura 3.8: Diagrama de carga.

Com este diagrama é possível determinar a energia necessária para alimentar o sistema, que neste caso é de 392 Wh, com uma potência média de 16,33 W. De notar que este diagrama é relativo ao dia com menos horas de sol do ano, o que faz com que a lâmpada esteja ligada mais tempo.

Recorrendo à Expressão anterior, a capacidade e as características do banco de baterias são mostradas na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Características do Banco de Baterias

|                |      |
|----------------|------|
| Energia (Wh)   | 392  |
| nda (dias)     | 1    |
| V (volts)      | 12   |
| DOD            | 0,6  |
| $\eta_{inv}$   | 1    |
| $\eta_{cabos}$ | 0.97 |
| C (Ah)         | 56   |

As baterias utilizadas na *Manta* são o modelo 6-CNFJ-14 fabricadas pela *Betta Batteries* (Betta Batteries (2014)) o que faz com que o sistema necessite de 4 baterias para além das que estão incluídas na *Manta*.

Assim estão escolhidos e dimensionados todos os equipamentos elétricos que vão alimentar a *Manta* e vão estar montados na plataforma. A Figura 3.9 mostra o diagrama de blocos da instalação:

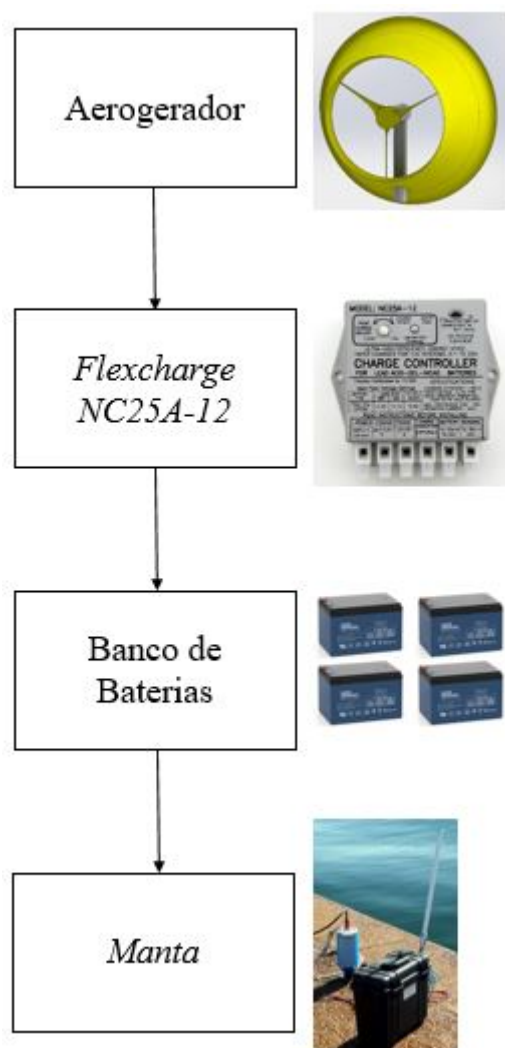


Figura 3.9: Diagrama de Blocos da Instalação.

Como se pode ver, a eletricidade produzida pelo gerador, acoplado ao rotor, é controlada pelo regulador de carga antes de carregar as baterias. É um processo em série de forma a que os componentes sejam simples, tornando-os mais robustos, uma mais valia nas aplicações em alto mar. Caso fosse utilizado um regulador de carga mais complexo, que alimenta-se a *Manta* diretamente quando as baterias estão totalmente carregadas e existe vento, iria ser mais suscetível a avarias. O banco de baterias está diretamente ligado à *Manta*, fornecendo eletricidade aos seus componentes eletrónicos.

### 3.4 Desenho e dimensionamento da plataforma

A plataforma é um componente muito importante no desenvolvimento deste projeto, uma vez que tem que suportar todo o equipamento (*Manta*, aerogerador e baterias) e ser estável em alto mar. Também tem de ser capaz de aguentar todo o peso dos componentes e do pessoal de manutenção.

A ideia inicial seria fazer uma plataforma baseado na *SEAWATCH Wind LiDAR Buoy* da Furgo, devido à sua forma ser propícia à instalação de um aerogerador e de painéis solares em simultâneo. Esta ideia inicial foi posta de parte devido à abundância de recurso eólico em alto mar, o que torna os painéis fotovoltaicos desnecessários.

Foi então decidido que a plataforma seria constituída por uma torre, com 7 metros de altura, onde será instalado o aerogerador, montada num lastro com uma câmara-de-ar de forma a dar a flutuação. A Figura 3.10 mostra o primeiro esboço do projeto:

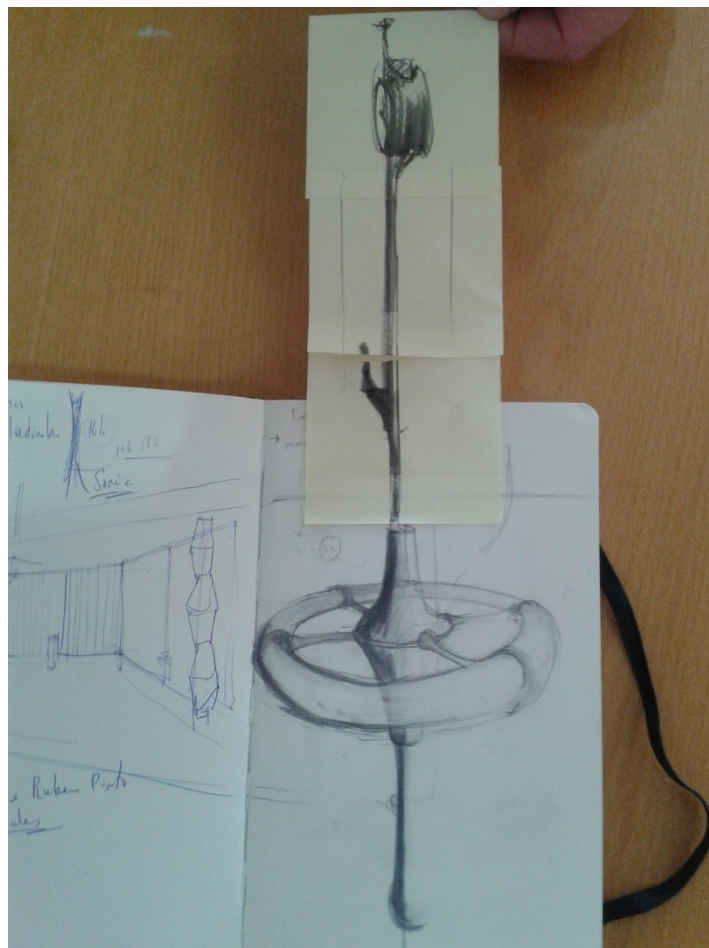


Figura 3.10: Esboço inicial da plataforma (desenhado por Carlos Casimiro da Costa (2014)).

Com o esboço desenhado, foi feito em *SolidWorks* o primeiro modelo da plataforma que pode ser visto na Figura 3.11:

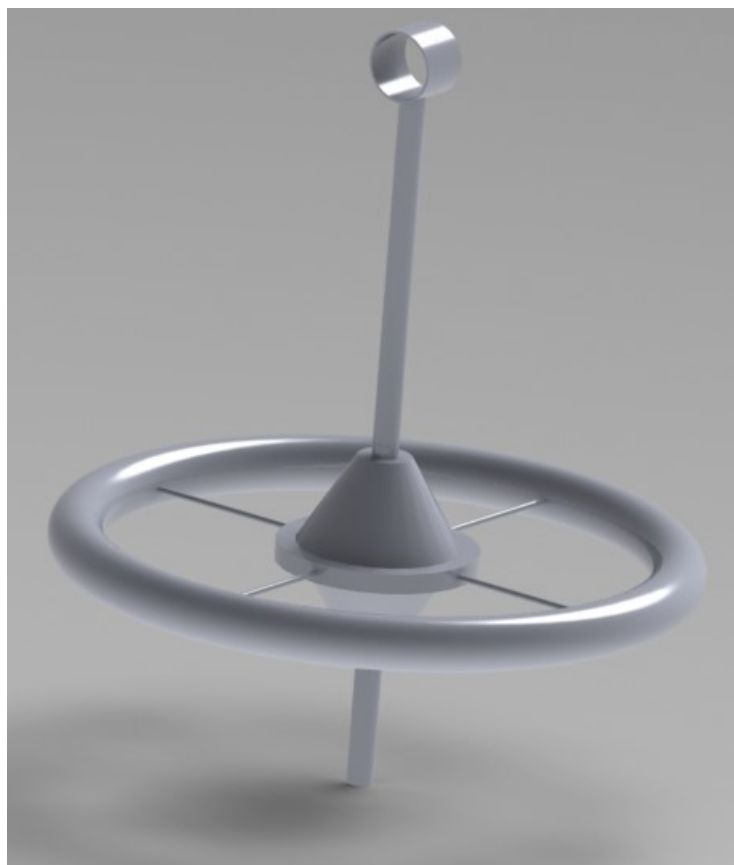


Figura 3.11: Primeiro modelo da plataforma

Este modelo serviu de base para perceber o que seria necessário alterar no desenho. Foi determinado que a plataforma central seria desnecessária, uma vez que poderia ser substituída por rede forte o suficiente para aguentar uma ou duas pessoas quando fosse necessário fazer manutenção. A torre também foi alterada para que tivesse degraus para que fosse possível subir ao aerogerador. Seguidamente foi adicionado um peso no lastro para aumentar a estabilidade. A Figura 3.12 mostra o desenho do segundo modelo:



Figura 3.12: Segundo modelo da plataforma.

O segundo modelo apresentava um aspeto mais satisfatório, e foi com esta plataforma que foram feitos os cálculos da estabilidade e do dimensionamento da câmara-de-ar para fazer a flutuação.

Com a informação retirada anteriormente foi calculado o centro de massa e o centro de impulsão da plataforma, com a forma da Figura 4.13. Recorrendo à equações (2.13), (2.14), (2.15), (2.17) e (2.19), foram calculados o centro de massa, a força de impulsão e a estabilidade.

Com esses cálculos realizados concluí-se que a plataforma era estável, mas para ter essa estabilidade seria necessário uma câmara-de-ar com um tamanho exagerado. Aliás, teria um tamanho que não existiria à venda no mercado, sendo necessário ser feita à medida. Um fator que também foi posto em causa foi a segurança, uma vez que a câmara-de-ar estaria completamente exposta, estaria vulnerável a embates de barcos ou mesmo vandalismos, o que punha em causa a integridade da plataforma. Para contornar este problema decidiu-se utilizar várias câmaras-de-ar mais pequenas, que estejam no mercado, protegidas por uma estrutura montada no perímetro da nova plataforma. Esta proteção seria feita com borracha reciclada, o mesmo material utilizado com piso em parques in-

fantis. A nova estrutura teria um esqueleto com quatro quadrantes, cada um preenchido com uma câmara-de-ar, feito em *CoreCork*, Figura 3.13:

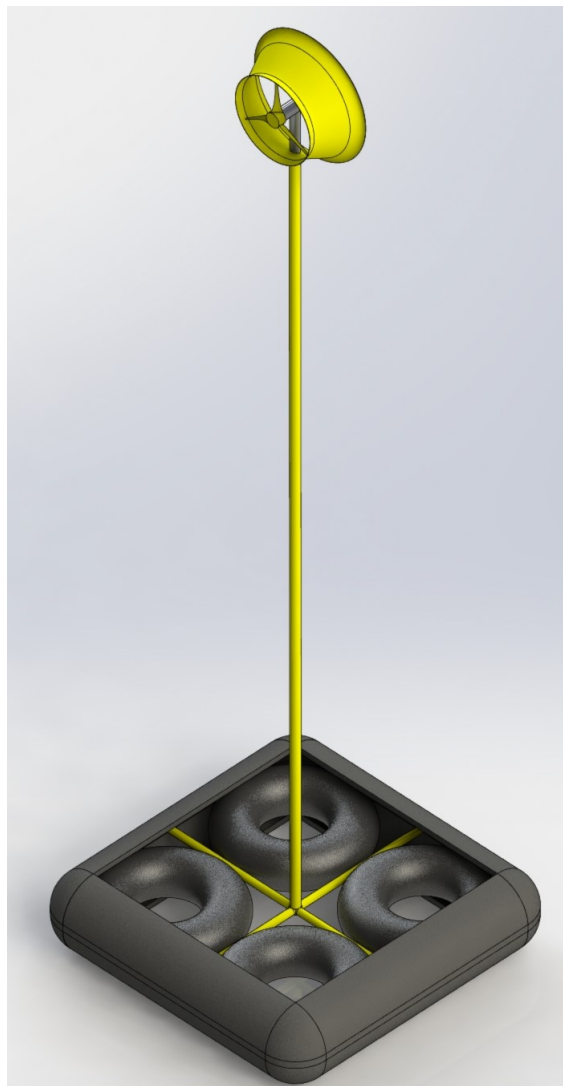


Figura 3.13: Desenho final da plataforma com aerogerador e câmaras-de-ar.

A proteção seria feita através de borracha injetada em moldes com a forma desejada, o que seria um processo simples e em que seriam apenas 2 moldes, um para o segmentos laterais retos e um para os cantos curvos. A superfície superior seria coberta com rede, forte o suficiente para aguentar com os responsáveis da manutenção. De notar também que a torre foi alterada, passando de uma torre fixa com escadas para uma torre dobrável ou telescópica, um aspeto a ser decidido em trabalhos futuros, o que tornará a manutenção ao aerogerador mais fácil e segura. A Figura 3.14 mostra uma vista explodida da plataforma:

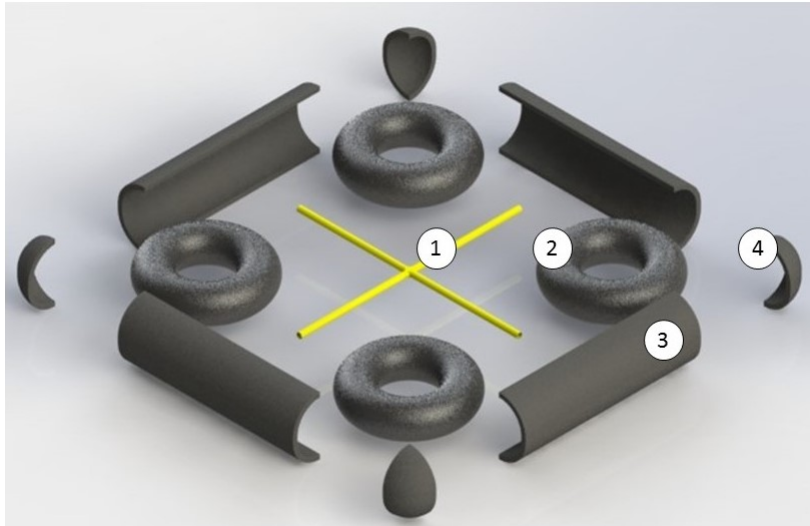


Figura 3.14: Vista explodida da plataforma.

Esta configuração facilita a montagem de todas as peças, já que podem ser unidas por rebiteagem ou por encaixe, se as peças forem moldadas para tal. A Tabela 3.4 tem a lista de peças da plataforma, conforme a numeração da Figura 3.14:

Tabela 3.4: Tipos de peças.

| Peça | Referência                             |
|------|--|
| 1    | Estrutura central em <i>CoreCork</i>   |
| 2    | Câmara-de-ar                           |
| 3    | Proteção lateral em borracha reciclada |
| 4    | União de canto em borracha reciclada   |

De notar que o modo de construção será um fator a ser abordado num trabalho futuro, onde será determinado se a união das peças será feita por rebiteagem, encaixe, colagem ou outro tipo de processo, uma vez que não era o objetivo principal deste projeto.

Com esta nova configuração a plataforma torna-se mais versátil, podendo ser utilizada em outras aplicações como a piscicultura. Torna-se também mais ecológica, uma vez que utiliza matérias recicladas (a borracha) para além de um material naturalmente sustentável (*CoreCork*). Assim a plataforma tem uma massa total de 510 kg e as suas dimensões podem ser consultadas no Anexo 1. As dimensões da Estrutura Central, da Proteção Lateral e da União de Canto estão indicadas nos Anexos 2, 3 e 4, respetivamente. Foram novamente calculados o centro de massa, força de impulsão e estabilidade, concluindo-se que a plataforma é estável, com um valor de  $MG$  de 3,6  $m$ , suficiente para manter a plataforma estável até uma inclinação de 34°. Para que a plataforma aguente águas mais agitadas é necessário fazer um estudo mais complexo de estabilidade, podendo até ser necessário alterar este desenho. O rebaixamento do centro de gravidade poderia ajudar.

### 3.5 Dimensionamento das câmaras-de-ar

No que toca ao dimensionamento das câmaras-de-ar foi utilizada a Expressão (3.2) (Alley (2003); Casio (2015)):

$$V = \frac{1}{4} \times \pi^2 \times (a+b)(b-a)^2 \quad (3.2)$$

Esta Expressão representa o volume de um toro, forma geométrica de uma câmara-de-ar. As dimensões  $a$  e  $b$  representam o diâmetro interno e externo, respetivamente, sendo  $b$  o diâmetro total do toro e  $a$  o diâmetro interno.

Neste dimensionamento foi tomado em conta a massa da plataforma e a massa que a mesma teria de aguentar, ou seja, as câmaras-de-ar têm de criar uma força de impulsão suficiente para aguentar o próprio peso da plataforma mais o peso do equipamento, aerogerador os responsáveis pela manutenção. Como o desenho da plataforma evoluiu para uma estrutura mais versátil, foi definido que as câmaras-de-ar seriam dimensionadas para aguentar uma tonelada, e com a Expressão (2.17) calcula-se que o volume necessário para tal é de  $1 \text{ m}^3$ . Este volume é dividido por quatro câmaras-de-ar e recorrendo à Expressão (3.2) conclui-se que neste projeto deveriam ser utilizadas câmaras-de-ar com a medida de 19 polegadas. No entanto não existe esta medida no mercado, logo foi escolhida uma câmara-de-ar com uma medida maior. A marca *Dongah Tire and Rubber* oferece câmaras-de-ar com uma medida de jante de 20 polegadas (com a referência 14,5/80x20) (Dongah Tire and Rubber (2015)), a que será usada neste projeto.

# Capítulo 4

## Conclusões

### 4.1 Conclusão

Este projeto teve o objetivo de dimensionar uma bóia marítima energeticamente autossustentável. Em termos de produção de energia elétrica esta bóia é capaz de alimentar a *Manta*, com uma potência instalada de 17 W, sem qualquer tipo de falha através de um aerogerador. O rotor foi dimensionado através da Teoria Elementar da Pá, sendo um pouco sobredimensionado, para cerca de 22 W, para que não existam falhas de potência devido à intermitência do vento. O gerador acoplado ao rotor, o regulador de carga, o banco de baterias e a lâmpada de sinalização são todos compatíveis e são facilmente adquiridos no mercado, assim como as câmaras-de-ar.

Até aqui sabemos que, graças aos cálculos efetuados, o sistema funciona da forma pretendida. No que toca à plataforma sabemos que é estável em alto mar até uma inclinação de 34°. Não foi feito um estudo de estabilidade num ambiente de ondas com grandes dimensões, logo não é possível dizer qual a altura de ondas que a plataforma aguenta sem virar. O modo de construção também será um fator a ser abordado num trabalho futuro, assim como determinar qual será a construção final da torre, uma vez que foi determinado que esta teria de ser rebatível e/ou dobrada.

Neste projeto não foi feita uma análise de investimento nem foram abordados os custos dos componentes.

O aerogerador é constituído por três pás com 35 cm de comprimento e carrega um banco de baterias com a capacidade de 56 Ah. Este banco de baterias alimenta a *Manta*, um equipamento de comunicação remota, e é capaz de fornecer energia durante 1 dia em caso de falta de recurso eólico.

A plataforma que recebe este equipamento é feita em *CoreCork*, um material sustentável feito com cortiça e resinas naturais e bastante leve. Existe também uma proteção em volta da plataforma feita com borracha reciclada que protege as câmaras-de-ar que dão a flutuabilidade necessária à plataforma.

A flutuabilidade é definida pela força vertical criada pelo peso do fluido deslocado pelo objeto flutuante. Assim, quatro câmaras-de-ar de 20 polegadas deslocam água suficiente para que o seu peso seja suficiente para que a plataforma flutue. A forma quadrangular da base, aliada com o volume submerso da mesma, faz com que esta configuração da plataforma seja bastante estável.

No que toca a bóias marítimas a alternativa à produção de energia localizada é a substituição de baterias em alto mar, um processo muito caro e perigoso. Se a energia for produzida no local as viagens até à plataforma reduzem substancialmente, sendo apenas necessárias para a manutenção do aerogerador, um processo muito menos frequente do que a substituição de baterias.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Como já foi referido anteriormente existem alguns trabalhos que podem ser estudados dentro deste projeto:

- Definir o método de união das peças, referido na página 33;
- Desenhar a torre de forma a que possa ser rebatida, referido na página 32;
- Fazer um modelo da bóia à escala através de uma impressora 3D;
- Fazer um estudo da estabilidade da bóia em águas agitadas, referido na página 33.

Uma vez que este produto tem o objetivo de ser posto no mercado, seria interessante fazer uma análise de investimento e um estudo de sustentabilidade de forma a saber a sua viabilidade económica.

# Bibliografia

Airfoiltools (2015).

**URL:** [airfoiltools.com](http://airfoiltools.com)

Alley, W. (2003).

**URL:** <http://whistleralley.com/torus/torus.htm>

Amorim Cork Composites (2013), *CoreCork - Reinventing Sustainable Core Materials*.

Betta Batteries (2014), *The Power of Tomorrow*, Betta Batteries.

Casio, K. (2015).

**URL:** <http://keisan.casio.com/exec/system/1223388402>

Department of Homeland Security (2011), 'Budget in brief'.

Dongah Tire and Rubber (2015), 'Catálogo 2015'.

E. L. Houghton & P. W. Carpenter (2005), *Aerodynamics for Engineering Students*, Butterworth - Heinemann.

Furgo (2012), 'Seawatch wind lidar'.

Hansen, M. O. L. (2008), *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan.

Hau, E. (2000), *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*.

Kulunk, E. (2011), *Aerodynamics of Wind Turbines, Fundamentals and Advanced Topics of Wind Power*, InTech.

Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (2015).

**URL:** [www.lsts.pt](http://www.lsts.pt)

McCormick, M. E. (2007), *Ocean Wave Energy Conversion*, Dover Publications Inc.

Mohan, N. (2003), *Electric Drives - An Integrative Approach*.

Nauti4u (2015).

**URL:** <http://www.nauti4u.com.pt/produto/luz-de-navegacao-bb6106>

Neves, R. N. F. (2010), 'Energia das marés e ondas'.

Offshore Wind (2014).

**URL:** <https://www.offshorewind.biz/2014/08/05/video-wavec-deploys-monitoring-buoy-in-portugal/>

Paulo, J. A. R. (2013), Construção, desenvolvimento e otimização de concentrador e difusor para turbina eólica, Master's thesis, IPB.

Sheri D. Sheppard & Benson H. Tongue (2010), *Estática: Análise e Projeto de Sistemas em Equilíbrio*.

Vicente & Batista (2013), 'Projeto de sistemas fotovoltaicos isolados'.

White, F. M. (2008), *Mecânica dos Fluidos*, bookman.

WindStream (2015).

**URL:** <http://windstreampower.com/>

# **Capítulo 5**

## **Anexos**

## **5.1 Anexo1**



## **5.2 Anexo 2**



### **5.3 Anexo 3**



## **5.4 Anexo 4**

