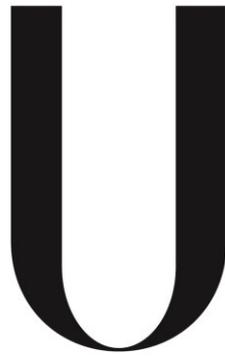


Universidade de Lisboa  
Faculdade Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Estudo de um sistema de concentração integrado numa pequena turbina  
eólica de eixo vertical**

**António José Alves da Silva Santos**

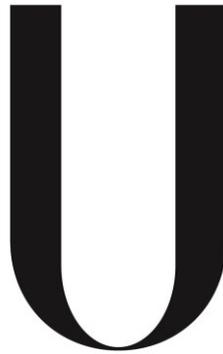
Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

**2014**



Universidade de Lisboa  
Faculdade Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Estudo de um sistema de concentração integrado numa pequena turbina  
eólica de eixo vertical**

**António José Alves da Silva Santos**

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada pelo Professor Doutor Fernando Marques da Silva

e coorientada pelo Professor David M. Rodrigues Pera

**2014**

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de expressar a minha gratidão aos professores orientadores ao Professor Fernando Marques da Silva pela disponibilização do túnel de vento do LNEC, pela sua orientação e ajuda ao longo dos ensaios e na revisão do trabalho escrito e ao Professor David Pera pela orientação desde o início do projecto até à revisão do trabalho escrito, pela disponibilidade e muito tempo despendido, contributo essencial na realização deste trabalho.

Queria também agradecer ao Professor Jorge Maia Alves por todo o apoio e tempo despendido, bem como pela oportunidade que me foi dada de ter participado neste projecto. Gostava de dar uma palavra de agradecimento à Professora Ana Estanqueiro que desde o princípio acompanhou a concepção da turbina utilizada neste projecto

Gostaria de agradecer de forma particular, ao João Silva, André Augusto, Filipa Reis e ao Ivo Costa pela ajuda na fase de construção do protótipo bem como na realização dos ensaios experimentais.

Queria salientar a preciosa ajuda e empenho do Técnico da Oficina do DEGGE, Ricardo.

Gostaria de agradecer ao estagiário do LNEC Lúri Martins pela ajuda disponibilizada no túnel de vento.

Queria agradecer às equipas do Fablab Lisboa e Fablab EDP onde foram feitas muitos dos componentes utilizados no protótipo, e ainda, à Tenente Ana Lesiário e ao Laboratório Aeronáutico da Força Aérea Portuguesa pela disponibilidade para o corte das pás da turbina.

Por último, mas não menos importante, não posso deixar de destacar o meu agradecimento muito especial a todos os amigos, e familiares, que ao longo deste período longo e cheio de desafios e de impossibilidades me apoiaram das mais diferentes formas.

**A todos, muito obrigado.**

## RESUMO

Este trabalho pretende estudar um novo conceito de aproveitamento energético, através de um sistema de concentração eólico adaptado para turbinas de eixo vertical (VAWT). O sistema permite aumentar a velocidade do vento à entrada do rotor da turbina e assim a potência disponível.

O aproveitamento energético de fonte eólica ainda não é comum no ambiente urbano pelo que esta é uma área de investigação relativamente nova.

Este projecto deu continuidade ao trabalho de carácter exploratório efectuado em 2012 no âmbito do Projecto de Licenciatura, onde foi otimizada uma estrutura aerodinâmica para concentração eólica.

Neste trabalho, foram construídas duas estruturas de concentração e uma turbina VAWT com o propósito de verificar que o efeito de concentração se manteria no sistema integrado e se contribuiria para a melhoria do desempenho da turbina. Foram realizados dezenas de ensaios em túnel de vento, para diferentes velocidades de vento, de forma a caracterizar a turbina e os sistemas de concentração. Os resultados obtidos para o sistema VAWT e concentrador, mostram que o efeito de concentração com a VAWT existe, contudo de forma reduzida quando comparada com as simulações computacionais para a estrutura de concentração. A diminuição do efeito de concentração poderá estar ligada às condições dos ensaios, ao regime de operação da turbina projectada, e ainda a falhas no protótipo. Desta forma, e como o efeito de concentração foi verificado, recomenda-se a construção de um novo protótipo de maiores dimensões de forma a mitigar o efeito prejudicial do regime de operação do protótipo usado neste projecto.

## **Abstract**

The purpose of this project is a feasibility study of a new concept of energy production, through a system of wind concentration for VAWT. The system increase the wind speed in the turbine rotor and thus the available power.

Wind turbines adapted to urban environment and new types are rarely used nowadays and they are a new field to develop. This project continues the work developed in 2012 when it was built and tested the first concentration prototype.

In this work, two different concentration structures and a VAWT were built, in order to prove that the concentration effect remains with a VAWT working and if it contributes to increase the VAWT efficiency.

Several wind tunnel tests were performed, for different wind speeds, to characterize the VAWT and the concentration systems. The results shows, that the concentration effects is still present with a VAWT operating, but in a small quantity compared to the results obtained in CFD simulations for the concentration structure. The decreased effect of concentration can be associated to the conditions of the tests, the VAWT operating regime and linked with prototype assembly failures. However, as the concentration effect was observed, it is recommended to build a larger prototype in order to reduce the negative effects of the operation conditions verified in this prototype design.

## Índice

Lista de Abreviações .....	i
1. Apresentação .....	1
1.1 Enquadramento e objectivos .....	1
2. Introdução .....	2
2.1 Recurso eólico .....	2
2.2 Turbinas eólicas .....	4
2.2.1 Pequenas turbinas eólicas .....	7
2.2.2 Turbinas eólicas em meio urbano .....	8
2.3 Recurso eólico em meios edificados .....	9
3. Turbinas de eixo vertical – Introdução teórica .....	13
3.1 VAWT- Parâmetros de funcionamento .....	14
3.2 VAWT- Parâmetros aerodinâmicos e característica do escoamento .....	17
3.2.1 Coeficiente de velocidade periférica .....	17
3.2.2 Perfil das pás e ângulo de ataque .....	18
3.2.3 Número de <i>Reynolds</i> .....	22
3.3 Área de varrimento e alongamento .....	24
3.3.1 Área de varrimento .....	24
3.3.2 Alongamento .....	24
3.4 Factor de bloqueamento .....	24
3.5 Limite de <i>Betz</i> .....	25
3.6 Gerador .....	26
4. Análise aerodinâmica .....	27
4.1 Modelos de análise numérica .....	27
4.1.1 <i>Double stream tube model, DMS</i> .....	28
5. Concentração eólica .....	31
6. Estudo e dimensionamento dos componentes aerodinâmicos .....	34
6.1 Sistema de Concentração .....	34
6.1.1 Simulações do Sistema de Concentração .....	34
6.2 Dimensionamento da VAWT .....	40
6.2.1 Perfil aerodinâmico das pás .....	40
6.2.2 Regime de funcionamento com base no perfil escolhido .....	41

6.2.3 Dimensionamento do rotor através do programa <i>Qblade</i> .....	42
7. Protótipo .....	46
7.1 Turbina.....	46
7.1.1 Estrutura de suporte da VAWT .....	46
7.1.2 Rotor .....	48
7.1 Concentrador.....	51
7.2.1 Concentrador B5025-26 .....	51
7.3 Gerador.....	53
8. Ensaio no túnel de vento .....	55
8.1 Túnel de vento .....	55
8.2 Instrumentos de medição e sistema de aquisição .....	57
8.3 Metodologia de medição .....	59
9. Resultados .....	63
9.1 Tratamento dos resultados.....	63
9.2 Apresentação e análise dos resultados .....	66
9.2.1 Comparação entre as configurações ensaiadas e os resultados obtidos por CFD sem presença de turbina.....	66
9.2.2 Comparação entre as configurações ensaiadas do sistema B50 e da VAWT.....	70
9.2.3 Comparação entre os valores medidos para os pontos laterais e a jusante do rotor, para o sistema de concentração B50 com cavidade e para a VAWT.....	71
9.2.4 Comparação do desempenho das configurações do sistema de concentração B50 e da VAWT.....	72
10. Viabilidade económica .....	76
11. Conclusão.....	79
Referências .....	81
Anexo 1 .....	84
Anexo 2 .....	85
Anexo 3 .....	86
Anexo 4 .....	87
Anexo 5 .....	89
Anexo 6 .....	90
Anexo 7 .....	93
Anexo 8 .....	94
Anexo 9 .....	96
Anexo 10 .....	98

## Índice de Figuras e Tabelas

Figura 1 - Mapa do recurso eólico europeu[4].....	3
Figura 2 - Ciclo diurno e nocturno efeito brisa marítima e terrestre [2] .....	4
Figura 3 - Curva de potência de uma turbina eólica [15] .....	5
Figura 4 - Curvas de coeficiente potência para vários tipos de turbina em função do coeficiente de velocidade periférica [12].....	6
Figura 6 - HAWT da marca <i>Enair</i> situada na Universidade Católica de Murcia, retirado de: <a href="http://www.enair.es/instalaciones/instalacion/universidad-cat-murcia">http://www.enair.es/instalaciones/instalacion/universidad-cat-murcia</a> .....	8
Figura 5 - HAWT <i>Proven</i> , retirado de: <a href="http://www.cityofsound.com/blog/2007/11/reading-a-recen.html">http://www.cityofsound.com/blog/2007/11/reading-a-recen.html</a> .....	8
Figura 7 – <i>Turby</i> protótipo campus TU DELFT .....	9
Figura 8 - <i>UGE 4KS</i> em Lincoln Financial Field .....	9
Figura 9 - Estrutura da CLU [34].....	10
Figura 10 - Mudança do perfil vertical de velocidade em função da rugosidade [13] .....	11
Figura 11 - Escoamento em torno de um edifício isolado [14].....	12
Figura 12 - Esteira resultante da passagem das pás a montante, para diferentes coeficientes de velocidade periférica [17]. .....	14
Figura 13 - Representação 2D, das forças aplicadas a uma VAWT com pás de perfil simétrico durante uma revolução.....	15
Figura 14 - Variação do ângulo de ataque para diferentes TSR [16] .....	16
Figura 15 - Perfil aerodinâmico [20].....	18
Figura 16 - Visualização de perda dinâmica para $\lambda = 2.14$ [18].....	21
Figura 17 - Coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque para o perfil NACA 633018 ( <a href="http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca633018-il">http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca633018-il</a> .....	21
Figura 18 - Fases da perda dinâmica de sustentação, Adaptado [19] .....	23
Figura 19 - Desempenho do perfil NACA 0018, $C_p$ em função da TSR para 3 factores de bloqueamento diferentes [25]. .....	25
Figura 20 - Corte da secção transversal de um rotor <i>Darrieus</i> (à esquerda) e aplicação do modelo <i>momentum</i> com dois discos atuadores em tandem (à direita) [6]. .....	30
Figura 21 - Representação artística das configurações de BUWT, retirado de [13]. .....	32
Figura 22 - Relação entre a energia produzida por diferentes configurações de BAWT e as turbinas equivalentes postas à mesma altura, mas não vinculadas a nenhum edifício, por diferentes tipologias de vento [34]. .....	33
Figura 23 - Concentrador B5025-26 à esquerda, e à direita corte 2D, onde E é a espessura máxima do toro.....	34
Figura 24 - Concentrador B5025-26, a verde a linha de teste representativa do perfil longitudinal, e a vermelho a linha de teste representativa do perfil vertical de velocidade do escoamento na estrutura aerodinâmica. ....	34
Figura 26 - Resultado da simulação para $U(x)=5m/s$ para o concentrador B5025-26.....	35
Figura 25 - Resultado da simulação, visualização 3D da região de maior velocidade registada no plano perpendicular ao escoamento não perturbado, para o concentrador B5025-26 .....	36
Figura 27 - Perfil vertical na estrutura aerodinâmica.....	36
Figura 28 - Perfil longitudinal de aproximação ao concentrado; a posição 0 m corresponde ao ponto médio da zona onde opera a turbina. ....	37

Figura 29 - Curvas de potência hipotéticas tendo em conta o factor de concentração médio obtido em CFD .....	38
Figura 30 - Desenho técnico VAWT .....	40
Figura 31 - A vermelho perfil NACA 0018 e a verde NACA 633018.....	40
Figura 32 - Desempenho do perfil Naca 633018 [25] .....	41
Figura 33 - Perfil simulado (azul), resultado da interpolação do perfil 0018 e 633018 .....	42
Figura 34 - Análise do perfil em função de $\alpha$ , através do programa <i>Qblade</i> .....	43
Figura 35 - Esquemático do posicionamento relativo das pás do rotor desenvolvido .....	44
Figura 36 - Simulação do Rotor .....	45
Figura 37- Resultados da simulação da turbina .....	45
Figura 38 - Desenho final do protótipo .....	46
Figura 39 - À esquerda esboço da estrutura de suporte da VAWT, à direita o protótipo concluído onde é possível ver a mesa, os triângulos e os suportes. ....	47
Figura 40 - Montagem do rotor .....	48
Figura 41 - Vista do eixo e braços do rotor .....	48
Figura 43 - Primeiro <i>design</i> para a braçadeira .....	49
Figura 42 - <i>Design</i> melhorado .....	49
Figura 44 - Perfil em alumínio para as pás de 8cm de corda .....	49
Figura 45 - Revestimento Fibra de vidro .....	50
Figura 46 - Corte do excesso de fibra de vidro .....	50
Figura 47 - Acabamento com resina epóxi .....	50
Figura 48 - Pesagem da pá.....	50
Figura 49 - À esquerda preparação do corte, à direita a deformação da lâmina após o corte do bloco. ....	52
Figura 50 - Corte peça para o molde, fresa CNC Fablab EDP.....	52
Figura 51 - Molde positivo terminado .....	52
Figura 52 - Estrutura aerodinâmica B5025-26 .....	53
Figura 53 - B5025-26 .....	53
Figura 54 - Curva característica do motor/ gerador, em modo gerador com uma carga de 3 $\Omega$ .....	54
Figura 55 - Caracterização em modo motor para diferentes cargas mecânicas.....	55
Figura 56 - Esquema de um corte da secção transversal horizontal de um <i>open-jet wind tunnel</i> [33.].....	55
Figura 57 - Esquema da malha de pontos da caracterização do perfil de velocidades da secção de teste do túnel e os valores obtida para a Velocidade $U_2$ .....	56
Figura 58 - Medição do ponto $(0,1)_2$ durante a caracterização para $U_2$ .....	57
Figura 59 - Foto Interruptor eléctrico, sistema de contagem de rotações .....	58
Figura 60 - Gerador e Sistema de aquisição de dados, <i>Arduino Uno</i> .....	59
Figura 61 - Esquema da secção de testes. R- Anemómetro de Referência; W- Anemómetro móvel; $X_6$ -0,15 m , $X_5$ -0,15m; $X_4$ - 0,4m ; $X_2$ - 0,5m; $X_3$ -0,5 m; $X_1$ -0,5m .....	59
Figura 62 - Esquema da medição dos pontos laterais, anemómetro W.....	60
Figura 63 - Esquema representativo da medição do ponto a jusante do roto, anemómetro W .....	60
Figura 64 - Vista de topo, visualização do comportamento do escoamento junto à superfície através da aplicação de fios de lã na superfície das estruturas de concentração. ....	61
Figura 65 -B50.....	62

Figura 66 - B50 sem cavidade .....	62
Figura 67 - VAWT.....	62
Figura 68 - B5025-26 sem cavidade.....	62
Figura 69 - À direita B5025-26 sem cavidade devidamente espiada, e do lado esquerdo nível na mesa de suporte.....	63
Figura 70 - Curva utilizada para calcular a potência conseguida em cada ensaio. Curva final a tracejado, coincidente com os sistemas B50 e a VAWT. B50D e VAWT-D referentes aos sistemas com montagem deficiente. ....	64
Figura 71 - Ensaio B50 – A.1, anemómetro móvel (equivalente a W figura 61); A. Ref, anemómetro de Referência (equivalente a R figura 61) .....	65
Figura 72 - Ensaio sistema B50, RPM e potência gerada .....	65
Figura 73 - Comparação do perfil de velocidades entre o túnel de vento e as estruturas de concentração com o obtido por CFD, no ponto $(1,1)_x$ , para a velocidade $U_1$ .....	67
Figura 74 - Comparação do perfil de velocidades entre o túnel de vento e as estruturas de concentração com o obtido por CFD, no ponto $(1,1)_x$ , para a velocidade $U_2$ .....	67
Figura 75 - Perfil vertical $U(x)$ na estrutura aerodinâmica.....	69
Figura 76 - Perfil vertical $U_{(x)}$ na estrutura aerodinâmica, velocidade 2.....	69
Figura 77- Comparação do perfil médio do escoamento $U_x$ entre os vários sistemas e a VAWT para $U_1$ .....	70
Figura 78 - Resultados para os melhores ensaio validados, $C_p$ máximo em função da velocidade do vento .....	72
Figura 79 - Potência máxima obtida para o sistema B50 e para a turbina, em função da velocidade da velocidade do escoamento não perturbado.....	73
Figura 80 - $C_p$ máximo obtido para o sistema B50 e para a VAWT em função da TSR .....	73
Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das turbinas de eixo horizontal [6][9].....	7
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das turbinas de eixo vertical [6][8][9] .....	7
Tabela 3 - Dimensões e resultados com base nas simulações em <i>FlowSimulation</i> para o modelo B5025-26 .....	39
Tabela 4 - Dimensões e Características de funcionamento do projecto para a VAWT .....	42
Tabela 5 - Diferenças de velocidade ao longo do perfil relativas à velocidade do escoamento não perturbado $U_1$ .....	68
Tabela 6 - Diferenças de velocidade ao longo do perfil relativas à velocidade do escoamento não perturbado $U_2$ .....	68
Tabela 7 - Comparação do impacto da solidez entre os concentradores e a VAWT com e sem sistemas de concentração .....	71
Tabela 8 - Valores registados para pontos laterais e a jusante do rotor para o Sistema B50 e para a VAWT.....	72
Tabela 9 - Valores dos ensaios válidos que apresentaram o $C_p$ máximo .....	75
Tabela 10 - Valores médios dos ensaios considerados válidos .....	75
Tabela 11 - Aumento de potência máximo e médios obtidos nos ensaios considerados válidos.....	76
Tabela 12 - Estimativa de produção e rendimento bruto anual para a série de vento de Lisboa.....	77

## Lista de Abreviações

$A$	Área;
$AR$	Alongamento;
$C$	Corda da pá;
$CC$	Corrente Contínua
$C_D$	Coefficiente de arrastamento;
$C_L$	Coefficiente de sustentação;
$CLA$	Camada limite atmosférica;
$CLU$	Camada limite urbana;
$C_p$	Coefficiente de potência;
$D$	Arrastamento;
$F$	Frequência;
$FC$	Factor de concentração
$F$	Força;
$F_n$	Força normal;
$F_t$	Força tangencial;
HAWT	Turbina eólica de eixo horizontal (do inglês <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> );
$L$	Sustentação;
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
$M$	Binário;
$N$	Número de pás;
$P$	potência;
$R$	Raio;
Re	Número de <i>Reynolds</i> ;
RI	Retorno do Investimento
RPM	Rotação por minuto
SWT	Pequena turbina eólica ( do inglês <i>Small Wind Turbine</i> )
TSR	Coefficiente de velocidade periférica (do inglês tip speed ratio)
$U$	Velocidade;
$U_x$	Componente da velocidade do escoamento
$W$	Velocidade do escoamento junto à pá
VAWT	Turbina eólica de eixo vertical (do inglês <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> );
$V_{cut\_in}$	Velocidade de arranque;
$V_{cut\_out}$	Velocidade máxima;

## 1. Apresentação

### 1.1 Enquadramento e objectivos

O desenvolvimento desta tese baseou-se no trabalho efectuado na cadeira de Projecto de Licenciatura, “*Concentrador eólico*”, que teve lugar em 2012 [1]. Esse trabalho tinha como objectivo otimizar o conceito original de concentração eólica para VAWT desenvolvido pelos Professores Jorge Maia Alves e David Pera, originalmente denominado eTurbine.

Nesse trabalho foi desenvolvido em CFD um perfil aerodinâmico que deu origem a uma estrutura aerodinâmica com capacidade para integrar uma turbina de eixo vertical. A estrutura desenhada em *SolidWorks* (ferramenta de CAD) e otimizada com recurso a simulação computacional de dinâmica de fluidos através de análises de elementos finitos (CFD-FEA), em ambiente *FlowSimulation*, foi projectada para concentrar o vento à entrada de uma turbina de eixo vertical (VAWT) de forma a aumentar a potência do recurso disponível. Como resultado das simulações foram obtidos factores de aceleração médios do vento na ordem de 1,23 [1], o que corresponde a um aumento da energia produzida de 85%. Esse concentrador foi construído e testado em túnel de vento de forma a validar o efeito de concentração na zona onde operaria a VAWT. Os resultados em túnel de vento validaram os perfis de velocidade obtidos em CFD. Com o presente trabalho pretendeu-se estudar a permanência do efeito de aceleração quando integrado numa VAWT, num determinado regime de funcionamento e quantificar o aumento de energia produzida.

A principal função do concentrador eólico é possibilitar às VAWT desenhadas para ambiente urbano, cuja velocidade nominal de funcionamento do rotor se situa acima dos 10 m/s [21], a colocação em zonas onde os valores médios anuais registados de velocidade de vento são inferiores e onde raramente poderiam operar à potência nominal. É importante referir que a potência eólica tem uma dependência cúbica da velocidade do vento (eq.1), pelo que um aumento neste parâmetro tem um impacto muito significativo na energia produzida pela turbina. Desta forma, o objectivo é aproveitar o recurso disponível e quebrar, de certa forma, a limitação operacional das VAWT. Este tipo de turbinas poderiam ser aplicadas a novos contextos, em especial, em zonas urbanas ou da periferia onde o recurso eólico apesar de existente apresenta valores médios de velocidade mais baixos [1]. Por outro lado, existe uma procura cada vez maior por soluções de produção de energia próximo das zonas de consumo, para o que devem ser desenvolvidas tecnologias adaptadas ao recurso energético existente procurando uma integração ambiental e visual destas soluções no meio.

Inicialmente, o objectivo seria a simulação em CFD, que incluísse a análise do funcionamento de uma VAWT com e sem sistema de concentração, que seria posteriormente validada através de ensaios em túnel de vento. Contudo, após a revisão bibliográfica concluiu-se que esta é uma área num estado prematuro de desenvolvimento e investigação, sobretudo em sistemas de concentração eólica. Desta forma, não foi analisada em CFD a turbina em pleno funcionamento, com ou sem sistema de concentração, devido à grande complexidade do desenvolvimento de um modelo robusto que permitisse caracterizar todos os fenómenos complexos de dinâmica de fluidos que ocorrem na interacção das pás da VAWT com o escoamento incidente. Assim, reformularam-se os objectivos inicialmente propostos tendo em conta o tempo e os recursos disponíveis. Fixou-se como principal objectivo desta tese a construção de um protótipo fiável para ensaios em túnel de vento, de forma a provar, o efeito de concentração e a sua contribuição para a melhoria do desempenho de uma VAWT.

De forma a garantir que todos os requisitos técnicos para a construção de uma turbina funcional seriam alcançados, o estudo inicial centrou-se na revisão bibliográfica e na síntese do estado da arte não só das VAWTs mas também dos recentes sistemas similares de concentração eólica. Com base na literatura, procedeu-se ao estudo de vários parâmetros considerados fundamentais no desenvolvimento de turbinas de eixo vertical, como o tipo de perfil aerodinâmico a usar, o número de pás, dimensões, tipo de turbina e previsão do regime de operação. Com base nesses parâmetros e de um levantamento sumário de algumas VAWT comercializadas, passou-se à construção de um protótipo do qual se obtiveram resultados experimentais em ambiente de túnel de vento que foram usados para a validação dos valores simulados e testados do concentrador.

## **2. Introdução**

### **2.1 Recurso eólico**

O vento não é mais que o movimento de massas de ar, gerado por diferenciais de pressão atmosférica. O desigual aquecimento da radiação solar e o movimento de rotação do próprio planeta são os responsáveis por estes diferenciais de pressão na atmosfera [5].

Ao longo das últimas décadas foram feitos vários estudos para quantificar e mapear o potencial eólico, figura 1, reflectindo-se sobretudo nas últimas décadas num aumento significativo de parques eólicos. O que possibilitou esta implementação em grande escala

foram os avanços tecnológicos, nos materiais de construção das turbinas, em especial na utilização de materiais compósitos leves e altamente resistentes, o desenvolvimento de geradores mais eficientes e adaptados aos regimes de funcionamento das turbinas, e também a evolução de sistemas de inversão que possibilitam a entrega na rede da energia produzida com segurança [3]. O impacto directo destes avanços reflectiu-se na diminuição do custo de produção e manutenção o que tornou esta tecnologia apetecível a investidores que procuram um rápido retorno dos seus investimentos, e para isso também muito contribuíram os incentivos e as tarifas de electricidade praticadas sobretudo em alguns países Europeus.

### Q3, 2010 Wind Speed Variance from Average

---

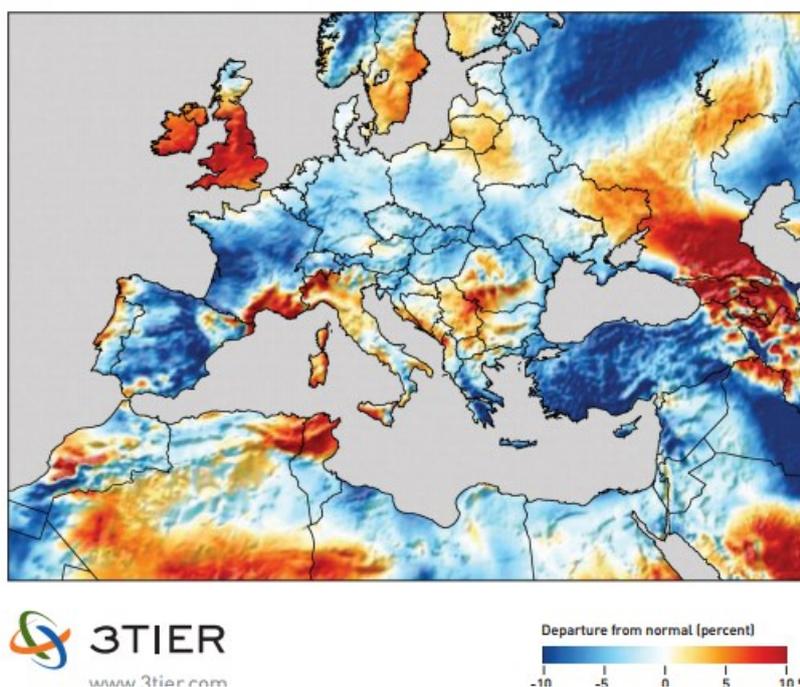


Figura 1 - Mapa do recurso eólico europeu[4]

À pequena escala, correspondente à circulação regional local das massas de ar, onde se insere o tipo de tecnologia estudada, a presença de montanhas e montes altera também a distribuição do vento, estando geralmente associadas maiores valores de velocidade do vento a zonas mais altas. Nas zonas costeiras o vento tende a soprar da água para terra de dia e no sentido inverso à noite, figura 2. Este fenómeno deve-se à diferença entre a capacidade térmica mássica dos meios, sendo superior na água, fazendo com que esta varie a sua temperatura mais lentamente e, conseqüentemente, com menor amplitude que

no solo. Também é possível assistir no continente a um fenómeno semelhante denominado de brisa de vale e montanha. Os efeitos locais, ligados à turbulência atmosférica resultante da perturbação orográfica no escoamento são essenciais para escolher os locais onde se registam velocidades médias anuais do vento elevadas [5]. No que diz respeito à implementação de parques eólicos, quer sejam *on shore* quer *off shore*, é essencial um estudo prévio, por um tempo mínimo de 12 meses sendo o ideal 3 a 4 anos [5], de forma a prever a produção de energia e aferir da rentabilidade do projecto.

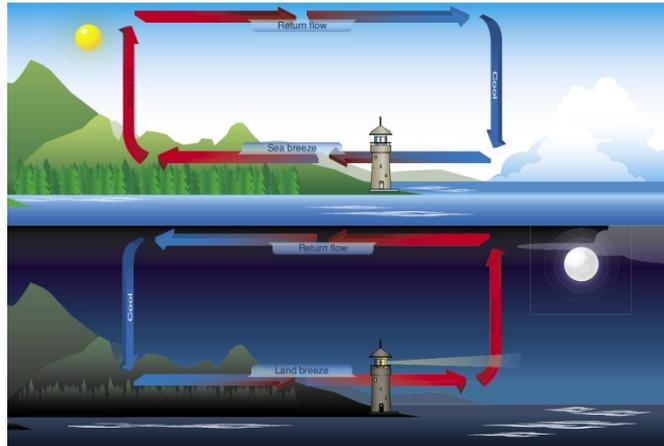


Figura 2 - Ciclo diurno e nocturno efeito brisa marítima e terrestre [2]

A medição das características do vento num local é feita com recurso a equipamentos especializados que medem normalmente 4 parâmetros: A velocidade e direcção do vento, a temperatura e a pressão atmosférica. A frequência  $f$  de amostragem, é também outra componente muito importante e só com frequências elevadas, na ordem das unidades de Hz, se pode avaliar em detalhe a turbulência do vento de um local.

O potencial eólico é a potência disponível na energia cinética do vento numa dada área por unidade de tempo:

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad (1)$$

Sendo  $\rho$  a massa volúmica do ar em  $\text{Kg/m}^3$ ,  $U_{\infty}$  a velocidade do escoamento incidente em  $\text{m/s}$  e  $A$  a área perpendicular ao escoamento considerada em  $\text{m}^2$  [6].

## 2.2 Turbinas eólicas

As turbinas eólicas podem ser agrupadas em duas categorias, de acordo com a direcção do

seu eixo de rotação: turbinas de eixo horizontal ou HAWT (*Horizontal-Axis Wind Turbine*) e turbinas de eixo vertical ou VAWT (*Vertical-Axis Wind Turbine*). Historicamente, as primeiras a aparecerem e com mais desenvolvimento ao longo do tempo são as HAWT, sendo por isso actualmente o tipo mais implementado e comercializado. No que diz respeito às primeiras VAWT de que há registo, remontam ao século XIX por Charles Brush nos EUA [6]. Nos meados dos anos 20 do século passado, S.J Savonius apresentou ma nova configuração de VAWT conhecida pelo seu nome, e uma década depois são panteadas as turbinas *Darrieus* e *Girromill* por Georges Darrieus [7], sendo este último tipo de VAWT o mais investigado.

Qualquer turbina eólica é composta por:

- Rotor para converter a energia cinética do vento em energia mecânica.
- Caixa de velocidades ou controlo electrónico de frequência, de modo a poder oferecer a frequência da rede eléctrica juntamente com a velocidade de rotação do rotor ideal.
- Sistema de controlo que monitoriza o modo de operação da turbina em modo automático, incluindo arranque e paragem consoante a velocidade do vento.
- Gerador para converter energia mecânica em energia eléctrica.
- Torre de suporte da estrutura e fundação para prevenir que a turbina seja derrubada pela força do vento.

As turbinas eólicas apresentam uma curva característica de potência em função do vento incidente, denominada por Curva de Potência.

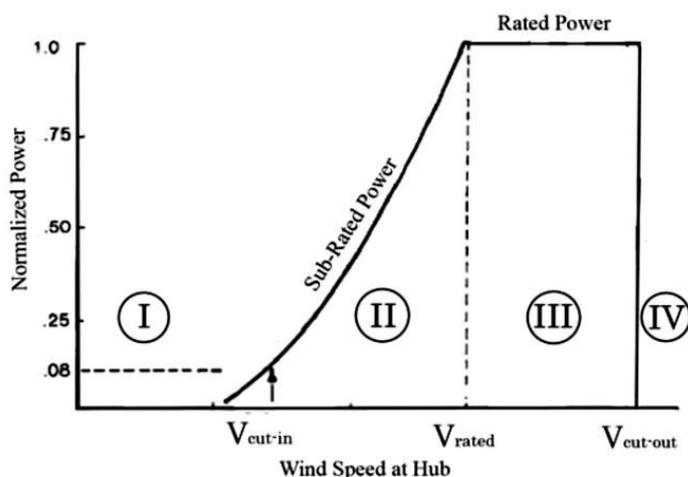


Figura 3 - Curva de potência de uma turbina eólica [15]

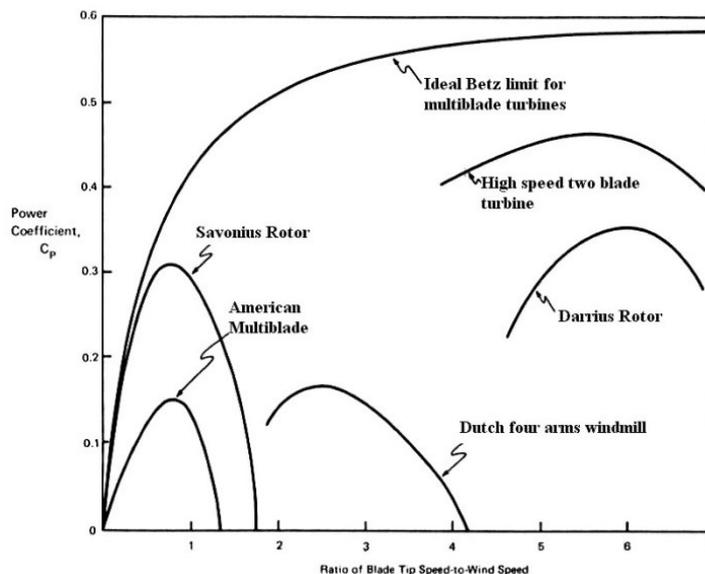
Para a gama de velocidade I a velocidade não é suficiente para que a turbina produza energia, apenas para a gama de velocidades II esta começa a produzir, atingindo a potência nominal na gama de velocidade III. Acima desta, para a  $V_{cut_{out}}$  a turbina é desligada, uma vez que a estas velocidades de vento, é perigoso manter a sua operação. A eficiência de uma turbina é caracterizada pelo seu coeficiente de potência, cujo valor máximo é conhecido pelo limite de *Betz*:

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{P_{eólica}} \quad (2)$$

$$C_{p_{máximo}} = \frac{16}{27} \sim 59\% \quad (3)$$

Este valor foi calculado para uma turbina ideal, com infinito número de pás e sem perdas mecânicas ou aerodinâmicas. Segundo a literatura este limite para VAWT é de 64% [6], apesar de o valor máximo registado seja de 40% [6]. Na figura 4 são apresentadas as curvas de potência típicas para os diferentes tipos de turbina, em função do coeficiente de velocidade periférica (TSR). Este parâmetro, TSR, relaciona a velocidade na ponta da pá, com a velocidade do vento que incide perpendicularmente à pá,  $U_{\infty}$ ,

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_{\infty}} \quad (4)$$



**Figura 4** - Curvas de coeficiente potência para vários tipos de turbina em função do coeficiente de velocidade periférica [12]

Em termos de vantagens/desvantagens relativamente à utilização de VAWT ou HAWT de pequenas dimensões temos:

<b>HAWT</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoamento em cada secção da pá é constante se a velocidade do vento também o for, maior estabilidade e mais fácil de estudar.</li> <li>• Menor fadiga do material por ter escoamento permanente para o mesmo ângulo de ataque.</li> <li>• Mais estudadas.</li> <li>• Exposição a uma velocidade de vento superior devido à altura a que é colocado o rotor.</li> <li>• As suas fundações ocupam pouca área no solo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessitam de uma torre maior.</li> <li>• Maior quantidade de matéria-prima utilizada, devido à torre de maiores dimensões e exigência de resistência desta.</li> <li>• Acesso e manutenção dificultada, todo o equipamento situado no topo, nomeadamente o gerador.</li> <li>• Maior espaçamento entre turbinas.</li> <li>• Requer sistema de alinhamento com o vento</li> <li>• Turbinas mais ruidosas devido a velocidade de rotação, TSR elevado</li> </ul>

**Tabela 1** - Vantagens e desvantagens das turbinas de eixo horizontal [6][9]

<b>VAWT</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Independência da direcção do vento.</li> <li>• Podem ser colocadas mais perto do solo.</li> <li>• Espaçamentos menores entre turbinas.</li> <li>• Instalação menos dispendiosa devido às massas em questão serem menores (torres).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por terem eixo vertical, o escoamento não permanente provoca cargas aerodinâmicas cíclicas o que induz maior fadiga nos materiais.</li> <li>• Devido à baixa altura a que é colocado o rotor estão expostas a velocidades do vento mais baixas.</li> <li>• Na grande maioria das VAWT é necessário um sistema de arranque [8]</li> <li>• Maior área de pás (uma componente normalmente dispendiosa) que nas HAWT para a mesma potência.</li> </ul>

**Tabela 2** - Vantagens e desvantagens das turbinas de eixo vertical [6][8][9]

### 2.2.1 Pequenas turbinas eólicas

Actualmente é cada vez mais frequente a instalação, ao nível da mini e microgeração deste tipo de turbinas, tendo as HAWT uma maior prevalência neste mercado [10]. As *SWT* (*small wind turbines*) são classificadas pelo diâmetro do seu rotor e pela potência nominal máxima de até 10kW [11]. É pretendido com as *SWTs* complementar o sistema electroprodutor de energia, em especial junto a habitações ou em sistemas de iluminação.

## 2.2.2 Turbinas eólicas em meio urbano

Como para outras escalas de aplicação deste tipo tecnologia, o sucesso de turbinas eólicas em meio urbano ou na periferia está dependente da quantidade e frequência do recurso eólico no local. Em meio urbano, é necessário serem reunidas algumas condições para a instalação de turbinas eólicas, em especial se o local em causa não tem à sua volta obstáculos ao vento, que estas não provoquem ruído ou tenham qualquer tipo de efeito visual, como a reflexão do sol nas suas pás, efeito denominado “*flashing*” [36]. Apesar de ser nesta área da indústria de energia eólica que se concebem os mais diferentes tipos de rotor, é passado em revista de forma sumária as tecnologias mais comuns em meio urbano:

- HAWT em meio urbano

Estas serão as turbinas mais aplicadas no topo de edifícios ou em vivendas, contudo apresentam como referido anteriormente algumas desvantagens em meio urbano, sobretudo devido às características do escoamento em zonas edificadas, uma vez que é altamente condicionado pela forte rugosidade do terreno, figura 5 e 6. Este tipo de regime de ventos, com rápidas variações na direcção do vento, diminui a eficiência destas turbinas que estão constantemente a moverem-se para alinhar com o vento. Somado ao possível desconforto visual provocado por este movimento de alinhamento da turbina, estas por apresentarem coeficientes de velocidade periférica mais elevados, são também mais ruidosas.



**Figura 6** - HAWT *Proven*, retirado de: <http://www.cityofsound.com/blog/2007/11/reading-a-recen.html>



**Figura 5** - HAWT da marca *Enair* situada na Universidade Católica de Murcia, retirado de: <http://www.enair.es/instalaciones/instalacion/universidad-cat-murcia>

Exemplos de sucesso de VAWT que não apresentam para meio urbano as desvantagens das HAWT, são as turbinas *Turby* e *UGE* [30] [33], principalmente porque captam o vento

independentemente da direcção que este apresente. O rotor destas turbinas é composto por pás com desenvolvimento helicoidal, figura 7 e 8, garantido que para cada posição azimutal da pá esta apresenta uma secção com o ângulo de ataque óptimo. Por outro lado, a sua forma facilita o auto-arranque. Ao nível do ruído, estas turbinas são menos ruidosas que as HAWT porque trabalham com menores rotações.



**Figura 7** – Turby protótipo campus TU DELFT



**Figura 8** - UGE 4KS em Lincoln Financial Field

### 2.3 Recurso eólico em meios edificados

O perfil de vento junto à superfície resultante da interacção do escoamento com esta, é caracterizado pelo conceito de camada limite atmosférica. “A *camada limite atmosférica* (CLA) é a parte da troposfera que é directamente influenciada pela presença da superfície da Terra e que responde aos forçamentos da superfície com uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos” [27].

No que diz respeito aos locais edificados, devido à complexa geometria superficial e à elevada rugosidade, na região mais superficial o escoamento não é uniforme e é caracterizado por valores reduzidos de velocidade média e elevados níveis de turbulência. Na Camada Limite Urbana (CLU), para descrever o perfil vertical da velocidade média do vento, é possível manter a validade da Lei Logarítmica, eq.5, só a partir de uma determinada cota, definida como a soma entre o comprimento de rugosidade e o deslocamento do plano de referência. Este último parâmetro constitui uma medida do bloqueamento imposto ao escoamento e, como no caso do comprimento de rugosidade, depende das características e da configuração dos elementos de rugosidade [34]

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (5)$$

Onde  $u(z)$  representa a velocidade do vento á altitude  $z$ ,  $u_*$  é a velocidade de atrito,  $k$  é a constante de *Von Kármán*,  $k=0,4$ ,  $z$  é altura a cima do nível do mar a considerar,  $z_0$  é a escala de comprimentos para a tensão de atrito total na superfície, isto é, uma medida do arrastamento e que caracteriza a rugosidade,  $d$  é a escala da distribuição vertical dessa tensão de atrito na “superfície” exterior da rugosidade, ou seja, do bloqueamento imposto ao escoamento [27].

Quando o escoamento encontra uma mudança de rugosidade, os efeitos provocados pela nova superfície demoram algum tempo a desenvolver e são mais evidentes a uma certa distância da fronteira, sendo mais ou menos acentuados em função da diferença entre os dois valores de rugosidade. Com a passagem do escoamento de uma área rural a uma urbana, este fenómeno resulta na formação da CLU, cuja espessura aumenta com a distância da fronteira que separa as duas áreas. Dentro da CLU é possível identificar a Camada de Cobertura Urbana (CCU), com uma espessura tipicamente igual à altura média dos elementos de rugosidade, onde o escoamento é governado e gerado pelo escoamento adjacente, sendo o campo de velocidade condicionado pelos elementos de rugosidade, cuja parametrização é complexa. Por cima desta camada, encontra-se a subcamada de inércia, ou Camada Limite Interna, caracterizada por fenómenos turbulentos fortemente variáveis em função da interação com os elementos de rugosidade. Além desta subcamada é possível aplicar a Lei Logarítmica, uma vez que se encontram as características típicas de qualquer outra camada superficial.

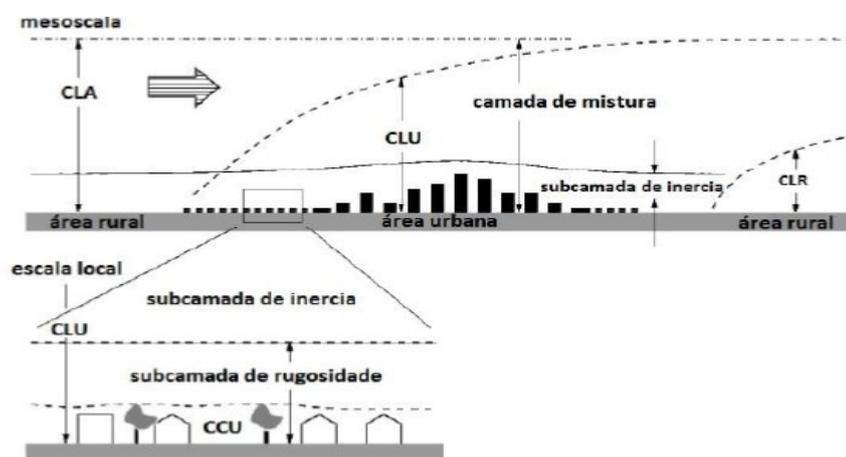


Figura 9 - Estrutura da CLU [34]

A aplicação da Lei Logarítmica na subcamada de inércia requer o conhecimento da velocidade de atrito. Quando este dado não se encontra disponível, é possível utilizar uma velocidade de referência, que, em ausência de medições anemométricas, pode ser obtida recorrendo a altas de vento. A conversão na velocidade interna à subcamada de inércia é obtida aplicando a abordagem teórica típica de uma mudança de rugosidade, entre a área urbana e a área rural.

A uma dada distância  $x$  da fronteira entre a superfície rural e a superfície urbana, é possível calcular a espessura da CLU,  $\delta$  (eq.7), e a velocidade média do vento na subcamada de inércia  $\bar{U}_{(zu)}$  (eq.6), e além da CCU, a partir de uma velocidade média de referência na zona rural  $\bar{U}_{zr}$  [34].

$$\bar{U}_{(zu)} = \frac{\ln \frac{z_u - d}{z_{02}} \ln \frac{\delta}{z_{01}}}{\ln \frac{\delta - d}{z_{01}} \ln \frac{z_r}{z_{01}}} \bar{U}_{zr} \quad (6)$$

$$\delta = 0,75 z_{02} \left( \frac{x}{z_{02}} \right)^{0,8} \quad (7)$$

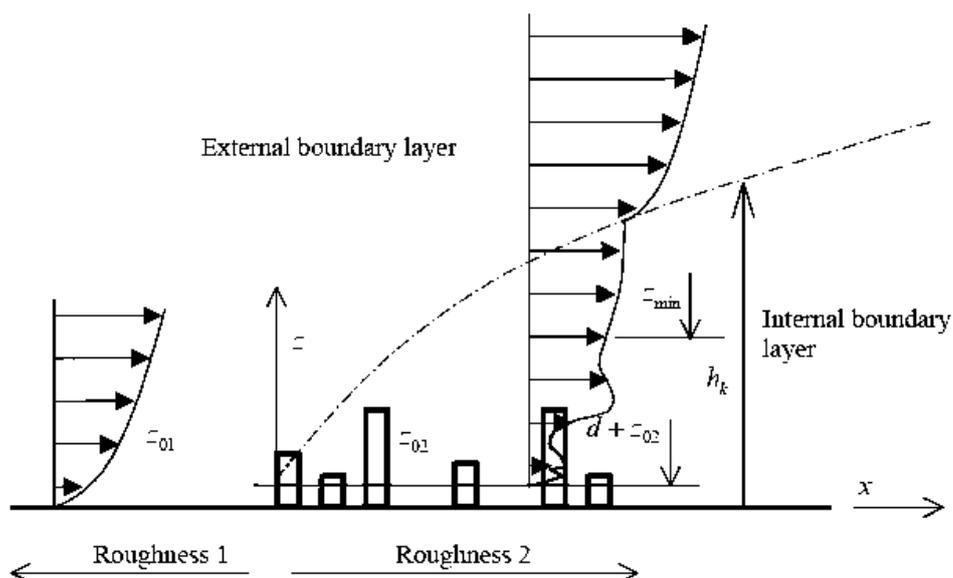


Figura 10 - Mudança do perfil vertical de velocidade em função da rugosidade [13]

Apesar da menor disponibilidade do recurso, existem locais onde pode haver aproveitamento eólico a uma pequena escala, aproveitando muitas vezes a própria forma dos edifícios que apresentam efeito concentrador, como será explicado no capítulo 5.

Os edifícios em meio urbano sobretudo os mais altos que apresentam uma cobertura plana, serão à partida os locais mais interessantes para se colocar uma turbina. Contudo é necessário ter em conta a envolvente e a forma do edifício para poder avaliar o potencial eólico aí presente. A análise do comportamento do escoamento sobre os edifícios é bastante complexa e difícil de modelar, é por isso, que simulações em CFD ou ensaios em túnel de vento são levados a cabo, de forma a perceber o padrão do escoamento em torno dos edifícios [14].

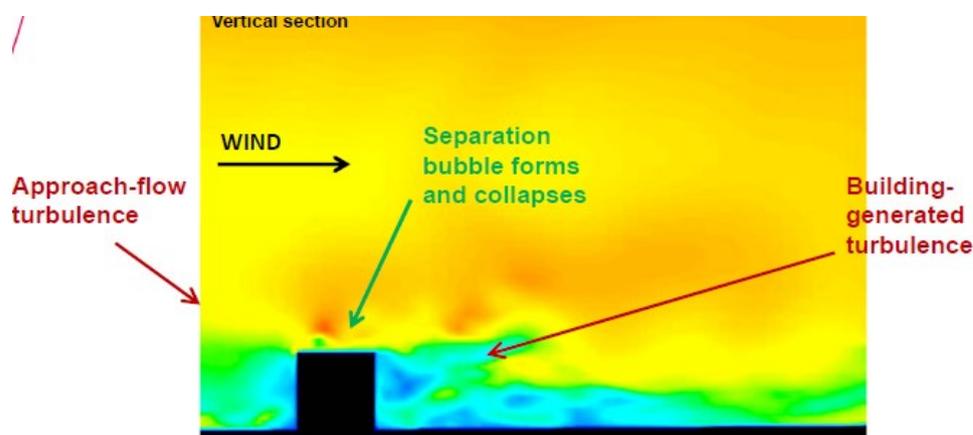
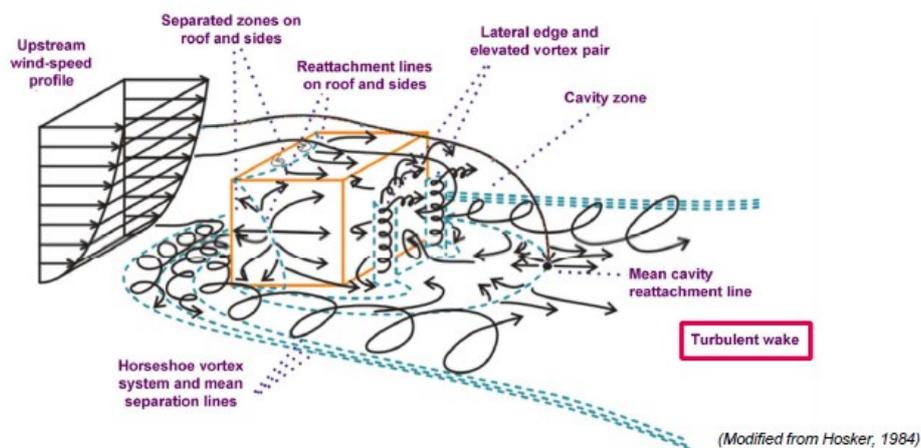


Figura 11 - Escoamento em torno de um edifício isolado [14]

Na figura 11 é possível visualizar o complexo padrão que o vento apresenta quando este é perpendicular à fachada de um edifício. Os edifícios que apresentam bordos afiados, apresentam pontos de separação bem marcados do escoamento, levando a formação de bolhas de separação, nas esquinas laterais e superior, dando origem a uma esteira de grande dimensão. A velocidade do vento acima ou para lá destes vórtices é superior a velocidade do vento incidente no edifício [13].

Neste tipo de edifícios dá-se a formação de uma zona de recirculação, caracterizada pelas baixas velocidades e elevada turbulência. Para edifícios com comprimentos elevados e paralelos à direcção do escoamento, ocorre o recolamento da camada limite, que volta a separar-se na borda traseira. Além da zona de recirculação, forma-se uma esteira, onde a velocidade e a intensidade de turbulência voltam gradualmente aos valores do escoamento livre. A montante do edifício, dá-se origem a uma zona de recirculação mais pequena, devido à interacção entre as elevadas pressões que se estabelecem na superfície frontal do edifício e o gradiente adverso de pressão existente em proximidade do terreno. Outro fenómeno de particular relevância é o efeito de aceleração nos bordos do edifício expostos à acção do vento, resultantes da diferença de pressão presente nas superfícies adjacentes [34].

Tendo em conta o comportamento do escoamento na presença de um edifício, é importante analisar com algum cuidado a aplicação de turbinas eólicas em edifícios, aproveitando possíveis efeitos de concentração e evitando zonas de recirculação e de turbulência elevada que provocam uma diminuição drástica no rendimento de turbinas eólicas.

### 3. Turbinas de eixo vertical – Introdução teórica

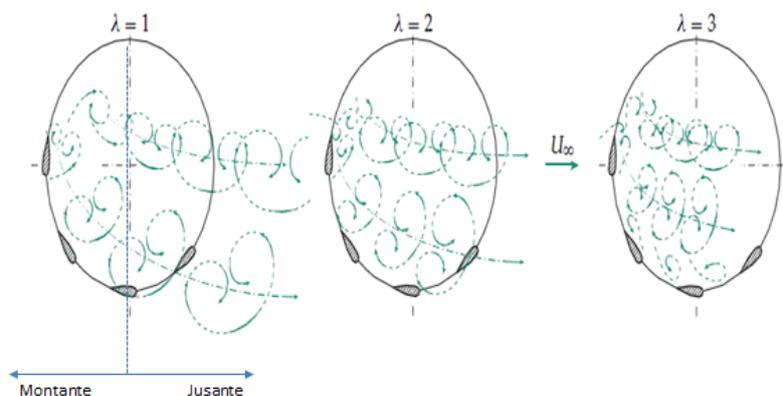
Existem dois grupos de VAWT, as de arrastamento (*drag*) cuja força motriz é o arrastamento aerodinâmico e as do tipo sustentação (*lift*) cuja força motriz é a sustentação aerodinâmica. Os tipos de VAWT existentes são:

- **Darrieus** – é um tipo de turbina de sustentação em que as pás apresentam uma forma *troposkiana*. O desenho das suas pás resulta do objectivo de a única força aplicada nas pás ser de tração, o que dificulta a construção das mesmas. Como a distância entre a pá e o eixo é variável, o escoamento não é uniforme ao longo da pá, obrigando a uma pá de secção variável de modo a obter um maior rendimento [6].

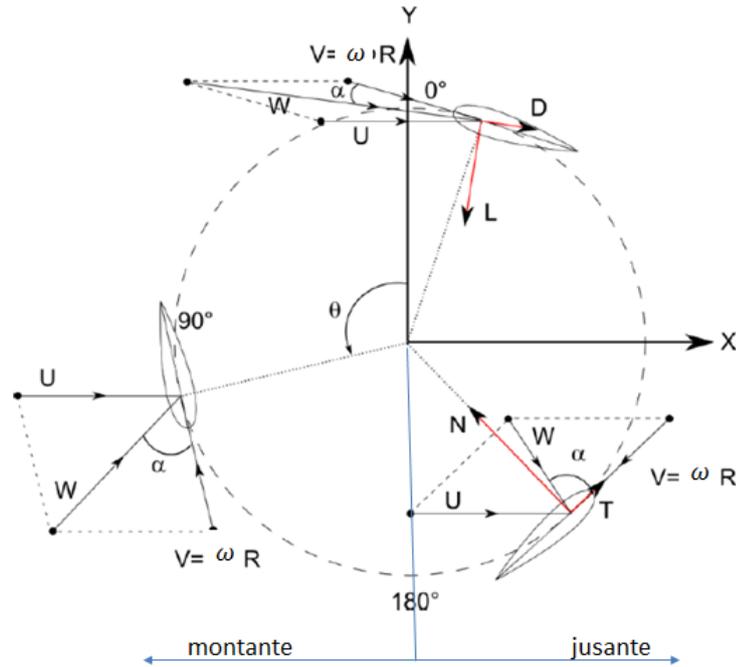
- **Giromill** – é uma variação da turbina de *Darrieus*, com as pás direitas e perfis geralmente simétricos. Existem variações desta turbina pela forma de suporte das pás, em forma de H, denominando-se H-rotor ou pela utilização de pás helicoidais.
- **Savonius** – é um tipo de turbina de resistência, que tem um rotor do tipo “S”, como um cilindro cortado ao meio, com as metades desfasadas de forma a possibilitar que o escoamento passa entre as metades dos cilindros. É uma turbina bastante estudada e de baixo custo, cujo rendimento máximo está na ordem dos 30% [6]. Por esta razão é costume ser utilizada como anemómetro ou equipamento de arranque a baixas velocidades para VAWT maiores.
- **Helicoidal (Gorlov)** - Este modelo é essencialmente uma turbina do tipo *Giromill* com uma configuração helicoidal. Foi desenvolvido com o objectivo de solucionar a maioria dos problemas do rotor original *Darrieus*. Esta turbina possui geralmente auto-arranque, tem menor variações de binário, baixa vibração e ruído.

### 3.1 VAWT- Parâmetros de funcionamento

No que diz respeito às interacções aerodinâmicas, como o eixo rotacional das VAWT é perpendicular ao escoamento, a previsão do comportamento e eficiência deste tipo de turbina é mais complexo comparativamente às HAWT. As principais desvantagens são o elevado ângulo de ataque que as pás experimentam ao longo de uma revolução e a esteira provocada pelas pás ao passarem na zona do escoamento incidente, a montante, o que afecta o rendimento total uma vez que o escoamento para a parte de trás, a jusante, é mais turbulento e tem uma velocidade inferior figura 12.



**Figura 12** - Esteira resultante da passagem das pás a montante, para diferentes coeficientes de velocidade periférica [17].



**Figura 13** - Representação 2D, das forças aplicadas a uma VAWT com pás de perfil simétrico durante uma revolução [16].

A velocidade relativa do escoamento junto a pá,  $W$ , pode ser decomposta em duas componentes, uma normal,  $W_n$  (positiva em direcção ao interior da turbina), e uma tangencial,  $W_t$  (positiva no sentido do bordo de ataque para o bordo de fuga) que são definidas como:

$$W_t = \omega R + U_\infty \times \cos(\theta) \quad (8)$$

$$W_n = -U_\infty \times \sin(\theta) \quad (9)$$

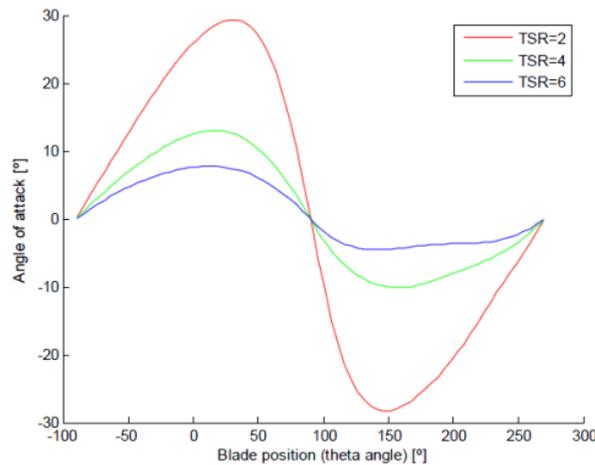
Sendo  $\theta$  o ângulo da posição da pá com a perpendicular ao escoamento e  $R$  o raio do rotor. A componente normal não depende da velocidade de rotação mas a intensidade da componente  $W_t$  depende de  $U_\infty$  e da velocidade angular da turbina, assim um aumento da velocidade angular aumenta a componente tangencial da velocidade o que faz diminuir o ângulo de ataque,  $\alpha$ . [17]. O ângulo de ataque é definido como:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{W_n}{W_t} \right) \quad (10)$$

Substituindo (4), (8) e (9), temos:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{-\sin(\theta)}{\lambda + \cos(\theta)} \right) \quad (11)$$

O ângulo de ataque depende apenas da velocidade angular e de  $\theta$ , sendo independente de  $U_\infty$ . Como se verifica na figura 14 para diminuir o ângulo de ataque máximo que uma pá experimenta ao longo de uma revolução, quando o pretendido é extrair a máxima potência da turbina, é necessário que esta opere a TSR superiores a 2, uma vez que, para ângulos de ataque elevados a perda do efeito de sustentação é mais frequente.



**Figura 14** - Variação do ângulo de ataque para diferentes TSR [16]

A velocidade do escoamento de aproximação pá,  $W$ , é dada por:

$$W = \sqrt{W_t^2 + W_n^2} \quad (12)$$

Substituindo (8) e (9) tem-se:

$$W = U_\infty \times \sqrt{\lambda^2 + 2\lambda \cos(\theta) + 1} \quad (13)$$

Onde velocidade média,  $\bar{W}$ , numa rotação, é dada por:

$$\bar{W} = U_\infty \times \sqrt{\lambda^2 + 1} \quad (14)$$

As forças aerodinâmicas exercidas nas pás, podem decompor-se numa componente de

sustentação,  $L$ , (do Inglês “*Lift*”), na direcção perpendicular à do escoamento incidente, e arrastamento,  $D$  (do Inglês “*Drag*”), na direcção do escoamento. A partir destas forças, figura 13, é possível obter a componente da Força Normal e Tangencial relativamente a cada pá.

$$F_T = L\sin(\alpha) + D\cos(\alpha) \quad (15)$$

$$F_n = L\cos(\alpha) + D\sin(\alpha) \quad (16)$$

A força tangencial média é dada por:

$$\overline{F_T} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T d\theta \quad (17)$$

O binário médio:

$$M = \overline{F_T} n R \quad (18)$$

Em que  $n$  é o número de pás do rotor.

Vem assim que a potência média da turbina pode ser calculada,

$$P_{turbina} = M\omega \quad (19)$$

A partir das relações apresentadas é possível fazer uma análise ao comportamento da turbina e de quais os parâmetros que afectam a performance e comportamento estrutural da mesma.

### 3.2 VAWT- Parâmetros aerodinâmicos e característica do escoamento

#### 3.2.1 Coeficiente de velocidade periférica

A optimização da TSR, é um dos parâmetros de funcionamento que mais afecta a energia produzida, pelo que, durante o projecto de uma VAWT deve ser garantido que esta trabalha com a TSR óptima. As VAWT operam normalmente com TSR 3 a 5 [6].

Segundo *Parachiouv* [6], a curva característica do coeficiente de potência,  $C_p$ , em função da TSR, baseia-se em 3 regimes de funcionamento. Para valores de TSR abaixo do valor de

$TSR_{\text{ótimo}}$  ocorre perda de sustentação uma vez que as pás não interagem suficientemente com o escoamento, para valores de *acima do valor*  $TSR_{\text{ótimo}}$  ocorrem efeitos secundários complexos relativos a criação de turbilhões que afectam as pás a jusante, para o valor  $TSR_{\text{ótimo}}$  existe uma zona de transição onde todos os fenómenos estão presentes mas numa escala menor [6].

### 3.2.2 Perfil das pás e ângulo de ataque

Um perfil alar ou aerodinâmico é uma estrutura com uma forma geométrica específica, semelhante à da figura 15. Este tipo de perfil geométrico é composto por:

- Linha média de curvatura (*Mean camber line*) – A linha a tracejado localizado entre as superfícies superior (extradorso) e inferior (intradorso) do perfil.
- Linha corda do perfil (*Chord line*),  $c$  – É a distância entre o bordo de ataque (*Leading edge*) e o bordo de fuga (*Trailing edge*).
- Espessura relativa (*Thickness*) – É a distância entre o extradorso e intradorso, medido perpendicularmente em relação a linha de corda do perfil.

O ângulo de ataque,  $\alpha$ , é o ângulo formado entre a linha de corda e a velocidade relativa do vento.

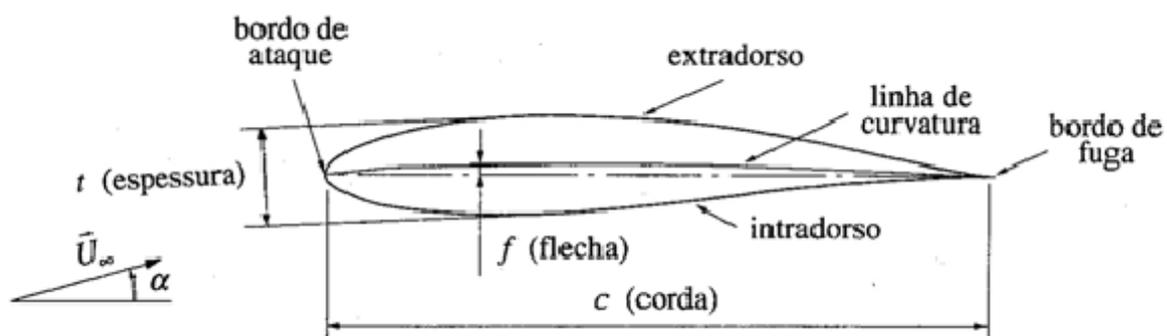


Figura 15 - Perfil aerodinâmico [20]

Os perfis podem ser simétricos, a corda coincide com a linha média, assimétricos quando a linha média é curva.

Para um determinado intervalo de ângulos de ataque, os perfis criam uma força resultante, que é decomposta numa componente normal e noutra paralela em relação à linha de corda. A velocidade do escoamento é maior sobre a superfície convexa, resultando numa pressão média menor comparativamente à superfície de alta pressão (superfície inferior do perfil). A componente paralela à linha de corda é o resultado da fricção entre o fluido, o ar, e a superfície do perfil. O resultado da decomposição dessa força resultante, são forças de sustentação e forças de arrastamento aerodinâmico.

Como já referido muitos dos problemas relacionados com escoamentos de fluídos podem ser caracterizados por coeficientes adimensionais, neste caso de força, que são funções do número de *Reynolds* e que geralmente são obtidos em ensaios em túnel de vento: o coeficiente de sustentação,  $C_l$ , o coeficiente de arrastamento aerodinâmico,  $C_d$ ,

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}A\rho U_\infty^2} \quad (20)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}A\rho U_\infty^2} \quad (21)$$

Onde,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $U_\infty$  é a velocidade do escoamento,  $A$  é a área de secção da pá,  $L$  é a força de sustentação,  $D$  é a força de arrastamento aerodinâmico.

O comportamento de um perfil aerodinâmico pode ser caracterizado em três regimes de escoamento [19]:

- Regime de escoamento sem separação da camada limite – É caracterizado por baixos ângulos de ataque.
- Elevada sustentação/ Desenvolvimento de perda aerodinâmica (*Stall*) – Neste tipo de regime, o coeficiente de sustentação aumenta continuamente com o ângulo de ataque até atingir um máximo. A perda de sustentação (*Stall*) ocorre quando o ângulo de ataque do perfil excede um determinado valor (dependendo do número de *Reynolds*) ou seja, dá-se a separação da camada limite no extradorso do perfil.

- Placa plana/ Regime de perda total (*Fully Stalled*) – Em elevados ângulos de ataque, até 90 °, o perfil comporta-se cada vez mais como uma simples placa plana. Com aproximadamente 45°, os coeficientes de sustentação e arrastamento são iguais e a 90° tem-se sustentação nula.

De forma a aumentar a eficiência das VAWT é necessário efectuar uma escolha cuidada, respeitando alguns requisitos [6]:

- Valores razoáveis para o coeficiente de sustentação máximo;
- Baixo coeficiente de resistência a baixos e altos  $\alpha$ ;
- Perfis delgados;

Os perfis mais utilizados em VAWT são perfis NACA simétricos, de 4 dígitos. Foi no início da década de 30 do século XX, em 1937, por *Jacobs* e *Sherman*, que se iniciaram os estudos neste tipo de perfis simétricos, para diferentes números de *Reynolds* em modo estacionário, de forma a caracterizar as componentes de sustentação e arrastamento [21]. No presente trabalho, como será justificado no capítulo 6, a escolha recaiu para um perfil Naca de 6 dígitos:

- O primeiro dígito define a série;
- O segundo dígito indica a distância da área de pressão mínima, relativamente à décima parte do comprimento da corda;
- O terceiro dígito indica a gama do coeficiente de sustentação em décimos acima e abaixo do coeficiente de sustentação para qual existe um gradiente de pressão favorável em ambas as superfícies do perfil;
- O 4º dígito é geralmente um 0 ou um hífen;
- Os últimos dois dígitos são relativos à espessura máxima do perfil em percentagem, relativamente ao comprimento da corda;

A resposta das pás ao longo de uma rotação é dinâmica, uma vez que ao longo da rotação estas vêm o seu ângulo de ataque alterado tendo a sua posição relativa face ao escoamento incidente ( $\theta$ ). Desta forma, é importante considerar ao longo do funcionamento de uma

turbina, os momentos de perda dinâmica (*dynamic stall*), que é caracterizado por um atraso na entrada em perda resultando daí valores de sustentação, arrastamento e binário diferentes dos normalmente apresentados para fenómenos de perda estática (*stall*) [17].

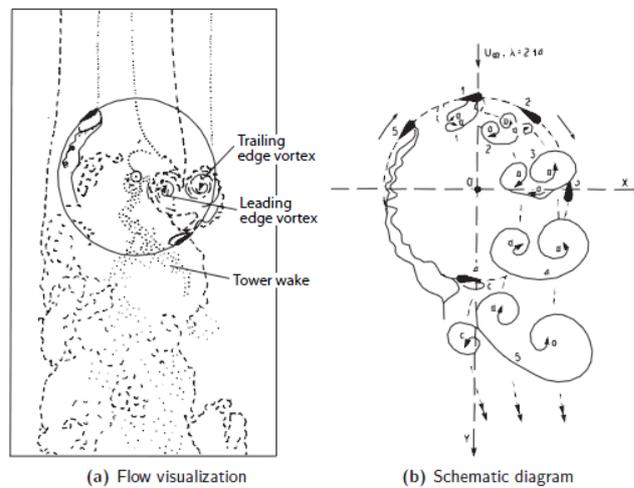


Figura 16 - Visualização de perda dinâmica para  $\lambda = 2.14$  [18]

Em geral, quanto maior o ângulo de ataque máximo, maior é o crescimento do vórtice de perda dinâmica e mais acentuados são os seus efeitos. Assim, a TSR tem uma enorme influência no regime de perda dinâmica. Embora a perda dinâmica leve a uma maior eficiência da turbina, provoca também maior fadiga dos equipamentos e ruído [17]. Na figura 17 é possível ver a relação entre o coeficiente de sustentação e o ângulo de ataque do perfil NACA 633018, para diferentes números de *Reynolds* (a roxo  $Re= 5 \times 10^5$ , a laranja  $Re=10^5$ ). É possível observar a instabilidade que o perfil apresenta para  $Re=10^5$ , para ângulos de ataque superiores a  $7^\circ$ .

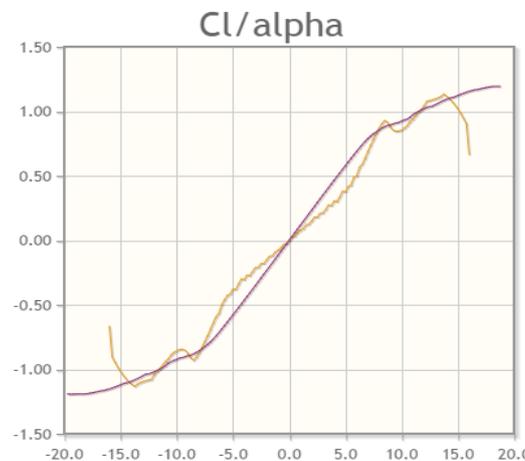


Figura 17 - Coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque para o perfil NACA 633018 (<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca633018-il>)

### 3.2.3 Número de *Reynolds*

A interação entre um fluido e um corpo sólido é dividida em duas categorias, dependendo da interação entre estes [28]: numa as forças de fricção são significativas, na outra os efeitos desta são desprezáveis. A região do fluido que está em contacto imediato com o corpo é designada por camada limite.

Muitos problemas relacionados com escoamentos de fluidos podem ser caracterizados por parâmetros adimensionais. O parâmetro mais importante é o número de *Reynolds*, que relaciona as forças de inércia e as forças viscosas do fluido.

$$Re = \frac{\rho U c}{\mu} = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças viscosas}} \quad (22)$$

onde,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $U$  é a velocidade do escoamento,  $c$  é o comprimento da superfície e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

O valor do número de *Reynolds* médio pode ser obtido através da velocidade média do escoamento de aproximação à pá (eq.14):

$$\overline{Re} = \frac{\rho c U_{\infty} \sqrt{\lambda^2 + 1}}{\mu} \quad (23)$$

Baseado no número de  $Re$  é possível classificar a camada limite como Laminar, Região de Transição, ou de Turbulenta. Escoamentos a números de  $Re$  baixos são escoamentos onde as forças viscosas são significativas enquanto para *Reynolds* elevados, escoamento turbulento, é dominado por forças inerciais [28].

A determinação do número de  $Re$  representa um factor muito importante para a escolha e análise adequada das características aerodinâmicas de um perfil aerodinâmico, pois a eficiência de um perfil em gerar sustentação e arrastamento aerodinâmico está intimamente relacionada ao número de  $Re$ . No caso das pequenas turbinas estas operam normalmente para um número de *Reynolds* inferior a  $10^6$  [26]. Os momentos de perda de sustentação dinâmica em cima referidos, são fruto da separação do escoamento na camada limite junto à superfície da pá, o que ocorre para valores de  $\alpha > 14 - 16\%$ , criando numa primeira fase

turbilhões de pequenas dimensões no bordo de ataque do perfil, que se designam por “*leading edge separation bubble*” [20]. Quando o perfil volta a um ângulo de ataque mais baixo o escoamento volta a pegar à superfície, figura 18.

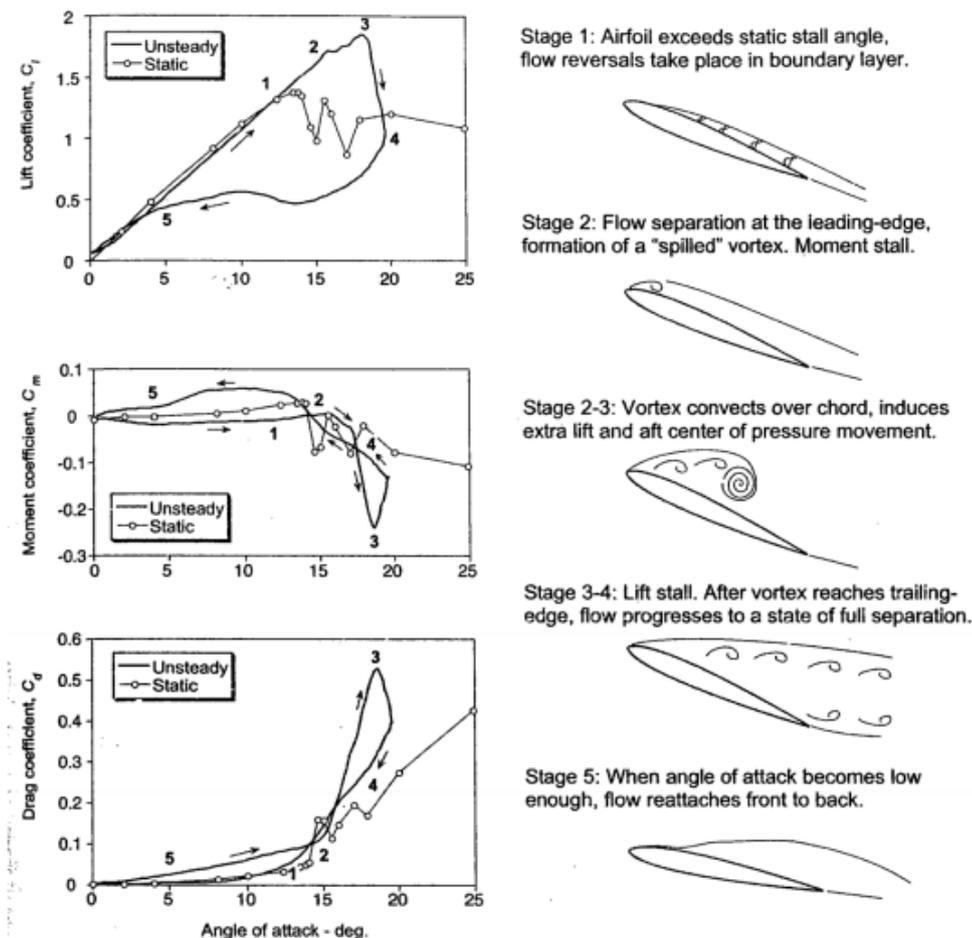


Figura 18 - Fases da perda dinâmica de sustentação, Adaptado [19]

### 3.2.4 Rugosidade

Com o nível adequado de rugosidade, é possível fazer a transição de uma camada limite laminar para turbulenta a um menor número de *Reynolds* do que ocorreria numa superfície lisa. Isto normalmente leva ao aumento da resistência de atrito. No entanto, uma camada limite turbulenta será também mais resistente à separação do escoamento da pá. Isto pode ser vantajoso nos casos em que ocorra separação em regime laminar pois diminui-se a resistência de forma (*form drag*) e, conseqüentemente, a resistência da pá é reduzida [22]. A importância deste factor no rendimento de uma turbina pode ter algum impacto na sua eficiência, dependendo do regime de funcionamento e do perfil aerodinâmico [6]. Um

exemplo comum da mais valia de aplicação de rugosidade sobre uma superfície são as cavidades de uma bola de golfe, permitindo a este alcançar maiores distâncias.

### 3.3 Área de varrimento e alongamento

#### 3.3.1 Área de varrimento

A área de varrimento,  $A$ , é determinada pela altura e diâmetro do rotor. A otimização destas medidas é um dos factores fundamentais para o sucesso de uma VAWT. Do ponto de vista de facilidade de construção, produção e melhor rendimento do investimento, são privilegiadas turbinas com áreas de varrimento consideráveis. A área de varrimento é dada por:

$$A = D \times h \quad (24)$$

Sendo  $h$  a envergadura das pás e  $D$  o diâmetro da turbina.

#### 3.3.2 Alongamento

O alongamento  $AR$ , é definido como:

$$AR = \frac{h}{D} \quad (25)$$

Um valor adequado deste parâmetro pode evitar perdas consideráveis nas extremidades na ponta das pás. Contudo, optar por um aumento de  $AR$ , leva a um conseqüente aumento da velocidade angular,  $\omega$  (rad/s), de forma a manter as mesmas condições do escoamento. O resultado desta escolha, é uma diminuição no binário,  $M$ , e isso terá impacto na escolha do gerador adequado. Mais uma vez, a otimização deste parâmetro depende do regime de funcionamento desejado [6].

### 3.4 Factor de bloqueamento

O factor de bloqueamento ou *solidity* é outra das características fundamentais no desenvolvimento de uma turbina e é dada por:

$$\sigma = \frac{nc}{R} \quad (26)$$

, sendo  $n$  o número de pás,  $c$  a corda de cada pá e  $R$  o raio da turbina [24].

Segundo Parachiouv [6] alguns resultados indicam que um menor  $\sigma$  resulta num maior  $C_p$  e num valor de TSR óptimo superior. Conclui ainda que a TSR óptima diminui com o aumento da solidez, e que por sua vez o  $C_p$  máximo para uma dada  $U_\infty$  tem um valor máximo para um dado  $\sigma$ .

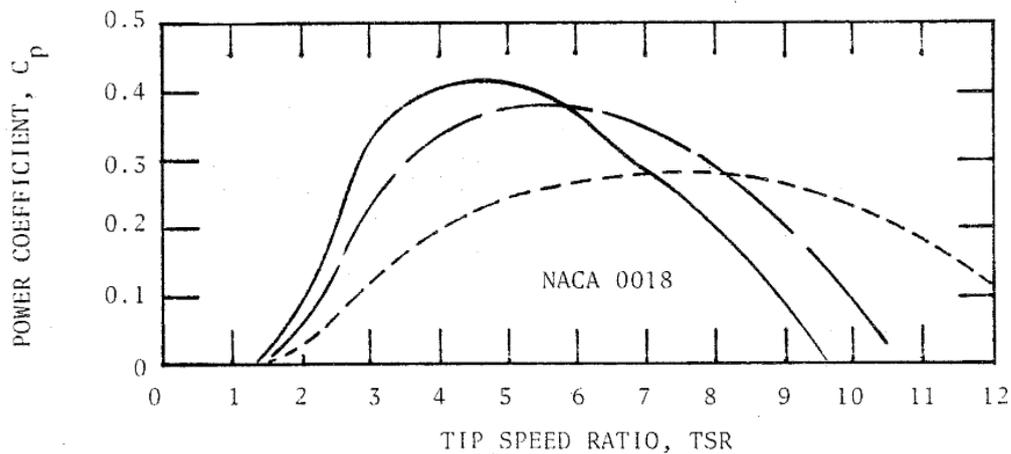


Figure 1-1.  $C_p$ -TSR PERFORMANCE OF NACA 00XX AIRFOILS  
[---  $\sigma = 0.07$ , —  $\sigma = 0.14$ , - - -  $\sigma = 0.21$ ]

**Figura 19** - Desempenho do perfil NACA 0018,  $C_p$  em função da TSR para 3 factores de bloqueamento diferentes [25].

Os rotores das turbinas eólicas podem ser constituídos por uma, duas, três ou mais pás. O número de pás adoptado depende de uma série de factores, como: a sua finalidade, a estrutura do suporte, o regime da velocidade dos ventos na região a que se destina e o custo de fabrico. Rotores compostos por uma e duas pás, apresentam um momento de inércia relativamente baixo ao longo da rotação, isto induz um comportamento instável provocando maior fadiga nos materiais. São também geralmente mais ruidosos, uma vez que para a produção de binário necessitam de TSR elevadas [6]. Os rotores de 3 pás por apresentarem um momento de inércia constante independente da posição relativa ao vento e da sua posição azimutal,  $\theta$ , e por operarem com velocidades de rotação mais baixas para produzirem a mesma potência que os rotores de uma e duas pás, são os mais utilizados [23].

### 3.5 Limite de Betz

Como já referido o valor teórico máximo, conhecido como limite de Betz para o coeficiente de potência, é na ordem de 59%, todavia esse valor na prática nunca foi registado. O limite de *Betz* não tem em consideração algumas perdas, resultantes da resistência aerodinâmica, perdas dinâmicas, eficiência mecânica, que a turbina é composta por um conjunto finito de pás e que a rotação induzida no escoamento após passar pela turbina, promove uma diminuição do valor de  $C_p$ .

No que diz respeito à rotação induzida pela turbina no escoamento, a variação do TSR condicionada fortemente o  $C_p$  obtido. Se é verdade que se obtém  $C_p$  máximo para valores elevados de TSR, valores elevados também induzem um aumento nas perdas nas extremidades da ponta da pá, as *end/tip losses* que ocorrem pela passagem de fluido da zona de maior pressão para a de menor pressão no extremo de uma asa. Está também associado à formação de vórtices nestas zonas. A determinação do factor de correcção das *tip losses* é dado por:

$$N_{tip} = \frac{1,8}{(n - \lambda)} \quad (27)$$

É importante referir que estas perdas podem ser atenuadas, projectando uma turbina com um  $AR > 3$  ou através da utilização de *end plates*, técnica usada na aviação por meio de *winglets* na ponta das asas [6].

Para além das *tip losses*, as perdas mais significativas prendem-se com a interacção do movimento rotacional das pás, e a influência nestas na sua própria esteira. De menor importância são as perdas com alguns componentes estruturais e mecânicos, como a dimensão do eixo, dos braços e qualidade dos rolamentos, quando bem dimensionados.

### 3.6 Gerador

A escolha deste elemento depende, mais uma vez, do regime de funcionamento da turbina. É necessário compatibilizar a curva de potência da turbina, com a curva característica do gerador. Muitas vezes essa compatibilidade para VAWT de grandes dimensões que operam a uma velocidade de vento relativamente baixa, é assegurada por geradores normalmente de indução com caixa de velocidades. Este tipo de sistemas de multiplicação de velocidade e transmissão não só promovem perdas de energia, como encarecem a turbina. O aparecimento de geradores de ímanes permanentes, apesar do seu custo de aquisição ser mais elevado, permite velocidades de funcionamento mais baixas e uma ligação directa à

turbina [5]. A escolha de um gerador também está ligada ao tipo de ligação que se pretende. As VAWT podem ser ligadas a bancos de baterias e nesse caso pretende-se um gerador CC ou AC com rectificação. No caso de sistemas para ligação à rede, pretende-se condições mais específicas, nomeadamente de frequência e tensão. Recentemente, o desenvolvimento da electrónica de potência tem permitido uma grande flexibilidade e segurança na injeção de energia na rede.

## 4. Análise aerodinâmica

### 4.1 Modelos de análise numérica

Para a previsão e optimização dos parâmetros de funcionamento de uma turbina é necessário recorrer a modelos numéricos que permitam calcular o comportamento do escoamento na turbina em funcionamento. De forma a prever a energia produzida pela turbina, foram criados modelos numéricos que têm em conta as cargas impostas nas pás devido à variação de quantidade de movimento provocado pelo escoamento incidente. Apesar de ainda nenhum modelo ser totalmente representativo do funcionamento de uma turbina, foram desenvolvidos vários modelos para VAWT, modelos *momentum* como o *double/multiple streamtube model*, e outros como *vortex model* e modelos CFD [26]. As principais componentes destes modelos são:

- Cálculo da velocidade  $V$  em função da posição  $\theta$  de acordo com a TSR, raio da turbina  $R$  e velocidade de escoamento livre  $U_\infty$ ;
- Cálculo das forças aerodinâmicas na pá;
- Cálculo da velocidade induzida,  $V_e$ , (velocidade do escoamento no interior da turbina, diferente da velocidade do escoamento livre  $U_\infty$  devido à influência da turbina sobre o escoamento);
- Modelos para a representação de efeitos tridimensionais, principalmente *end/tip losses*;
- Modelos para o cálculo das forças aerodinâmicas na pá considerando perda dinâmica

Os modelos *momentum* baseiam-se no “*actuator disk theory*” relacionando a velocidade induzida  $W_e$  e a variação de quantidade de movimento do escoamento livre. Estes modelos tornam-se inválidos para valores elevados valor de TSR e  $\sigma$ , figura 19 [6].

Cada vez mais utilizados, os modelos de CFD apresentam-se como uma solução de futuro, uma vez que se tornam cada vez mais fiáveis e permitem ao utilizador obter a informação necessária no pós-processamento da simulação. Neste método é gerada uma malha tridimensional em torno do modelo da turbina de forma a calcular por métodos iterativos, entre cada célula dessa malha com base na análise de elementos finitos, as propriedades do escoamento. O refinamento da malha e o tamanho do domínio computacional são factores fundamentais para se obter um resultado fiável. Daqui resulta umas das desvantagens deste método, que requer para sistemas complexos muito tempo de pré-processamento do modelo e muita capacidade computacional.

Neste trabalho foram realizadas simulações complementares em ambiente *FlowSimulation* dos concentradores, contudo a grande lacuna desta análise é a falta de resultados representativos da simulação do sistema de concentração com turbina em pleno funcionamento.

#### **4.1.1 Double stream tube model, DMS**

Para o estudo da turbina, foi utilizado um *software opensource* de simulação, *Qblade*, desenvolvido por uma equipa de investigadores do Departamento de Mecânica dos Flúidos da Universidade Técnica de Berlim liderados pelo *Prof. Dr. Christian Oliver Paschereit*. Este *software* permitiu simular o rotor da VAWT do tipo utilizado nos ensaios, recorrendo ao modelo numérico *double stream tube model*.

Este modelo numérico foi desenvolvido por Ion Paraschivoui [6] para analisar o rendimento de turbinas do tipo Darrieus [6] resultando na combinação do modelo *multiple streamtubes* com um duplo disco actuator, figura 20. O escoamento que atravessa o rotor é dividido em pequenas secções tubulares. As pás do rotor passam em todas as secções durante uma revolução e extraem energia do fluido reduzindo a velocidade deste durante a rotação. Na verdade, cada pá passa no mesmo tubo duas vezes, e por isso este modelo assume duas áreas distintas,  $+180^\circ$  (*montante*) e  $-180^\circ$  (*jusante*). Desta forma, o algoritmo é iterado duas vezes numa revolução para cada uma destas áreas.

São 5 as velocidades que o modelo integra:

- Velocidade do escoamento incidente,  $U_{\infty i}$
- A velocidade induzida na área a montante,  $V$
- Uma velocidade na zona intermédia de equilíbrio entre as áreas a montante e a jusante,  $V_e$
- Velocidade induzida a montante,  $V'$ , representativa de diminuição de velocidade resultante da extracção de energia pelas pás a montante.
- A velocidade perturbada,  $V''$ , em todo o domínio dos dois discos atuadores

A componente da velocidade induzida a montante (*upwind zone*) é inferior a velocidade do escoamento não perturbado,  $V < U_{\infty i}$ , no plano intermédio entre a região a montante e a jusante (*downwind zone*) existe uma velocidade de equilíbrio,  $V_e < V$ ; A velocidade diminui na região a montante e isso reflecte-se na região a jusante onde  $V' < V$ . Na figura 20 é apresentado um esquema das velocidades induzidas no duplo disco actuador. Para a região a montante do rotor, a velocidade local incidente,  $U_{\infty i}$ , diminui por um factor de interferência  $u < 1$ , e esta é definida por [6]:

$$V = uU_{\infty i} \quad (28)$$

Por fim a velocidade de equilíbrio  $V_e$  é dada por:

$$V_e = (2u - 1)U_{\infty i} \quad (29)$$

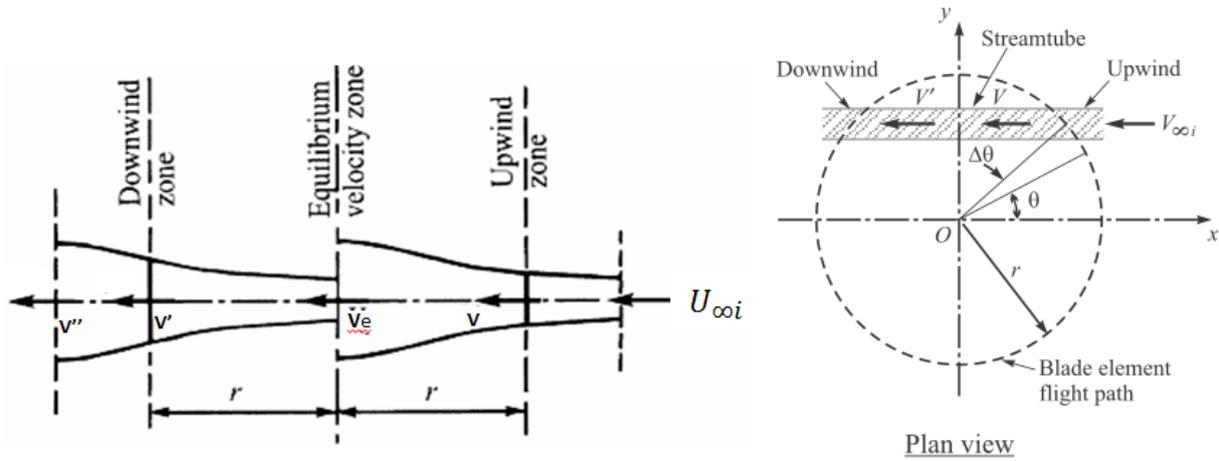
Para jusante, com  $V_e$  como velocidade de entrada, a velocidade induzida é dada por:

$$V' = u'(2u - 1)U_{\infty i} \quad (30)$$

Através das velocidades referidas é possível determinar o factor de interferência que representa a energia extraída na passagem das pás a montante e a jusante,

$$u = \frac{V}{U_{\infty i}} \quad (31)$$

$$u' = \frac{V'}{V_e} \quad (32)$$



**Figura 20** - Corte da secção transversal de um rotor *Darrieus* (à esquerda) e aplicação do modelo *momentum* com dois discos atuadores em tandem (à direita) [6].

Neste modelo o escoamento é dividido horizontalmente em tubos com uma largura angular dada por:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_\theta} \quad (33)$$

A carga imposta pelo escoamento incidente na pá é:

$$\Delta F_x = \Delta F_n \cos(\theta) + \Delta F_t \sin(\theta) \quad (34)$$

A partir das eq.15 e eq.16 é possível deduzir as componentes da força normal e tangencial aplicada a cada pá:

$$C_n = \frac{\Delta F_n}{0,5\rho \times V^2 \times c \times \Delta z} \quad (35)$$

$$C_t = \frac{\Delta F_t}{0,5\rho \times V^2 \times c \times \Delta z} \quad (36)$$

$\Delta z$  representa o comprimento de pá considerado.

Resultando como variação da força aplicada na pá no intervalo  $\Delta\theta$ :

$$\Delta F_x = \frac{1}{2} \rho V^2 c \Delta z [C_n \cos(\theta) + C_t \sin(\theta)] \quad (37)$$

Para uma rotação a força média resultante é dada por:

$$\bar{F}_x = F_x \frac{n\Delta\theta}{2\pi} \quad (38)$$

De forma a calcular a força média é necessário utilizar as velocidades correspondentes a zona a montante e a jusante, assim a partir de (4), (11) e (14) temos:

- a montante

$$V_{up}^2 = V^2 \left[ \left( \frac{\omega R}{V} - \sin\theta \right)^2 \right] + \cos^2\theta \quad (39)$$

- a jusante

$$V_{down}^2 = V'^2 \left[ \left( \frac{\omega R}{V'} - \sin\theta \right)^2 \right] + \cos^2\theta \quad (40)$$

Aplicando o algoritmo para diferentes TSR e velocidades do escoamento não perturbado, é possível calcular  $V_{up}^2$ ,  $V_{down}^2$  e determinar os factores de interferência  $u$  e  $u'$  que são alvo de um critério de convergência, definido pelo utilizador, de forma a obter um resultado aproximado ao real. A partir dos valores  $V_{up}$  e  $V_{down}$  é possível calcular o binário total produzido numa revolução, e dependendo da velocidade e assim estimar a potência.

## 5. Concentração eólica

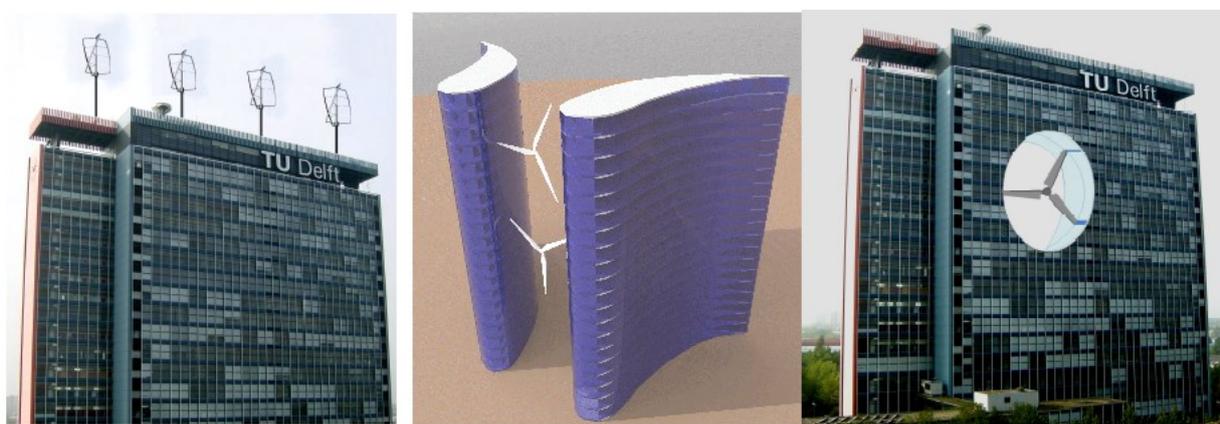
Fora do meio urbano, existe a possibilidade de procurar locais onde a velocidade do vento médio anual registado, seja tal, que este tipo de sistemas não seja necessário. Este tipo de sistemas, procura aumentar a velocidade do vento na área de captação da turbina, tornando assim locais com velocidades médias mais reduzidas, viáveis para a utilização de turbinas. A potência de uma turbina eólica aumenta proporcionalmente com o cubo da velocidade do vento. Assim com a amplificação da velocidade do vento resultará um aumento significativo da energia produzida anualmente.

Da pesquisa e revisão bibliográfica efectuada, não são actualmente comercializados produtos de concentração do vento para VAWT. Grande parte dos sistemas de concentração eólica aproveita a integração em edifícios, ou são aplicados sobretudo em HAWT, com forte predominância da aplicação de difusores circulares com perfil aerodinâmico em torno do rotor (Anexo 1).

Enquanto estruturas criadas para turbinas, os primeiros concentradores eólicos surgiram na segunda metade do século passado, apesar de nunca terem entrado com muito sucesso em comercialização. Os primeiros concentradores foram desenhados para HAWT baseados no princípio de *Bernoulli* (exemplos no Anexo 1), que serviam para acelerar os ventos de baixa e reduzir do ruído aerodinâmico [1]. Da pesquisa efectuada só foi possível aceder a um sistema patenteado similar ao estudado, que é possível consultar no Anexo 1.

É sobretudo em meios edificados, que começa a ser mais frequente a integração de turbinas na arquitectura. O termo “*Building Augmented Wind Turbines*” ou BAWT, refere-se à integração de turbinas que são favorecidas por efeitos de concentração promovidos pela forma e disposição dos edifícios [13]. O dimensionamento destes sistemas está obviamente condicionado pela dimensão dos edifícios e de uma integração correcta com o meio. Existem três tipos de configuração de BAWT, figura 21, tendo em conta o seu regime de funcionamento e local de aplicação:

- Perto do edifício, geralmente no topo deste
- Entre edifícios que apresentem formas aerodinâmicas
- Em aberturas nas fachadas dos edifícios ou em corredores com passagens livres



**Figura 21** - Representação artística das configurações de BUWT, retirado de [13].

Todas as outras possíveis configurações de BAWT resultam da combinação destas três. O facto de o efeito de concentração ocorrer apenas em zonas próximas dos edifícios, constitui uma limitação para a dimensão do rotor eólico. Turbinas com dimensões superiores a 20% da dimensão característica do edifício, apresentam uma redução significativa do coeficiente de potência [35].

Configuração BAWT	Factor de Concentração de Energia para tipo de vento			
	Uniforme	Com direcção prevalente semanal	Fortemente unidireccional	Bidireccional
Em cima do edifício	1,12	1,12	1,12	1,12
Em cima do edifício (bordas arredondadas)	1,15	1,15	1,15	1,16
Aos lados do edifício	0,78	0,81	0,84	0,88
Entre dois edifícios	0,99	1,03	1,07	1,13
Integradas na fechada do edifício	1,35	1,39	1,43	1,51

**Figura 22** - Relação entre a energia produzida por diferentes configurações de BAWT e as turbinas equivalentes postas à mesma altura, mas não vinculadas a nenhum edifício, por diferentes tipologias de vento [34].

É importante um estudo prévio à aplicação deste tipo de turbinas, uma vez que a experiência mostra que nem sempre são aplicadas nos melhores locais ou da melhor forma, especialmente devido à complexidade do vento em meio urbano, referida no subcapítulo 2.3. Grande parte destes projectos deve ser simulado em CFD ou realizados ensaios em túnel de vento porque muitas vezes, por detrás destes sistemas de concentração estão pressupostos teóricos nomeadamente o efeito de *Venturi*<sup>1</sup> que foi desenvolvido para escoamentos confinados, o que não é o caso das condições existentes neste tipo de aplicação. Um dos exemplos mais conhecidos de aplicação deste sistema integrado em edifícios, são as torres *Bahrain World Trade Center*, nas quais, segundo estudos recentes levados a cabo pela Universidade Técnica de *Eindhoven* [14], quer em CFD quer em ensaios em túnel de vento mostram que a disposição actual das turbinas entre as torres, não é a óptima para o aproveitamento de amplificação de velocidade induzido pelas torres. A diferença de produção na anual de energia, entre a configuração usada e a óptima podem ditar um tempo de retorno do investimento, mais ou menos longo, no caso, mais longo uma vez que a produção de energia está aquém do que seria possível [14].

<sup>1</sup> A velocidade de um fluido em movimento numa conduta fechada aumenta, face à diminuição de pressão, quando o fluido encontra um restringimento da secção transversal da conduta.

## 6. Estudo e dimensionamento dos componentes aerodinâmicos

### 6.1 Sistema de Concentração

O sistema de concentração desenvolvido é composto por uma estrutura aerodinâmica de simetria axial, na qual é integrada uma turbina de eixo vertical. Estas permitem a aceleração do vento independentemente da direcção deste. O sistema em estudo resultou do perfil obtido em [1], figura 23. A curva foi obtida através de um método iterativo, com base em considerações utilizadas no aproveitamento do recurso eólico, nomeadamente a inclinação e geometria óptimas de topografias com efeito de concentração do escoamento atmosférico. Em resultado disso desenvolveu-se uma nova forma de desenhar perfis adequados à estruturação do concentrador, com o nome de Spline 5025-26.

#### 6.1.1 Simulações do Sistema de Concentração

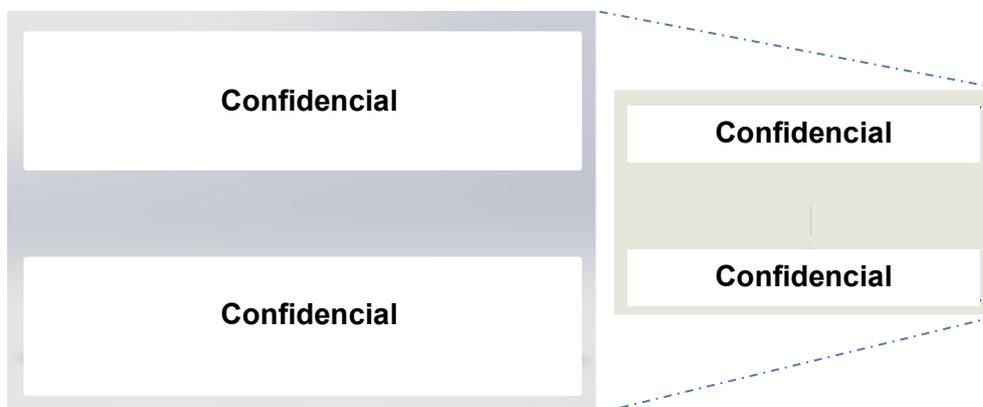
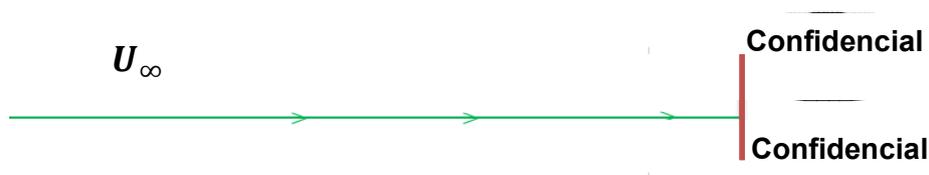


Figura 23 - Concentrador B5025-26 à esquerda, e à direita corte 2D, onde E é a espessura máxima do toro

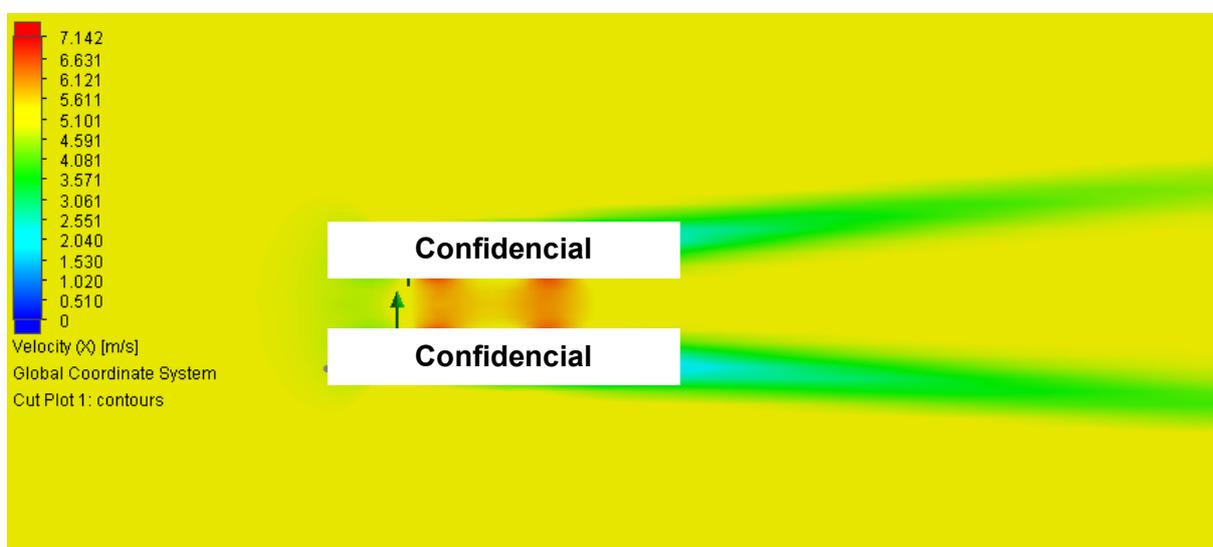
Na figura 24 é possível observar o modelo simulado em ambiente *FlowSimulation* e de onde são extraídos os perfis de velocidade, longitudinal a verde, e vertical a vermelho, que permitem caracterizar o efeito da estrutura aerodinâmica no escoamento incidente, para a componente  $U(x)$  dada em  $m/s$ .



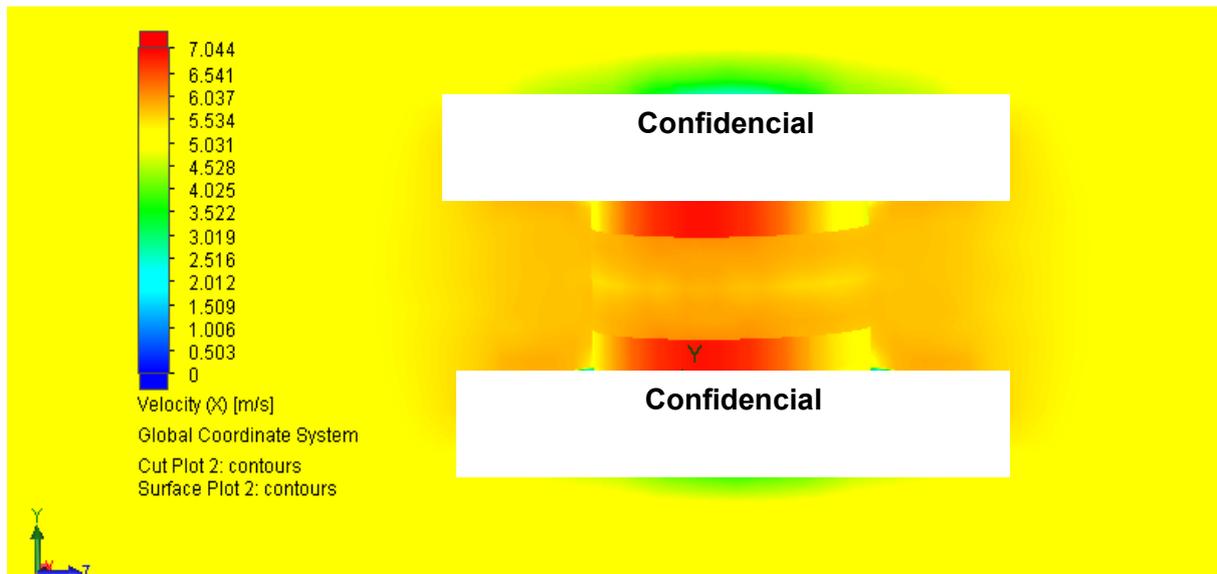
**Figura 24** - Concentrador B5025-26, a verde a linha de teste representativa do perfil longitudinal, e a vermelho a linha de teste representativa do perfil vertical de velocidade do escoamento na estrutura aerodinâmica.

Uma vez que o efeito de concentração da estrutura projectada em [1] tinha sido provado, no presente trabalho foram realizadas apenas simulações adicionais recorrendo à ferramenta de CFD-FEA, *FlowSimulation* do *Solidworks*, variando-se a intensidade turbulência do escoamento na simulação, avaliado a nova escala do modelo e o impacto da estrutura de suporte. As novas simulações consideraram uma gama de velocidades do escoamento não perturbado entre os 5 e os 9 *m/s* para intensidades de turbulência de 0,1, 5 e 15%. As simulações anteriores foram realizadas respeitando todas as condições consideradas nas simulações anteriores realizadas para o modelo de [1] cujo protótipo tinha então 0,70 *m* de diâmetro [1].

O agora denominado, B5025-26, corresponde a um sistema de concentração que na escala construída está preparado para integrar uma turbina com 0,85 *m* de diâmetro. O critério para a utilização desta escala, deveu-se sobretudo às limitações técnicas e financeiras, para em tempo útil se executar um protótipo fiável. A escolha do espaçamento de 0,56 *m*, que corresponde a 33% do diâmetro da estrutura aerodinâmica, baseia-se nas tabelas obtidas em [1] presentes no Anexo 2. Relativamente aos novos ensaios, na figura 25 é possível perceber através de um corte da secção longitudinal ao centro da estrutura aerodinâmica o resultado da simulação e assim visualizar o comportamento do escoamento na presença do concentrador. Na figura 26 é possível observar o resultado obtido, tendo como vista um corte da secção transversal no plano frontal e a zona de maior aceleração do escoamento em 3D.

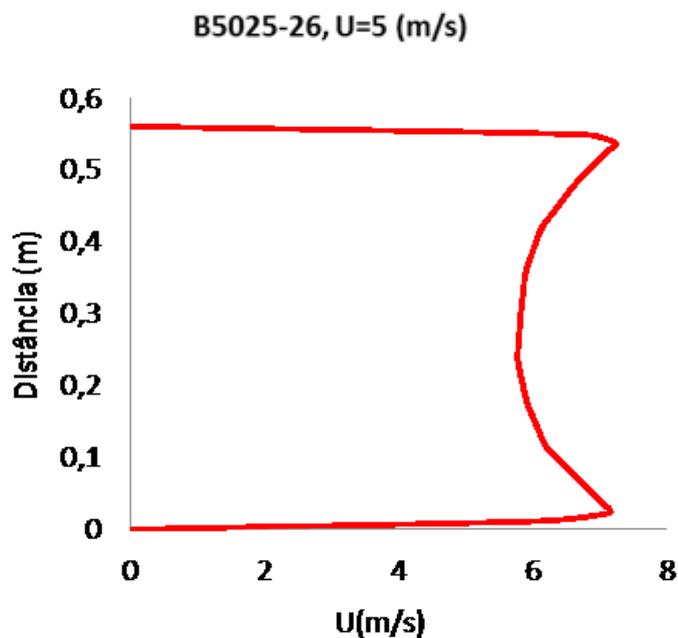


**Figura 25** - Resultado da simulação para  $U(x)=5\text{m/s}$  para o concentrador B5025-26

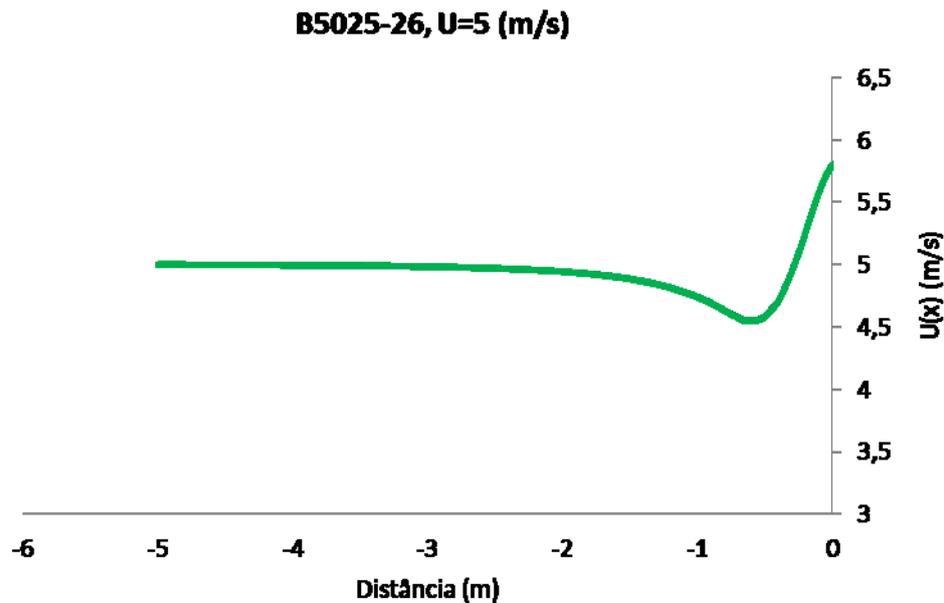


**Figura 26** - Resultado da simulação, visualização 3D da região de maior velocidade registada no plano perpendicular ao escoamento não perturbado, para o concentrador B5025-26

Os resultados obtidos para uma velocidade do escoamento não perturbado,  $U(x)=5 \text{ m/s}$ , e para uma intensidade de turbulência de 5%, para o perfil vertical de velocidade na zona de operação da VAWT e para o perfil longitudinal de aproximação à estrutura de concentração, podem ser observados nas figuras 27 e 28 respectivamente.



**Figura 27** - Perfil vertical na estrutura aerodinâmica



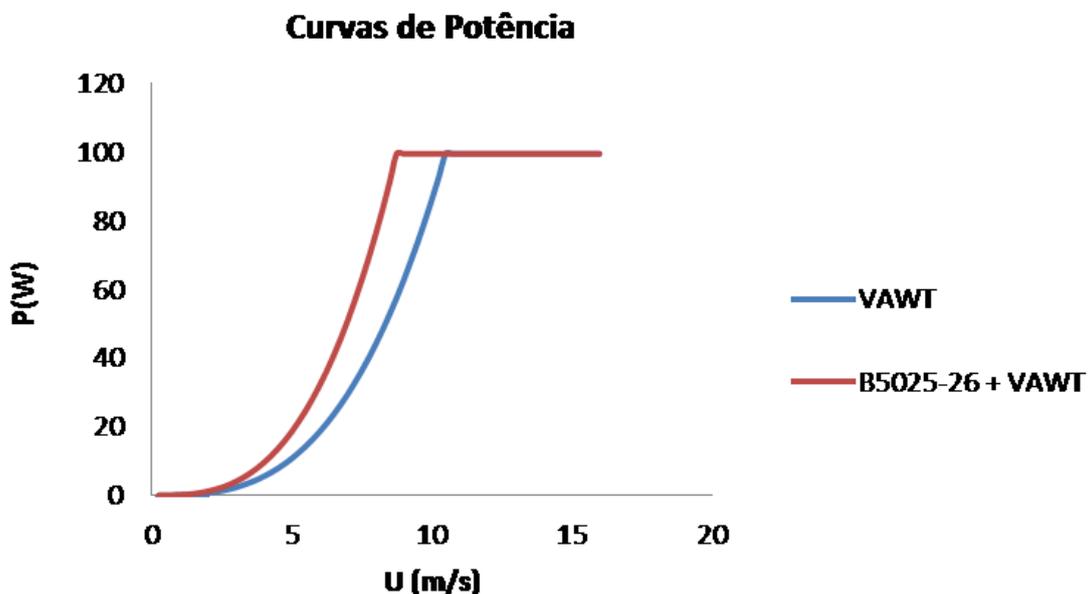
**Figura 28** - Perfil longitudinal de aproximação ao concentrado; a posição 0 m corresponde ao ponto médio da zona onde opera a turbina.

É possível verificar, figura 27, que o efeito de concentração atinge o seu máximo próximo da superfície da estrutura aerodinâmica, apresentado um  $\Delta U_{máximo}$  de 1,45 m/s face ao valor registado no ponto central desta estrutura. No que diz respeito ao perfil longitudinal, figura 28, o concentrador a aproximadamente 0,5 m deste apresenta o valor máximo de atenuação de 0,5 m/s, atingindo no ponto médio da estrutura correspondente à região de operação da VAWT, um valor aproximado de 5,85 m/s o que corresponde a um aumento de 17% face à velocidade do escoamento não perturbado de 5 m/s.

É possível consultar no anexo 3 as tabelas com os restantes valores para as diferentes velocidades iniciais do escoamento da simulação, onde é possível também analisar os valores referentes ao impacto da variação da intensidade turbulência no modelo utilizado em *FlowSimulation*. O estudo deste parâmetro, intensidade turbulência, deve-se às condições onde foram realizados os ensaios, como será explicado no capítulo 9. A variação no factor de concentração com a variação da intensidade turbulência, não foi considerado relevante nesta fase do projecto uma vez que as simulações não mostraram um impacto significativo no factor de concentração.

O factor de concentração<sup>2</sup> é obtido pela integração do perfil vertical de velocidade do escoamento na zona de operação da VAWT e este é na ordem de 1,2 para o modelo analisado. O valor obtido nestas simulações situa-se no intervalo de valores obtidos no trabalho de pesquisa efectuado em 2012 [1]. Desta forma, seria de esperar um aumento da energia produzida pela turbina integrada no concentrador, de 70%.

A presença da turbina, com ou sem concentrador, provoca a desaceleração do escoamento quando este se aproxima da mesma [6], contudo esse facto está implícito no coeficiente de potência da turbina pelo que nesta fase para previsão da potência esperada foi usado o valor de velocidade do escoamento não perturbado. Neste caso, com concentrador, o factor de aceleração anunciado já teve em conta a perturbação causada pelo próprio, pelo que hipoteticamente se teria uma nova velocidade no cálculo da potência. Desta forma é possível estimar as curvas de potência para os sistemas, tendo em conta os factores médios de concentração e as dimensões da turbina que pode operar no concentrador.



**Figura 29** - Curvas de potência hipotéticas tendo em conta o factor de concentração médio obtido em CFD

A potência da turbina com concentrador é calculada por:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \rho A C_p (U_{\infty} \times FC)^3 \quad (41)$$

---

<sup>2</sup>Fator de concentração: designação dada à razão entre o escoamento do ar concentrado (na linha de teste) e o escoamento não perturbado [1]

Admitindo os factores de concentração médios obtidos em CFD, e que eles se verificam mesmo com uma turbina em funcionamento é apresentada, na tabela 3, as dimensões do sistema “Concentrador + VAWT” e a produção de energia esperada relativamente a uma turbina padrão. A Turbina padrão é diferente da turbina presente no sistema com concentrador sendo considerado que esta tem igual diâmetro mas tem uma envergadura de pá igual à distância entre o topo e base da estrutura aerodinâmica.

A área de varrimento para a turbina que serve de comparação é dada por:

$$A_{turbina\ padrão} = D \times (h + 2e) \quad (42)$$

Em que  $e$  é a espessura do perfil do concentrador.

Na tabela 3 estão os dados do projecto de dimensionamento e os dados obtidos nas simulações para as configurações que viriam a ser testadas em túnel de vento, considerando uma velocidade do escoamento não perturbado de 10 m/s e um  $C_p$  de 0,2.

<b>B5025-26</b>	
<b>Diâmetro total <math>l(m)</math></b>	1,7
<b>Distanciamento na estrutura <math>(h)(m)</math></b>	0,56
<b>Espessura máxima do perfil <math>(m)</math></b>	0,213
<b>Volume <math>(m^3)</math></b>	0,58
<b>Área total <math>(m^2)</math></b>	9,43
<b>Diâmetro da turbina <math>(m)</math></b>	0,85
<b>FC médio para <math>U=9m/s</math></b>	1,2
<b>Área de varrimento de turbina (Concentrador+VAWT)<math>(m^2)</math></b>	0,47
<b>Área de varrimento VAWT padrão<math>(m^2)</math></b>	0,84
<b>P sistema <math>(W)</math></b>	99
<b>P turbina <math>(W)</math></b>	101,6

**Tabela 3** - Dimensões e resultados com base nas simulações em *FlowSimulation* para o modelo B5025-26

Pela tabela 3 é possível perceber que o rácio de potência, potência Sistema Concentração /potência turbina, é desfavorável, mas estes resultados vão de encontro aos obtidos por simulação em CFD, em 2012. Este rácio só é positivo para determinadas dimensões de concentrador e determinados distanciamentos, e infelizmente, devido às limitações já referidas, essas condições não se verificam nos concentradores possíveis de prototipar, sendo direccionado o foco deste trabalho para a verificação e quantificação do efeito de

concentração para o sistema completo, “Concentrador + VAWT” independentemente do rácio de potências verificado.

## 6.2 Dimensionamento da VAWT

Com base nos capítulos 3 e 4, procedeu-se ao desenvolvimento de uma turbina composta por 3 pás, do tipo *Giromill* com 2 braços de suporte entre o eixo de rotação e as pás e com o gerador situado na parte inferior do rotor, figura 30. As dimensões da turbina, diâmetro e envergadura, foram condicionados pelo tamanho possível para o protótipo do concentrador. Assim, esta apresenta 0,55 m de envergadura e 0,85 m de diâmetro.

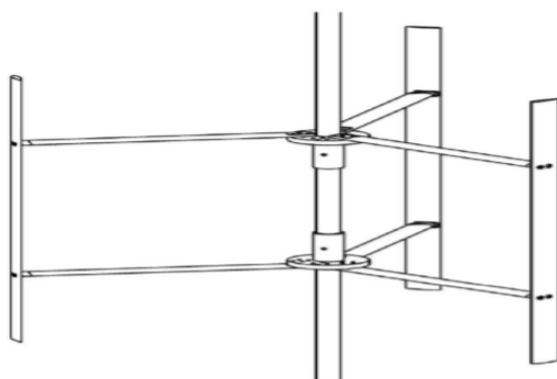


Figura 30 - Desenho técnico VAWT

### 6.2.1 Perfil aerodinâmico das pás

No caso das VAWT como já referido, estas operam com TSRs relativamente baixas, e como a corda das pás é curta, estas operam a números de *Reynolds* relativamente baixos. Ensaio do protótipo *Turby* [13] mostraram que para uma turbina com 1,5 m de diâmetro e uma TSR 3, para uma velocidade do escoamento não perturbado de 10 m/s se obtinha um  $C_p$  aproximado de 0,3. É também descrito num trabalho realizado por *Martens* [21] que para valores de *Reynolds* de  $10^5$  e perfis aerodinâmicos com espessura de 18% da sua corda, a turbina deveria operar com TSR's entre 2 e 4.

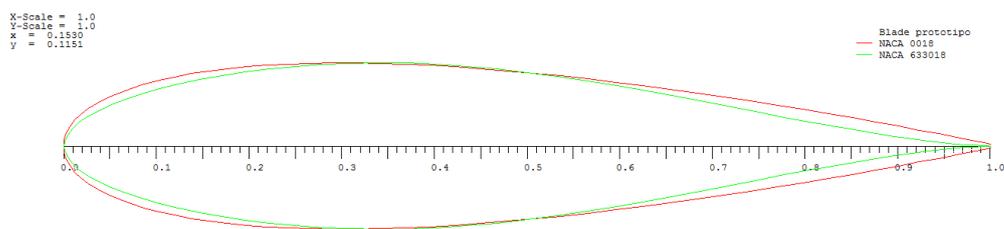


Figura 31 - A vermelho perfil NACA 0018 e a verde NACA 633018

Tendo em conta a revisão bibliográfica e os dados experimentais disponíveis, não foi considerado necessário proceder à simulação ou ao desenvolvimento de um perfil específico para o projecto. O perfil utilizado neste projecto foi o perfil NACA 633018. É um perfil semelhante ao Naca 0018 usado por *Martens* [21] nos ensaios para *Turby*, diferenciando-se por apresentar um bordo de fuga e de ataque menos pronunciados e cheios, e portanto um desempenho aerodinâmico melhor, com um rácio L/D superior, para TSR entre 2 e 4.

### 6.2.2 Regime de funcionamento com base no perfil escolhido

As dimensões da turbina, nomeadamente o seu diâmetro condicionam o regime de funcionamento desta. É possível verificar na figura 32 que a TSR óptima para este perfil se situa entre 3 e 5 para um factor de bloqueamento de 0,21. Com estas características e segundo a eq.26 a corda da pá é de 6 cm, e admitindo  $U_\infty$  de 10 m/s como velocidade nominal, segundo a eq.4 temos uma velocidade de rotação de 750 rpm, para um TSR 3,5. A velocidade de rotação prevista, que resulta do diâmetro reduzido do rotor, foi assinalada nesta fase de projecto como um dos principais factores críticos na parte experimental deste trabalho.

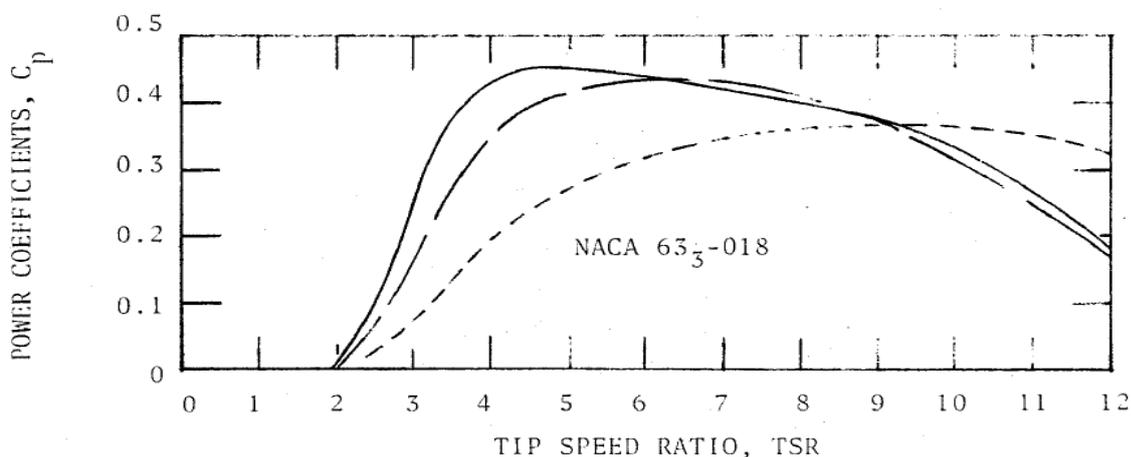


Figure 1-2.  $C_p$ -TSR PERFORMANCE OF NACA 63<sub>b</sub>-0XX AIRFOILS  
 [---  $\sigma = 0.07$ , —  $\sigma = 0.14$ , —  $\sigma = 0.21$ ]

**Figura 32** - Desempenho do perfil Naca 633018 [25]

Assumindo um  $C_p$  de valor intermédio de 0,2 na tabela 4 encontram-se as características assumidas para esta primeira fase de desenvolvimento da turbina.

VAWT (Primeira fase de desenvolvimento)			
Dimensões e parâmetros de funcionamento			
Diâmetro do Rotor (m)	0,85	Alongamento	0,65
Envergadura das pás (m)	0,55	Solidez	0,21
Corda das Pás (m)	0,06	Área de Varrimento (m <sup>2</sup> )	0,47
Coefficiente de potência	0,2	RPM	750
TSR	3,5	Potência nominal (W)	57,3 <sup>3</sup>
Nº de Pás	3		
U nominal (m/s)	10		

Tabela 4 - Dimensões e Características de funcionamento do projecto para a VAWT

### 6.2.3 Dimensionamento do rotor através do programa *Qblade*

Devido às limitações de tempo e conhecimento na utilização de Análise Computacional de Fluidos com malhas dinâmicas, e sendo essa, uma das maiores lacunas do presente trabalho como já referido, para confirmar esta primeira aproximação da configuração da VAWT a ser testada, recorreu-se à utilização do programa *Qblade*.

O programa tem a função de gerar com auxílio do *software XLFR5* perfis NACA de 4 dígitos. Como o perfil escolhido não estava disponível foi necessário inserir ponto a ponto a curva correspondente ao perfil NACA 633018. Esta fase de avaliação do perfil foi revista após construção das pás, uma vez que o processo manual de construção acabou por originar um perfil diferente. De forma a aproximar o resultado simulado com aquele que seria obtido na construção das pás, foram interpolados os perfis NACA 0018 e 633018. Na figura 33 é possível observar este novo perfil, curva a azul.

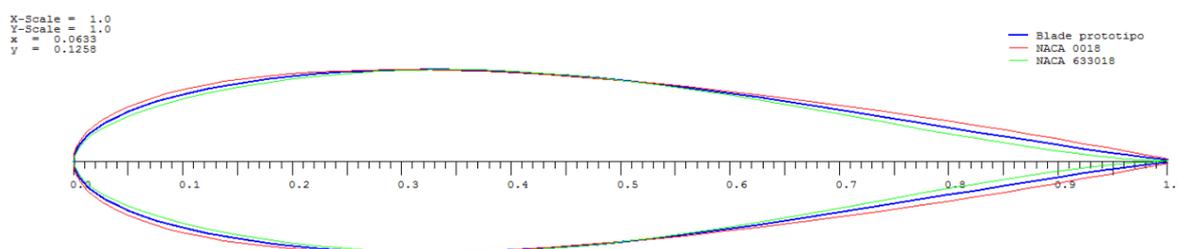
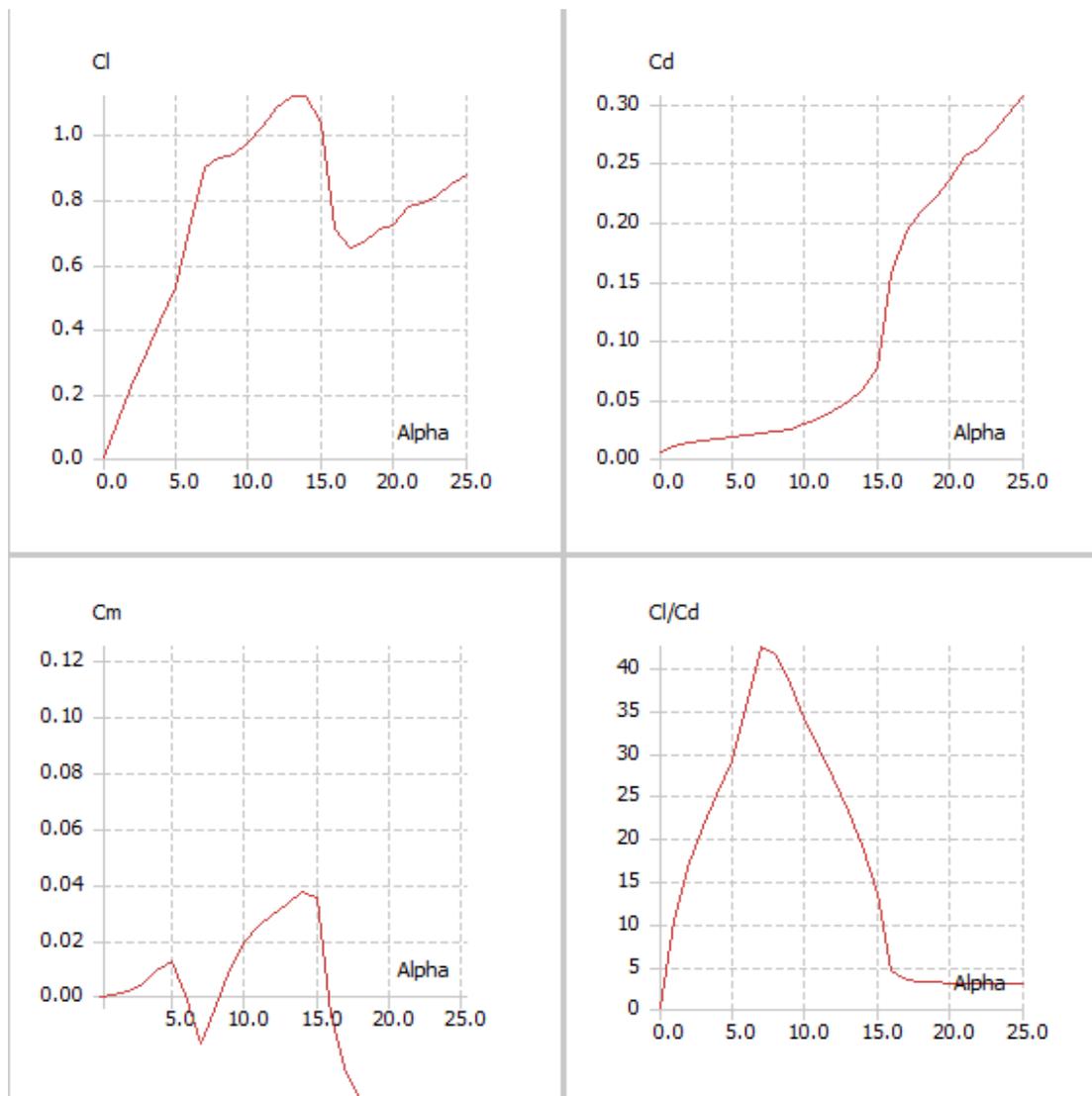


Figura 33 - Perfil simulado (azul), resultado da interpolação do perfil 0018 e 633018

No passo seguinte é feita uma análise ao perfil, para diferentes ângulos de ataque para um determinado número de *Reynolds* local, relativo à velocidade angular e à corda da pá (utilizado nesta fase  $Re=2 \times 10^5$ ). Como na altura destas simulações já tinham sido

<sup>3</sup> - Este valor não tem factor de concentração associado

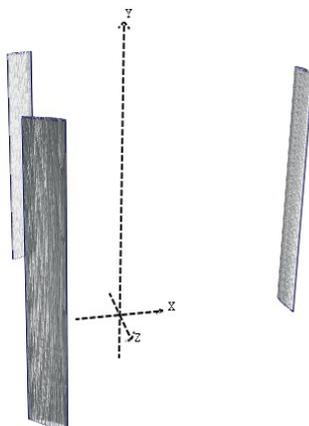
construídas as pás que viriam a ser usadas no protótipo, foi possível incluir alguns dados adicionais, como o peso das pás, envergadura e corda.



**Figura 34** - Análise do perfil em função de  $\alpha$ , através do programa *Qblade*

É possível observar na figura 34 que para um  $Re=2 \times 10^5$ , este perfil apresenta um rácio máximo  $C_l/C_d$  para um ângulo de ataque, de  $7^\circ$ . Seria por isso importante, durante os ensaios, ter alguma liberdade de ajustamento do ângulo inicial das pás na fase de teste de lançamento da turbina. O ângulo de ataque óptimo para a obtenção de uma sustentação mais elevada ser inferior a  $14^\circ$ , e para  $\alpha=14^\circ$  atinge-se o binário máximo. A cima desse ângulo é possível ver no gráfico  $C_l$  em função do ângulo de ataque,  $\alpha$ , que o perfil experimenta perda acentuada de sustentação.

Seguidamente é realizada uma extrapolação do comportamento do perfil para cada ângulo azimutal,  $\theta$ , durante uma revolução completa. Desta forma é possível passar ao desenho do rotor, composto por três pás, figura 35.



**Figura 35** - Esquemático do posicionamento relativo das pás do rotor desenvolvido

Com o rotor desenhado e os dados referentes aos coeficientes de resistência e sustentação do perfil aerodinâmico calculados, o programa, através do algoritmo, DMS, explicado no capítulo 5, pode iniciar a simulação do rotor. Nesta fase o utilizador tem que definir as propriedades do escoamento, o número de iterações desejadas e o perfil de velocidade aplicado (*Setups Anexo 4*).

No que diz respeito as condições do escoamento foram inseridos os mesmos valores utilizados na simulação do concentrador. A simulação neste passo, dependendo do número de iterações desejado, toma muito tempo e requer elevadas recursos computacionais, uma vez que que é simulado para uma gama de TSR.

Nos gráficos presentes na figura 36 é possível confirmar que a TSR ótima para esta configuração de rotor e perfil aerodinâmico é de 3,5 como já se tinha previsto numa fase inicial do dimensionamento da turbina. São evidenciados pela linha azul os resultados de operação da turbina para essa TSR. Para este valor o  $C_p$  calculado atinge 0,35, obviamente um valor sobrestimado, uma vez que não são assumidas mais perdas para além das aerodinâmicas que o algoritmo compreende. É possível observar no gráfico  $h/H$  (altura relativa à envergadura de pá) em função de  $u_{up}$ , factor de interferência a montante, que  $u_{up}$  é cerca de 0,8. No gráfico que relaciona o coeficiente de força tangencial do rotor com a posição azimutal da pá, o valor máximo obtido é de aproximadamente 0,14 Nm.

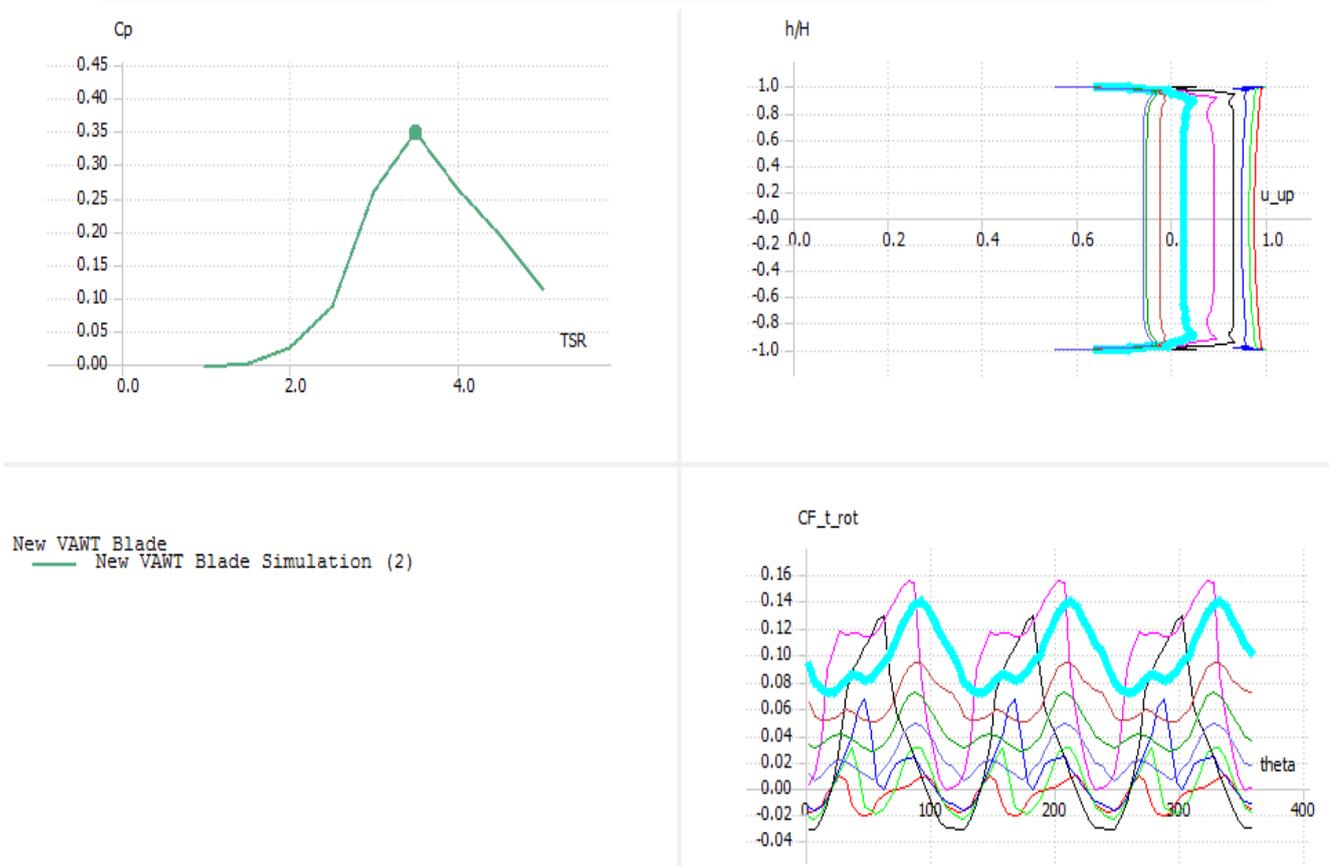


Figura 36 - Simulação do Rotor

Por fim, é possível introduzir as especificações de funcionamento da turbina, nomeadamente perdas relativas a eficiência do gerador, velocidade de arranque,  $V_{in}$  e de paragem da turbina e o número de rpm como velocidade nominal. (*Setups Anexo 4*). Os valores obtidos para a potência nominal, 95 W, foram superiores ao apresentado na tabela 4, uma vez que a simulação tomou como valor de  $C_p$ , o  $C_p$  máximo teórico para este rotor, 0,35. O binário máximo registado é de aproximadamente 2 Nm, figura 37.

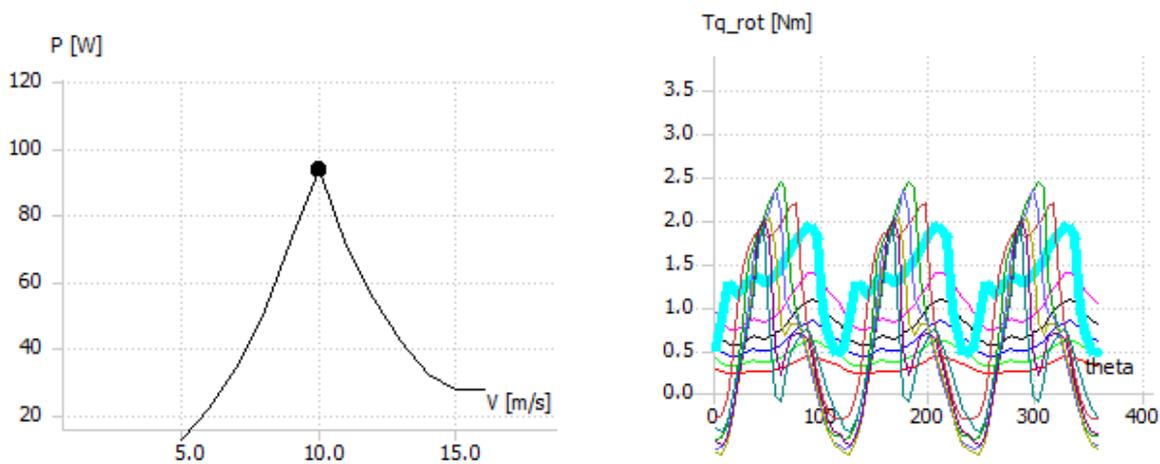


Figura 37- Resultados da simulação da turbina

## 7.Protótipo

O protótipo desenvolvido teve por base o modelo da figura 38, o sistema concentrador B50, composta por uma VAWT com o concentrador B5025-26.

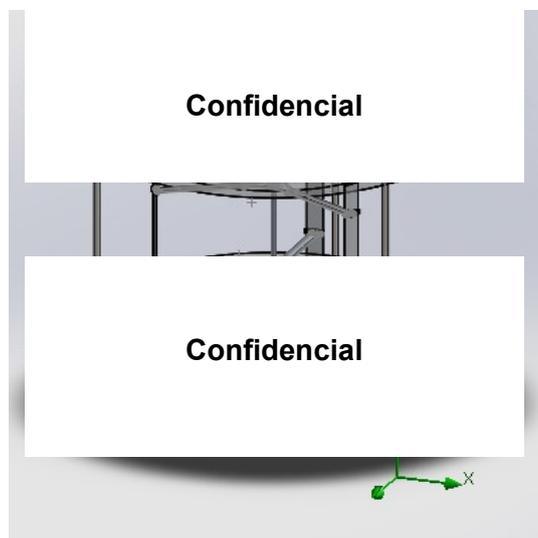


Figura 38 - Desenho final do protótipo

A execução do protótipo é dividida em três fases de construção que envolveram diversas técnicas e diferentes materiais de prototipagem, estas foram: a VAWT, o concentrador e o gerador.

### 7.1 Turbina

#### 7.1.1 Estrutura de suporte da VAWT

Embora as pás sejam as principais responsáveis pelas forças de atrito na turbina, a torre e os suportes ajudam a reduzir o coeficiente de potência máximo. Os suportes são necessários para fornecer rigidez às pás e diminuir as tensões na turbina. A estrutura foi desenhada, de forma a ser facilmente manuseada e adaptada ao concentrador sem afectar a região de rotação de turbina.

Do ponto de vista da perturbação do escoamento, optou-se pela utilização de suportes circulares de superfície lisa, uma vez que esta forma apresenta um coeficiente de resistência reduzido [28]. O diâmetro dos postes, bem como o diâmetro do eixo de rotação deveria ser o mais reduzido possível e foi estimado tendo por base [6]:

$$\Delta V_{esteira} = \frac{C_d \times V_{poste} \times D_p}{4L} \quad (43)$$

Onde  $L$  é a largura de esteira,  $\Delta V_{esteira}$  é a variação de velocidade na zona de esteira,  $C_d$  o coeficiente de atrito do poste e  $D_p$  é o diâmetro do poste.

Os valores de diâmetro padrão de tubos e varões de Ferro ou Alumínio mais comuns comercialmente, entre os 10 e os 25 *mm* eram aceitáveis, tendo sido considerada a utilização de tubos e varões de suporte de 15 *mm*.

Para suporte dos varões e do eixo, foi desenhada uma estrutura triangular (desenhos técnicos no anexo 5), para o topo e para base, ligados em cada vértice pelos postes. Estes triângulos suportam o concentrador e na zona central destes foram posicionados os rolamentos que suportam o eixo de rotação da turbina, figura 39.

Os dois triângulos foram feitos a partir de cantoneiras de ferro, assim como a ponte para a peça de suporte da chumaceira dos rolamentos colocada no centro de cada base triangular. A estabilização da verticalidade da estrutura foi assegurada através da utilização de tubos de ferro, com 15 *mm* de diâmetro). Com o objectivo de dotar a estrutura com a possibilidade de ajuste em altura foram utilizados varões roscados, com 10 *mm* de diâmetro, colocados no seio dos tubos estruturais. O ajuste é feito através de um sistema de aperto, tornando os postes mais estáveis e menos susceptíveis a torções.

Devido às características do túnel de vento, foi colocada uma armação de uma mesa como suporte no triângulo de base, conferindo uma maior altura e estabilidade (Anexo 6).



**Figura 39** - À esquerda esboço da estrutura de suporte da VAWT, à direita o protótipo concluído onde é possível ver a mesa, os triângulos e os suportes.

### 7.1.2 Rotor

Para o eixo, é importante ter um tubo resistente, leve, e com um diâmetro adequado de forma a este não ser mais um elemento com impacto negativo sobre o escoamento. Foi adquirido numa primeira fase um tubo de aço-inox polido e calibrado de diâmetro 10 mm e parede 1mm, que apesar da sua aparente resistência, nos primeiros ensaios foi possível verificar que a sua flexibilidade em rotação podia comprometer as pás durante o funcionamento a rotações elevadas. De forma a contrariar a vibração sentida no eixo, foi adquirido um segundo tubo, de alumínio, com 15 mm de diâmetro, e 1,5 mm de parede. Para este eixo tiveram que ser criados uns adaptadores de diâmetros para fixação aos rolamentos, de 10 mm de diâmetro interior. Os rolamentos, figura 40(A), cedidos pela empresa *Igus*, são de um polímero resistente e possuem a capacidade de oscilar em qualquer direcção podendo assim compensar possíveis desalinhamentos entre rolamentos.

Para a ligação das pás ao eixo, foram desenhados 2 conjuntos de braços radiais, cortados a laser a partir de chapa de alumínio de 3 mm. Em termos de aplicação de forças, durante o funcionamento da turbina, o correcto distanciamento dos braços é importante, pelo que, da revisão bibliográfica, o valor apresentado como óptimo é de 20,7% da envergadura da pá desde os topos das pás [16]. Os braços foram fixos a 2 peças circulares de alumínio apertadas no eixo de rotação por meio de pernes, figura 41(B), o que permitia assim, grande liberdade para montagem e desmontagem. É possível pela figura 40 e 41 ver os principais elementos que compõe o rotor do protótipo.



Figura 40 - Montagem do rotor

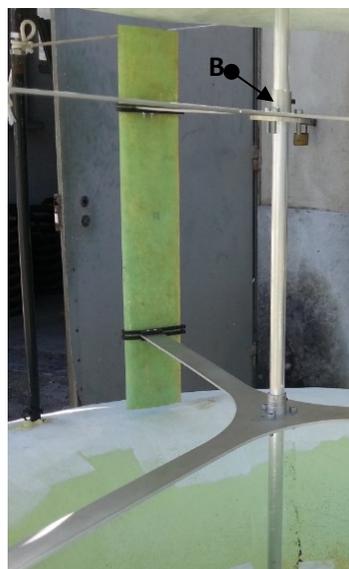
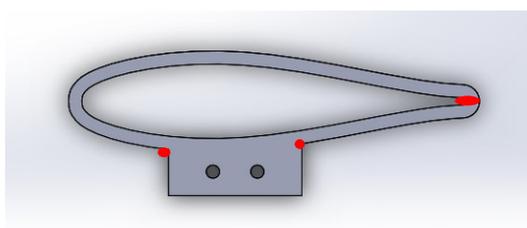
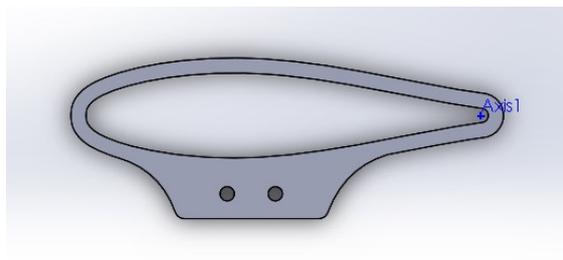


Figura 41 - Vista do eixo e braços do rotor

A ligação entre os braços e as pás levou ao desenvolvimento de uma braçadeira com o mesmo perfil da pá, aparafusada ao braço, de forma a evitar mais perturbações no escoamento, figura 43. A cada braço eram aparafusadas duas braçadeiras, prefazendo um total de 4 braçadeiras por pá. Estas peças de policarbonato foram cortadas a laser. O policarbonato por ser leve e resistente, foi numa primeira fase a opção escolhida para a execução deste componente. O corte foi realizado nas instalações do FabLab EDP, e neste local foi realizado um teste à resistência do material, que pode ser consultado no Anexo 7. As peças em policarbonato foram sujeitas a um teste de resistência, tendo sido sujeitas a diversas forças no sentido da força centrífuga que esperimentariam em funcionamento. Como resultado, as braçadeiras, quebraram nos locais assinalados a vermelho na figura 42 no ensaio de 6.5 Kgf. De qualquer forma, foi necessário repensar a geometria e o material usado nas braçadeiras, pois aquando uma inspeção entre ensaios experimentais da turbina em funcionamento, estas apresentaram fracturas irreparáveis nos mesmos locais assinalados da figura 42 comprometendo assim a segurança do próximo ensaio. O novo desenho, figura 43, vê nas arestas arredondadas uma forma de reduzir o gradiente de tensões nos pontos críticos de quebra. O material escolhido foi alumínio de 3 mm, e as peças foram cortadas a laser de acordo com a figura 44.



**Figura 42** - Primeiro *design* para a braçadeira



**Figura 43** - *Design* melhorado



**Figura 44** - Perfil em alumínio para as pás de 8cm de corda

As pás da turbina, feitas em esferovite de alta densidade, XPS, foram cortadas numa máquina CNC de fio quente. Foram cortadas inúmeras pás, com 5, 6 e 8 *cm* de corda e com uma envergadura de 60 *cm*. Com o objectivo conferir resistência às pás de esferovite, de modo a não descaracterizar o perfil NACA 633018, a opção recaiu no revestimento com fibra de vidro e resina epóxi. Foram testadas inúmeras metodologias de aplicação destes revestimentos nas pás, tendo sido adoptado um esquema onde eram colocadas camadas de fibras de vidro de diferentes densidades para uma determinada quantidade de resina e com um tempo de cura de 1 dia. Obtiveram-se pás com superfícies aceitáveis, apesar de, o perfil NACA 630318 ter sofrido alterações significativas nomeadamente nos bordos de ataque e fuga. A superfície apresentava no entanto uma rugosidade reduzida, para um método, em que não foi utilizado qualquer sistema de pressão durante a cura da fibra com a resina. O processo terminava com corte dos excessos de fibra, lixa, polimento final, pesagem e rectificação do peso. Foram obtidas 3 pás com 8 *cm* de corda, 0,13Kg cada e 3 pás com 6 *cm* de corda com 0,051Kg cada. É possível ver o processo de endurecimento das pás nas figuras 45 a 48.



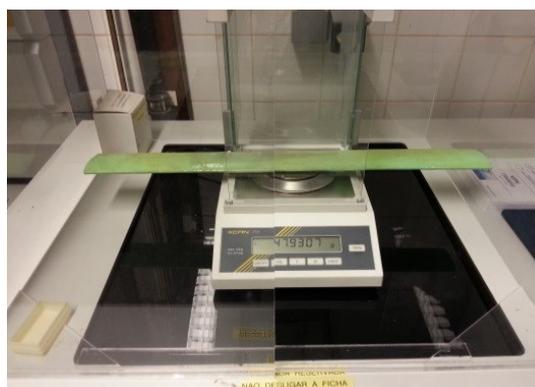
**Figura 45** - Revestimento Fibra de vidro



**Figura 46** - Corte do excesso de fibra de vidro



**Figura 47** - Acabamento com resina epóxi



**Figura 48** - Pesagem da pá

As pás utilizadas no protótipo tinham 8 *cm* de corda, ao contrário do previamente calculado de 6 *cm*, uma vez que a turbina em todos os ensaios com a configuração do rotor com pás de 6 *cm* nunca conseguiu apresentar uma estabilização da velocidade angular nos valores esperados, tendo se verificado em todos os ensaios uma diminuição acentuada desta velocidade.

## **7.1 Concentrador**

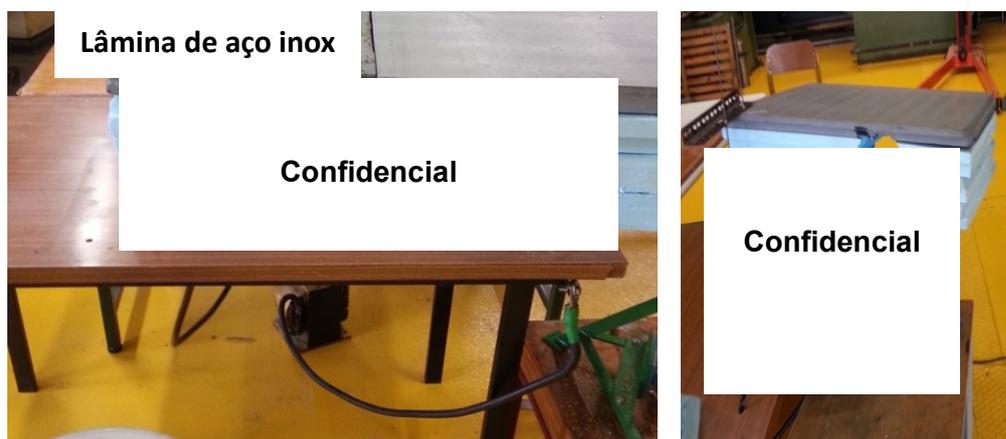
O maior desafio na construção do protótipo foi a dimensão do concentrador B5025-26. Foi a estrutura que apresentou os componentes mais dispendiosos quer em recursos quer em tempo. Do ponto de vista de execução, foi necessário garantir que o concentrador apresentava a mesma curva do modelo simulado em CFD.

### **7.2.1 Concentrador B5025-26**

Este concentrador, devido às suas dimensões, foi o maior desafio quanto à escolha da técnica quer dos materiais mais adequados. Optou-se por criar um molde correspondente a  $\frac{1}{4}$  da estrutura aerodinâmica e usar fibra de vidro e resina epoxi como material para dar forma à superfície do concentrador. O maior desafio deste processo moroso foi a gestão minuciosa dos recursos disponíveis, uma que vez que envolvia uma grande quantidade de resina e fibra de vidro.

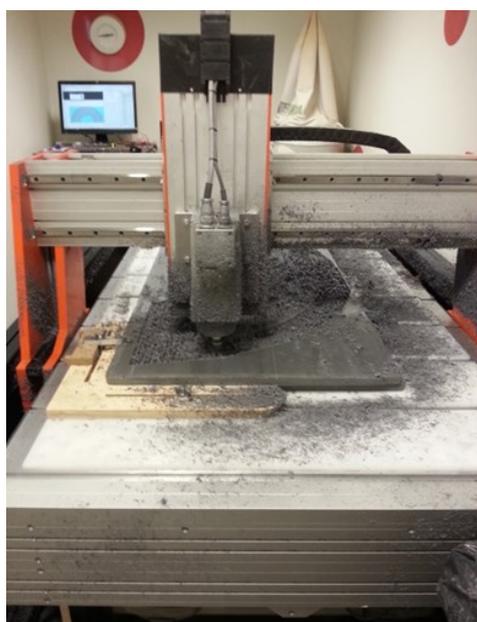
O molde foi realizado em duas fases distintas, resultado de um processo de aprendizagem evolutivo e também por condicionamento pelos recursos disponíveis. Numa primeira abordagem tentou-se construir o molde através da técnica de corte por revolução com fio quente, já experimentada na construção do primeiro protótipo em 2012 [1]. Foi criada uma mesa de corte semelhante à usada em [1], com uma plataforma de rotação que permitisse passar um bloco de esferovite por uma lâmina metálica de aço-inox aquecida. Este processo necessitou de ser calibrado, ajustando a velocidade de rotação do bloco de esferovite, e da corrente dissipada na lâmina. O principal objectivo deste método era obter um molde positivo e um negativo, de forma a sobrepor sobre o negativo camadas de fibra de vidro e epoxi, e aproveitando o molde positivo para aplicar a pressão necessária durante a cura da peça. Contudo, devido a diferenças de velocidade angular, entre o raio interno referente à cavidade da estrutura e o raio externo, a lâmina fundia demasiado material no bordo do perfil junto a cavidade central da estrutura pois o período de contacto nesta região era maior. Para além disso, devido à elevada temperatura de trabalho, a quantidade de

material e a força aplicada sobre a lâmina metálica deformaram-na gradualmente como é possível ver na figura 49.

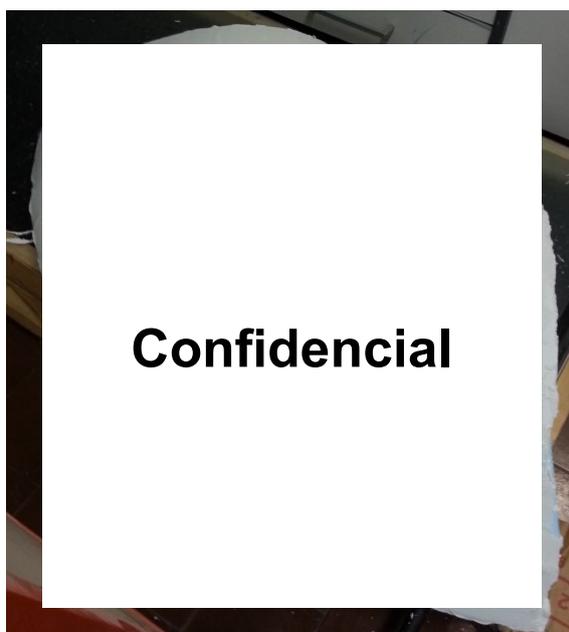


**Figura 49** - À esquerda preparação do corte, à direita a deformação da lâmina após o corte do bloco.

Desta técnica aproveitaram-se apenas algumas placas para a base do molde. Contudo, foi abandonada a possibilidade de usar um molde negativo, o que acabou por trazer problemas. De forma a terminar o molde positivo, as restantes peças foram feitas com recurso à fresa CNC do Fablab EDP, figura 50. As peças foram coladas e a superfície aperfeiçoada com gesso, figura 51.



**Figura 50** - Corte peça para o molde, fresa CNC Fablab EDP



**Figura 51** - Molde positivo terminado

Sobre o molde, protegido com película aderente e álcool polivinílico para desmoldagem, foram sobrepostas camadas de fibra de vidro, alternadas com resina epóxi. A aplicação era feita a rolo, e a cura feita sem qualquer sistema de pressão. Devido a falta de pressão durante a cura das peças, à utilização de menos resina do que a necessária, as 8 peças obtidas não ficaram suficientemente rígidas, pelo que, foi criado um esqueleto com uma base em madeira, e perfis da curva do concentrador em esferovite, dispostos de 45 em 45° (Anexo 6). Foram dispostas as partes de fibra de vidro, coladas com epóxi e passada uma fita de cola de malha para reforçar a sua colocação sobre os perfis.

Esta nova estrutura em madeira tornou-se o suporte ideal para a colocação do triângulo da estrutura no topo, contudo, a estrutura passou a pesar 40 Kg. O resultado final da estrutura aerodinâmica do concentrador é apresentado na figura 52. Depois de pintado e de abertas as passagens para os tubos de suporte, estas foram reforçadas por enchimento com poliuretano expandido. Na figura 53 é possível observar o resultado final do concentrador.

**Confidencial**

**Confidencial**

---

**Figura 52** - Estrutura aerodinâmica B5025-26

**Figura 53** - B5025-26

### **7.3 Gerador**

O componente mais difícil de encontrar e compatibilizar com os parâmetros de funcionamento e limitações da turbina, foi o gerador. Foi de facto impossível de obter um gerador eléctrico compatível. Uma das imposições sobre este elemento era a capacidade deste conseguir arrancar a turbina, ou seja, a possibilidade de permutar de motor para gerador. Foi testado inicialmente um gerador cuja curva de potência era a mais compatível com o regime de funcionamento da turbina, contudo o seu binário de arranque e

incapacidade da turbina atingir uma velocidade mínima para permanecer em funcionamento, inviabilizaram a sua utilização. Como solução alternativa procuraram-se pequenos motores eléctricos, tipicamente usados em sistemas de ventilação, alterando o rotor com a introdução de imanes de neodímio de modo a que este induzisse um campo magnético no estator quanto fosse actuada uma força mecânica sobre o veio. Os valores medidos para tensão de saída tornavam estes motores interessantes, que aliados à capacidade de permuta entre motor e gerador foram durante muito tempo alvo de tentativas de melhoramento. Contudo, durante o manuseamento e alteração destes motores estes sofreram danos irreparáveis, e no que diz respeito à potência de saída, a alta impedância dos enrolamentos do estator limitava a potência como gerador. Finalmente, o gerador adoptado foi um motor CC com escovas, altamente rotativo, cerca de 3000 rpm, de 48 W de potência máxima e com um binário de arranque relativamente baixo e uma resistência interna de  $3\Omega$ . Uma vantagem deste motor/gerador era o facto de dispensar a rectificação do sinal saída, uma vez que era monofásico. Para carga eléctrica ( $R=3\Omega$ ) do sistema foi utilizado um fio de Kanthal que apresenta uma capacidade resistiva de  $145\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . O gerador foi caracterizado no torno da oficina para a carga máxima de  $3\Omega$ , figura 54.

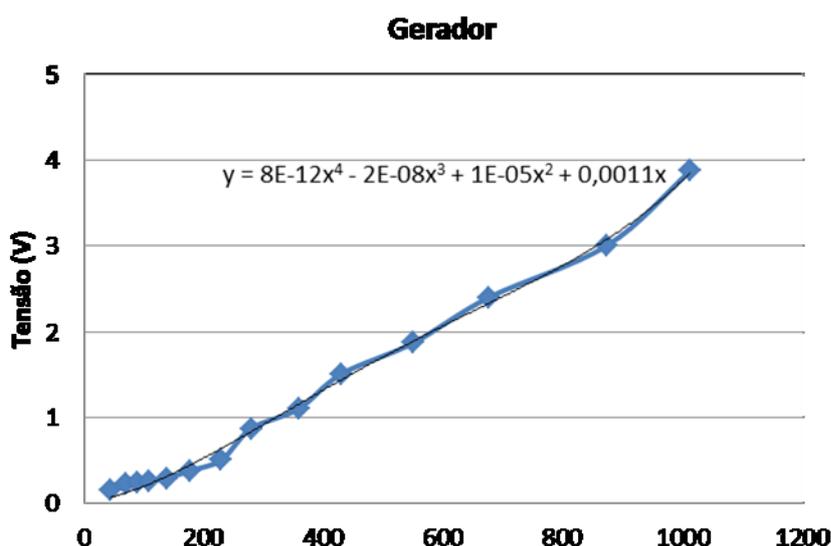


Figura 54 - Curva característica do motor/ gerador, em modo gerador com uma carga de  $3\ \Omega$

Posteriormente também foi feita a sua caracterização como motor, sendo a carga mecânica o rotor da turbina, para dois comprimentos de eixo utilizados durante os ensaios no túnel de vento, figura 55.

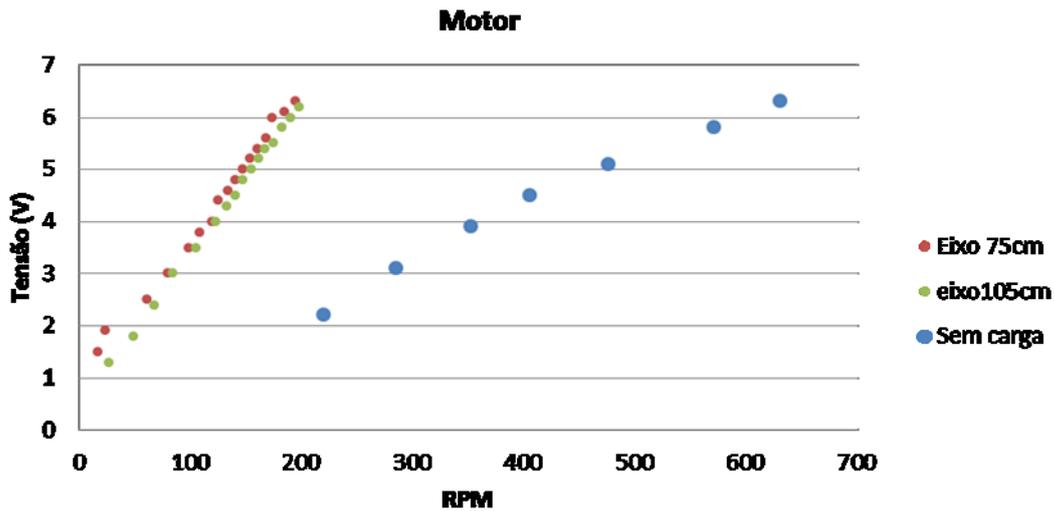


Figura 55 - Caracterização em modo motor para diferentes cargas mecânicas

A ligação entre gerador e eixo dá-se através de um *cardan* (conector de eixos) que permitiu atenuar possíveis falhas de alinhamento dos rolamentos e folgas de outros elementos sobretudo nas ponteiras que foram usadas para adaptar o eixo da turbina em alumínio aos rolamentos.

## 8. Ensaio no túnel de vento

### 8.1 Túnel de vento

O túnel de vento onde foram realizados os ensaios é um túnel de circuito-aberto de jacto com secção de testes aberta no exterior, cujo perfil de velocidades se representa na figura 56.

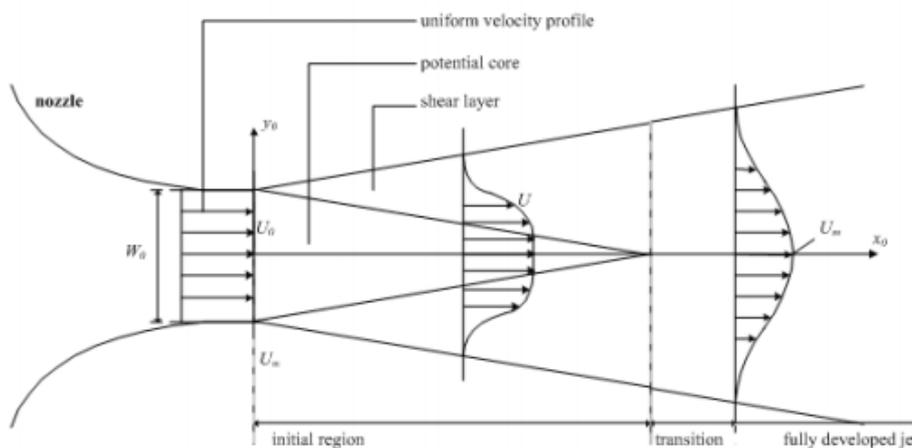
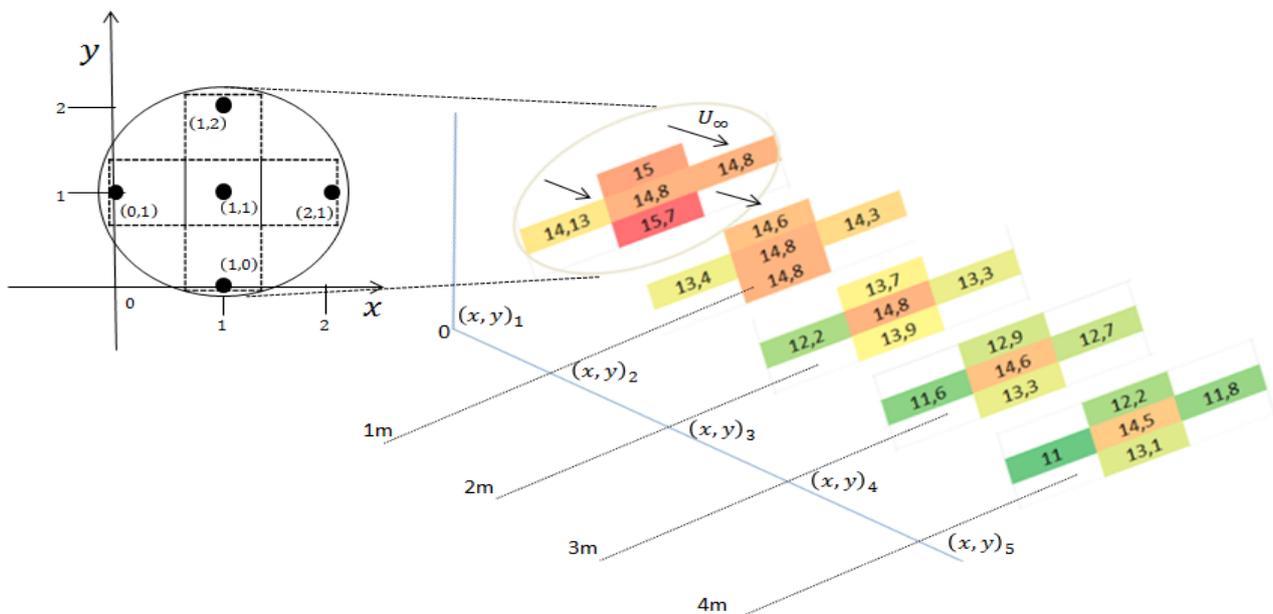


Figura 56 - Esquema de um corte da secção transversal horizontal de um *open-jet wind tunnel* [33]

A secção de testes do túnel é no exterior do edifício apresentando algumas vantagens e desvantagens. O campo de velocidades que se pretende ter uniforme e controlado num túnel de vento, no caso particular pode ser influenciado pelas condições atmosféricas. Mesmo com secção de teste aberta dentro de edifícios um dos problemas associados a este tipo de túnel é o facto do cumprimento do jacto ser responsável por flutuações de pressão acentuadas do escoamento [29]. O sistema de regulação de velocidade é feito através da mudança de passo das pás do ventilador, através de um sistema de ar comprimido. A mudança de passo das pás introduzia uma variação frequente na velocidade de túnel de vento cuja frequência não teve impacto nos valores medidos da velocidade do vento. O túnel tem uma gama de velocidade entre 7,5 m/s e 24 m/s e a saída para o exterior de forma circular apresenta um diâmetro de 1,6 m.

O perfil de velocidade do escoamento na secção de teste foi caracterizado recorrendo a uma malha de 20 pontos, para três níveis velocidade [mínima (U1), média (U2) e máxima (U3)]. Esta malha é constituída por cinco secções, uma na boca do túnel e outras 4 com passo de 1m para jusante, e cinco pontos em cada secção:  $(x, y)_1, (x, y)_2, \dots, (x, y)_5$ , representada na figura 57. Os restantes valores de caracterização do túnel estão disponíveis no Anexo 9. Para esta medição foi utilizado o anemómetro AIRFLOW™ AV6, figura 58 (descrito em 8.2).



**Figura 57** - Esquema da malha de pontos da caracterização do perfil de velocidades da secção de teste do túnel e os valores obtida para a Velocidade U2



**Figura 58** - Medição do ponto  $(0,1)_2$  durante a caracterização para U2

## 8.2 Instrumentos de medição e sistema de aquisição

Durante os ensaios os dados que se pretenderam registar foram a velocidade do vento, velocidade de rotação da turbina e a energia produzida pelo gerador.

Segundo Sheldahl [32] a maior dificuldade ao testar uma turbina em condições reais é a variabilidade do vento, fazendo com que seja difícil associar os parâmetros medidos na turbina a uma medida precisa do mesmo. Tal dificuldade pode ser atenuada através de elevadas taxas de amostragem. Desta forma, utilizou-se um microcontrolador/*datalogger* do tipo *Arduino Uno*.

O *Arduino Uno* é um microcontrolador destinado à prototipagem electrónica, que utiliza uma linguagem de programação simples (linguagem C) e permite uma ligação ao computador via protocolo *usb* ou *Wireless*. Este microcontrolador pode receber sinais analógicos, entre 0 a +5V CC, e pode alimentar dispositivos até 5V, sendo assim um sistema de aquisição adequado para a medição dos sinais de saída dos instrumentos de medida utilizados e a tensão de saída do gerador. A elevada precisão e taxa de amostragem do *Arduino Uno* Este dispositivo permitiu a aquisição sincronizada dos dados referentes à tensão de saída do gerador, anemómetros e da velocidade de rotação da turbina.

### ▪ Medição da velocidade do vento

Os anemómetros usados foram:

- TSI®, AIRFLOW TA5, anemómetro representado na figura 61 pela letra R.

- TSI®, AIRFLOW™ AV6, anemómetro móvel representado na figura 61 pela letra W.

Os anemómetros utilizados foram previamente calibrados e as respectivas curvas de calibração são apresentadas no anexo 9.

#### ▪ Medição da velocidade da turbina

Na configuração adoptada, o *Arduino Uno* alimentava um sistema de contagem de rotações constituído por um emissor, LED, um receptor, foto-transistor, e um disco de alumínio com uma ranhura, acoplado ao eixo de rotação da turbina, figura 59 e 60. A ranhura no disco permitia a passagem do feixe de luz entre o led e foto transistor. Assim por cada duas passagens da ranhura, era contado o tempo desse intervalo de forma a calcular a velocidade de rotação da turbina. É possível consultar o código utilizado e um esquema da ligação dos instrumentos de medição e gerador ao *Arduino* (Anexo 8).

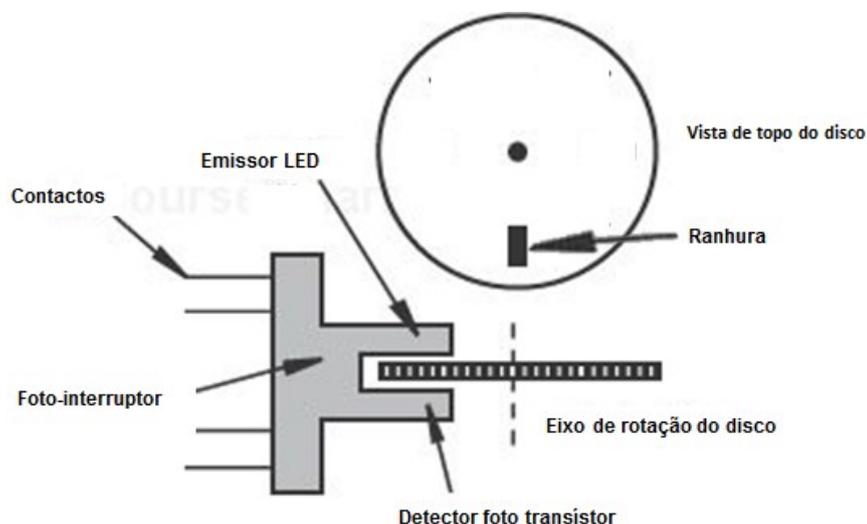


Figura 59 - Foto Interruptor eléctrico, sistema de contagem de rotações

#### ▪ Medição da tensão de saída do gerador

Uma vez que o *Arduino Uno* recebe um sinal analógico de 0 a 5V e o gerador apresenta uma tensão de saída de 4V para 1000 rpm, ligaram-se directamente os terminais do gerador ao *Arduino Uno*, figura 60.

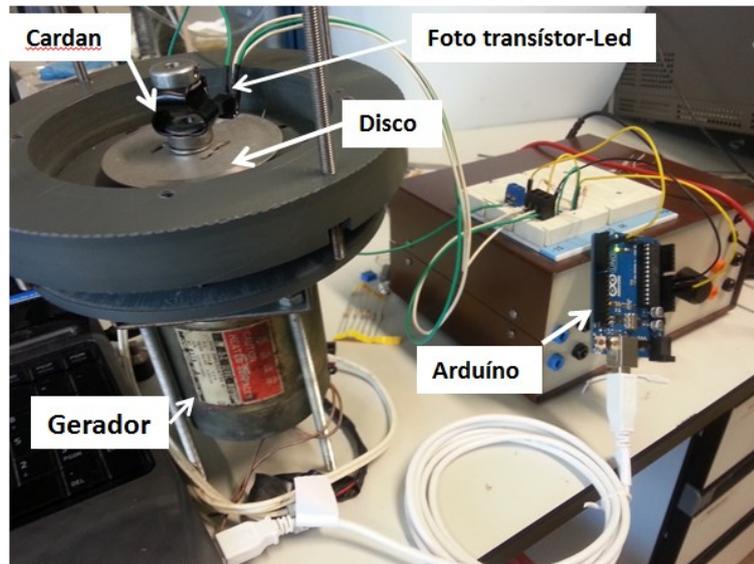


Figura 60 - Gerador e Sistema de aquisição de dados, *Arduino Uno*

### 8.3 Metodologia de medição

A caracterização do escoamento incidente durante os ensaios foi feita recorrendo a um anemómetro colocado em permanência na boca do túnel de vento em  $(1,1)_1$  (ponto central), e um segundo móvel, destinado a medir a velocidade do escoamento nas posições representadas na figura 61, de B até F, mantendo a posição no ponto  $(1,1)$ . Os ensaios foram realizados para as velocidades médias de  $U_R=7,5$  m/s, 9,0 m/s e 11 m/s.

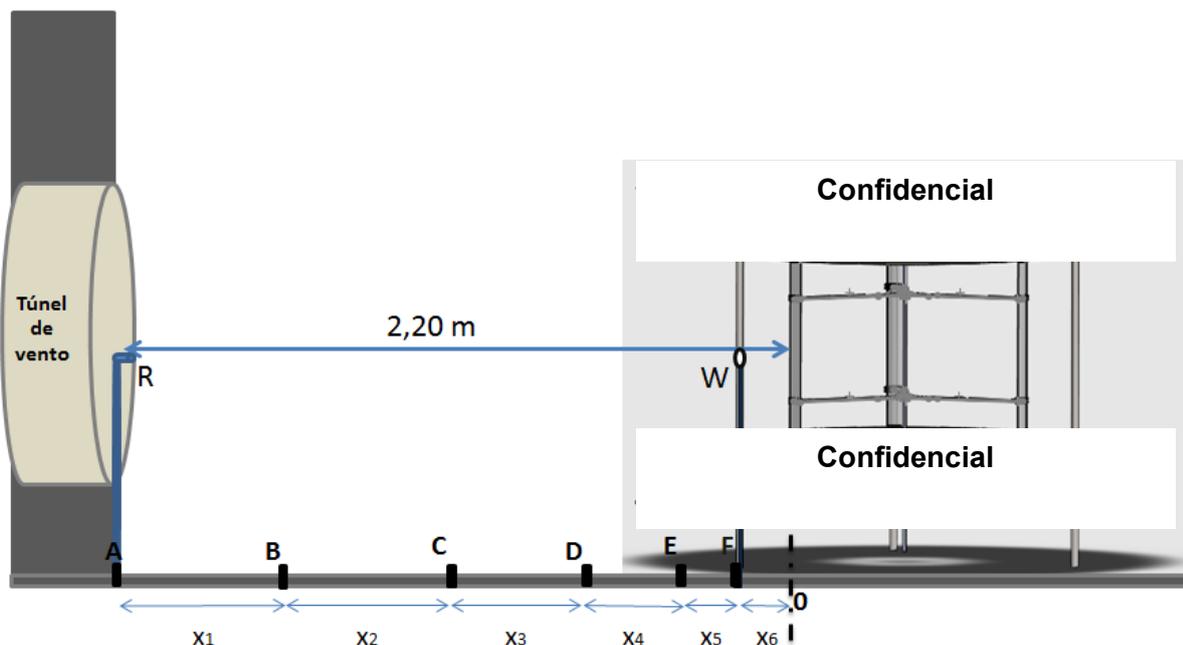


Figura 61 - Esquema da secção de testes. R- Anemómetro de Referência; W- Anemómetro móvel;  $X_6=0,15$  m ,  $X_5=0,15$ m;  $X_4=0,4$ m ;  $X_2=0,5$ m;  $X_3=0,5$  m;  $X_1=0,5$ m

O anemómetro do tipo móvel, W, mediu também os pontos laterais (0,1) e (2,1) em F, próximo dos suportes da estrutura, figura 62. O anemómetro móvel mediu também em (1,1), um ponto a jusante a aproximadamente 0,3 m do rotor, figura 63. Este anemómetro mostrou-se bastante fiável ao longo dos ensaios, apesar da vibração que apresentava para a velocidade 2 e 3, que foi mitigada pela sua fixação por cabos. O anemómetro de fio quente, R, devido a problemas técnicos com os cabos de ligação apresentou um sinal de saída com uma grande dispersão de valores. De forma a serem considerados válidos os dados desse anemómetro, foi aplicado um filtro que definiu um intervalo de valores nos quais estes seriam válidos, +/- 0,5 m/s do valor referência.

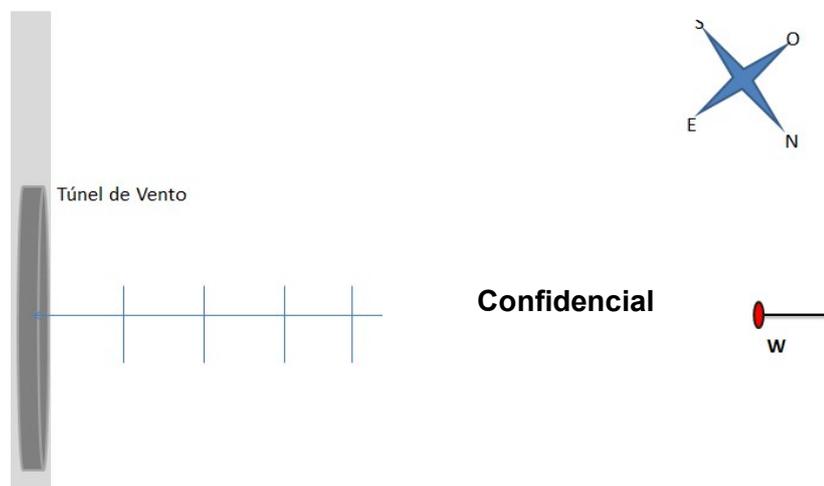
**Confidencial**



**Confidencial**



**Figura 62** - Esquema da medição dos pontos laterais, anemómetro W



**Confidencial**

**Figura 63** - Esquema representativo da medição do ponto a jusante do rotor, anemómetro W

De forma a visualizar a direcção e comportamento do escoamento na superfície do concentrador, recorreu-se à utilização de fios de lã como mostra a figura 64.

## Confidencial

**Figura 64** - Vista de topo, visualização do comportamento do escoamento junto à superfície através da aplicação de fios de lã na superfície das estruturas de concentração.

### 8.3.1 Configurações testadas

Nos ensaios em túnel de vento foram testadas cinco configurações diferentes:

- **B5025-26** – Sistema de concentração sem turbina
  - com cavidade
  - sem cavidade (cavidade da estrutura aerodinâmica foram tapadas)
- **B50** - Sistema de concentração com turbina
  - com cavidade
  - sem cavidade
- **VAWT**- Apenas a turbina

No que diz respeito às configurações sem cavidade, pretendia-se estudar o impacto no factor de aceleração do escoamento, tapando estas, uma vez que o resultado registado em [1] aponta para um maior factor de concentração para essa configuração.

**Confidencial**

**Figura 65** -B50

**Confidencial**

**Figura 66** - B50 sem cavidade

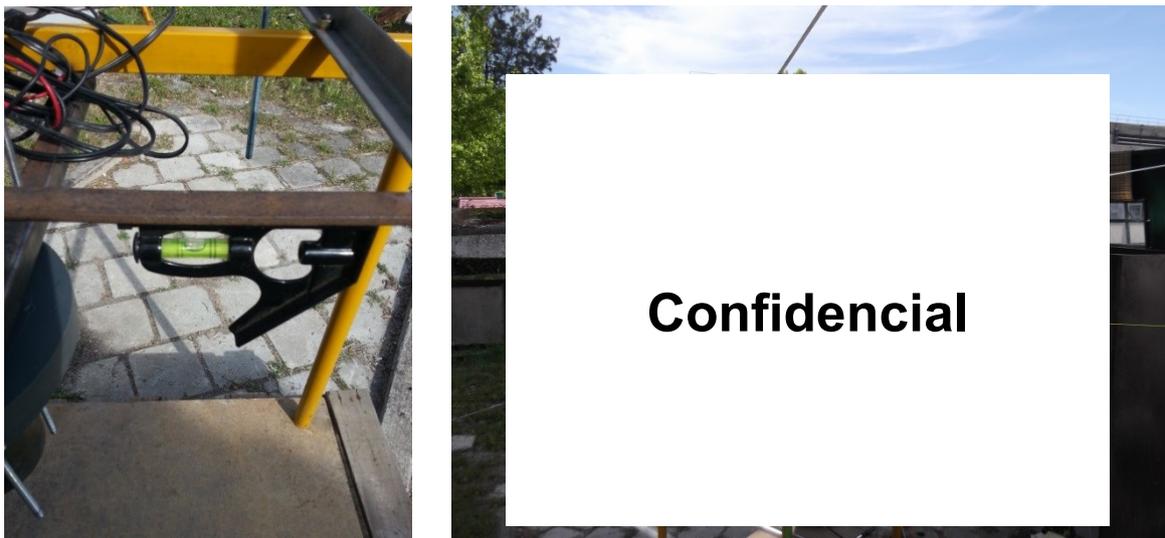
**Confidencial**

**Figura 67** - VAWT

**Confidencial**

**Figura 68** - B5025-26 sem cavidade

Durante os ensaios foi necessário garantir que a estrutura de suporte, conferia os mesmos níveis de rigidez a todas as configurações testadas. Garantir que a estrutura de suporte estava nivelada, e bem espiada foi um dos factores críticos para assegurar a reprodutibilidade dos ensaios do ponto de vista mecânico, uma vez que a estabilidade das condições do escoamento estava sujeita a variações impostas pelas condições atmosféricas, figura 69.



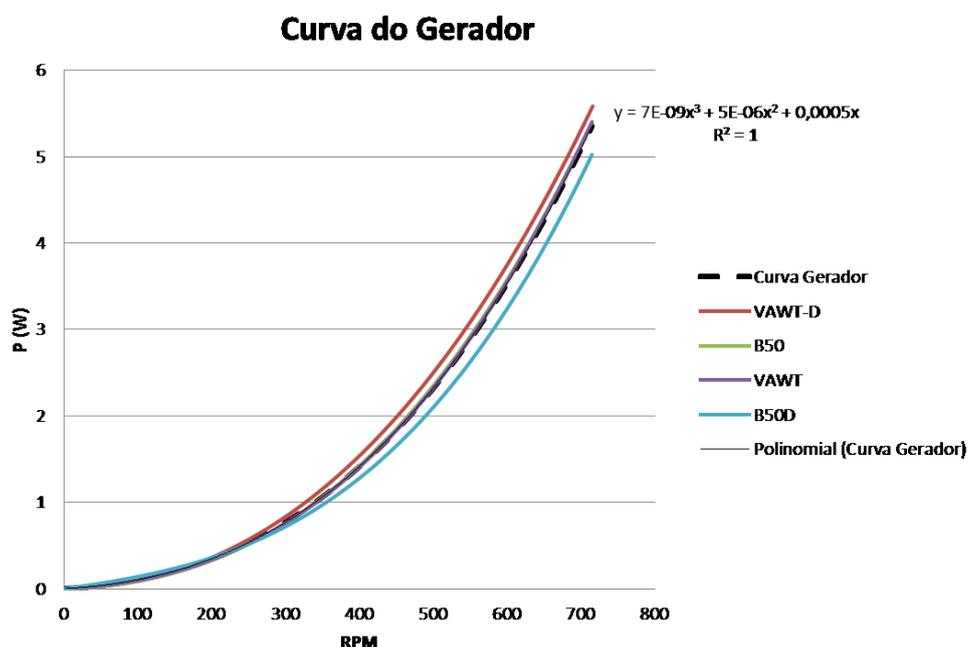
**Figura 69** - À direita B5025-26 sem cavidade devidamente espiada, e do lado esquerdo nível na mesa de suporte

## 9. Resultados

### 9.1 Tratamento dos resultados

Dos 100 ensaios completos, apenas uma fracção foram considerados válidos ou de interesse para o estudo. Inicialmente durante os primeiros ensaios, verificou-se que tinha ocorrido um erro na montagem da estrutura de suporte que provocava instabilidade e uma excessiva vibração de toda a estrutura que teve como consequência uma perda significativa de rendimento dos sistemas. Os resultados validados são na sua maioria referentes à estrutura devidamente montada, exceptuando os valores da configuração B50, que apesar das condições em que foi testada, apresenta valores muito interessantes comparativamente à VAWT. Nos subcapítulos seguintes designa-se por B50D e VAWT-D os ensaios referentes às configurações B50 e VAWT com a falha de montagem estrutural presente. Para além desta falha, foi detectada uma ligação deficiente entre o gerador e o eixo de rotação que, por vezes, resultou em séries de dados com valores discordantes entre sinal de saída de tensão do gerador e a frequência de rotação da turbina. De forma a filtrar séries de dados válidas para o cálculo da potência, e tendo em conta o elevado volume de dados, foi feita uma análise estatística através de regressões, usando o programa de tratamento estático SPSS 16.0. Após este tratamento estatístico e se ter verificado que a própria curva do gerador variou ao longo dos ensaios, foi obtida uma curva única, através da média de todas

as curvas válidas que foram tratadas estaticamente. A origem da variação da característica do gerador, embora não tenha sido clarificada, foi associada, por hipótese, à degradação da bobine devido à exposição às elevadas temperaturas experimentadas pelo sistema durante os meses em que decorreram os ensaios. Assim, o sinal de saída referente à potência de saída do gerador foi rectificado, de forma a comparar os vários sistemas, figura 70.



**Figura 70** - Curva utilizada para calcular a potência conseguida em cada ensaio. Curva final a tracejado, coincidente com os sistemas B50 e a VAWT. B50D e VAWT-D referentes aos sistemas com montagem deficiente.

É possível verificar que a curva obtida experimentalmente difere da curva obtida na caracterização feita na oficina, figura 54. Tal diferença resulta do facto de experimentalmente o gerador estar sujeito à carga mecânica do rotor para além da carga eléctrica.

Os resultados entre as diferentes configurações (B50 com e sem cavidade, B50D e VAWT) foram comparados tendo em conta o desvio padrão para a potência, a intensidade de turbulência (eq.44) e as gamas de velocidade do escoamento não perturbado já referidas.

$$I = \frac{\sqrt{(U(t) - \bar{U})^2}}{\bar{U}} \quad (44)$$

De forma a garantir que a reprodutibilidade dos ensaios tinha sido assegurada, foi necessário ter noção da flutuação da velocidade a partir do cálculo da intensidade de turbulência.

É possível observar nas figuras 71 e 72, a representação da série de dados obtida para um ensaio do sistema de concentração B50 para U1.

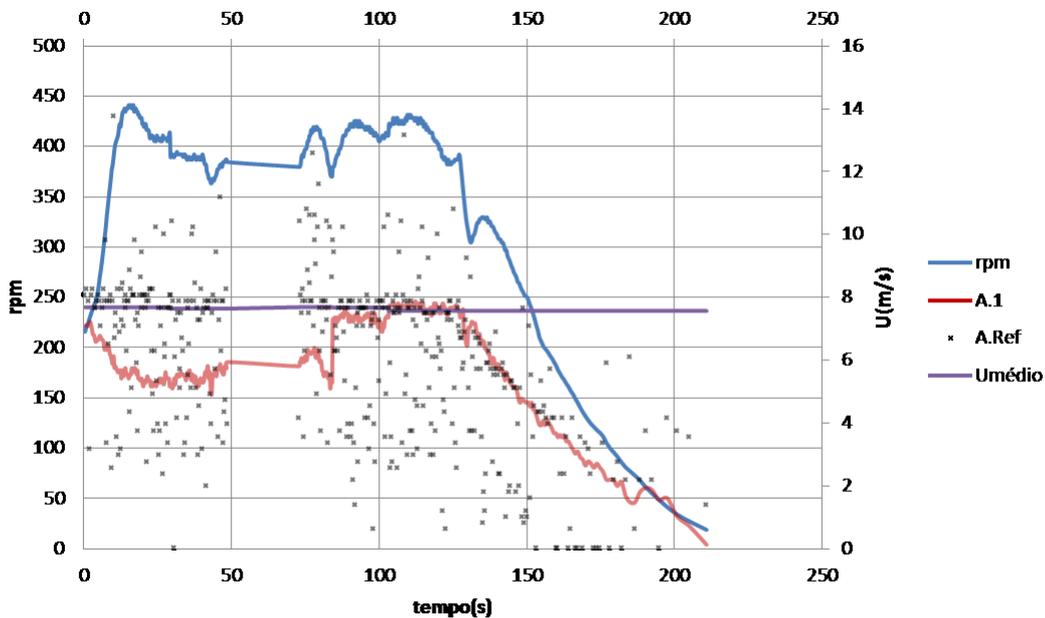


Figura 71 - Ensaio B50 – A.1, anemómetro móvel (equivalente a W figura 61); A. Ref, anemómetro de Referência (equivalente a R figura 61)

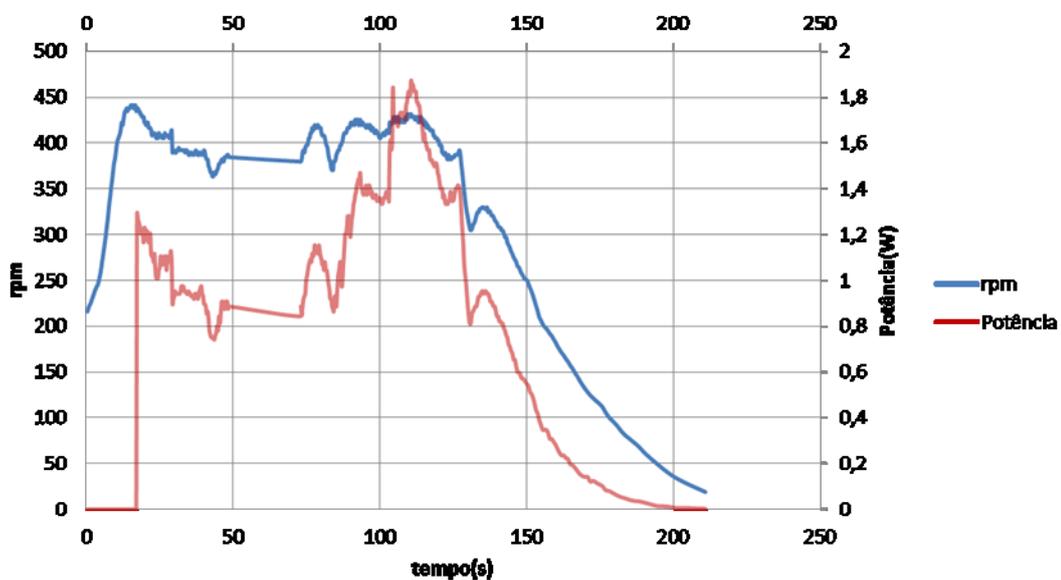


Figura 72 - Ensaio sistema B50, RPM e potência gerada

Com a medição dos parâmetros representados nas figuras 72 e 71, obtiveram-se os dados necessários para caracterizar os sistemas. A secção de teste como já referido, era ao ar livre e para as medições era necessário estarem reunidas as condições atmosféricas ideais. Apesar de se ter verificado que a turbina arrancava sozinha foi necessário colocar a turbina à velocidade correcta de rotação. A estabilização da turbina numa dada velocidade angular, com a velocidade do vento constante,  $U_{\infty}$ , reflecte que a condição de equilíbrio foi atingida, e esta para a velocidade  $U1$  ocorria quando a VAWT, era lançada a 300 rpm através do gerador funcionando em modo de motor. Após o lançamento a velocidade de rotação da turbina diminuía, na velocidade  $U1$  esta gama para a VAWT situava-se nas 395 rpm. Na figura 71 é possível perceber a correlação directa entre a velocidade do vento e a velocidade de rotação da turbina. É também possível verificar a nuvem dispersa de registos, do anemómetro de referência, R, resultado do problema técnico já referido. Desta forma a intensidade turbulência, foi estimada pelo anemómetro móvel (W) no ponto B, figura 61. Este ponto encontrava-se a 1,70m da turbina, o que corresponde a dois diâmetros do rotor, onde o impacto do rotor no escoamento se torna nulo [32]. O valor de  $\bar{U}$  é o valor médio dos valores filtrados do anemómetro em permanência na boca do túnel, como explicado no subcapítulo 8.3.

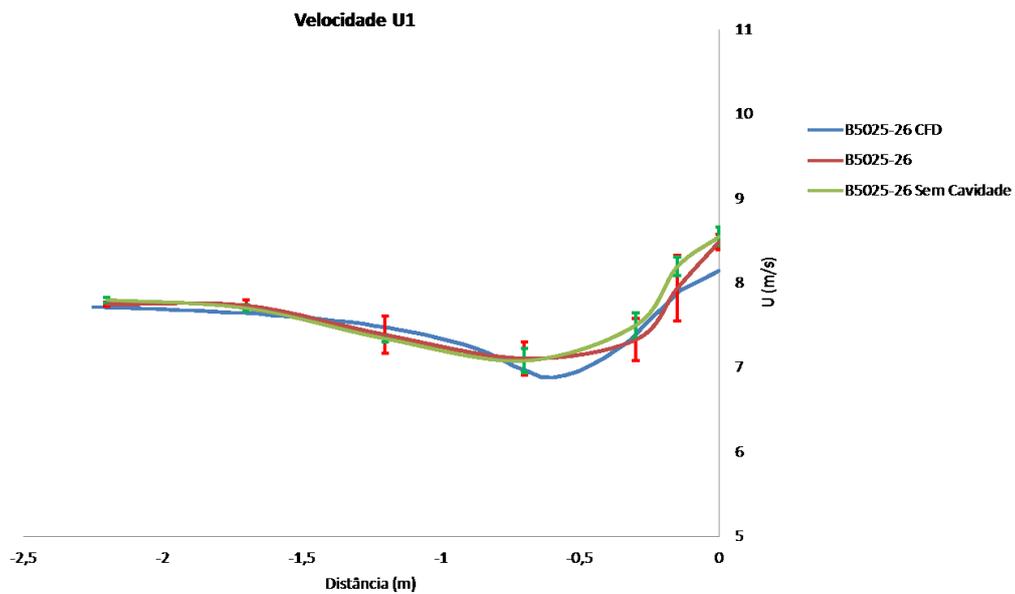
Na figura 72, correspondente à produção de energia em função da velocidade de rotação é possível verificar a resposta rápida do sinal do gerador às mudanças mais significativas da velocidade de rotação do rotor.

## **9.2 Apresentação e análise dos resultados**

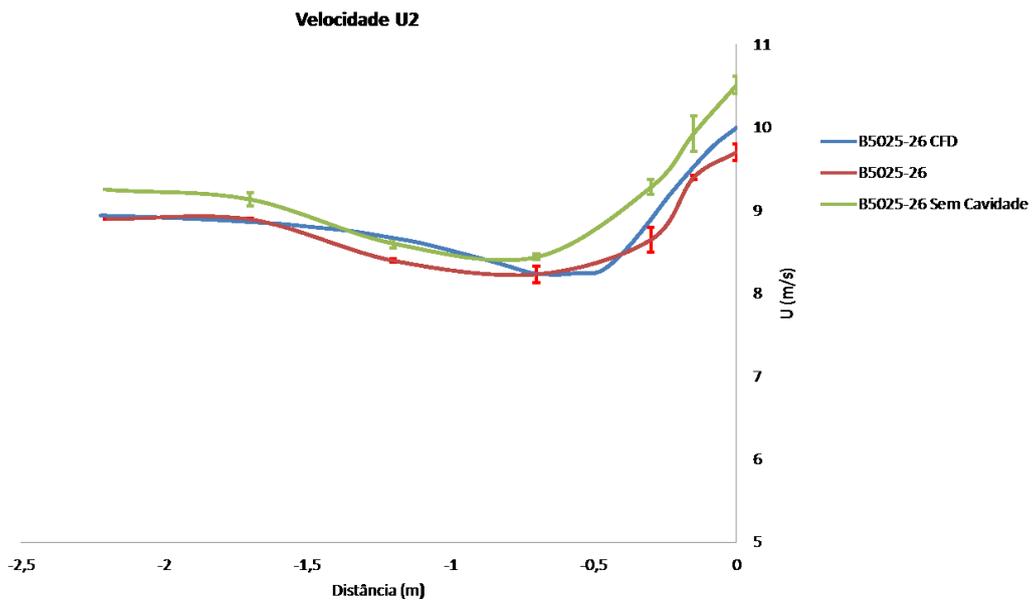
### **9.2.1 Comparação entre as configurações ensaiadas e os resultados obtidos por CFD sem presença de turbina**

Nesta análise o ponto correspondente a 0 m (Figura 61) corresponde ao ponto médio da estrutura aerodinâmica, sobre a região de maior espessura do perfil. Na região imediatamente à saída do túnel o escoamento é considerado não perturbado e é esse valor o utilizado na simulação computacional. Os perfis de velocidade dos concentradores são perfis médios, resultam da média dos ensaios válidos para a caracterização do perfil longitudinal de velocidade do vento. Devido a falta de precisão na regulação de velocidade do túnel de vento, os resultados são comparados por gamas de velocidades, já descritos,  $U1$ ,  $U2$  e  $U3$ . Devido à forte instabilidade da estrutura para velocidades do vento acima de  $U2$ , foi muitas vezes evitado executar os ensaios para  $U3$ .

- Perfil longitudinal  $U(x)$  (m/s)



**Figura 73** - Comparação do perfil de velocidades entre o túnel de vento e as estruturas de concentração com o obtido por CFD, no ponto  $(1,1)_x$ , para a velocidade  $U_1$



**Figura 74** - Comparação do perfil de velocidades entre o túnel de vento e as estruturas de concentração com o obtido por CFD, no ponto  $(1,1)_x$ , para a velocidade  $U_2$

No que diz respeito ao perfil longitudinal para velocidade 1, figura 73, é novamente verificado o mesmo resultado obtido em [1], onde o concentrador com a cavidade tapada apresenta um maior factor de concentração. A diferença máxima registada entre os valores obtidos nos ensaios e o valor obtido em CFD foi de 5,17%. Para a velocidade U1, na caracterização do campo de velocidades na secção de teste, deste o ponto (1,1)<sub>1</sub> até ao ponto (1,1)<sub>3</sub> (correspondente ao perfil longitudinal de aproximação até ao protótipo), foi registada uma diferença de apenas 0,1 m/s. Na tabela 5 são apresentadas as diferenças de velocidade entre a velocidade do escoamento não perturbado e o valor mínimo e máximo,  $\Delta U1$  e  $\Delta U2$  respectivamente, e entre o valor máximo e mínimo registado,  $\Delta U3$ . As diferenças apresentadas são relativas à velocidade média do escoamento não perturbado dos ensaios.

	<b>B5025-26</b>	<b>B5025-26 sem cavidade</b>
$\Delta U1$	-8,29%	-9,20%
$\Delta U2$	-9,54%	-9,63%
$\Delta U3$	-17,83%	-18,83%

**Tabela 5** - Diferenças de velocidade ao longo do perfil relativas à velocidade do escoamento não perturbado U1

Para a velocidade U2, o concentrador sem cavidade, apesar do valor médio registado para a velocidade do escoamento não perturbado ser +0,4 m/s relativamente ao valor médio registado nos ensaios do concentrador B5025-26, é admissível dizer que este volta a apresentar um factor de concentração superior e uma atenuação da velocidade do escoamento ao longo do perfil menos pronunciada que a registada para o concentrador com cavidade. De um modo geral, os resultados obtidos em CFD são próximos dos obtidos experimentalmente, apresentando uma diferença máxima de 10%. Na tabela 6 seguinte é apresentado os valores  $\Delta U$ .

	<b>B5025-26</b>	<b>B5025-26 sem cavidade</b>
$\Delta U1$	-7,52%	-8,77%
$\Delta U2$	-9,02%	-13,66%
$\Delta U3$	-16,54%	-22,43%

**Tabela 6** - Diferenças de velocidade ao longo do perfil relativas à velocidade do escoamento não perturbado U2

- Perfil vertical de velocidade na zona onde opera a VAWT

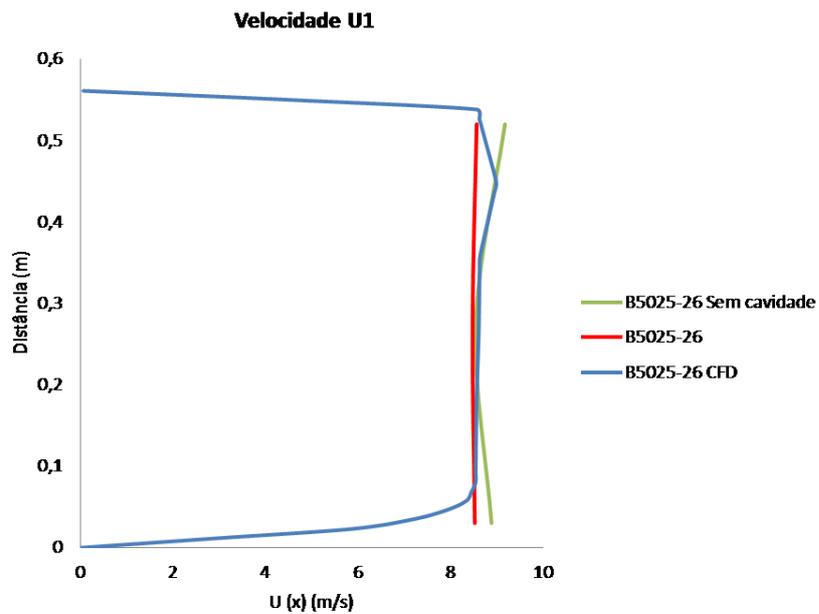


Figura 75 - Perfil vertical  $U(x)$  na estrutura aerodinâmica

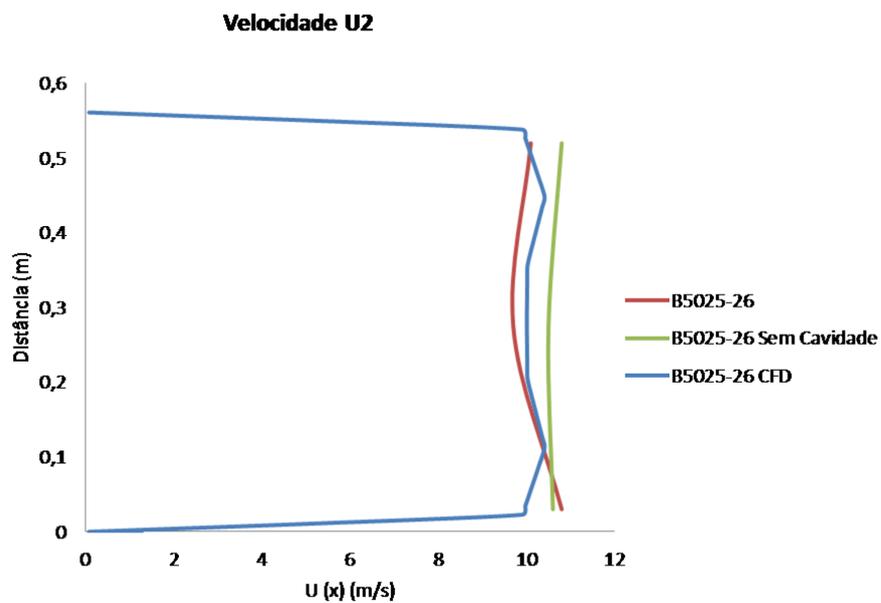
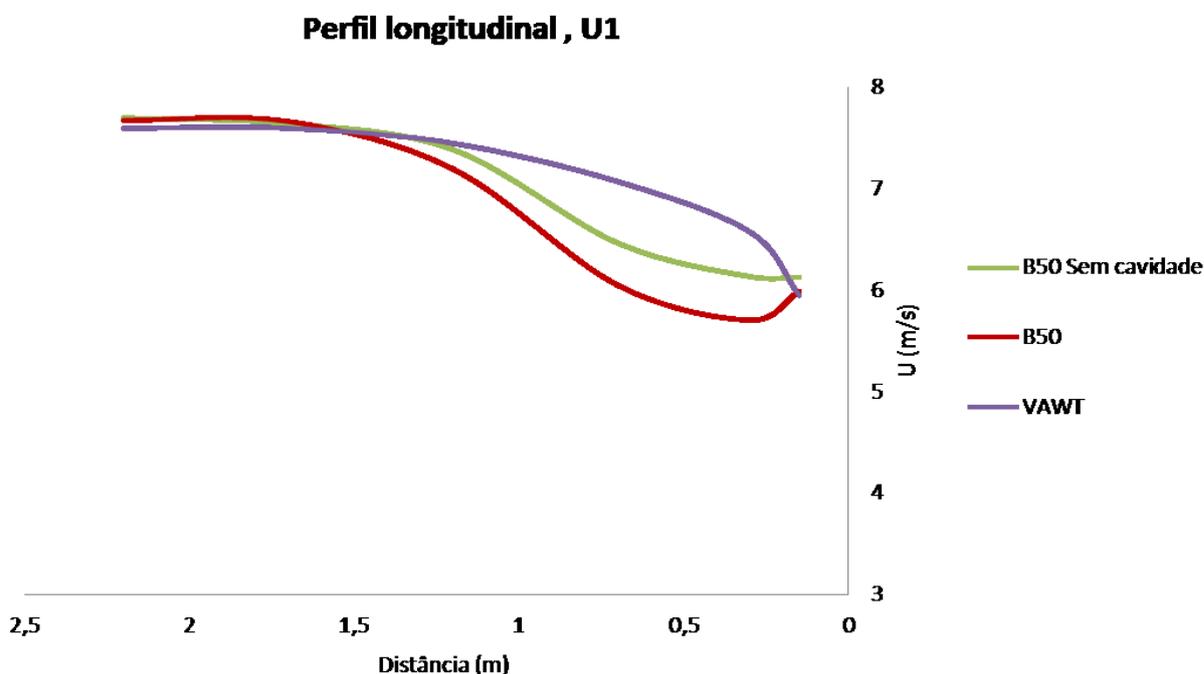


Figura 76 - Perfil vertical  $U(x)$  na estrutura aerodinâmica, velocidade 2

O perfil vertical de velocidade, para a velocidade U1, figura 75, volta a mostrar que a cavidade central prejudica aparentemente o efeito de concentração, uma vez que foram

medidos velocidades mais elevadas junto à superfície da estrutura aerodinâmica para a configuração B5025-26 sem cavidade. Para a velocidade 2, figura 76, é registada novamente uma velocidade superior para o concentrador com a cavidade tapada. É importante referir que os valores registados nos ensaios são relativos apenas a 3 pontos, no ponto central e junto à superfície da estrutura aerodinâmica, com um afastamento desta de 3 cm. Estas medições, bem como todas as outras podem ter sido afectadas pelas condições atmosféricas na altura da medição e uma vez que as medições eram feitas manualmente, as pequenas vibrações no anemómetro móvel (W) podem ter tido impacto nos valores medidos. Contudo, os valores obtidos por simulação em CFD para o perfil vertical de velocidade difere em menos de 5% dos valores obtidos experimentalmente.

### 9.2.2 Comparação entre as configurações ensaiadas do sistema B50 e da VAWT



**Figura 77-** Comparação do perfil médio do escoamento  $U_x$  entre os vários sistemas e a VAWT para  $U_1$

Na figura 77 são apresentados os perfis de velocidade longitudinais com base na média dos valores registados dos ensaios considerados válidos, o que significa que para todos os sistemas é respeitada a mesma gama de valores de  $U_\infty$  e de velocidade de rotação da turbina. Importa referir que o perfil está incompleto, já que não foi possível ir além de uma

aproximação de 20-15 *cm* do rotor, devido à presença da turbina. Desta forma os perfis de concentração podem ser superiores ao apresentado. O efeito de solidez<sup>4</sup> da VAWT provoca uma diminuição máxima na velocidade do escoamento de ~1,4m/s, a 0,2 m do rotor. No caso do sistema B50 a velocidade mínima registada devido à solidez situa-se a 0,35m desta. Existe uma diminuição de velocidade relativa à velocidade do escoamento não perturbado de 1,7 m/s, contudo, a montante, no início do bordo da estrutura aerodinâmica, o efeito de concentração provoca o aumento de velocidade do escoamento. Para o sistema B50 sem cavidade, foi registada uma diferença de ~1,5 m/s entre a velocidade do escoamento não perturbado e a velocidade mínima, contudo, o efeito de concentração é menos evidente. Na tabela 7 são apresentados os valores de  $\Delta U1$ , para a gama de velocidades  $U1$ , para os diferentes sistemas.

	B5025-26	B5025-26 sem cavidade	B50 (com VAWT)	B50 sem cavidade (com VAWT)	VAWT
$\Delta U1$	-7,52%	-8,77%	-25,46%	-20,48%	-21,92%

Tabela 7 - Comparação do impacto da solidez entre os concentradores e a VAWT com e sem sistemas de concentração

É importante referir que os valores mínimos de velocidade do perfil para os concentradores foram registados a 0,7 m das estruturas, para o sistema B50 a 0,3m do rotor, e para a VAWT e sistema B50 sem cavidade a 0,15 m do rotor.

### 9.2.3 Comparação entre os valores medidos para os pontos laterais e a jusante do rotor, para o sistema de concentração B50 com cavidade e para a VAWT

A avaliação dos pontos laterais e do ponto a jusante ao rotor é complexa, uma vez que por detrás destes valores estão efeitos tridimensionais associados aos fenómenos mais complexos da interacção do rotor com o escoamento. É possível admitir que os pontos medidos, apresentem valores de velocidade superiores nos pontos laterais para o sistema B50, uma vez que, como verificado pela visualização dos fios de lã, o escoamento tenderá a evitar o rotor e é desviado lateralmente. No que diz respeito ao ponto a jusante, é importante atentar à frequência de rotação da turbina nos dois ensaios, tabela 8. Com uma frequência

---

<sup>4</sup> Relativo à área ocupada pelo objecto relativamente ao escoamento incidente

de 420 rpm a turbina no sistema B50 apresenta provavelmente um efeito de “parede”, que justifica o valor próximo de 0 m/s a jusante do rotor.

	VAWT	Sistema B50
<b>RPM Médio</b>	397,58	420,89
<b>U(m/s) túnel</b>	7,55	7,51
<b>U(m/s) Lateral esquerdo</b>	5,66	6,27
<b>U(m/s) Lateral direito</b>	6,35	7,14
<b>U(m/s) ponto de trás</b>	1,09	0,21

Tabela 8 - Valores registados para pontos laterais e a jusante do rotor para o Sistema B50 e para a VAWT

#### 9.2.4 Comparação do desempenho das configurações do sistema de concentração B50 e da VAWT

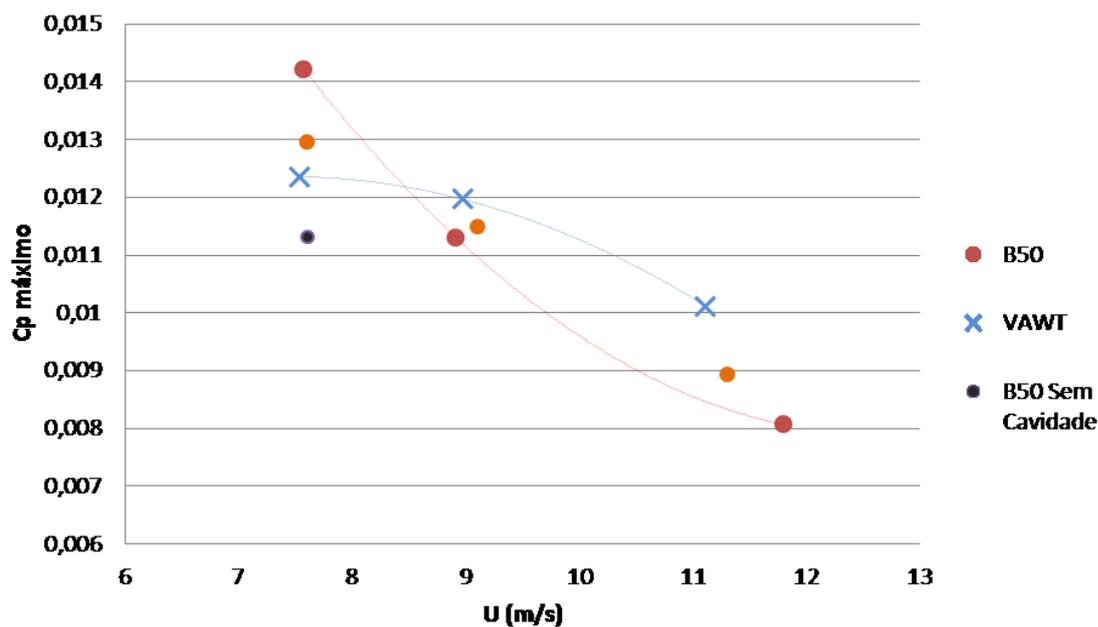


Figura 78 - Resultados para os melhores ensaio validados,  $C_p$  máximo em função da velocidade do vento

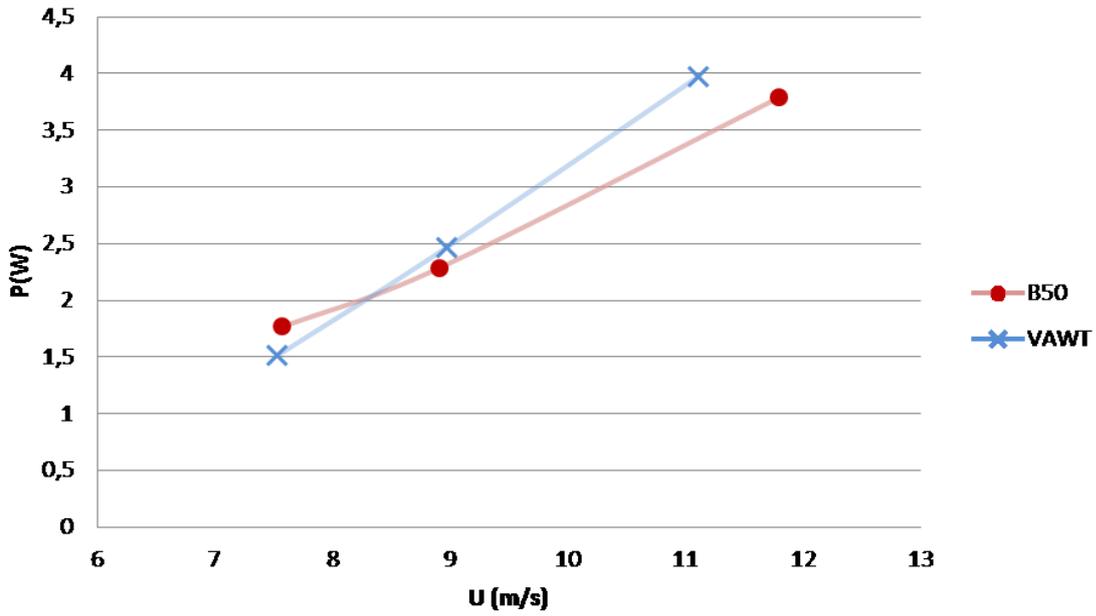


Figura 79 - Potência máxima obtida para o sistema B50 e para a turbina, em função da velocidade da velocidade do escoamento não perturbado

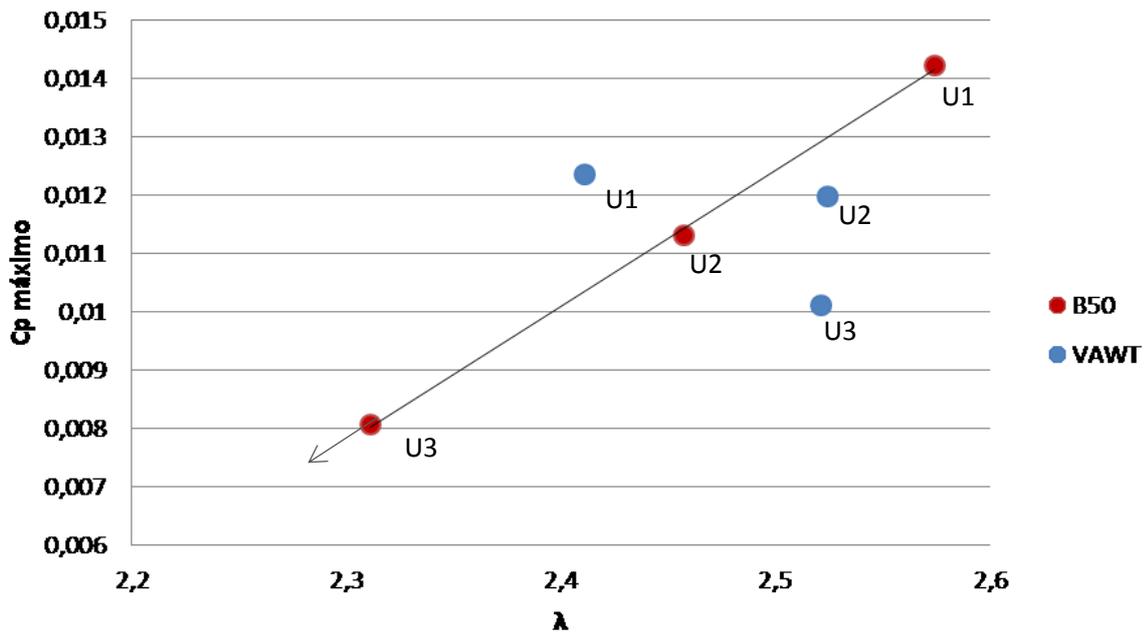


Figura 80 -  $C_p$  máximo obtido para o sistema B50 e para a VAWT em função da TSR

É possível verificar na figura 78, que para a velocidade  $U_1$ , aproximadamente 7,7 m/s, se verifica um regime de funcionamento da turbina, que favorece os sistemas de concentração B50 e B50D, face à VAWT. Relativamente ao  $C_p$  obtido, o baixo valor deste resulta essencialmente da incompatibilidade da curva característica do gerador usado, com a curva da turbina. Também é interessante verificar que ao contrário do que se esperava para o concentrador B5025-26 sem cavidade, este acaba por ter um desempenho significativamente pior quando comparado com o modelo original que apresenta cavidade na estrutura aerodinâmica. É de destacar que os valores apresentados, são na sua maioria, a escolha do melhor ensaio válido entre vários ensaios, e como se verificará, para esta velocidade, quer seja relativo ao melhor ensaio de cada sistema ou à média dos ensaios de cada sistema, o efeito de concentração permanece para esta gama de velocidade de vento,  $U_1$ . Para velocidades superiores, onde a turbina apresenta uma maior velocidade de rotação de forma a conservar a TSR, o efeito de concentração é anulado.

Do ponto de vista da potência obtida, segundo a figura 79, para  $U_1$  o efeito de concentração leva a um aumento de potência da turbina, o que traduz um aumento da sua eficiência, reflectido no aumento de  $C_p$  máximo. Eficiência essa, que diminui com um aumento de velocidade do vento, pelo mesmo motivo pelo qual cancela o efeito de concentração, as perdas aerodinâmicas são superiores para velocidades de rotação mais elevadas, o que leva a uma diminuição significativa do  $C_p$  máximo. Estas perdas advêm apenas da característica da turbina, mas também são fruto das pequenas falhas técnicas na construção dos protótipos.

Na figura 80 é possível perceber o diferente comportamento do sistema B50 e da VAWT, em função da TSR para cada gama de velocidades de ensaio. No caso do sistema B50 verificou-se se mais uma vez que para velocidades superiores a  $U_1$  a turbina apresenta uma perda de eficiência com uma diminuição da TSR. Para a VAWT, a relação entre  $C_p$  e TSR não segue o mesmo comportamento, uma vez que apesar do aumento da TSR, esse aumento não corresponde a um aumento de  $C_p$ , o que revela que a VAWT para as  $U_2$  e  $U_3$  a velocidade de rotação deveria ser superior de forma a aumentar a potência extraída e com isso manter ou aumentar o  $C_p$ .

É possível consultar na tabela 9 os valores relativos aos ensaios onde foram registados os valores máximos de potência para cada velocidade.

	$U_{\infty}$	RPM	P(W)	$C_p$	TSR	U (m/s)	Desvio padrão potência	I(%)
<b>B50</b>	U1	438,0	1,77	0,014	2,6	7,57	0,07	3
	U2	491,8	2,29	0,011	2,5	8,91	0,11	12
	U3	612,2	3,79	0,008	2,3	11,79	0,14	6
<b>VAWT</b>	U1	411	1,53	0,012	2,4	7,53	0,07	3
	U2	508,5	2,47	0,012	2,5	8,97	0,10	4
	U3	625,0	3,97	0,010	2,5	11,11	0,14	4
<b>B50 sem Cavidade</b>	U1	397,4	1,43	0,011	2,3	7,61	0,08	2,5
<b>B50 D</b>	U1	422,5	1,63	0,013	2,5	7,6	0,06	2,5
	U2	500	2,38	0,115	2,27	9,1	0,1	4
	U3	606,0	3,70	0,008	2,39	11,3	1,16	9

**Tabela 9** - Valores dos ensaios válidos que apresentaram o  $C_p$  máximo

	$U_{\infty}$	RPM	P(W)	U (m/s)	Desvio padrão P(W)
<b>B50</b>	U1	430	1,69	7,58	0,095
	U2	491,8	2,29	8,94	0
	U3	612,2	3,79	11,43	0
<b>VAWT</b>	U1	401,5	1,45	7,59	0,060
	U2	508,5	2,47	8,96	0
	U3	625,2	3,97	11,08	0
<b>B50 sem cavidade</b>	U1	393,5	1,40	7,62	0,030
<b>B50 D</b>	U1	408,0	1,51	7,59	0,117
	U2	480,8	2,18	9,15	0,195
	U3	606,6	3,70	11,33	0

**Tabela 10** - Valores médios dos ensaios considerados válidos

De forma a comparar a VAWT e os sistemas de concentração, é considerado um factor de aumento de potência,  $\tau$ , para os valores máximos e médios de potência apresentados nas tabelas 9 e 10, para cada gama de velocidade, que é dado por:

$$\tau = \frac{P_{B50(\dots)}(U_x)}{P_{VAWT}(U_x)} \quad (45)$$

	$U_\infty$	$\tau$ máximo	$\tau$ médio
<b>B50</b>	U1	<b>1,154</b>	<b>1,161</b>
	U2	0,923	0,927
	U3	0,962	0,953
<b>B50 sem cavidade</b>			
	U1	0,947	0,963
<b>B50 (D)</b>			
	U1	<b>1,081</b>	<b>1,045</b>
	U2	0,962	0,883
	U3	0,945	0,931

**Tabela 11** - Aumento de potência máximo e médios obtidos nos ensaios considerados válidos

Como se pode ver na tabela 11, o factor médio de aumento de potência para U1 é o mais elevado, traduzindo um aumento de **16,1%** de potência. Isso reflecte o que foi verificado durante os ensaios: uma maior estabilidade dos sistemas com concentrador, para velocidades baixas. Enquanto nos ensaios da VAWT, assumindo que a reprodutibilidade dos ensaios estava assegurada, houve mais registos de piores performances. Os sistemas com concentrador por sua vez, e para velocidades baixas, apresentaram bons resultados de forma mais consistente para a velocidade de rotação da turbina.

## 10. Viabilidade económica

Apesar do principal objectivo dos sistemas de concentração ser viabilizar locais onde se registam velocidades médias anuais de vento reduzidas, nomeadamente em meio urbano, é necessário perceber se o custo dos sistemas compensa face à possibilidade de aumentar a área de varrimento por aumento da envergadura de pá.

O custo de uma turbina engloba o custo de fabrico que se faz reflectir no custo de aquisição desta, custos de instalação e custos de operação e manutenção. As pequenas turbinas eólicas apresentam preços, €/kW, muito superiores às turbinas de maiores dimensões, devido à ainda produção a pequena escala [31].

Nesta análise assumiu-se que seria possível com o sistema de concentração, integrar uma turbina existente no mercado, cuja curva de potência, dimensões e custo das pás fosse

conhecido. A turbina escolhida é a *Turby 2.5*, uma VAWT helicoidal com 2,5 kW de potência nominal, e uma área de varrimento de  $5,97 \text{ m}^2$ .

Foi usada uma série de vento da cidade de Lisboa disponível no Anexo 10.

É possível calcular a energia produzida anualmente, tendo a curva de potência e a área de varrimento da turbina, a distribuição frequência de velocidades de vento do local e o factor de concentração. Assumiu-se o aumento médio de potência de 16,1%. O factor de concentração é dado por:

$$F_c = (P \times \tau)^{1/3} \quad (46)$$

Em que  $P$  é a potência da turbina,  $\tau$  é o fator de aumento de potência. O sistema B50 apresenta um factor de concentração médio da velocidade vento de 1,051.

$$E_{\text{anual}} = \sum_{\text{bin}=3}^n P_{\text{útil}}(\text{bin}) \times n^{\circ} \text{Horas}(\text{bin}) \quad (47)$$

Assumindo como tarifa de microgeração  $0,14 \text{ €/kWh}$  e recorrendo a eq.47:

	<b>Turby</b>	<b>Turby+B50</b>
<b>Eanual(kWh)</b>	1413,3	1640,7
<b>Rendimento anual(€)</b>	197,9	230

**Tabela 12** - Estimativa de produção e rendimento bruto anual para a série de vento de Lisboa

O custo de um sistema de concentração acresce ao custo da turbina, o custo do concentrador, o custo da estrutura de suporte e possivelmente os custos acrescidos de instalação.

O rotor da *Turby* tem uma área de varrimento de  $5,97 \text{ m}^2$ , e o acréscimo necessário de pá para se obter a mesma produção de energia é dada por :

$$H_{pá+} = h_1 \times \tau \quad (48)$$

Em que  $h_1$  se refere à envergadura original da pá.

Seria preciso aumentar 16,1% a envergadura de cada pá da *Turby*, para conseguir a mesma produção que o sistema B50.

As pás de uma VAWT, são um dos elementos mais caros do rotor, e vê o seu custo inflacionado para turbinas com reduzida área de varrimento. O valor associado ao custo das pás da *Turby*, é de aproximadamente 600 €/m<sup>2</sup> [31], e desta forma o set 3 de pás custaria 570 €.

Admitindo que o custo do sistema B50 é superior ao custo do aumento da envergadura do rotor da turbina, o retorno de investimento é dado por:

$$RI = \frac{\text{Custo sistema concentração} - \text{Custo fabrico das pás}}{\text{Lucro anual do sistema de concentração}} \quad (49)$$

Admitindo como bom um retorno do investimento de 5 anos, o custo de um sistema de concentração que apresente o mesmo factor de aumento de potência do protótipo testado, teria que ser no máximo de 730 €.

Por outro lado é possível assumir os sistemas de concentração como um melhoramento de turbinas já instaladas, caso estas possuam relações geométricas, diâmetro e envergadura de pás, compatíveis com as especificadas do concentrador B5025-26. Assumindo que a *Turby 2.5* é compatível com o concentrador, é possível estimar o retorno do investimento com a integração de um sistema concentrador na *Turby 2.5*,

$$RI = \frac{\text{Custo da turbina (€)} + \text{Custo sistema de concentração(€)}}{\text{Produção}_{\text{anual}}(\text{kWh}) \times \text{Tarifa}(\text{€/kWh})} \quad (50)$$

Como o sistema concentrador leva a aumento da produção anual de energia, o retorno do investimento será mais rápido, mas isto só se verifica se,

$$\text{Custo Sistema de Concentração} < \tau \times \text{Custo Turbina} \quad (51)$$

No caso da *Turby 2.5* cujo PVP é de 13.500,00 €, o retorno do investimento tendo em conta a série de vento utilizada e a tarifa de 0,14 €/kWh, é de 68 anos. De forma a garantir pelo menos o mesmo retorno do investimento, sendo o aumento de potência médio registado de 16,1% para o sistema B50, o custo do sistema de concentração B50 poderia ser no máximo de 2.160,00 €.

É difícil quantificar o custo associado ao fabrico do concentrador, da estrutura de suporte adequado e da instalação destes. Contudo, no que diz respeito ao concentrador, como esta é uma estrutura passiva, não sujeita à mesma fadiga mecânica dos componentes do rotor, é possível admitir que o custo seja inferior a maioria dos componentes mais dispendiosos da turbina.

## 11. Conclusão

De um modo geral, os resultados obtidos são satisfatórios. No que diz respeito ao factor de concentração máximo verificado, cerca 1,055 para o sistema B50, prova que o concentrador em determinados regimes de operação favorece o funcionamento da turbina. Contudo, comparativamente aos valores simulados para o concentrador B5025-26 relativamente ao aumento da potência do recurso eólico, os valores experimentais são significativamente inferiores. Todavia, o potencial da tecnologia de concentração para meios urbanos é inquestionável, uma vez que a tecnologia estudada é das mais adequadas às características do recurso eólico em zonas edificadas. A sua viabilidade económica assenta no aumento de potência que estas introduzem nas VAWT e na capacidade de produzir estas estruturas com um custo competitivo face ao custo de fabrico das pás das VAWT.

Relativamente aos factores que contribuíram para a obtenção de valores de  $C_p$  reduzidos, é de destacar a utilização de um motor/gerador, que no regime de funcionamento a que foi submetido apresentou uma eficiência muito baixa. Apesar da sua velocidade nominal ser 3000 rpm, como gerador, foi sujeito, no máximo, a 400 rpm. Neste regime, a tensão de saída não excedeu os 1,1 V para baixas correntes resultando em valores de  $C_p$  com pouco significado. Na verdade o gerador serviu apenas para impor determinada carga, suficiente para controlar a TSR da turbina e como sensor de potência. Tendo em conta esta incompatibilidade entre gerador e a turbina desenvolvida, foi impossível estabelecer um termo de comparação com os resultados previstos nas fases de projecto, tanto para a potência bem como para o coeficiente de potência inicialmente estimados.

No que diz respeito às diferenças verificadas no regime de operação da turbina, face ao seu dimensionamento, é de destacar uma TSR mais baixa do que a esperada, possivelmente explicado pelo aumento do factor de bloqueamento inicialmente projectado, de 21% para pás de 6 cm de corda, para 28% uma vez que se usaram pás com 8 cm de corda.

No que se refere à qualidade dos componentes do protótipo, as pás apresentaram alguma rugosidade, resultado do processo manual de revestimento com fibra de vidro; e a turbina não apresentou a rigidez desejada, afectando as condições de escoamento. Esta última condição manifestou-se sob uma forte vibração da turbina, de tal forma significativa que inviabilizou os testes para velocidades angulares superiores às apresentadas. Adicionalmente, a existência de folgas e uma ligeira excentricidade no eixo podem ter intensificado a vibração.

Relativamente às condições de teste do túnel de vento, apesar das protecções existentes e as que se criaram posteriormente, o local era afectado pelo vento exterior. A variabilidade quer em termos de intensidade quer em direcção afectavam fortemente o funcionamento da turbina pelo que se privilegiaram os períodos em que as condições de vento se mantiveram relativamente estáveis durante os ensaios experimentais. Esta condição inviabilizou a utilização de dados de vários ensaios pois apesar da omnidireccionalidade de captação da turbina, esta mostrou-se bastante sensível a ventos cruzados. A coincidência da direcção e sentido dos ventos exteriores com o do túnel de vento contribuiu para a incerteza da avaliação do estudo comparativo entre as várias configurações e velocidades de vento testadas.

Apesar de todas as condicionantes negativas que caracterizaram a actividade experimental, ficou provado que o efeito de concentração permanece na presença da turbina para as dimensões e para determinados regimes de funcionamento testados. No entanto, a quantificação deste efeito deverá continuar a ser objecto de investigação para condições experimentais melhor controladas.

Para trabalhos futuros, é sugerida a realização de simulações em CFD de um sistema completo, “Concentrador + Turbina”, variando o diâmetro de turbina, de forma a reduzir a velocidade de rotação de operação desta, uma vez que, o efeito de concentração foi anulado para frequências de rotação acima de 440 rpm. Outro ponto de interesse para futura investigação seria a consideração de outros tipos de VAWT, nomeadamente turbinas com pás helicoidais, que apresentam eficiências maiores e possuem auto-arranque o que facilitará a escolha de um gerador adequado.

## Referências

- [1] Santos, António, Rodrigues, Gonçalo, Silva, João e Menezes, Jorge. (2012). Relatório de Projecto de Licenciatura “ Concentrador eólico”, FCUL.
- [2] Retirado de: <http://www.climatesnack.com/2013/05/03/earth-science-goes-star-wars-how-lasers-can-catch-the-wind//>. (2013).
- [3] EWEA. (2009). Oceans of opportunity - Harnessing Europe's largest domestic energy resource. EWEA.
- [4] Retirado de: <http://www.3tier.com/en/>. (2010).
- [5] Estanqueiro, Ana. (2012). Energia Eólica Avaliação do Potencial Eólico: Identificação e Caracterização do Recurso. Apontamentos da disciplina de energia eólica do curso em Mestrado de Engenharia de Energia e Ambiente, FCUL.
- [6] Paraschivoiu, Ion. (2002). Wind turbine design (with emphasis on Darrieus concept). École Polytechnique de Montréal.
- [7] Eriksson, Sandra, Bernhoff, Hans e Leijon, Mats. (2006). Evaluation of different turbine concepts for wind power. Renewable & sustainable energy reviews.
- [8] P. Tillman, Joseph.(2011). Master's Thesis. Improvements to vertical axis wind turbine blades to aid in self-starting. Eastern Illinois University, EUA
- [9] Wind at work: “*Wind energy and job creation in the EU*”. (2008). EWEA.
- [10] Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers. (2011) Supported by the European < <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Catalogo.pdf>>
- [11] Dam, Jeroen van. (2011). NREL-IEC Small Wind Turbine Standards,U.S. Small Wind Association of Testers.
- [12] Patel, M.R. (1999). Wind and Solar Power Systems, CRC Press, NY.
- [13] Mertens, S. (2006). Wind Energy in the Built Environment; Concentrator Effects of Buildings. Multi-Science, Brentwood. United Kingdom.
- [14] Blocken, Bert (2014), Apontamentos do curso Sports Building aerodynamics. University of Technology Eindhoven
- [15] Johnson, Scott, van Dam, C.P. e Berg, Dale. (2008). Active load control techniques for wind turbines. Sandia Laboratories report SAND2008-4809.
- [16] Javier Castillo (2011). Small-scale vertical axis wind turbine design, Bachelor's Thesis Degree program in Aeronautical Engineering. Tampere University of Applied Sciences.
- [17] Fujisawa, Nobuyuki e Shibuya, Satoshi. (2001). Observations of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics.

- [18] Brochier, G., Frauni'e, P., Begui'er, C., and Paraschivoiu, I. (1986). Water channel experiments of dynamic stall on darrieus wind turbine blades. *Journal of Propulsion*.
- [19] Okeoghene, Eboibi. (2013). The Influence of Blade Chord on the Aerodynamics and Performance of Vertical Axis Wind Turbines. Mechanical Engineering Department. The University of Sheffield.
- [20] Jacobs, E., and Sherman, A., (1937). Airfoil Section Characteristics as Affected by Variations of the Reynolds Number. Technical Report No. 586. National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C.
- [21] Mertens, S.(2002). Turby. DUWIND report 009. Technical University Delft, The Netherlands.
- [22] Brederode, Vasco de. (2014). Fundamentos de aerodinâmica incompressível. Edição do autor.
- [23] Howell, Robert. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine.
- [24] Vaishnav, Etesh. (2007). An investigation on the aerodynamic performance of a vertical axis wind turbine. Bachelor of science in mechanical engineering. Bhilai Institute of Technology ,Durg, India.
- [25] Paul G. Migliore, John R. Fritschen. (1982). Darrieus Wind Turbine Airfoil Configuration. A Subcontratcrepor USA dep. Of Ernergy.
- [26] M.C. Claessens. (2006). Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines. Master of Science Thesis. Technical University Delft, The Netherlands
- [27] Marques da Silva, Fernando. (2013). Aerodinâmica: Camada limite atmosférica, Apontamentos da disciplina de Aerodinâmica do Mestrado de Engenharia de Energia e Ambiente, FCUL.
- [28] White, Frank M. (2008). Fluid Mechanics. McGraw Hill. 6ª Edição.
- [29] Rennie, Dr. Mark. (2010). Effect of jet length on pressure fluctuations in  $\frac{3}{4}$  open-jet wind tunnels. Aero-Acoustics Engineering Group. Aiolos Engineering Corporation. Toronto, Canada.
- [30] Mertens, S., H. Polinder, Sidler, H.F.A. (2004). Turby: Concept and realization of a small VAWT for the built environment. Technical University Delft, The Netherlands
- [31] Beveren, S.C. van. (2008). *Design of an urban wind turbine with diffuser*. Master Thesis. Faculty of Aerospace Engineering Delft University of Technology.
- [32] Sheldahl, Robert. (1982). Comparison of field and wind tunnel Darrieus wind turbine data. Sandia laboratories report SAND80-2469.
- [33] C. Taylor, Katharin. (2013). "Method for Vawt Placement on a Bomplex Building Structure", Master thesis, Naval Postgraduate School Monterey, California.

[34] Ibelli, Gerardo. (2013). Avaliação do potencial eólico em meio urbano. Aplicação a um caso de estudo em Telheiras. Dissertação Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente.FCUL

[35] Mertens, S. (2002). Wind energy in urban areas, concentrator effects for wind turbines close to buildings.

[36] Kotsarinis, Charilaos.(2009). *Systems and Knowledge Engineering Design of na Urban Vertical Axis Wind Turbine*. Master of Science Thesis in Aerospace Engineering. Faculty of Aerospace Engineering Delft University of Technology.

## Anexos

### Anexo 1

#### Sistemas de concentração eólica

Sistema de concentração similar ao concentrador B50, imagem retirada da patente.

Confidencial

Confidencial

Sistemas aplicados a turbinas de eixo horizontal



Imagem retiradas de: <http://wind-energy.ucoz.com/>

Sistema de concentração aplicada a uma HAW. Turbina *Donki*.

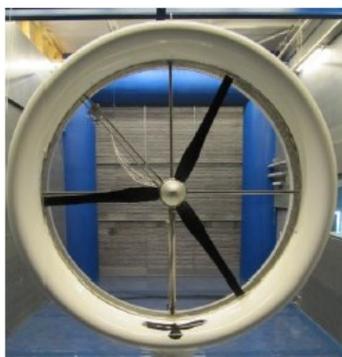


FIGURE 51: OLD BLADE



FIGURE 52: OPTIMAL BLADE



FIGURE 53: LINEARIZED BLADE

## Anexo 2

### Estudo da distância entre toros efectuada em 2012 [1]

Intensidade com conc. (W/m <sup>2</sup> )	212,5	179,5	184,4	173,7	173,5	155,7	143,0	155,0	138,1	141,4	132,0	139,5	116,1	114,0	114,5	111,0	110,8
Intensidade sem conc. (W/m <sup>2</sup> )	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6
Razão intensidade com/sem conc.	2,78	2,34	2,41	2,27	2,27	2,03	1,87	2,02	1,80	1,85	1,72	1,82	1,52	1,49	1,50	1,45	1,45
Potência sem conc. (W)	55,1	58,2	61,3	64,3	67,4	70,4	73,5	76,6	79,6	82,7	85,8	88,8	91,9	94,9	98,0	101,1	104,1
Potência com conc. (W)	46,8	46,7	55,3	59,0	65,9	65,4	65,8	77,5	74,6	82,0	81,8	92,1	81,3	84,4	89,3	91,0	95,3
Razão potência Com/Sem conc.	0,85	0,80	0,90	0,92	0,98	0,93	0,89	1,01	0,94	0,99	0,95	1,04	0,88	0,89	0,91	0,90	0,92
Fator Vmédia/Vo	1,41	1,33	1,34	1,31	1,31	1,27	1,23	1,26	1,22	1,23	1,20	1,22	1,15	1,14	1,14	1,13	1,13
Fator Vmáxima/Vo	1,45	1,40	1,42	1,42	1,37	1,32	1,27	1,35	1,28	1,29	1,27	1,29	1,19	1,20	1,22	1,19	1,18

Tabela 5: Resumo das simulações efetuadas no estudo do espaçamento entre as toros para o melhor perfil, Spline 5025-26

Confidencial

### Anexo 3

#### Estudo do impacto da variação da intensidade de turbulência na simulação no Factor de aceleração do escoamento

<b>Componente Ux (m/s) velocidades na zona de operação da VAWT</b>									
<b>Velocidade do escoamento</b>	<b>5 m/s</b>			<b>7 m/s</b>			<b>9 m/s</b>		
<b>Intensidade turbulência (%)</b>	0,10%	5%	15%	0,10%	5%	15%	0,10%	5%	15%
<b>Umáximo (m/s)</b>	7,22	7,06	7,03	9,42	9,80	9,79	12,15	12,62	12,61
<b>Umédio(m/s)</b>	6,24	6,11	6,10	8,23	8,53	8,53	10,61	10,98	10,98
<b>Umínimo(m/s)</b>	5,77	3,65	3,64	4,80	5,07	5,07	6,20	6,55	6,55
<b>Desvio padrão(m/s)</b>	0,45	0,55	0,55	0,71	0,76	0,76	0,91	0,98	0,98
<b><math>\Delta U</math>(max-min)(m/s)</b>	1,45	3,41	3,39	4,62	4,73	4,72	5,96	6,07	6,07
<b>Factor de aceleração médio</b>	1,25	1,22	1,22	1,18	1,22	1,22	1,18	1,22	1,22
<b>Componente Ux no perfil longitudinal para o concentrador B5025-26</b>									
<b>Umáximo verificado (m/s)</b>	5,80	5,74	5,74	7,82	8,02	8,03	10,07	10,33	10,33
<b>Factor de aceleração médio</b>	1,16	1,15	1,15	1,12	1,15	1,15	1,12	1,15	1,15

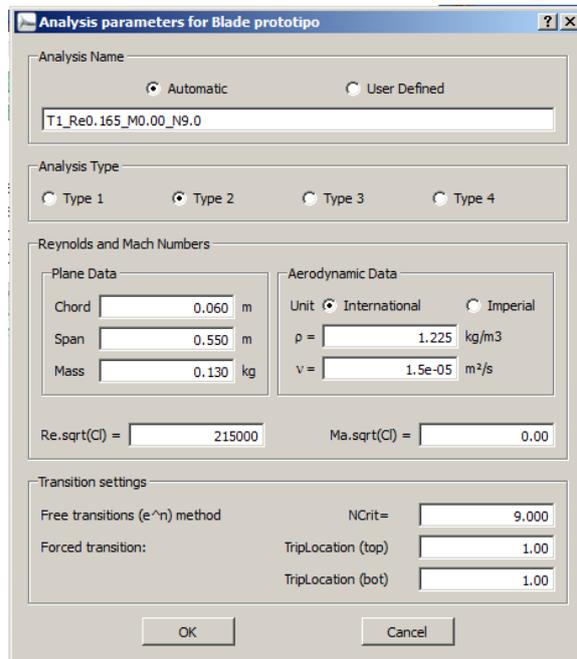
## Anexo 4

### Etapas e valores introduzidos na simulação da turbina usando o programa *Qblade*

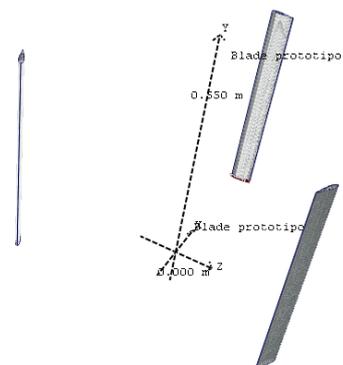
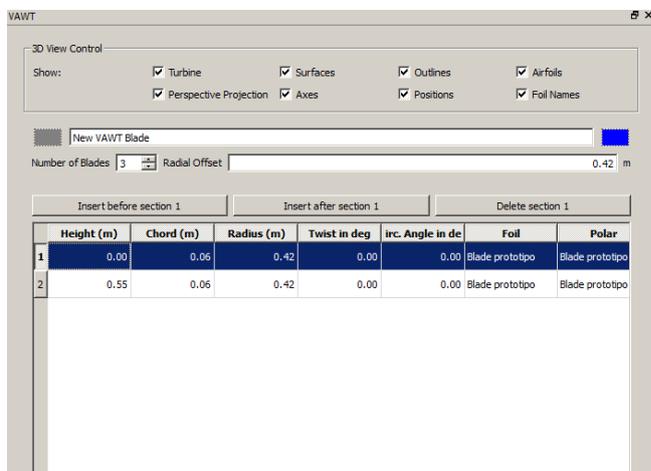
1. Análise dos parâmetros referentes ao perfil escolhido

O número de Re com base na corda do perfil é calculado por

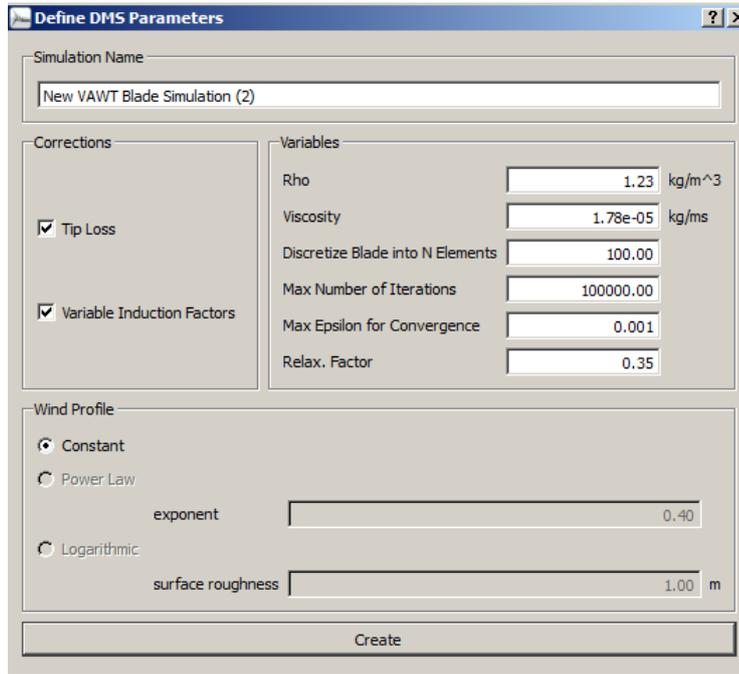
$$Re_c = \frac{\rho c W}{\mu} \sim 2,15 \times 10^5$$



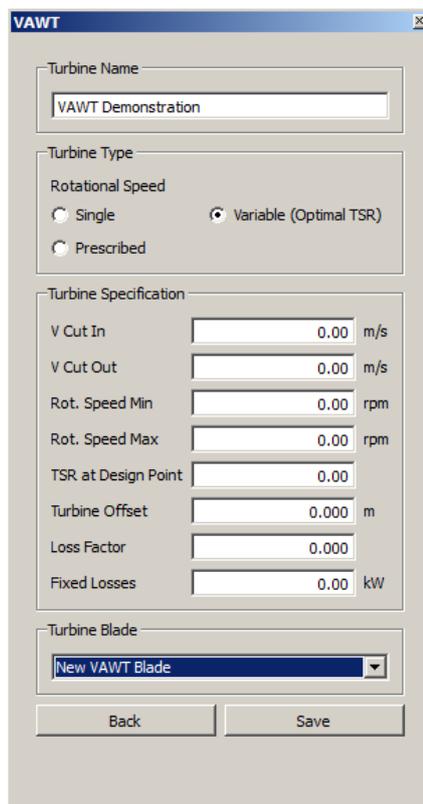
2. Após a análise do perfil e o modelo DMS ter feito a extrapolação do perfil para cada ângulo azimutal,  $\theta$ , são as dimensões do rotor.



Seguidamente são definidos os parâmetros da simulação do rotor definindo as propriedades do escoamento, correcções incluindo perdas, o perfil de vento, no caso foi escolhido um perfil de vento constante, e ainda definidas as condições e critério de convergência da simulação

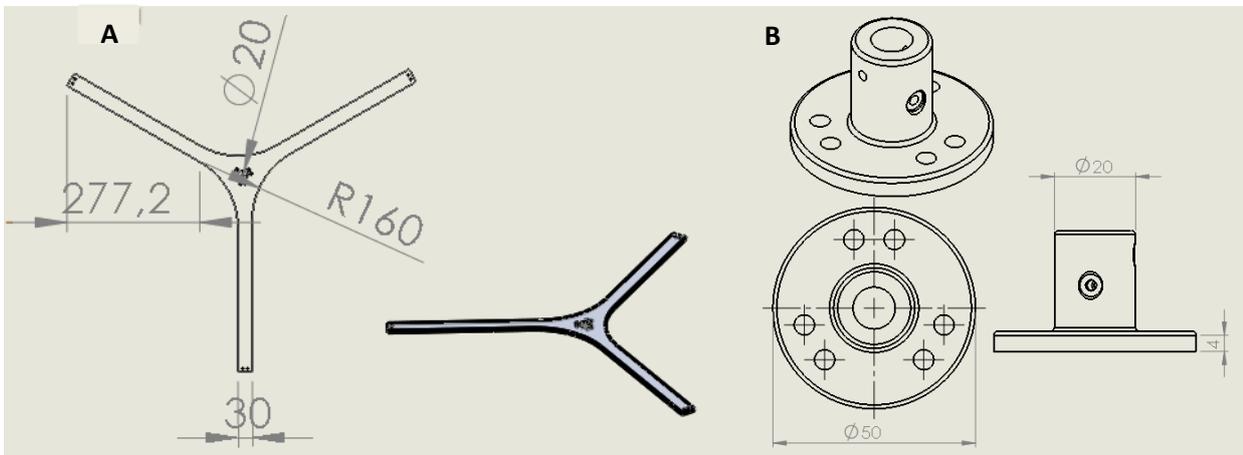
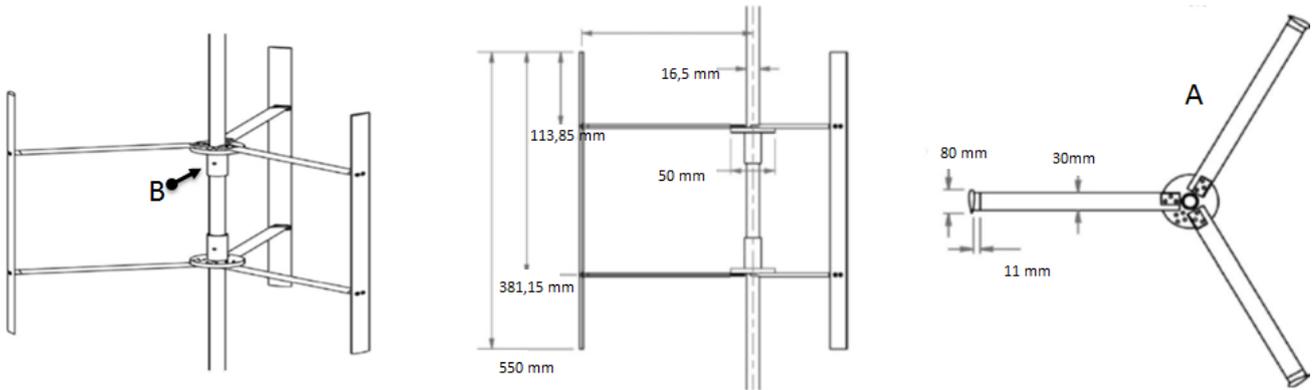


Por fim é experimentado o regime de operação da VAWT

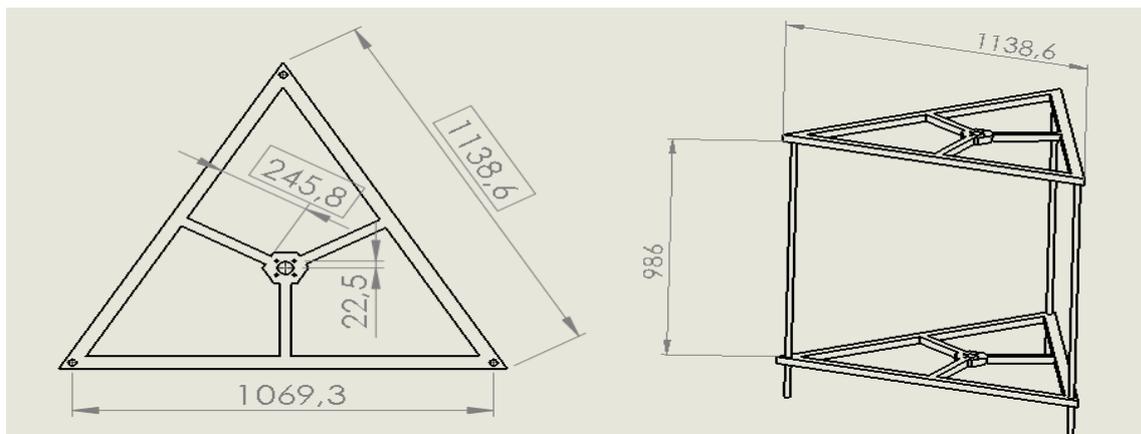


## Anexo 5

### Desenhos técnicos dos principais componentes do rotor



### Desenho técnico do triângulo e estrutura de suporte da turbina e concentradores



## Anexo 6

### Fotos da construção do protótipo

#### B50

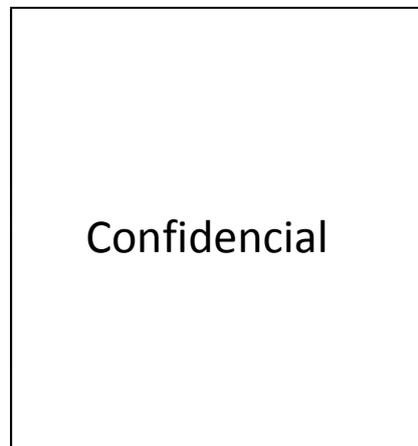
Corte na Fresa do Molde Fablab  
EDP



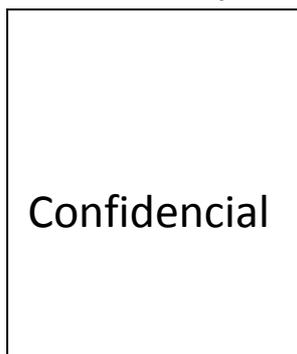
Corte fio quente Molde Oficina  
DEGGE



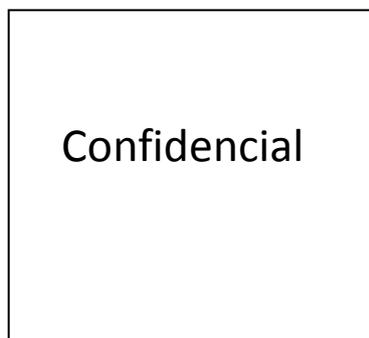
Molde terminado



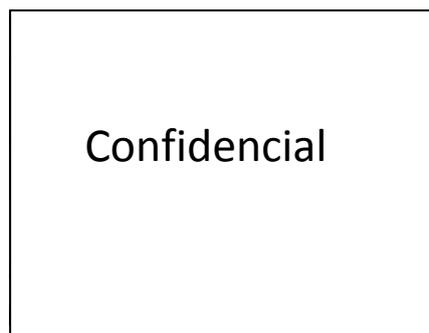
Molde preparado para  
sobreposição de camadas de  
fibra de vidro e epoxi



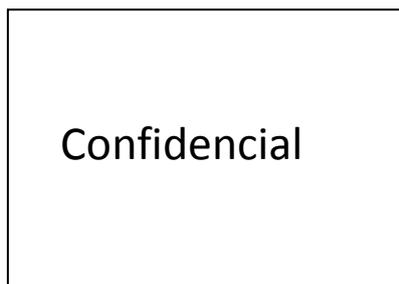
Peças em Fibra de Vidro



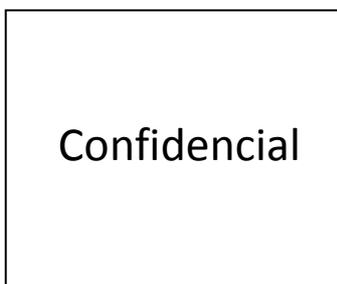
Esqueleto de suporte das peças em  
fibra de vidro



Montagem do toro



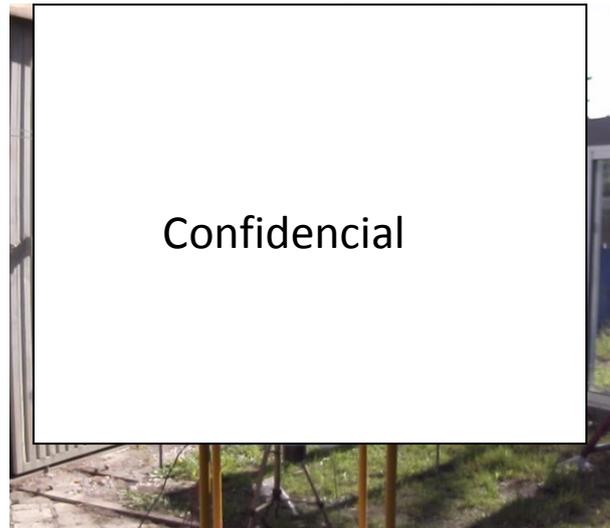
Toro terminado



Concentrador B5025-26 terminado



## Sistema B50



## Pás da turbina

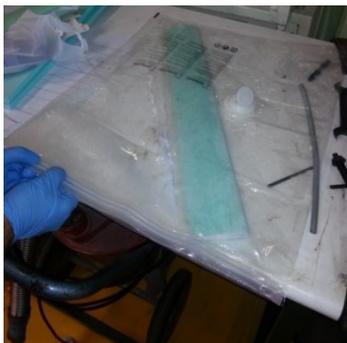
Pá após corte na CNC fio quente



Aplicação do revestimento em fibra de vidro



Processo de cura a vácuo (método não utilizado)



Corte do excesso de fibra



## **Estrutura de suporte**

### **Mesa de suporte e triângulo inferior**



### **Estrutura de suporte e VAWT**



## Anexo 7

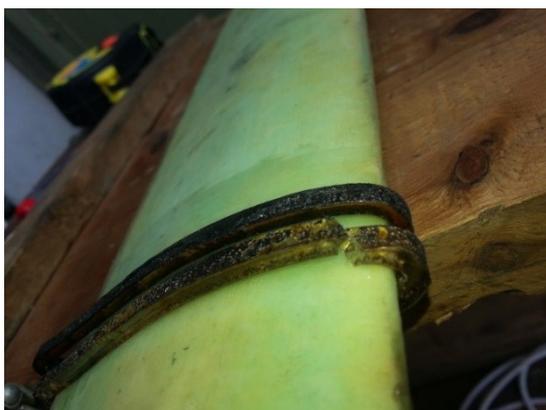
### Resistência dos materiais e designs para as braçadeiras das pás.

Foram utilizadas braçadeiras de policarbonato para quais foi realizado um teste de resistência do material. Foi aplicada uma massa ligada ao extradorso com a peça aparafusada a uma chapa de madeira. Como resultado, as braçadeiras, quebraram no ensaio de 6.5 Kgf

**Teste de resistência da braçadeira  
Policarbonato**



**Braçadeira quebrada após inspecção**



**Resultado dos testes de resistência  
efectuados**

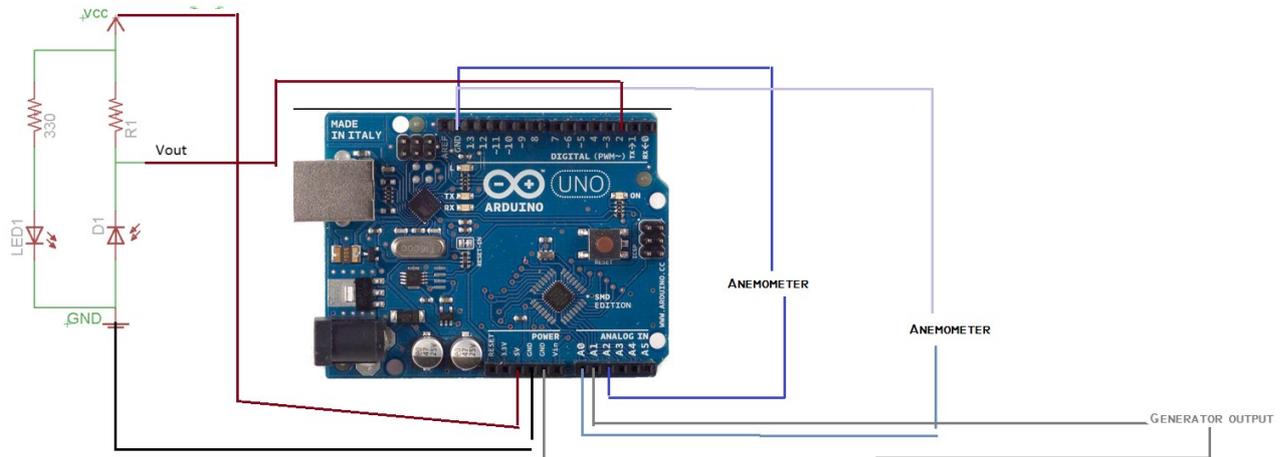


**Teste no corte a laser de policarbonato**



## Anexo 8

### Sistema de aquisição



Código desenvolvido pelo Professor David Pera para contagem das rotações da turbina

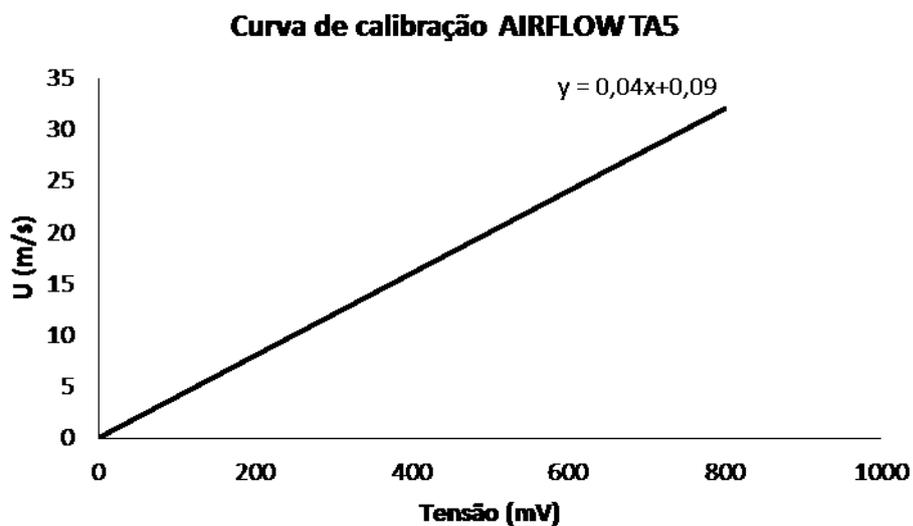
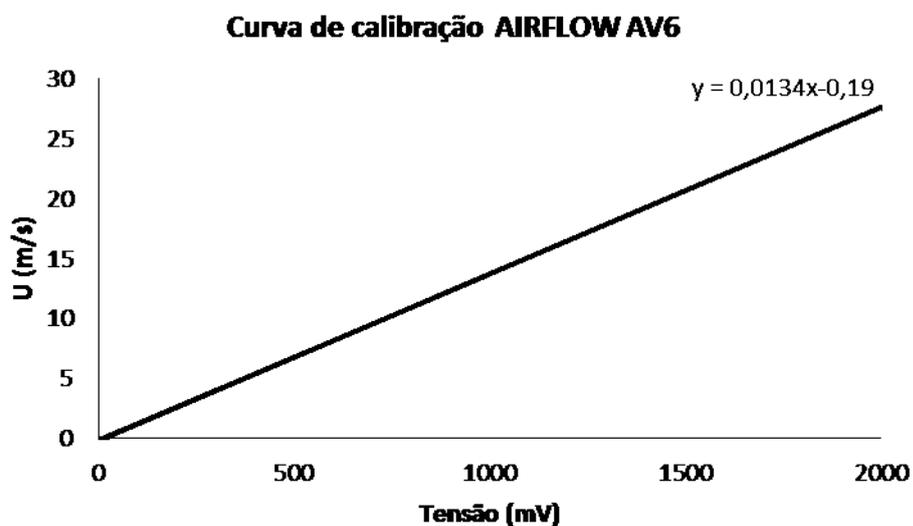
```
//-----
```

```
int anemPin = A0;
int motorPin = A1;
int anem2Pin = A2;
int rpmcount;
double rpm;
double tic;
double tac;
double wind;
double wind2;
double volt;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  rpmcount = 0;
  rpm = 0;
}
```

```
void loop()
{
  attachInterrupt(0, rpm_fun, RISING);
}
void rpm_fun()
{
  rpmcount++;
  if (rpmcount ==1){
    tic=millis();
  }
  if (rpmcount >=2){
    tac= millis()-tic;
    rpm = 1/(tac/1000/60);
    rpmcount = 0;
    wind = analogRead(anemPin);
    volt = analogRead(motorPin);
    wind2= analogRead(anem2Pin);
    Serial.print(rpm);
    Serial.print(",");
    Serial.print((wind*5/1024)*((0.0134*1000)-0.19));
    Serial.print(",");
    Serial.print (volt*5/1024);
    Serial.print(",");
    Serial.print((wind2*5/1024)*((0.04*1000)+0.09));
    Serial.print(",");
    Serial.println (millis());
  }
}
```

## Anexo 9

- Curvas de calibração dos anemómetros



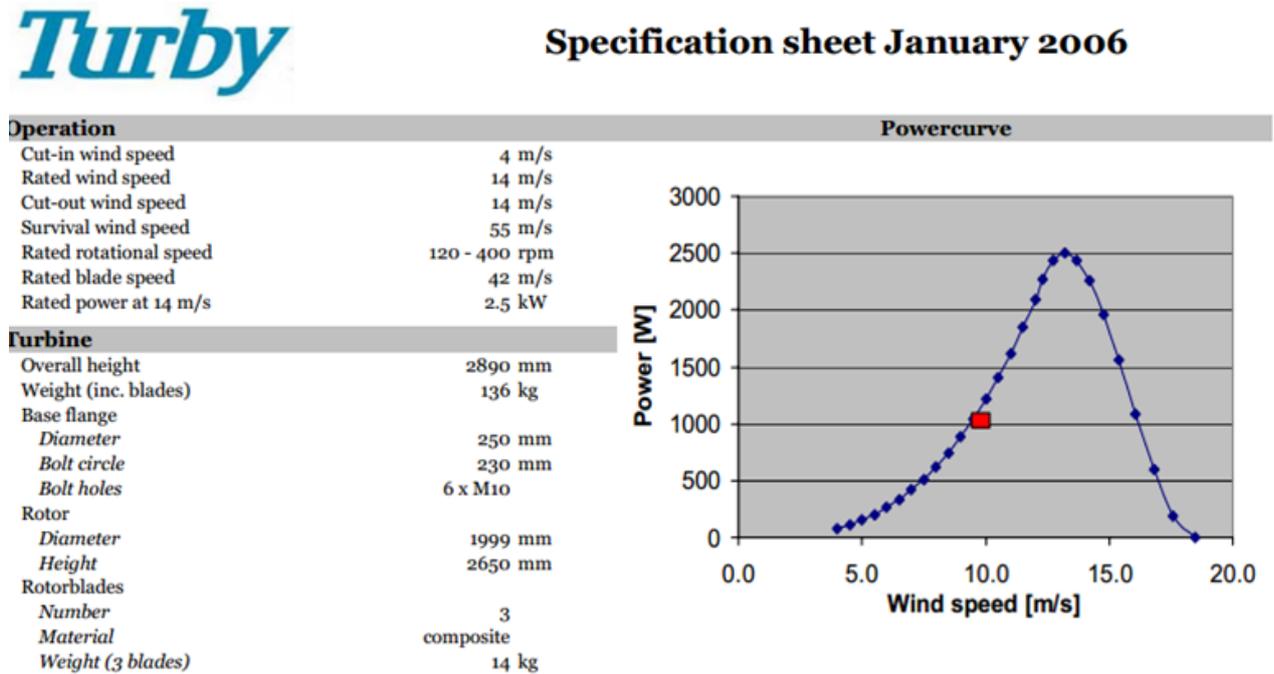
- Caracterização do túnel de vento

<b>Velocidade 1</b>					
<b>Ponto</b>	<b>(1,1)</b>	<b>(0,1)</b>	<b>(2,1)</b>	<b>(1,2)</b>	<b>(1,0)</b>
<b>0m</b>	7,7	5,6	5,7	5,7	5,7
<b>1m</b>	7,6	5,6	5,6	5,7	5,7
<b>2m</b>	7,6	5,5	5,6	5,6	5,4
<b>3m</b>	7,6	5,5	5,4	5,6	5,4
<b>4m</b>	7,6	5,5	5,4	5,4	5,4
<b>Velocidade 2</b>					
<b>Ponto</b>	<b>(1,1)</b>	<b>(0,1)</b>	<b>(2,1)</b>	<b>(1,2)</b>	<b>(1,0)</b>
<b>0m</b>	14,8	14,1	14,8	15,0	15,7
<b>1m</b>	14,8	13,4	14,3	14,6	14,8
<b>2m</b>	14,8	12,2	13,3	13,7	13,9
<b>3m</b>	14,6	11,5	12,7	12,9	13,3
<b>4m</b>	14,5	10,9	11,8	12,2	13,1
<b>Velocidade 3</b>					
<b>Ponto</b>	<b>(1,1)</b>	<b>(0,1)</b>	<b>(2,1)</b>	<b>(1,2)</b>	<b>(1,0)</b>
<b>0m</b>	23,2	22,4	23,9	23,2	24,5
<b>1m</b>	23,2	21,8	23,4	22,2	23,4
<b>2m</b>	22,9	20,1	22,6	21,6	22,4
<b>3m</b>	22,7	18,2	22,2	19,8	21,7
<b>4m</b>	22,3	17,9	21,7	18,6	20,3

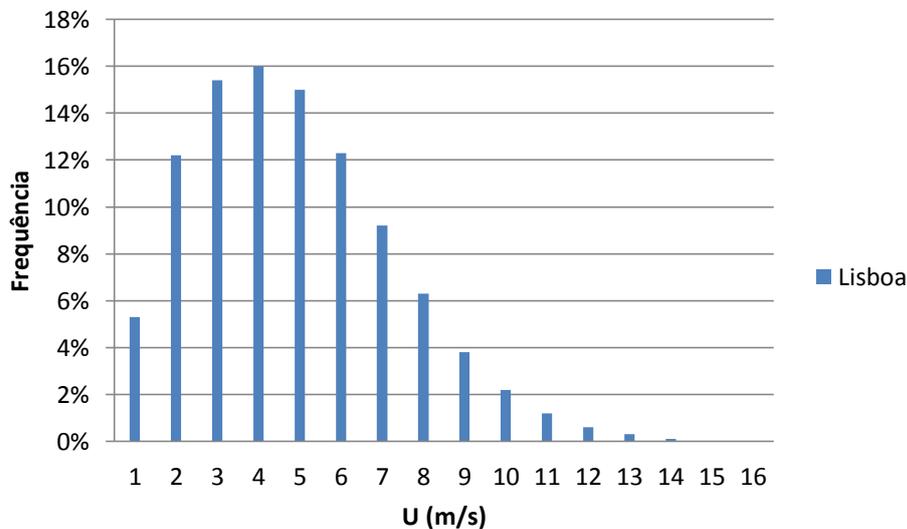
## Anexo 10

### Dados viabilidade económica

- Curva de Potência Turby 2.5kW



- Série de vento Lisboa instituto geofísico (2006)



Tabelas referentes à série de vento e energia produzida anualmente pela *Turby 2.5*

	Dados Lisboa I. Geofísico			Turby 2,5		
	Freq(%)	Nº horas	U (m/s)	$C_p$	P (W)	E_anual (kWh)
<b>1</b>	5,30%	464	0,5	0	0,0	0,0
<b>2</b>	12,20%	1069	1,5	0	0,0	0,0
<b>3</b>	15,40%	1346	2,5	0	0,0	0,0
<b>4</b>	16,00%	1402	3,5	0,1	15,5	21,7
<b>5</b>	15,00%	1314	4,5	0,2	65,9	86,5
<b>6</b>	12,30%	1077	5,5	0,2	120,2	129,5
<b>7</b>	9,20%	806	6,5	0,2	198,5	160,0
<b>8</b>	6,30%	552	7,5	0,3	457,4	252,5
<b>9</b>	3,80%	333	8,5	0,3	665,8	221,7
<b>10</b>	2,20%	188	9,5	0,3	929,5	174,7
<b>11</b>	1,20%	102	10,5	0,3	1255,0	128,0
<b>12</b>	0,60%	53	11,5	0,4	2198,4	116,5
<b>13</b>	0,30%	23	12,5	0,3	2117,4	48,7
<b>14</b>	0,10%	11	13,5	0,3	2667,4	29,3
<b>15</b>	0,00%	9	14,5	0,2	2203,4	19,8
<b>16</b>	0,00%	9	15,5	0,2	2691,4	24,2
	100,00%	8756			Total	<b>1413,3</b>