

AVERIGUAÇÃO DO POTENCIAL DE VENTO EM AMBIENTE  
EDIFICADO PARA APROVEITAMENTOS EÓLICOS  
URBANOS

Nuno Filipe da Costa Magalhães



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Telecomunicações

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2011



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha da Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Este texto encontra-se redigido segundo as normas do português clássico.

Candidato: Nuno Filipe da Costa Magalhães, Nº 1060852, 1060852@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Betina Campos Neves, bbn@isep.ipp.pt

Professora Isabel Sousa de Jesus, isj@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Telecomunicações

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

11 de Novembro de 2011



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar, quero dirigir os meus profundos agradecimentos às responsáveis pela minha orientação científica, Eng<sup>a</sup> Betina Baère de Faria Campos Neves e Prof. Doutora Isabel Maria de Sousa de Jesus. A ambas, o meu obrigado pela orientação, dedicação, ensinamentos e disponibilidade em acompanhar o trabalho desenvolvido.

Agradeço, profundamente, a uma grande colega e amiga Tânia Zhao Zhu pela extrema paciência e a possibilidade de partilha de conhecimentos.

Finalmente, à minha família e pessoas mais próximas, o meu “Muito Obrigado” pelo apoio que me foi conferido.



## *Resumo*

O objectivo deste projecto consiste em analisar o potencial eólico em ambiente edificado urbano, considerando a utilização de turbinas eólicas de eixo vertical para produção de energia nesse contexto. Pretende-se com este documento demonstrar que, embora os estudos sobre as turbinas de eixo vertical sejam ainda reduzidos quando comparados aos das de eixo horizontal, tal não implica que as mesmas não tenham características que, em determinados cenários, sejam superiores às turbinas de eixo horizontal.

Para a análise da intensidade de vento em cenário edificado urbano, seleccionou-se como local de estudo desta tese o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), mais concretamente, o edifício F e o edifício E. Foi escolhido o edifício F, pelo facto de a acessibilidade ao mesmo ser mais fácil e também pelo facto de nesse edifício se ter acesso à parte norte do mesmo, onde os ventos são de intensidade mais forte. O edifício E como já tinha um anemómetro colocado a recolher dados para a estação meteorológica do ISEP foi igualmente objecto de incorporação na tese e utilizado na avaliação geoestatística exemplificativa.

Após a extensa recolha de dados nos locais anteriormente mencionados, procedeu-se à análise de diversas turbinas de eixo vertical em termos dos respectivos perfis de produção. De seguida, efectuou-se uma análise estatística e geoestatística de carácter exemplificativo, de modo a caracterizar a intensidade de vento presente na área compreendida entre o edifício E e o edifício F. De forma a finalizar o documento, é apresentada uma conclusão relativa ao potencial eólico para produção de energia eléctrica em ambiente edificado urbano por recurso a turbinas eólicas de eixo vertical.

### *Palavras-Chave*

VAWTs, HAWTs, Geoestatística, Estatística, *Weibull*, *Savonious*, *H-rotor*, *Darrieus*



## *Abstract*

The scope of this project is to analyze the wind potential in the urban built environment through the use of vertical axis wind turbines for energy production in this context. It is intended with this document to demonstrate that although there is a lack of research and development regarding vertical axis turbines when compared to the R&D on horizontal axis turbines, it does not mean that, in certain situations, the first type of turbines are less adequate or efficient than the second ones.

For the analysis of wind intensity in urban environment, the buildings and place selected for testing purposes were at the Polytechnic Institute of Engineering of Porto (ISEP), more specifically the F and E buildings. The reason for selecting building F was due to the fact that it was the easiest one to access and allowed a comfortable access to its northern side, where the wind intensity is stronger. Building E was selected because it already had an anemometer installed for collecting data for ISEP's meteorological station, and it was therefore used for the geostatistics evaluation example presented in this project.

In short, the project started with the collection of wind data on two buildings mentioned above. The next steps consisted on the research, analysis and comparison, in terms of their production profile of several types of vertical axis wind turbines. In addition, a statistical analysis as well as a geostatistic example analysis were made in order to determine the intensity of wind within the area between the F and E buildings. At the end of this document, a conclusion was drawn regarding wind energy potential in urban built environment for energy generation with vertical axis wind turbines.

### ***Keywords***

VAWTs, HAWTs, Geostatistic, Statistic, Weibull, Savonious, H-rotor, Darrieus



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. MOTIVAÇÃO .....	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	5
<b>2. VENTO E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO</b> .....	<b>7</b>
2.1. VENTO – O QUE É?.....	7
2.2. RECOLHA DE DADOS .....	9
2.3. INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DO VENTO.....	12
2.3.1. <i>Anemómetros rotacionais</i> .....	12
2.3.2. <i>Anemómetro de tubo de pressão</i> .....	13
2.3.3. <i>Anemómetro de deflexão</i> .....	14
2.3.4. <i>Anemómetro termoeléctrico</i> .....	15
2.3.5. <i>Anemómetro laser</i> .....	16
2.3.6. <i>Anemómetro ultra-sónico</i> .....	17
2.3.7. <i>O tipo de anemómetro utilizado</i> .....	18
2.4. MEDIÇÃO DO VENTO DE ACORDO COM A NORMA IEC.....	18
<b>3. TIPOS DE TURBINAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA – ESTADO DA ARTE.</b> .....	<b>21</b>
3.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	21
3.2. COMERCIALIZAÇÃO DE VAWTs.....	28
3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	30
3.4. ESTUDO COMPARATIVO .....	31
3.4.1. <i>Design e mecanismo de orientação</i> .....	32
3.4.2. <i>Orientação relativamente ao eixo</i> .....	33
3.4.3. <i>Mecanismo de accionamento directo</i> .....	34
3.4.4. <i>Aspectos de construção</i> .....	34
3.4.5. <i>Estrutura mecânica</i> .....	41

3.4.6.	<i>Tamanho</i> .....	41
3.4.7.	<i>Aerodinâmica e desempenho</i> .....	43
3.4.8.	<i>Controlo de potência</i> .....	46
3.4.9.	<i>Impacto ambiental e ruído sonoro</i> .....	48
3.4.10.	<i>Custo monetário</i> .....	49
3.5.	DESENVOLVIMENTOS MAIS ACTUAIS .....	51
3.5.1.	<i>Melhoramento da performance da savonious baseando-se em estudos numéricos</i> .....	51
3.5.2.	<i>Análise e testes a turbinas eólicas de eixo vertical do tipo savonious</i> .....	54
3.5.3.	<i>Novo tipo de VAWT e optimização da estrutura das suas pás</i> .....	56
3.5.4.	<i>Melhoramento da solidez das turbinas eólicas de eixo vertical de pás rectas utilizando estudos numéricos</i> .....	58
3.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	61
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA UTILIZADA NA MEDIÇÃO DO VENTO</b> .....	<b>63</b>
4.1.	REGIÃO A ESTUDAR .....	63
4.2.	INSTRUMENTO UTILIZADO PARA RECOLHA DE DADOS .....	66
4.3.	<i>DATALOGGER</i> PARA ARMAZENAMENTO DOS DADOS.....	66
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DOS DADOS</b> .....	<b>71</b>
5.1.	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	71
5.1.1.	<i>Distribuição de Weibull aplicada aos locais em estudo</i> .....	71
5.1.2.	<i>Comparação de capacidade produtiva de diferentes VAWTs</i> .....	76
5.2.	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	90
5.2.1.	<i>Conceitos de geoestatística</i> .....	90
5.2.2.	<i>Geoestatística aplicada aos locais de estudo</i> .....	94
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>111</b>
	<b>ANEXO A. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ANEMÓMETRO</b> .....	<b>117</b>
	<b>HISTÓRICO</b> .....	<b>120</b>

## Índice de Figuras

Figura 1	Modelo conceptual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direcções dos ventos próximos da superfície. Também são indicadas as latitudes típicas de baixas e altas pressões [63] .....	8
Figura 2	Escala de ventos <i>Beaufort</i> [63].....	9
Figura 3	Atlas Europeu do Vento.....	10
Figura 4	Atlas Português do Vento – velocidade média horizontal a 60 m [m/s], ano ref 1999 [62] .....	11
Figura 5	Anemómetro tipo hélice [65] e anemómetro de copos [66] .....	13
Figura 6	Funcionamento de um modelo do anemómetro de tubo de pressão [67] .....	13
Figura 7	Anemómetro de deflexão [67].....	14
Figura 8	Anemómetro térmico digital [1].....	15
Figura 9	Formação da intersecção dos feixes e formação das franjas [67].....	16
Figura 10	Modelo de um anemómetro ultra-sónico [5].....	17
Figura 11	Moinho de vento de eixo vertical para a moagem de cereais [58] .....	22
Figura 12	Primeira turbina eólica automática do mundo, desenvolvida por <i>Charles F. Brush</i> , em 1888 [59] .....	23
Figura 13	Turbina eólica de eixo horizontal desenvolvida por <i>Marcellus Jacobs</i> , rotor de diâmetro de cerca de 4 m e potência entre 1.8 a 3 kW, 1932 [58] .....	23
Figura 14	Turbina <i>Savonius</i> [6] .....	24
Figura 15	Turbinas de eixo vertical – <i>Savonius</i> , <i>Darrieus</i> , <i>H-Rotor</i> [58] .....	25
Figura 16	Parque eólico com turbinas eólicas <i>Darrieus</i> da <i>Flowind</i> nas montanhas de <i>Tehachi</i> , EUA, 1986 [58] .....	26
Figura 17	Turbina <i>Darrieus Eole</i> ,4 MW de potência, <i>Hydro-Québec</i> , Canadá, 1987 [58].....	27
Figura 18	Turbina <i>H-rotor</i> , com um rotor de diâmetro 35 m e 300 kW de potência nominal [58].. .....	27
Figura 19	Chinook 2000 – pormenor das pás e da estrutura [70].....	28
Figura 20	Turbina Turby [22] e turbina Wind-Sail [32].....	29
Figura 21	Turbina de eixo vertical do tipo <i>H-rotor</i> da <i>Ropatec</i> , potência 6 kW [26] .....	29
Figura 22	Diferentes tipos de solidez de uma turbina eólica [7] .....	31
Figura 23	Modelo numérico de um edifício em que o fluxo de vento embate contra o mesmo [7]. .....	33
Figura 24	Ambiente de produção e fabricação das pás de turbinas eólicas, da empresa <i>Enercon</i> [58] .....	35
Figura 25	Pás dos rotores <i>Darrieus</i> da <i>Flowind</i> constituídas por alumínio [58].....	35
Figura 26	Características geométricas do perfil NACA [11].....	36
Figura 27	Geometria do perfil NACA normalmente usado nas turbinas <i>Darrieus</i> [7].....	37

Figura 28	Modelo geométrico da turbina <i>Savonious</i> de duas pás [11] .....	38
Figura 29	Modelos das turbinas <i>Savonious</i> de um, dois e três níveis [11] .....	40
Figura 30	Parque eólico <i>off-shore Middelgrunden</i> , perto da costa dinamarquesa de Copenhaga [58] .....	42
Figura 31	Curvas de $C_p$ em função de $\lambda$ , das turbinas <i>Darrieus</i> , HAWT e <i>H-rotor</i> [60].....	44
Figura 32	Coeficientes de potência de diferentes tipos de turbinas eólicas [58] .....	45
Figura 33	Exemplos de controlo de passo aplicados às HAWTs [58].....	46
Figura 34	Ângulo de passo e de ataque [20].....	47
Figura 35	Forças de arrasto e sustentação [20].....	48
Figura 36	Bando de aves migratórias passando perto de um parque eólico [58].....	49
Figura 37	Aerogenerator X, turbina de eixo vertical completamente futurista actualmente em desenvolvimento pelo ETI – <i>Energy Technologies Institute</i> [35].....	51
Figura 38	Forma da turbina helicoidal <i>Savonious</i> [41].....	52
Figura 39	1-análise do melhor número de pás, 2- análise do overlap e 3-análise do ângulo de torção [41] .....	53
Figura 40	Diversos tipos de rotores utilizados no projecto [48] .....	54
Figura 41	Curvas de potência obtidas para diferentes tipos de rotores <i>Savonious</i> [48].....	55
Figura 42	Exemplo de uma VAWT com <i>Windshield</i> [51].....	56
Figura 43	Movimento do ar numa VAWT tradicional [49].....	56
Figura 44	Movimento do ar numa VAWT com <i>Windshield</i> [49].....	57
Figura 45	Análises efectuadas: sem <i>windshield</i> em a), com <i>windshield</i> e $\beta=90^\circ$ em b), com <i>windshield</i> e $\beta=30^\circ$ em c) e com <i>windshield</i> e $\beta=45^\circ$ em d) [49].....	58
Figura 46	Coeficientes de binário estático do modelo com perfil NACA0012 [54] .....	60
Figura 47	Coeficientes de binário estático do modelo com perfil NACA0018 [54] .....	61
Figura 48	Edifício F, do Instituto Superior de Engenharia do Porto [55].....	63
Figura 49	Pormenor dos locais escolhidos para recolha de dados do vento .....	65
Figura 50	Locais de estudo, imagem de satélite vista de sul .....	65
Figura 51	Anemómetro de copos utilizado na recolha de dados de vento.....	66
Figura 52	Diagrama genérico do sistema utilizado na recolha e armazenamento de dados, com possibilidade de acesso remoto aos mesmos utilizando a Internet.....	67
Figura 53	Conjunto de ficheiros com dados do vento disponibilizados remotamente .....	68
Figura 54	Opções disponíveis no software do anemómetro utilizado, e medição da velocidade do vento .....	69
Figura 55	Ficheiro xls utilizado no tratamento dos dados .....	69
Figura 56	Histograma dos valores máximos mensais do local 1. Distribuição de <i>Weibull</i> $A=1.128$ $K=0.92$ .....	73
Figura 57	Histograma dos valores máximos mensais do local 2. Distribuição de <i>Weibull</i> $A=1.938$ $K=0.85$ .....	74
Figura 58	Histograma dos valores máximos mensais do local 3. Distribuição de <i>Weibull</i> $A=2.273$ $K=0.89$ .....	74

Figura 59	Histograma dos valores máximos mensais do local 4. Distribuição de <i>Weibull</i> $A=2.410$ $K=0.89$ .....	75
Figura 60	Ropatec Big Star [71].....	76
Figura 61	Curva de potência produzida pela <i>Big Star</i> a diferentes velocidades do vento, de acordo com os dados do fabricante <i>Ropatec</i> [71].....	77
Figura 62	Distribuição de potência produzida no local 1 pela <i>Ropatec Big Star</i> .....	78
Figura 63	<i>Urban Green Energy</i> [71].....	78
Figura 64	Curva de potência produzida pela <i>Urban Green Energy</i> a diferentes velocidades do vento, de acordo com os dados do fabricante [71].....	79
Figura 65	Distribuição de potência produzida no local 1 pela <i>Urban Grenn Energy</i> uge-4kW...	80
Figura 66	Distribuição de potência produzida no local 2 pela <i>Urban Grenn Energy</i> uge-4kW...	82
Figura 67	Distribuição de potência produzida no local 2 pela <i>Ropatec Big Star</i> .....	83
Figura 68	Distribuição de potência produzida no local 3 pela <i>Ropatec Big Star</i> .....	84
Figura 69	<i>Windturbine.cc</i> PK10kW[71].....	85
Figura 70	Valores de potência produzida pela <i>Windturbine.cc</i> PK10kW a diferentes velocidades do vento, de acordo com os dados do fabricante [71]......	85
Figura 71	Distribuição de potência produzida no local 3 pela <i>Windturbine.cc</i> PK10kW.....	86
Figura 72	Distribuição de potência produzida no local 4 pela <i>Ropatec Big Star</i> .....	87
Figura 73	Distribuição de potência produzida no local 4 pela <i>Windturbine.cc</i> PK10kW.....	88
Figura 74	Semivariogramas: (A) sem efeito pepita; (B) com efeito pepita [69].....	92
Figura 75	Pormenor da localizacao dos anemómetros no ISEP.....	95
Figura 76	Medição do comprimento da área em análise.....	96
Figura 77	Medição da largura da área em análise.....	96
Figura 78	Área em análise utilizando a geoestatística.....	97
Figura 79	Semivariograma obtido para o mês 1.....	99
Figura 80	Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 1.....	100
Figura 81	Semivariograma obtido para o mês 2.....	101
Figura 82	Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 2.....	101
Figura 83	Semivariograma obtido para o mês 3.....	102
Figura 84	Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 3.....	103
Figura 85	Semivariograma obtido para o mês 4.....	103
Figura 86	Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 4.....	104



## Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização do projecto .....	4
Tabela 2	Síntese das diferenças mais relevantes das turbinas em análise: <i>H-rotor</i> , <i>Darrieus</i> , <i>Savonious</i> e HAWT .....	32
Tabela 3	Medidas dos rotores utilizados na referência [48].....	55
Tabela 4	Parâmetros principais do modelo analisado [54].....	59
Tabela 5	Simulações efectuadas [54].....	59
Tabela 6	Medições efectuadas durante a recolha de dados do vento .....	64
Tabela 7	Comparação de parâmetros <i>Weibull</i> aplicados aos locais em estudo.....	75
Tabela 8	Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 1 .....	81
Tabela 9	Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 2 .....	83
Tabela 10	Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 3 .....	87
Tabela 11	Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 4 .....	89
Tabela 12	Síntese dos resultados obtidos para cada local analisado em termos de potência mensal produzida por cada uma das VAWTs.....	89
Tabela 13	Coordenadas GPS e altura do anemómetro do local S relativamente ao nível do mar	95
Tabela 14	Síntese dos valores médios máximos medidos durante um mês nos dois anemómetros em simultâneo, mas em locais diferentes.....	98



## *Acrónimos*

ETI	<i>Energy Technologies Institute</i>
FEM	Força Electromotriz
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Indução
I&D	Investigação e Desenvolvimento
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
SB-VAWT	<i>Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine</i>
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
R&D	<i>Research &amp; Development</i>



# 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho pretende avaliar o potencial de vento para produção de energia com turbinas eólicas de eixo vertical em ambiente edificado ou urbano. Assim, em consequência deste objectivo, uma parte do esforço empreendido consiste em analisar as potencialidades das turbinas eólicas de eixo vertical face às turbinas eólicas de eixo horizontal. Para tal, foi elaborado um estudo sobre o estado da arte dessas mesmas turbinas, as vantagens e desvantagens da sua utilização no contexto aqui proposto, face às suas congéneres de eixo horizontal, assim como uma análise do potencial eólico de um local situado em ambiente urbano, o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Utilizando uma análise geoestatística exemplificativa, pretendeu-se encontrar o melhor local para a instalação de turbinas eólicas de eixo vertical.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Antes da revolução industrial, fontes energéticas, tais como a água, o vento e mesmo a lenha eram comumente utilizadas para a produção de calor (caso da lenha) e de força motriz (caso da água e do vento). No entanto, e no seguimento da revolução industrial, foi necessário adoptar novas fontes de energia, como forma de colmatar a crescente procura de energia eléctrica verificada deste então. Para isso, passaram a ser utilizadas fontes de energia, tais como, carvão, petróleo, gás e energia nuclear [56]. Como estas fontes de energia são bastante poluentes, começaram a utilizar-se formas alternativas de energia, baseadas em recursos renováveis, não poluentes e potencialmente inesgotáveis, tais como o vento. Ora, na produção de energia proveniente do vento existem actualmente dois tipos de turbinas: as turbinas de eixo horizontal e vertical. No desenvolvimento tecnológico destas

turbinas até aos dias de hoje, foram privilegiadas as turbinas de eixo horizontal, sem que fosse provado que as de eixo vertical fossem piores (em termos de capacidade de extracção de energia do vento, custo mais elevado) que as de eixo horizontal, possuindo mesmo algumas vantagens face às de eixo horizontal. Por exemplo, as turbinas de eixo vertical não dependem da direcção do vento para produzir energia. Os motivos de uma maior aposta na investigação e desenvolvimento das turbinas de eixo horizontal em detrimento das de eixo vertical foi apenas consequência de limitações técnicas de época, hoje amplamente ultrapassadas. Assim, e em virtude de determinadas vantagens únicas das turbinas de eixo vertical, se estima que estas possam ter um papel incontornável nos futuros aproveitamentos eólicos urbanos. Foi com esta premissa que a elaboração desta tese se realizou e, em consequência disso, nos capítulos subsequentes, serão apresentados com detalhe todos os aspectos relevantes que suportam a essência desta tese

## **1.2. OBJECTIVOS**

De modo a cumprir o objectivo de avaliar o potencial eólico em ambiente edificado urbano, utilizando turbinas eólicas de eixo vertical, procedeu-se à recolha de dados de vento, num cenário afim, e em diferentes pontos geográficos do mesmo, ao longo de um período de tempo suficiente. Paralelamente, procedeu-se ao estudo dos dois tipos de tecnologias de turbinas eólicas – eixo vertical e eixo horizontal – efectuando uma análise comparativa dos aspectos que podem ditar uma selecção adequada.

Cumprido esse objectivo, previu-se ainda a questão da escolha “fina” – entre tipos de turbinas de eixo vertical – de um ou mais tipos de turbina que, em função de perfil de vento registado no local, se apresentem como mais apropriadas.

Realizou-se uma análise estatística e geoestatística exemplificativa de modo a seleccionar a turbina mais adequada ao local, bem como obter um mapeamento da variável intensidade do vento da área em análise, apontando para tal o local mais propício à instalação.

## **1.3. MOTIVAÇÃO**

A motivação deste trabalho provém do facto de sentir que o tema proposto nesta tese se reveste de extrema relevância para cenários futuros de produção/consumo de energia eléctrica, num contexto de custos crescentes para o consumidor final, levando à

necessidade de encontrar soluções alternativas financeiramente adequadas. Foi igualmente motivador constatar uma escassez de documentação na comparação das potencialidades das turbinas de eixo vertical face às de eixo horizontal, e, sobretudo, da sua aplicabilidade em ambiente edificado urbano. Para que o documento fosse concluído com sucesso foi seguida a calendarização presente na Tabela 1.



## **1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

No presente capítulo é feita uma pequena introdução sobre os aspectos mais relevantes abordados no projecto, assim como a calendarização do mesmo. No capítulo 2 é explicado o processo de geração do vento e os instrumentos utilizados para a medição do mesmo. No capítulo 3 é realizado o estudo relativo ao estado da arte sobre as turbinas de eixo vertical realçando as diferenças entre estas e as de eixo horizontal. No capítulo 4 é explicada a metodologia e o *software* utilizado na medição do vento em diferentes pontos espaciais. No capítulo 5 é feita uma análise estatística e geoestatística de natureza exemplificativa dos dados recolhidos pelos anemómetros utilizados. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões sobre todo o estudo efectuado.

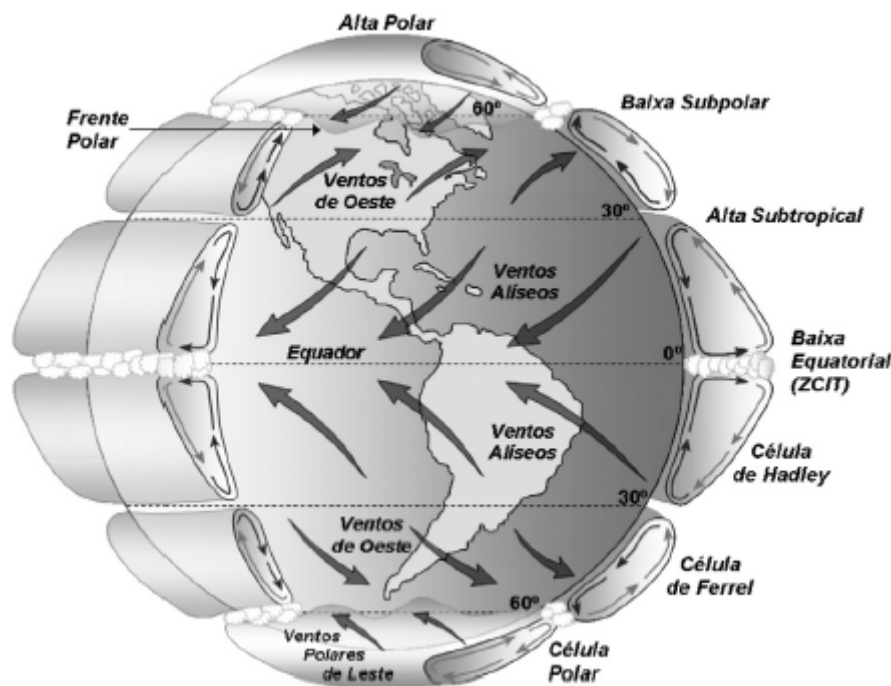


## 2. VENTO E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Neste capítulo irá ser explicado em que consiste o vento, quais os problemas inerentes à medida do mesmo e que instrumentos existem actualmente para que tal tarefa seja concluída com sucesso, realçando as vantagens e desvantagens de cada um.

### 2.1. VENTO – O QUE É?

De forma sucinta, o vento provém das diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre. Estas diferenças de pressão surgem pelo facto de a radiação solar recebida na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares. A velocidade dos ventos é mais uniforme e persistente a cerca de 10 km da superfície da terra. Porém, não é de todo possível colocar conversores eólicos a tal altitude, ficando o seu espaço de interesse restrito a algumas dezenas de metros na atmosfera. A quantidade de energia disponível no vento varia de acordo com as estações do ano e as horas do dia. A topografia e a rugosidade do solo têm também uma grande influência na distribuição de frequência de ocorrência dos ventos e da sua velocidade num dado local.



**Figura 1** Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direções dos ventos próximos da superfície. Também são indicadas as latitudes típicas de baixas e altas pressões [63]

Na Figura 1, está representado o modelo conceitual da circulação dos ventos em termos atmosféricos. A estrutura global dos ventos muda diariamente devido a mudanças de pressão local. A massa de ar em movimento surge como consequência do aquecimento desigual da superfície terrestre, como foi referido anteriormente.

Existe uma escala de vento, de nome *Beaufort*, que mede de zero a doze a força exercida pelo vento, sendo esta escala uma medida empírica para a intensidade de vento. Na figura seguinte pode-se visualizar essa mesma escala. Esta escala foi publicada em 1806 pelo Almirante Inglês *Francis Beaufort*. Esta mesma escala foi adoptada, em 1874, como padrão pelo comité meteorológico internacional e é hoje amplamente utilizada na meteorologia náutica mundial. É apresentada nesta tese a título de curiosidade













Força	Velocidade do vento em nós	Descrição	Símbolo meteorológico	Altura da Vaga (em metros)	Aspecto do mar	Aspecto em terra
0	0 - 1	Calma		0	Mar de azeite, espelhado ou estanhado	Folhas imóveis. O fumo sobe verticalmente
1	1 - 3	Aragem		0 - 0.10	Rugas na água em forma de escamas, sem cristas de espuma	A direcção do vento define-se pelo fumo mas não chega a desfaldar as bandeiras. Tremem as folhas das árvores.
2	4 - 6	Fraco		0.10 - 0.25	Pequenas vagas curtas mas marcadas; cristas translúcidas, mas não rebentam	Sente-se o vento na cara. Movem-se as folhas das árvores. Geralmente movem-se também as bandeiras
3	7 - 10	Bonançoso		0.25 - 1.0	Pequenas vagas mais alongadas, as cristas começam a rebentar, espuma vítrea, alguns camelros	As folhas das árvores agitam-se constantemente. Desfaldam-se as bandeiras.
4	11 - 16	Moderado		1.0 - 1.50	Pequenas vagas alongadas, mais camelrada	Levanta-se poeira e pequenos papéis. Movem-se os ramos pequenos das árvores.
5	17 - 21	V. Fresco		1.50 - 2.50	Vagas médias de forma alongada, aumenta a camelrada	Movem-se as árvores pequenas. Formam-se pequenas vagas nos lagos.
6	22 - 27	Muito Fresco (Frescalhão)		2.50 - 4.0	Vagas grandes em formação; cristas espumantes com ronçana	Movem-se os ramos grandes das árvores. Sibiam os fios do telégrafo. Dificuldade em conservar abertos os guarda-chuvas.
7	28 - 33	Forte		4.0 - 5.50	As vagas acumulam-se a espuma alonga-se em fielos esbranquiçados na direcção do vento	As árvores sacodem-se. Dificuldade em andar contra o vento.
8	34 - 40	Muito Forte (Muito Riço)		5.50 - 7.50	Vagas medianamente altas mas compridas; as cristas rebentam em turbilhão, a espuma estende-se em fielos nítidos na direcção do vento	Partem-se pequenos ramos das árvores. Geralmente não se pode andar contra o vento.
9	41 - 47	Tempestuoso		7.5 - 10.0	Vagas altas, fielos densos, o mar enrola, a ronçana diminui, por vezes, a visibilidade	Ligeiras avarias nos edifícios. Caem chaminés e levantam-se as telhas
10	48 - 55	Temporal		10.0 - 12.0	Vagas muito altas, de cristas compridas e pendentes, ronçana em lençóis estrados em faixas brancas, superfície da água esbranquiçada, o rolo é violento e caótico, má visibilidade	Arranca as árvores e produz grandes estragos nos edifícios
11	56 - 63	Temporal Desfeito		12.0 - 16.0	Vagas excepcionalmente altas, mar coberto de faixas de espuma, os picos das cristas são poeira de água, má visibilidade	É muito raro. Produz grandes estragos em toda a parte.
12	> 64	Furacão		> 16.0	O ar está saturado de espuma e ronçana, mar completamente branco, péssima visibilidade	

Figura 2 Escala de ventos *Beaufort* [63]

## 2.2. RECOLHA DE DADOS

Devido à natureza inconstante do vento, para que os dados recolhidos possam caracterizar minimamente o local em estudo, é necessário que sejam efectuadas medidas durante algum tempo e em diferentes pontos do local em estudo. Note-se que, na elaboração dos primeiros estudos, i.e. quando se pensou em utilizar energia eólica para aproveitamentos energéticos, esses estudos eram realizados tendo em conta as estações meteorológicas existentes, cujos dados normalmente eram utilizados pela aviação, agricultura, previsão do tempo, mas não para a avaliação do potencial eólico, pois as estações meteorológicas não estão normalmente localizadas nos sítios mais favorecidos do ponto de vista eólico, logo a extrapolação dos registos levou a uma avaliação por defeito do recurso [56].

De modo a se conseguir ultrapassar este problema, foi publicado em 1989, o Atlas Europeu do Vento<sup>1</sup>. Este atlas foi obtido tendo em conta dados de estações meteorológicas seleccionadas, sendo depois corrigidos, para se ter em conta os efeitos da topografia e permitir a extrapolação para outras áreas.

Na Figura 3, está representado, em termos da velocidade média (m/s) e da densidade de potência ( $w/m^2$ ) média anuais, o recurso eólico na Europa Ocidental, à altura de 50 metros do solo e em função de 5 tipos distintos de terreno.

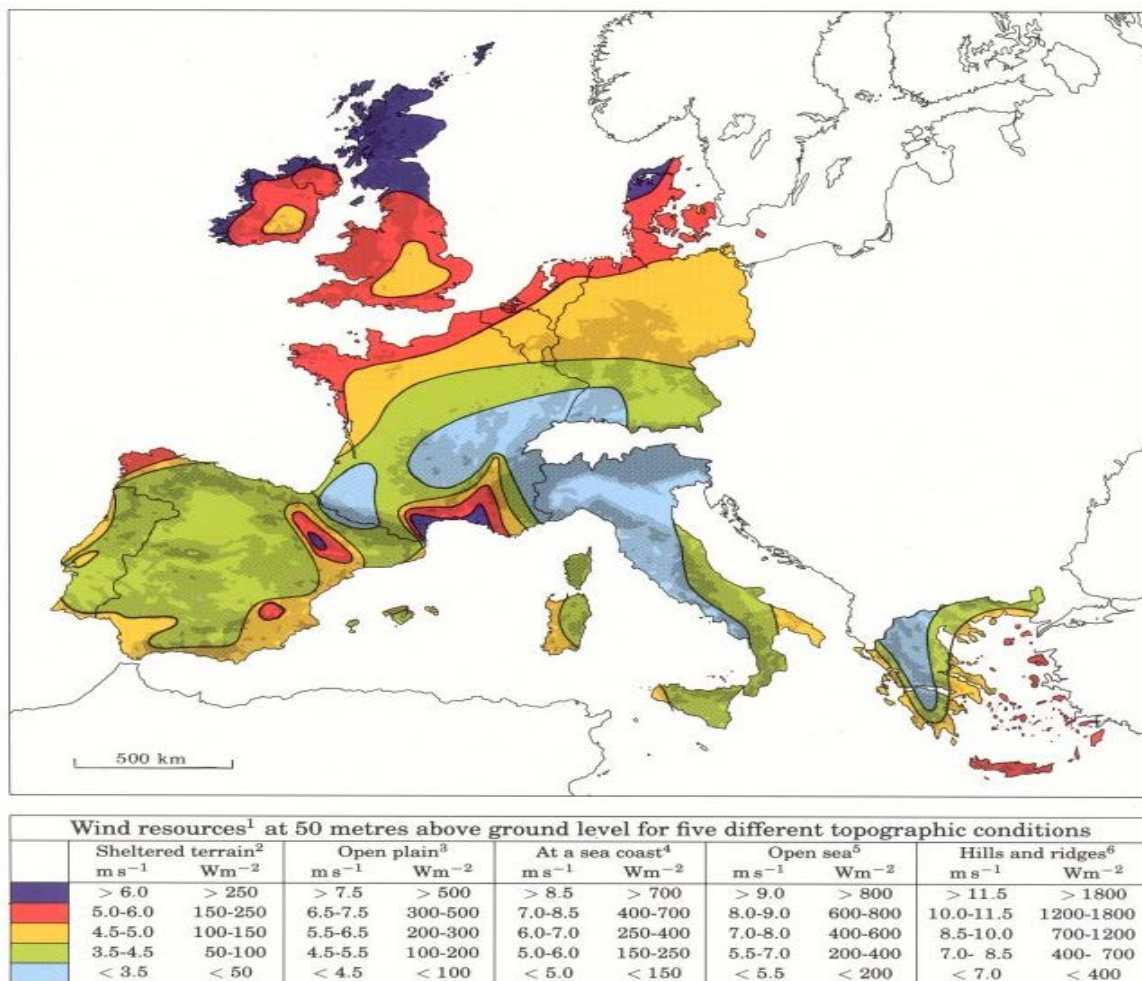


Figura 3 Atlas Europeu do Vento

<sup>1</sup> *European Wind Atlas* (disponível em <http://www.windatlas.dk/Europe/landmap.html>)

Como se pode verificar pela figura anterior, as regiões mais ventosas na Europa estão localizadas no norte do Reino Unido. Por sua vez, as regiões menos ventosas são o norte de Itália e o sul de França. No que diz respeito a Portugal Continental, as zonas mais ventosas estão situadas sobretudo no litoral norte e centro.

Convém realçar que o Atlas Europeu do Vento, apesar de muito limitado (visto que o mesmo foi elaborado tendo em conta algumas estações meteorológicas seleccionadas e extrapolações grosseiras feitas a partir dessas mesmas estações) foi um grande passo para se ter noção da capacidade eólica europeia.

Para além de existir o Atlas Europeu do Vento, algumas instituições, mais concretamente o INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, realizaram diversas medições do vento, de forma a se obter o Atlas Português de Vento [61]. Esse mesmo Atlas pode ser observado na Figura 4. Repare-se que as maiores velocidades médias anuais, de 6 a 6,5 m/s, a 60 m de altura, encontram-se junto ao litoral oeste, mais concretamente na zona centro e em certas regiões do interior norte.

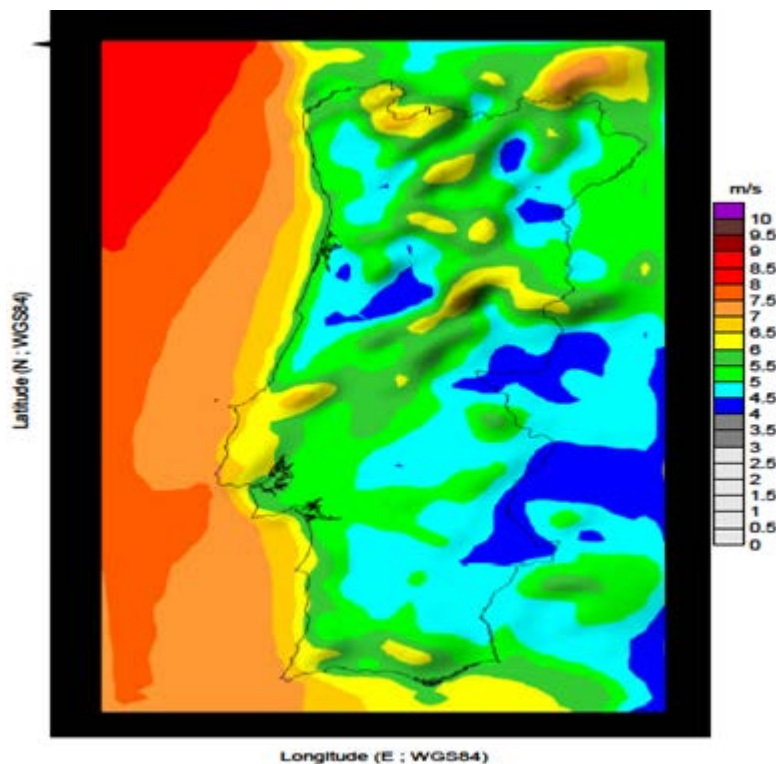


Figura 4 Atlas Português do Vento – velocidade média horizontal a 60 m [m/s], ano ref 1999

[62]

Para que a recolha dos dados do vento fosse possível (tanto no Atlas Europeu do vento como no Atlas Português do Vento), foi necessário utilizar instrumentos capazes de fazer essa medição. De seguida são descritos alguns tipos de sensores mais usados na medição do vento.

### **2.3. INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DO VENTO**

Os dispositivos que são usados para medir a direcção e velocidade do vento, em túneis de ventos, estações meteorológicas, embarcações e/ou utilizados para estudos de instalação de turbinas eólicas, denominam-se por anemómetros. Esse mesmo termo dado ao instrumento que mede o vento deriva de uma palavra grega: “*anemos*” que significa vento [64].

Tanto os instrumentos capazes de medir a velocidade do vento como as técnicas envolvidas evoluíram bastante desde o século XV. Actualmente, existem várias técnicas de medição e diferentes tipos de anemómetros que se encontram descritos em [65].

Os anemómetros mais modernos podem ser reunidos em cinco categorias principais: rotacional, tubo de pressão, deflexão, termoeléctricos e ultra-sónicos.

#### **2.3.1. ANEMÓMETROS ROTACIONAIS**

Os anemómetros rotacionais são os mais usuais e amplamente utilizados para medir o vento, sobretudo por serem simples e económicos. Nesta categoria existem dois tipos de anemómetros: os que são constituídos, basicamente, por hélices que giram a uma velocidade angular proporcional à velocidade do vento que passa por elas e os que são formados por “copos” anexadas a um eixo horizontal de rotação, como se pode observar na Figura 5. Quando o ar exerce pressão sobre as canecas, o eixo horizontal de rotação gira a uma velocidade proporcional à velocidade de deslocamento do ar. Este tipo de anemómetro tem a desvantagem de ser pouco sensível a rajadas de vento de curta duração, devido essencialmente à sua inércia.

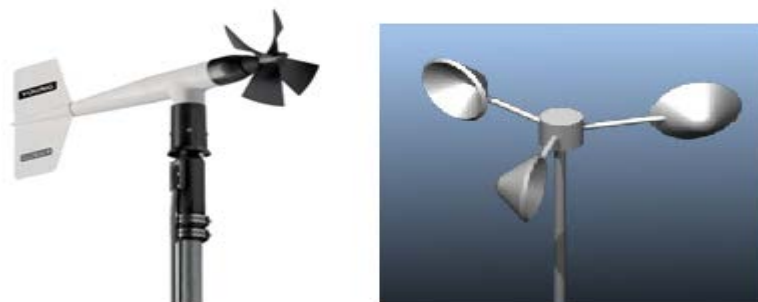


Figura 5 Anemómetro tipo hélice [65] e anemómetro de copos [66]

### 2.3.2. ANEMÓMETRO DE TUBO DE PRESSÃO

O anemómetro de tubo de pressão faz uso da diferença de pressão exercida pelo movimento das moléculas do ar em movimento para medir a velocidade do vento. Basicamente, este dispositivo mede a velocidade do vento convertendo a energia cinética em energia potencial no ponto de estagnação à entrada do tubo, ver Figura 6. O inventor deste anemómetro foi *Henri Pitot*, por isso há também quem chame a este tipo de anemómetro *Tubo de Pitot* [67].

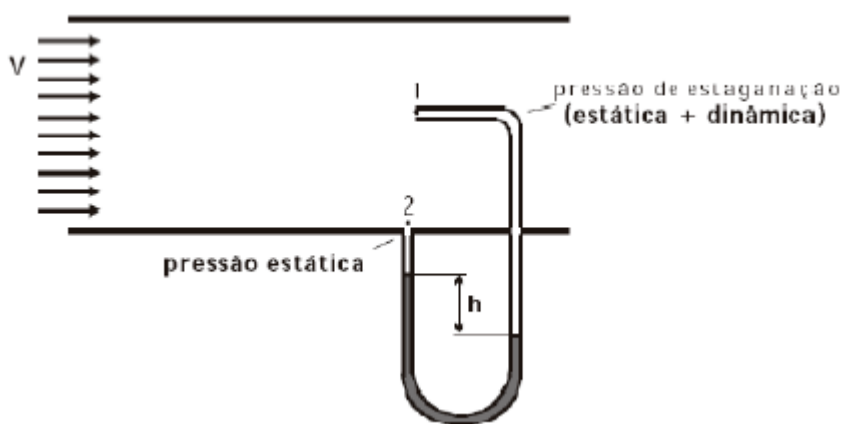


Figura 6 Funcionamento de um modelo do anemómetro de tubo de pressão [67]

A grande vantagem do anemómetro tubo de pressão é o facto de ser facilmente construído a um custo muito reduzido, quando comparado com outros sensores disponíveis no mercado e praticamente não necessita de calibração [67]. Como limitações, este tipo de sensor tem uma precisão e resolução espacial insuficientes para algumas aplicações, o seu

tubo tem de estar perfeitamente alinhado com a linha de escoamento do ar e para que os resultados sejam confiáveis, é necessário que se tenha muito rigor na sua construção.

### 2.3.3. ANEMÓMETRO DE DEFLEXÃO

Trata-se do primeiro aparelho destinado à medição da velocidade do vento de que se tem registo. É conhecido como anemómetro de *Da Vinci*, pois muitos atribuem a sua invenção ao cientista italiano *Leonardo Da Vinci* [68].

O anemómetro de deflexão é facilmente construído, visto ser constituído apenas por uma chapa metálica em que um dos seus lados fica solto e outro preso à ponta do arco que a constitui. Na Figura 7, pode-se observar que a chapa é montada sobre uma escala logarítmica.



**Figura 7 Anemómetro de deflexão [67]**

Para além da sua construção ser simples, o seu funcionamento também o é. Basicamente, o vento incide sobre a chapa metálica, a qual deflectirá em função da magnitude da velocidade do vento.

No entanto, este tipo de anemómetro tem uma grande característica desfavorável associada, a incerteza do mesmo é muito grande quando comparada aos anemómetros comerciais dos dias de hoje.

#### 2.3.4. ANEMÓMETRO TERMOELÉCTRICO

O anemómetro termoeléctrico usa a troca de calor para determinar a velocidade de um fluído, no caso do vento, o ar [67]. A troca de calor é feita através de um fio que seja condutor de calor e o próprio fluído medido. O fio é então aquecido e exposto ao fluído a ser medido. Assim a velocidade do fluído (neste caso do ar) fica proporcional à quantidade de calor retirada do fio quente. Na Figura 8, pode-se observar o aspecto que este tipo de anemómetro tem.



**Figura 8** Anemómetro térmico digital [1]

As principais vantagens deste tipo de anemómetro são: não possuir partes móveis, ter um tamanho reduzido quando comparado com os anemómetros rotacionais, além de possuir maior sensibilidade para baixas velocidades do vento [67]. Porém, é de natureza muito frágil e os seus parâmetros são muito sensíveis às partículas de poluição depositadas no fio, o que implica directamente a necessidade de recalibração e custo elevado.

### 2.3.5. ANEMÓMETRO LASER

Este anemómetro usa o efeito *Doppler* causado pelo movimento de partículas que atravessam as franjas formadas pelo cruzamento de dois feixes de raios Laser. Tal sistema é chamado de LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) e funciona através do cruzamento de dois feixes de raios laser. No ponto de cruzamento são criadas franjas, conforme se pode identificar na Figura 9. O volume  $\lambda$ , com dimensão muito reduzida, é colocado sobre o escoamento do fluído a ser medido.

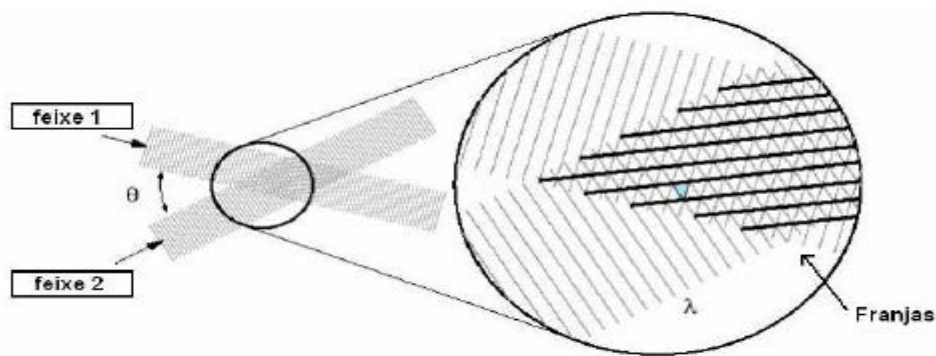


Figura 9 Formação da intersecção dos feixes e formação das franjas [67]

As micro-partículas de poluição deste fluído acabam por passar pelas franjas, também chamadas de franjas de *Fresnell*. Isto faz com que a luz seja desviada no momento em que é atravessada pelas franjas, o que implica um pequeno desvio de frequência devido ao movimento das partículas, fenómeno chamado de Efeito de *Doppler*. Assim, dispositivos ópticos conseguem detectar estes desvios e associá-los à velocidade do fluído, de tal forma que a razão com que estas partículas atravessam as franjas seja proporcional à velocidade de escoamento do fluído [67].

A principal vantagem deste anemómetro é que ele consegue medir uma vasta gama de velocidade de escoamento de líquidos e gases, isto é, desde  $\mu\text{m/s}$  até velocidades supersónicas. Possui também precisão e resolução espacial elevadas. Porém tem um custo bastante elevado.

### 2.3.6. ANEMÓMETRO ULTRA-SÓNICO

Este anemómetro funciona explorando um princípio conhecido: o movimento das partículas do ar afecta a velocidade de uma onda acústica, com frequência ultra-sónica. É constituído por uma fonte sonora, transdutor transmissor e uma fonte colectora de energia, transdutor receptor, separados por uma distância de alguns centímetros. A onda sonora é emitida pelo transmissor e depois disso é recebida no sensor receptor. O tempo necessário para que o sinal ultra-sónico saia do transmissor e alcance o receptor depende da velocidade de deslocamento do ar em movimento no espaço entre cada um deles.

Este é formado por, pelo menos, um par de transdutores ultra-sónicos, os quais são constituídos por um material que reage à diferença de potencial no momento em que são expostos a pressões mecânicas e vice-versa [67]. Na Figura 10 é apresentado um exemplo de um anemómetro ultra-sónico comercial, no qual se pode observar o conjunto de sensores ultra-sónicos no topo do anemómetro.



**Figura 10 Modelo de um anemómetro ultra-sónico [5]**

As principais vantagens deste tipo de anemómetro são: boa exactidão, resposta sistémica rápida (depende do tempo gasto pelo deslocamento da onda ultra-sónica e dos atrasos electrónicos que são geralmente muito pequenos), não mantém contacto e nem obstrui o fluxo do fluído medido, apresenta linearidade numa grande faixa de frequências. A única desvantagem deste tipo de anemómetro é o seu custo, apesar de ser um dos melhores tipos de sensores para a medição do vento [67].

### **2.3.7. O TIPO DE ANEMÓMETRO UTILIZADO**

O anemómetro que foi utilizado em todo o projecto desta tese foi o anemómetro do tipo “copos”. Embora pudesse ser apetecível um outro tipo de anemómetro, por motivos de restrição financeira e porque este tipo de anemómetro ser igualmente o tipo de anemómetro utilizado e sugerido pelo NREL – USA (*National Renewable Energy Laboratory*) e pela norma IEC 61400 para o tipo de recolha de dados que esta tese encerra em si, esta foi uma opção incontornável. No Capítulo 4, irá ser explicada a forma como se utilizou o mesmo para a recolha de dados.

## **2.4. MEDIÇÃO DO VENTO DE ACORDO COM A NORMA IEC**

Quando se trata de elaborar certificados sobre o estudo do potencial eólico de determinado local, por exemplo para uma empresa, esses mesmos certificados devem seguir normas específicas para que do estudo efectuado seja possível a comparação dos resultados.

Uma norma muito utilizada é a norma IEC 61400 (*International Electrotechnical Commission*), onde para além dos equipamentos certificados que devem ser utilizados, se indica igualmente o procedimento que deve ser adoptado, o cálculo de incertezas a efectuar, entre outros. Para além desta norma, o NREL, que tem por objectivo o desenvolvimento da energia renovável e de tecnologias de eficiência energética, também possui metodologias indicadas para, por exemplo, efectuar a medição do vento [24]. Nesse mesmo documento é descrita como devem ser realizadas as medições, por exemplo, o intervalo entre amostras, que segundo o NREL, deve ser de 10 minutos, o tempo total de medição que deve de ser entre 1 a 2 anos e o equipamento de medida e sensores a serem utilizados.

O propósito da norma IEC 61400 é o de fornecer uma metodologia uniforme que garanta a precisão, consistência e reprodutibilidade na medição e análise do desempenho que determinada turbina eólica terá no local de estudo. Fornece a orientação na medição, análise e elaboração de relatórios sobre o desempenho das turbinas eólicas. Desta forma, esta norma beneficia as partes envolvidas na fabricação, instalação, licenciamento, operação, utilização e regulamentação das turbinas eólicas.

De forma sucinta, os aspectos que esta norma recomenda que sejam tidos em conta, são:

localização do mastro meteorológico para a medição do vento

ter em conta o raio de actuação do vento, i.e. se não tem muitos obstáculos ou mesmo outras turbinas eólicas perto

realizar correcções, se necessárias, de modo a minimizar distorções originadas pela topografia do local

medição do vento, utilizando um anemómetro de copos (devidamente certificado) de modo a medir a velocidade e a direcção do vento

medição da densidade do ar, medindo para isso a temperatura do ar e utilizando a equação conhecida da densidade do ar para determinar a mesma

Para mais informações sobre a metodologia desta norma, esta pode ser consultada na referência documental [38].



### 3. TIPOS DE TURBINAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA – ESTADO DA ARTE

Com o passar dos anos, é cada vez maior o número de geradores eólicos instalados em todo o mundo. No entanto, a maioria desses geradores eólicos são de um tipo particular de turbina – turbina de eixo horizontal HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*). Porém, existe em muito menor número, um outro tipo de turbina – turbina de eixo vertical VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*). Neste capítulo, irá ser efectuado um estudo comparativo dos dois tipos de turbinas existentes, evidenciando os aspectos que os diferenciam, e realçando todas as capacidades das VAWTs, bem como o porquê das mesmas poderem ser um melhor meio para produzir energia eléctrica a partir do vento em situações específicas.

#### 3.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA

A energia eólica é uma importante fonte de energia amiga do ambiente e tem-se tornado ainda mais importante nos últimos anos. A quantidade de energia eólica instalada aumenta de ano para ano e muitos países têm feito planos para fazer grandes investimentos nesta área - Portugal incluído.

Numa perspectiva histórica, desde há muito tempo que o vento tem sido utilizado como fonte de energia, por exemplo, nos barcos à vela. Os primeiros moinhos foram usados pelos persas cerca de 900 aC [8]. Curiosamente, esses primeiros moinhos possuíam VAWTs como meio de accionamento. A seguir podemos ver um exemplo de um desses

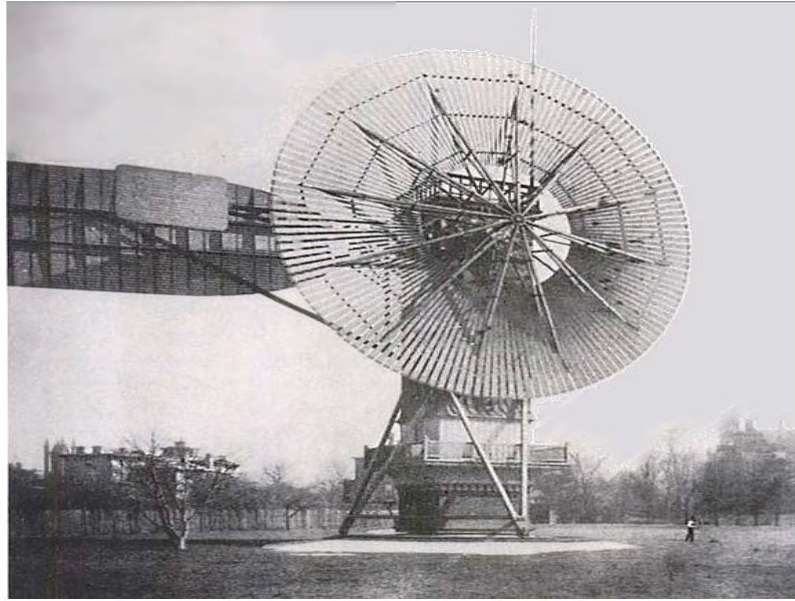
moinhos no Afeganistão Figura 11. Este tipo de moinho surge especificamente na região Este do Irão e na região Oeste do Afeganistão.



**Figura 11 Moinho de vento de eixo vertical para a moagem de cereais [58]**

Durante a idade média, foram construídos moinhos na Europa, mas estes já eram de eixo horizontal – HAWTs, e eram usados para tarefas mecânicas, como bombeamento de água ou moagem de grãos de cereais. Como seria de esperar, após a revolução industrial, estes moinhos foram gradualmente perdendo popularidade.

Uma das primeiras tentativas de gerar electricidade utilizando o vento foi realizada por *Charles Brush*, nos Estados Unidos, em 1888. A turbina desenvolvida por *Charles Brush* tinha 60 metros de altura, diâmetro de 56 metros e uma potência máxima de 12 kW, como se pode observar na Figura 12.



**Figura 12** Primeira turbina eólica automática do mundo, desenvolvida por *Charles F. Brush*, em 1888 [59]

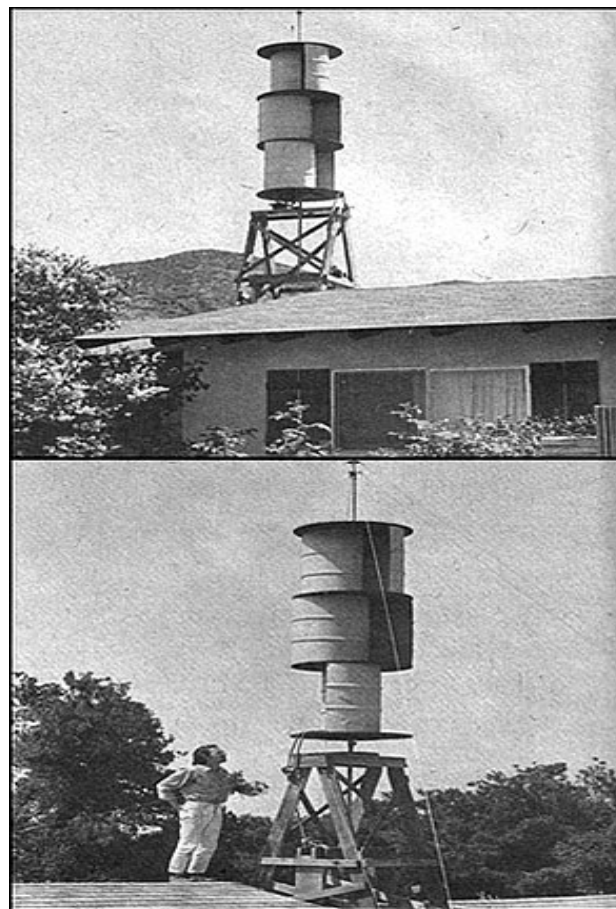
Para além de *Charles Brush*, outras individualidades da época construíram também turbinas eólicas, tal era o interesse que despertavam tais turbinas. Uma das turbinas importantes desenvolvida naquela época, para além da de *Charles Brush*, foi a de *Marcellus Jacobs*. Esta turbina tinha três pás em forma de perfil de “asa de avião”, uma bateria de armazenamento de energia e um sistema que orientava a turbina de acordo com a direcção do vento, como se pode ver na Figura 13.



**Figura 13** Turbina eólica de eixo horizontal desenvolvida por *Marcellus Jacobs*, rotor de diâmetro de cerca de 4 m e potência entre 1.8 a 3 kW, 1932 [58]

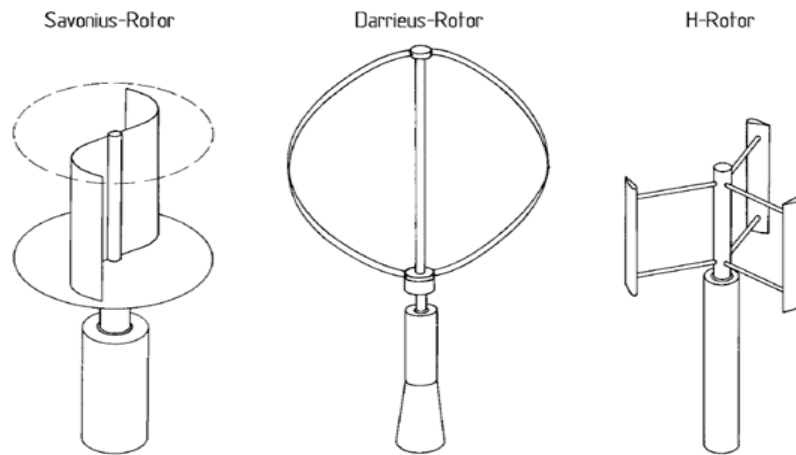
Durante o século XX, as HAWTs continuaram a evoluir, até chegarem ao estado tecnológico em que actualmente se encontram [8].

Por outro lado, as VAWTs tiveram um desenvolvimento paralelo com as HAWTs, mas com muito menos interesse e apoio financeiro. Uma das turbinas mais importantes desenvolvidas naquela época foi a *Savonius*, ver exemplo na Figura 14, em 1922, desenvolvida por *S.J. Savonius* [2].



**Figura 14 Turbina *Savonius* [6]**

Trata-se de um rotor em forma de “S”, ver Figura 15, que basicamente opera de maneira semelhante a um anemómetro de copos. É simples em termos de estrutura, funciona com velocidades de vento baixas e algo que a diferencia dos outros tipos de turbinas VAWT é o facto de possuir sempre binário de arranque [7]. Apesar de não haver tanta comercialização como outras turbinas de eixo vertical, as *Savonius* são as que têm mais estudos realizados sobre a geometria e eficiência das mesmas [11].



**Figura 15 Turbinas de eixo vertical – Savonius, Darrieus, H-Rotor [58]**

Em 1931, *Georges Darrieus*, patenteou a ideia de ter uma VAWT com pás rectas ou dobradas, ver Figura 15 [9]. Durante os anos 1970 e 1980 as máquinas de eixo vertical voltaram à ribalta quando o Canadá e os Estados Unidos construíram vários protótipos de turbinas *Darrieus*. Tudo começou em 1973 quando o *Sheik Yamani* se posiciona como elemento chave do cenário petrolífero mundial, no centro do primeiro grande choque petrolífero do planeta, choque esse que empurrou grandes nações como os EUA para a procura de soluções de produção de energia que não dependessem do petróleo. Nesse momento, a energia eólica apresenta-se como uma área de investigação e de desenvolvimento imperativa. Os protótipos desenvolvidos naquela altura mostraram-se muito eficientes e confiáveis [2]. De acordo com um relatório da *Sandia National Laboratories*, nos Estados Unidos, as VAWTs acabaram por não vingar na altura, essencialmente, devido ao fraco mercado de energia eólica no Estados Unidos [10] e, sobretudo, devido a problemas de fadiga mecânica dos materiais então disponíveis para a construção das pás. A última VAWT da *Sandia* foi desmantelada em 1997, depois de terem encontrado fendas na sua fundação. Em 1980, e durante essa década, a empresa americana *FloWind* comercializou a turbina *Darrieus* e construiu vários parques eólicos utilizando a mesma, tendo estas funcionado bem, ver Figura 16. Porém também aqui começaram a surgir problemas devido à fadiga das pás, que tinham sido projectadas para serem flexíveis. Foi, aliás, devido também a esse problema de fadiga das pás, actualmente já ultrapassado, que as VAWTs passaram para segundo plano em detrimento das HAWTs.

Hoje, com os avanços na investigação e desenvolvimento na área dos materiais compósitos e ligas metálicas, juntamente com a banalização de acesso a esses tipos de materiais, as questões de fadiga mecânica de outrora já não se colocam. Tornou-se, pois, possível, ultrapassar todos os inconvenientes técnicos do passado no que se refere às VAWTs.



**Figura 16** Parque eólico com turbinas eólicas *Darrieus* da *Flowind* nas montanhas de *Tehachi*, EUA, 1986 [58]

A *Eole*, uma turbina *Darrieus* de 96 m de altura construída em 1986, foi a maior turbina VAWT construída na época e tinha uma potência máxima de 4 MW, ver Figura 17 [13]. Chegou mesmo a produzir 12 GWh de energia eléctrica durante os 5 anos que esteve em funcionamento, tendo chegado a níveis de potência de até 2.7 MW. Esta máquina acabou por ser desmantelada em 1993 devido a uma falha do rolamento inferior.



**Figura 17 Turbina *Darrieus Eole* ,4 MW de potência, *Hydro-Québec*, Canadá, 1987 [58]**

*Darrieus*, também patenteou uma VAWT, mas de pás rectas. Esta turbina é, geralmente, referida de *H-rotor*, ver Figura 18 [9].



**Figura 18 Turbina *H-rotor*, com um rotor de diâmetro 35 m e 300 kW de potência nominal [58]**

O maior *H-rotor* construído no Reino Unido foi uma máquina de 500 kW, projectada em 1989 [16]. Na década de 1990, a empresa alemã *Heidelberg Motor GmbH* trabalhou no desenvolvimento de *H-rotors*, e chegaram a construir protótipos de 300 kW [17,18].

Como se pode constatar através do que foi escrito até ao momento, em 2011, a tecnologia das HAWT é uma tecnologia “madura” e a das VAWT não. Os actuais investigadores apontam como cerne da questão o facto de as VAWT não serem piores do que as HAWT, apenas estão menos estudadas, em termos de I&D (Investigação & Desenvolvimento) e apresentam campos de aplicação em que se destacam pela positiva de forma inequívoca contrariamente às HAWT (como se irá ver mais à frente nesta tese).

### 3.2. COMERCIALIZAÇÃO DE VAWTs

Existem várias empresas que comercializam máquinas baseadas na tecnologia VAWT. A *Canadian Company Sustainable Energy Technologies* vende uma turbina *Darrieus* com uma potência nominal de 250 kW, chamada de *Chinook 2000* [21], ver figura seguinte.



**Figura 19 Chinook 2000 – pormenor das pás e da estrutura [70]**

Existem também duas equipas de investigadores, que trabalham com uma geometria algures entre a turbina *Darrieus* e *H-rotor*, que estão actualmente a comercializar máquinas desse tipo. A primeira turbina de uma dessas equipas de investigadores é da Holanda e é chamada de *Turby* [22] e a segunda turbina também dessa equipa de investigadores é da Rússia e é chamada de *Wind-Sail* [32], ver Figura 20.



Figura 20 Turbina Turby [22] e turbina Wind-Sail [32]

Uma outra empresa que também comercializa turbinas de eixo vertical é a *Ropatec* [26], onde se pode adquirir turbinas de potência de 6 kW, do tipo *H-rotor*, com duas ou quatro grandes pás e uma estrutura extra aerodinâmica no centro do rotor, Figura 21.



Figura 21 Turbina de eixo vertical do tipo *H-rotor* da *Ropatec*, potência 6 kW [26]

O mercado mundial tem sido abordado sobre a construção e evolução tecnológica das VAWTs. A empresa Alemã, *Nehauser*, desenvolveu uma VAWT do tipo *H-rotor* e chegou a instalá-la no topo de um telhado em Munique. A maior turbina produzida por esta empresa tem uma potência nominal de 40 kW [27]. Muitas outras empresas, encontram-se

actualmente a trabalhar na realização de turbinas do tipo *H-rotor* [29-32]. Relativamente às *Savonious* não existe comercialização efectiva (possivelmente devido ao baixo coeficiente de potência – um parâmetro crucial na avaliação de turbinas eólicas, adiante explicitado - mas com base em estudos efectuados sobre as mesmas, existem diversas equipas de investigadores e alguns “amadores” que constroem essas turbinas.

### 3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A potência (na realidade potência mecânica),  $P$ , que pode ser extraída ao vento por uma turbina eólica pode ser encontrada através da seguinte fórmula matemática:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (1)$$

onde  $C_p$  é o coeficiente de potência (adimensional),  $\rho$  é a densidade do ar em  $kg/m^3$ ,  $A$  em  $m^2$  é a área varrida pela turbina e  $v$  é a velocidade do vento em  $m/s$ .

O  $C_p$  representa o rendimento efectivo de conversão aerodinâmico da turbina de vento, ou seja, a razão entre a potência desenvolvida pela turbina e a potência total presente no vento, tratando-se de uma função da relação da velocidade específica na ponta da pá (*tip speed ratio*)  $\lambda$ , que é a razão entre a velocidade tangencial específica na ponta da pá do rotor e a velocidade do vento. Trata-se de um parâmetro muito importante pois permite verificar quando se obtém a eficiência máxima do rotor para determinada velocidade do vento, sendo definido por:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2)$$

onde  $\omega$  é a velocidade de rotação da turbina,  $R$  é o raio da turbina e  $v$  é a velocidade do vento. E o factor  $\omega R$  é denominado de velocidade tangencial em rad/s.

A solidez,  $\sigma$ , é definida como sendo a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas mesmas. Na figura seguinte, estão representados diferentes tipos de solidez de uma turbina eólica.

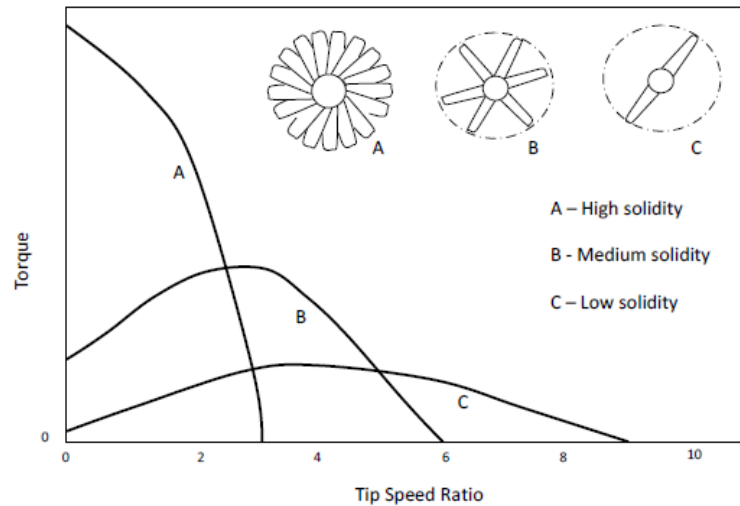


Figura 22 Diferentes tipos de solidez de uma turbina eólica [7]

Existem diferentes definições para diferentes tipos de turbinas. Para uma HAWT, a solidez é definida como:

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R} \quad (3)$$

onde  $B$  é o número de pás e  $c$  é o comprimento de corda (*chord length*). Para uma VAWT, a solidez é definida como:

$$\sigma = \frac{Bc}{R} \quad (4)$$

### 3.4. ESTUDO COMPARATIVO

As turbinas de vento que irão ser consideradas neste estudo comparativo são as HAWT tipo hélice, e as VAWTs *Darrieus*, *H-rotor* e *Savonius*. Alguns aspectos que irão ser considerados são: dinâmica estrutural, sistemas de controlo, manutenção, fabricação e equipamentos eléctricos. Por vezes, irão ser comparadas VAWTs com HAWTs, e mesmo dentro das VAWTs irão ser feitas considerações sobre as diferenças existentes entre as mesmas, sempre que tal se justifique.

As principais diferenças estão resumidas na Tabela 2.

**Tabela 2 Síntese das diferenças mais relevantes das turbinas em análise: *H-rotor*, *Darrieus*, *Savonius* e HAWT**

	<i>H-rotor</i>	<i>Darrieus</i>	<i>Savonius</i>	HAWT
<i>Perfil das pás</i>	Simple	Complexo	Simple	Complexo
<i>Necessidade de mecanismo de orientação</i>	Não	Não	Não	Sim
<i>Possibilidade de controlo de potência do tipo “pitch”</i>	Sim	Não	Não	Sim
<i>Torre</i>	Sim	Não	Não	Sim
<i>Cabos de tensão</i>	Opcional	Sim	Opcional	Não
<i>Ruído</i>	Baixo	Moderado	Baixo	Elevado
<i>Área varrida pelas pás</i>	Moderada	Grande	Moderada	Pequena
<i>Posição do gerador</i>	No solo	No solo	No solo	Topo da torre
<i>Binário de arranque</i>	Não	Não	Sim	Sim
<i>Tamanho das fundações</i>	Moderada	Simple	Simple	Elevada
<i>Estrutura global</i>	Simple	Simple	Simple	Complexa

### 3.4.1. DESIGN E MECANISMO DE ORIENTAÇÃO

A principal diferença entre as VAWTs e HAWTs é a capacidade das VAWTs aceitarem vento oriundo de qualquer direcção, i.e. são omni-direccionais. Tal permite às VAWTs não necessitarem de um sistema de orientação, que é caro e pode falhar durante o funcionamento, reduzindo desta forma os custos associados à instalação, operação e manutenção do sistema de orientação. Sem o mecanismo de orientação, as perdas de energia associadas à mudança de posição da turbina, quando o vento muda de direcção, deixam de existir [33]. Uma turbina omni-direccional pode ser colocada em locais onde o vento é turbulento e muda frequentemente de direcção. Por este motivo, as VAWTs são indicadas para áreas de alta montanha, com ventos fortes ou rajadas e igualmente em áreas urbanas, onde a geração de energia deve ser efectuada o mais próximo possível dos consumidores, com ventos turbulentos e/ou ventos canalizados pela estrutura construída

envolvente. Na Figura 23, pode-se visualizar um modelo numérico do vento quando o mesmo embate num edifício. Repare-se na turbulência gerada pelo edifício. As HAWT de pequenas dimensões (não as de tipo “*utility scale*” ou seja de produção em grande escala de energia eléctrica) têm igualmente o inconveniente de serem ruidosas. Ora este tipo de ruído, que se transmite desconfortavelmente à envolvente e interior dos edifícios que as adoptaram, não se verifica com as turbinas de eixo vertical – VAWT, tornando-as, no contexto urbano ainda mais apetecíveis face às suas congéneres de eixo horizontal.

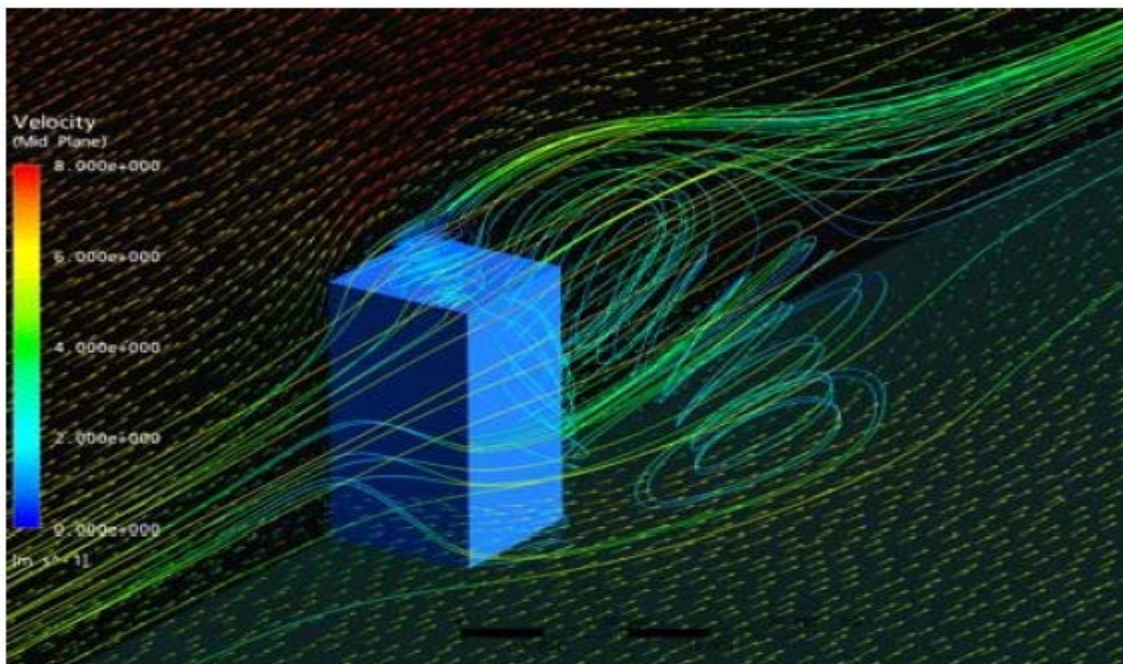


Figura 23 Modelo numérico de um edifício em que o fluxo de vento embate contra o mesmo [7]

A título de curiosidade, as VAWTs, têm sido propostas como sendo parte da fonte de energia do edifício a ser construído no local das antigas Torres Gémeas, em Nova York [4].

### 3.4.2. ORIENTAÇÃO RELATIVAMENTE AO EIXO

As VAWTs permitem que o gerador possa ser localizado na parte inferior da torre. Isto faz da instalação, operação e manutenção, acções muito mais fáceis. Desta forma, a torre pode ser mais leve uma vez que a *nacelle* pode ser excluída, o que reduz as cargas estruturais e os problemas com a montagem da torre. O *design* do gerador pode ser focado

na eficiência, minimizando o custo e a manutenção, em função do tamanho do gerador. O sistema de controlo também pode ser localizado ao nível do chão para facilitar o acesso [33].

### **3.4.3. MECANISMO DE ACCIONAMENTO DIRECTO**

O accionamento directo é uma solução utilizada onde a turbina é directamente, através de um eixo, acoplada ao rotor do gerador. Ao usar um gerador de accionamento directo, a caixa de velocidades deixa de ser necessário ao sistema. De notar que, com o passar do tempo, à caixa de velocidades, está normalmente associada a degradação e a necessidade de manutenção [34]. O sistema global fica também mais simples e fácil de instalar sem a caixa de velocidades, havendo igualmente um reflexo positivo ao nível do rendimento do sistema, já que, qualquer estrutura de desmultiplicação implica a diminuição do rendimento global do sistema devido a um maior atrito mecânico, que se sobrepõe negativamente à vantagem de maior F.E.M. – Força Electromotriz - gerada. Existem diversas empresas que trabalham com geradores de accionamento directo para HAWTs, por exemplo, a *Enercon*, que é fabricante líder no mercado das turbinas eólicas de grande potência [36].

### **3.4.4. ASPECTOS DE CONSTRUÇÃO**

As pás de uma HAWT têm que ter auto-sustentação, visto só estarem ligadas num ponto principal. As pás de uma *H-rotor* são suportadas por braços de apoio, que geralmente são ligados ao centro das pás. No entanto, os braços de apoio também adicionam mais peso à estrutura.

As pás de uma *H-rotor* e das *Savonious* (no caso de ser uma *Savonious* de pás rectas) são muito mais fáceis de fabricar do que as pás de uma HAWT ou mesmo duma turbina *Darrieus*, sobretudo porque tanto nas HAWTs como nas *Darrieus*, as pás têm forma diferente ao longo do comprimento e até podem ser torcidas, fazendo com que o processo de fabrico das mesmas seja mais complexo. Na figura seguinte, pode-se ter a noção do ambiente de produção e fabricação das pás de turbinas eólicas, da empresa *Enercon*.

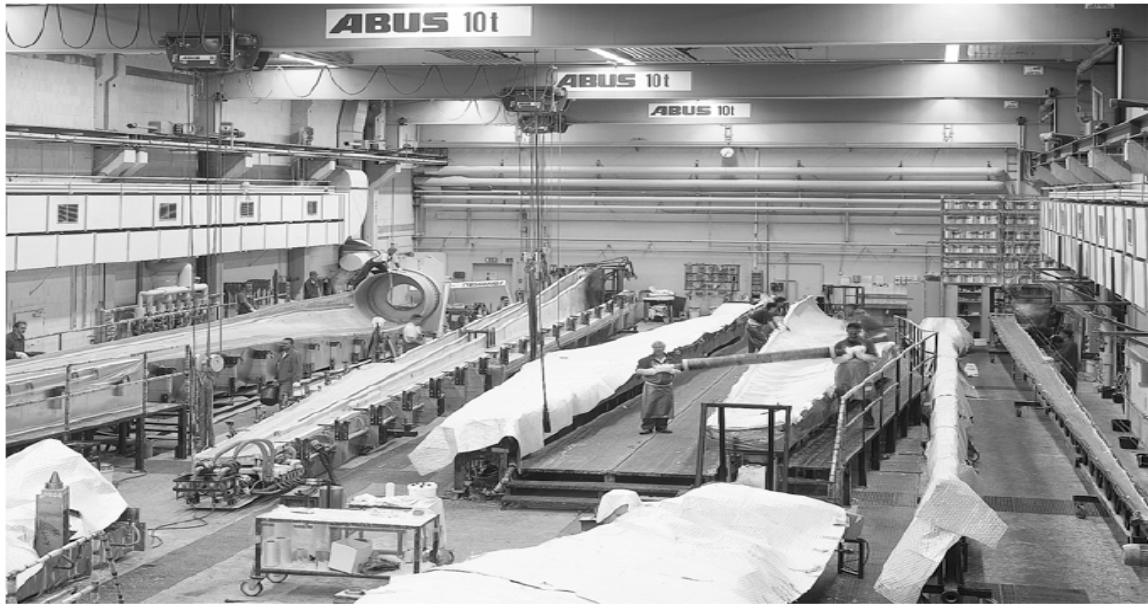


Figura 24 Ambiente de produção e fabricação das pás de turbinas eólicas, da empresa *Enercon* [58]

O perfil das pás nas *Darrieus* é um perfil de “asa de avião” e a sua construção segue os critérios dos perfis NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*). Na Figura 25 tem-se uma imagem das pás da turbina *Darrieus* da *Flowind*.



Figura 25 Pás dos rotores *Darrieus* da *Flowind* constituídas por alumínio [58]

Um perfil NACA corresponde ao desenho otimizado de um perfil aero/hidrodinâmico, conforme definido pela *National Advisory Committee for Aeronautics* e caracteriza-se pelos seguintes parâmetros, podendo ser visualizado na Figura 26:

- comprimento de corda  $c$  (*chord length*)

- curvatura máxima  $f$  ou razão de curvatura  $\frac{f}{c}$ , em percentagem, como sendo a máxima curvatura sobre a linha média
- posição da curvatura máxima  $x_f$
- espessura máxima do perfil NACA,  $d$ , diâmetro máximo possível de uma circunferência a passar na linha média, ou espessura rácio/corda  $\frac{d}{c}$  (*thickness-to-chord ratio*) em percentagem
- posição da espessura máxima  $x_d$
- raio de ponta  $r_N$  (*nose radius*)
- coordenadas do perfil NACA  $z_u(x)$  e  $z_l(x)$ , dos contornos laterais superiores e inferiores, respectivamente.

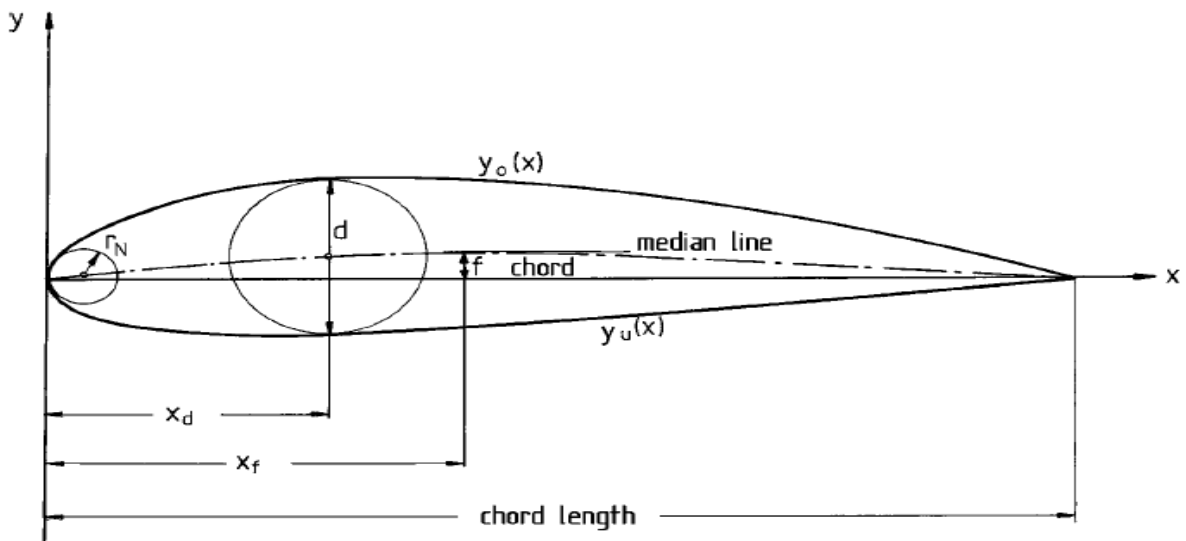


Figura 26 Características geométricas do perfil NACA [11]

Todos os valores referentes a um perfil NACA encontram-se catalogados em tabelas, seguindo uma nomenclatura restrita. Os perfis aerodinâmicos NACA possuem um código contendo dados sobre a geometria do perfil e também certas propriedades aerodinâmicas.

As famílias mais importantes em termos de perfil NACA são:

#### Perfil NACA de quatro dígitos:

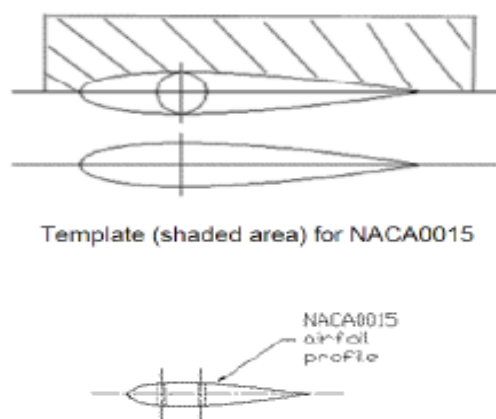
Primeiro dígito | flecha relativa em percentagem,  $\frac{f}{c}$

Segundo dígito	coordenada da flecha máxima, $x_m$ , dada por $\frac{10x_m}{c}$
Terceiro/Quarto dígito	espessura relativa em percentagem, $\frac{d}{c}$

**Perfil NACA de cinco dígitos:**

Primeiro dígito	valor aproximado de $\frac{2}{3} * 10(C_l)_{proj}$
Segundo/Terceiro dígito	coordenada da flecha máxima, $x_m$ , dada por $200x_m/c$
Quarto/Quinto dígito	espessura relativa em percentagem, $\frac{d}{c}$

No caso das turbinas *Darrieus*, o perfil NACA mais utilizado, para aproveitamentos energéticos, é o NACA0015, que de acordo com o perfil NACA significa: 00 que não tem curvatura, sendo simétrico relativamente à corda e o 15 significa que tem mais 15% de espessura comparativamente ao seu comprimento e o NACA0012, ver figura seguinte [7].



**Figura 27 Geometria do perfil NACA normalmente usado nas turbinas *Darrieus* [7]**

Ainda relativamente às *Darrieus*, como têm pás curvas, o seu transporte e fabrico torna-se mais elaborado [37]. Logo, uma mais valia para as *H-rotor* e para as *Savonius* de serem de pás rectas, consiste no facto de a sua produção em massa implicar baixos custos de

produção visto que, o seu *design* as torna por exemplo mais fáceis de produzir em grande número relativamente às HAWTs [19].

No caso das *Savonious*, constata-se um facto muito interessante que é o de existirem vários estudos sobre o *design* e as relações dimensionais óptimas de toda a turbina. Isto constitui uma vantagem face aos dois outros tipos de turbinas de eixo vertical que não possuem ainda estudos equivalentes, pelo menos em publicações científicas recentes. Na figura seguinte, encontra-se representado um esboço geométrico das grandezas caracterizadoras deste tipo de turbina, de acordo com esses mesmos estudos.

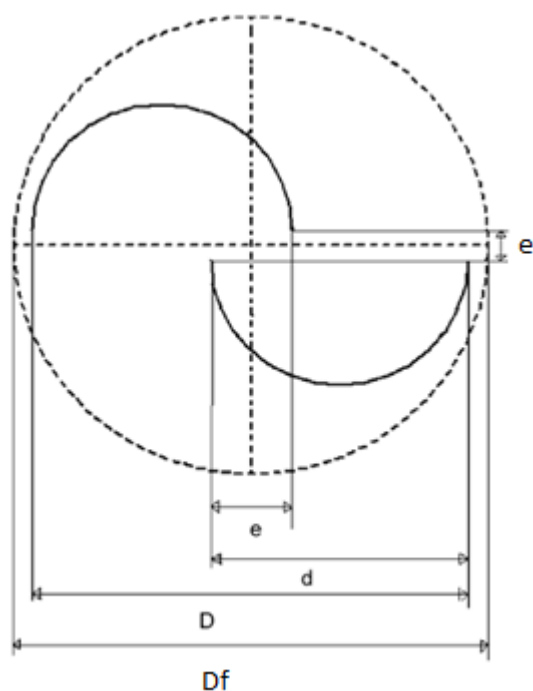


Figura 28 Modelo geométrico da turbina *Savonious* de duas pás [11]

De seguida são apresentados os parâmetros caracterizadores da turbina *Savonious*, de acordo com a figura anterior.

### Nomenclatura

$$A_r = \frac{h}{d}$$

C

proporção em termos de dimensão das pás

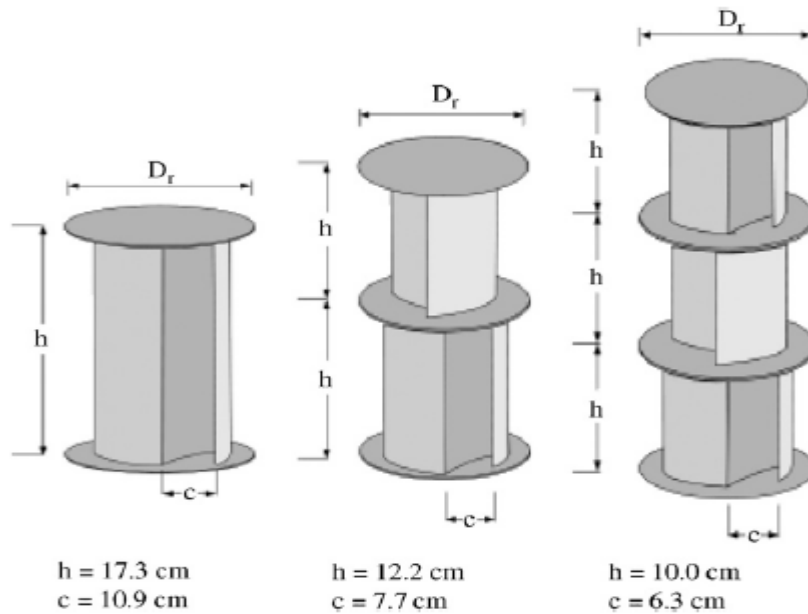
comprimento de corda das pás

d	diâmetro das pás
$D_f, D_0$	diâmetro dos extremos
D	diâmetro do rotor
E	diferença entre as duas pás: sobreposição principal
$e'$	outra diferença entre as duas pás: sobreposição secundária
H	altura das pás
$\beta = \frac{e}{d}$	relação de sobreposição das pás

De acordo com diversos estudos, a eficiência da turbina *Savonious* é tanto maior quanto maior for o valor de  $A_r$ . O valor de  $A_r$  deve de ser de aproximadamente 4.0 para o melhor  $C_p$ , isto para um *bucket* de duas *Savonious*. Estudos revelaram também que para se obter um valor mais alto do  $C_p$ , o valor  $D_f$  deve de ser 10% maior do que o valor  $D$ ,  $D_f = 1.1D$  [7].

No que diz respeito ao valor de  $\beta$ , para se obter maior eficiência da turbina *Savonious*, o mesmo deve de estar compreendido entre  $0.2 < \beta < 0.3$ . O valor do  $C_p$  diminui quando  $e'$  se afasta de zero. Logo, o ideal será ter  $e' = 0$  [7].

Ainda relativamente às *Savonious*, e no caso particular de estas não terem pás torcidas, há estudos que revelaram que quando se compara a *Savonious* de um único nível para modelos de dois ou três níveis, o melhor número de níveis revelou ser dois. E para o caso das *Savonious* de dois ou três níveis, os rotores devem ser sempre colocados de forma ortogonal entre si [7].



**Figura 29 Modelos das turbinas *Savonius* de um, dois e três níveis [11]**

No caso de se utilizar um único nível na *Savonius*, os referidos estudos revelaram também que, no caso da mesma ter pás torcidas, a eficiência é maior do que no caso de ter pás rectas. O mesmo se verifica no caso de se ter dois níveis, como se pode ver na ilustração da figura anterior. Em relação à geometria das pás, a mesma relaciona-se com o ângulo de torção. Todavia, não existem actualmente estudos que forneçam um número ideal para o ângulo de torção das pás da *Savonius*. Em termos do número de pás, estudos já revelaram que uma *Savonius* com duas pás tem maior eficiência do que uma de três pás. Em termos gerais, a *Savonius* “ideal” será de dois estágios com pás torcidas [7].

Por vezes, é afirmado, que as VAWTs não possuem torre e, portanto, situam-se sempre junto ao solo, onde o vento é baixo e turbulento. Mas tal afirmação não é necessariamente verdade, pois de facto as turbinas *Darrieus* estão realmente localizadas próximas do solo, e como têm um formato longo, faz com que o corte do vento seja perceptível, porém as *H-rotor* são normalmente situadas no topo de uma torre, tal como as HAWT, afim de alcançar ventos permanentemente mais intensos e menos turbulentos.

Com excepção das HAWTs, todas as VAWTs podem ter cabos de tensão para suportar o eixo da estrutura, tornando assim mais robusta a sua construção. A turbina *Darrieus* necessita sempre de cabos de tensão. No caso das *H-rotors* e das *Savonius*, esses cabos são opcionais, o que pode ser uma vantagem, por exemplo, no mar ou em áreas densamente povoadas, respectivamente.

Em termos de fundação, as *Darrieus* e as *Savonius* necessitam duma fundação mais simples comparada com a das outras duas turbinas, uma vez que não têm torre. As *H-rotors* necessitam duma fundação moderadamente profunda, mas por outro lado, as HAWTs necessitam duma fundação bastante mais profunda e duma base maior, visto terem uma torre com uma concentração de massa assinalável no topo.

#### **3.4.5. ESTRUTURA MECÂNICA**

As pás de uma HAWT estão sujeitas a cargas periódicas devido à erosão causada pelo vento, proporcionando fadiga das pás [8]. As pás da *H-rotor* estão sujeitas a grandes momentos de flexão, devido à aceleração centrípeta [39]. E comparando a *H-rotor* com a *Darrieus*, a primeira sofre muito maiores momentos de flexão do que a última devido às suas grandes pás rectas. Este efeito, porém, diminui à medida que se aumenta o tamanho da turbina pois a aceleração centrípeta diminui com o aumento do raio da turbina, considerando uma velocidade constante das pás.

Algumas das máquinas construídas nos anos 1970 e 1980 sofreram danos por fadiga das pás, devido essencialmente a tensões cíclicas aerodinâmicas sobre as pás rotativas. No entanto, essas pás eram feitas de alumínio, e actualmente as pás são compostas por compósitos com melhores propriedades perante efeitos de fadiga [43]. Com um material moderno e uma avaliação minuciosa das cargas aplicadas nas pás (sejam HAWTs ou VAWTs), os problemas com a fadiga das pás pode ser totalmente evitado, o que já se garante presentemente.

#### **3.4.6. TAMANHO**

Uma tendência no desenvolvimento da energia eólica tem sido o aumento do tamanho das turbinas. Além disso, o interesse pela energia eólica *off-shore* tem aumentado consideravelmente. Para aplicações *off-shore*, os custos de fundação e instalação são tão elevados que se torna mais económico fazê-lo com turbinas maiores [14]. Actualmente, as turbinas eólicas que constituem os parques *off-shore* de todo mundo são constituídas por HAWTs, ver Figura 30.



**Figura 30** Parque eólico *off-shore* *Middelgrunden*, perto da costa dinamarquesa de Copenhaga  
[58]

Porém, *Steven Peace*<sup>2</sup>, director da empresa *Eurowind Developments Ltd.* [31], acredita que é possível obter-se VAWTs de vários *Megawatt* de potência [12,44], curiosamente *Peter Musgrove*<sup>3</sup> já tinha também feito uma afirmação idêntica 20 anos mais cedo [14]. Ambos afirmam que as HAWTs já atingiram o seu tamanho máximo não sendo mais economicamente viável aumentar as mesmas [2,14]. A razão para isso é a força inversa que a gravidade impõe ciclicamente às pás e que aumenta com o tamanho da turbina. Para as VAWTs não existe tal limite, pelo que as VAWTs são um bom substituto para as HAWTs, em mercados *off-shore* [12,14].

Há igualmente quem defenda que o futuro das VAWTs não passa necessariamente pelo seu aumento de tamanho e potência, mas sim por se ter VAWTs mais pequenas mas mais optimizadas em termos de eficiência, tal como afirma *Riegler*<sup>4</sup> em [3]. *Riegler* chega mesmo a afirmar que as HAWTs actuais são tão económicas que poderia ser difícil de

---

<sup>2</sup> *Steven Peace* – É um engenheiro electromecânico director da empresa *Eurowind*, e autor de diversos artigos sobre as potencialidades das VAWTs face às HAWTs.

<sup>3</sup> *Peter Musgrove* – Escritor de diversos livros sobre a energia eólica e tipos de eólicas. Esteve também muito envolvido num programa no Reino Unido, entre 1970 e 1980, sobre o estudo do potencial das VAWTs. Chegou mesmo a ser presidente da BWEA (*British Wind Energy Association*) em 1978.

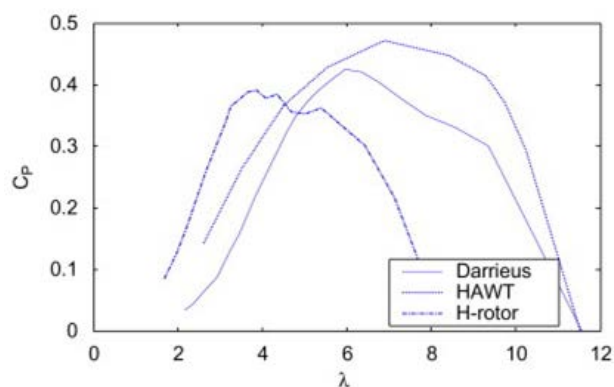
<sup>4</sup> *Hannes Riegler* – Colaborador da empresa *Ropatec* e escritor de diversos artigos abordando a questão das pequenas turbinas eólicas baseadas na tecnologia VAWT para aproveitamentos energéticos.

superar as mesmas com VAWTs, mas que as VAWTs mais pequenas podem desempenhar um papel mais relevante em áreas onde as HAWTs não funcionam tão bem, por exemplo, em zonas de montanha ou em regiões com ventos extremamente fortes ou rajadas, ou mesmo em topos de telhados de edifícios urbanos.

### 3.4.7. AERODINÂMICA E DESEMPENHO

O desempenho de uma turbina eólica depende do coeficiente de potência,  $C_p$ , que determina a quantidade de potência do vento que de facto é absorvida pela turbina. O valor teórico do coeficiente de potência máximo que uma turbina consegue absorver é chamado de limite *Betz* e é, no caso ideal, igual a 0.59 [8]. Para uma HAWT, o valor do  $C_p$  máximo está compreendido entre 0.40 e 0.50 [45]. É difícil afirmar um valor exacto do  $C_p$  máximo para VAWTs uma vez que existem poucas turbinas em operação e até ao momento, os estudos aerodinâmicos relativos a este tipo de turbinas é ainda muito escasso. Por esse motivo, apenas existem poucos estudos teóricos e experimentais, e nesses estudos o valor previsto do  $C_p$  máximo é de 0.40. Em 1987, *Musgrove* constatou, através de estudos teóricos e experimentais que as VAWTs tinham uma eficiência comparável às mais modernas HAWTs [14]. Se tivesse sido investido mais tempo e dinheiro na pesquisa e desenvolvimento das VAWTs, talvez a tecnologia das mesmas estivesse ao nível das HAWTs ou mesmo superior. Note-se que dos poucos valores que se tem do  $C_p$  das VAWTs os mesmos já datam de há quase 20/30 anos. Para além disso, tendo em conta o progresso em termos de materiais passíveis de serem usados e mesmo dos estudos de aerodinâmica feitos desde então, se aplicados às VAWTs, poder-se-ia aumentar ainda mais o desempenho das mesmas.

Na Figura 31, estão representadas curvas de energia ( $C_p=f(\lambda)$ ) para três das quatro turbinas em análise neste estudo comparativo.



**Figura 31** Curvas de  $C_p$  em função de  $\lambda$ , das turbinas *Darrieus*, HAWT e *H-rotor* [60]

O coeficiente de potência,  $C_p$ , mostrado na figura anterior em função velocidade específica na ponta da pá,  $\lambda$ , foi baseado em dados de diferentes fontes. O *H-rotor* é uma VAWT britânica 260, tem 100 kW e duas pás [15]. Os dados para a turbina *Darrieus* provêm da turbina *Sandia-34*, de 500 kW, desenvolvida e testada pela *Sandia National Laboratories* [46]. Os dados da HAWT provêm da *National Renewable Energy Laboratory*, dos EUA [45], tem como objectivo ser um modelo típico de uma HAWT.

Como se pode verificar pela figura, as três turbinas operam a diferente velocidade específica na ponta da pá. As VAWTs têm uma eficiência quase tão boa como as HAWTs. O valor de  $C_p$  elevado, pode, em certa medida, ser explicado pela grande experiência e desempenho otimizados que as actuais HAWTs têm. A turbina *Darrieus* é conhecida pelo facto de ter um menor  $C_p$  que as HAWTs. No entanto, *Paraschivoiu*<sup>5</sup> afirma que a diferença verificada no  $C_p$  da *Darrieus* comparada com a das HAWTs não é assim tão grande quanto isso e que o  $C_p$  da *Darrieus* pode ser melhorado usando um perfil de “asa de avião” melhorado. Tal como foi dito anteriormente, é usado um perfil NACA0015 e o NACA0012 no caso das *Darrieus*, no entanto, como poucos estudos foram feitos neste tipo de turbina, pode eventualmente haver um outro tipo de perfil de “asa de avião” que tenha vantagens face aos dois perfis utilizados actualmente, e que possam ser usados de forma a reduzir o arrasto [40].

*Roynarin* e a sua equipa de investigadores estudaram curvas de potência para um protótipo de um *H-rotor* e os resultados desses testes foram bastante promissores [33]. Os resultados

---

<sup>5</sup> *Ion Paraschivoiu* – Escritor de diversos livros sobre VAWTs, possui grande reputação no que a energia eólica diz respeito sobretudo pelas suas contribuições significativas para a teoria do desempenho aerodinâmico da turbina *Darrieus* de eixo vertical.

teóricos desse estudo revelaram um  $C_p$  máximo de 0.54 a uma velocidade específica na ponta da pá de 2.5 (m/s) para um pequeno *H-rotor*. Numa outra investigação realizada por *Agren* e a sua equipa de investigadores [42] também revelou resultados promissores para o desempenho do *H-rotor*. Os resultados foram tão bons que chegaram a colocar em causa o valor limite de *Betz*, em termos de coeficiente de potência das VAWTs. Num outro estudo, desta feita realizado por *Mertens* e a sua equipa, mostrou-se que o coeficiente de potência de um *H-rotor* é maior do que o coeficiente de potência de uma HAWT, quando o *H-rotor* era colocado no telhado de um edifício, com ventos turbulentos e intensos [23].

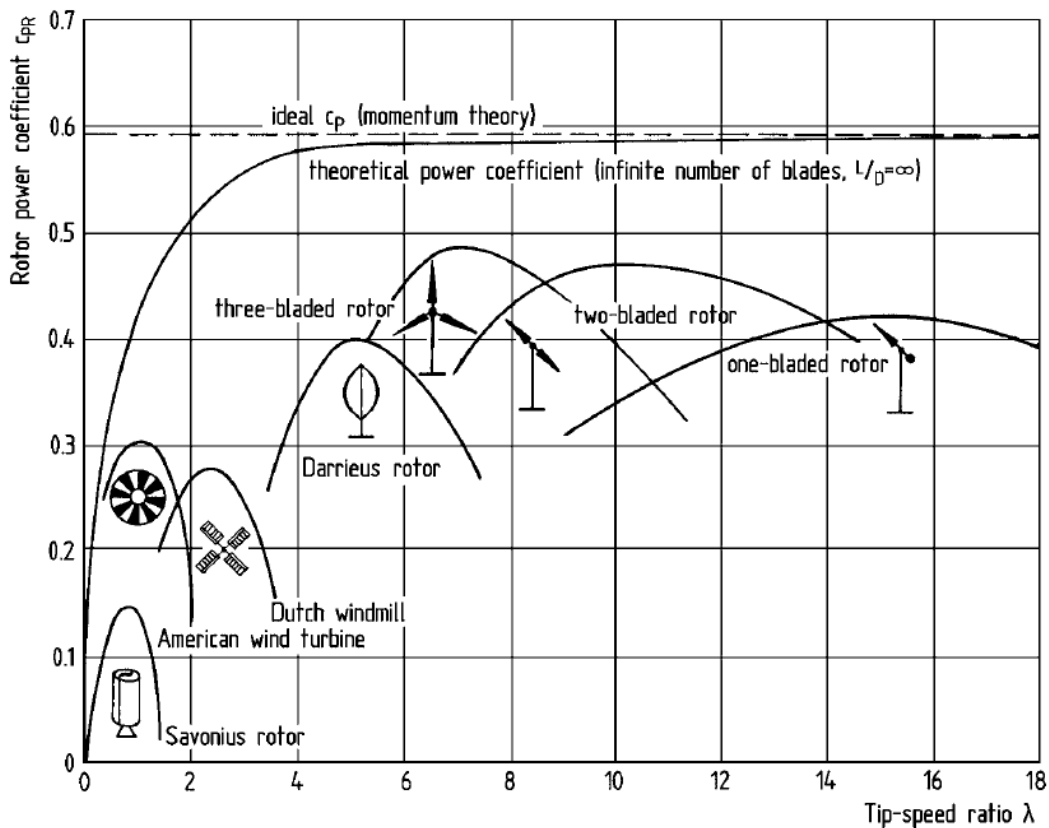


Figura 32 Coeficientes de potência de diferentes tipos de turbinas eólicas [58]

Resta ainda dizer, a propósito do  $C_p$ , que as *Savonius* são as que têm menor valor do  $C_p$ , ver Figura 32 [58]. No entanto, existem alguns estudos experimentais em que foi possível verificar um coeficiente de potência superior a 0.35, o que revela que possivelmente este tipo de turbina pode ser ainda bastante melhorado (note-se que os valores máximos deste turbina andam à volta de 0.15) [25]. Os rotores do tipo *Savonius*, têm uma alta solidez, e funcionam com uma baixa velocidade específica na ponta da pá. E, embora esteja mostrado teoricamente que o valor do pico de eficiência deste tipo de turbina não possa

ultrapassar os 20%, existem alguns estudos experimentais que mostraram que é possível obter-se um pico de eficiência de 31% em túneis de vento e 37% em fluxo de ar livre [25,28]. Ou seja, as *Savonious* não serão possivelmente as ideais para a indústria, onde existe elevado consumo energético porém, podem perfeitamente ser usadas para mercados domésticos, sendo utilizadas por exemplo no carregamento de baterias, e isto tudo com baixo custo, devido sobretudo à sua simplicidade de concepção.

### 3.4.8. CONTROLO DE POTÊNCIA

É crucial controlar a quantidade de potência que se consegue extrair do vento assim como parar a turbina em segurança quando o mesmo é demasiado elevado. O sistema de controlo mantém a velocidade de rotação constante no seu valor nominal, quando o vento é mais veloz do que o necessário para produzir energia em condições de segurança (sem comprometer toda a estrutura da turbina).

Esta tarefa de regulação pode ser efectuada por meios passivos, i.e., desenhando o perfil das pás de modo a que entrem em perda aerodinâmica (*stall*) a partir de determinada velocidade do vento, sem necessidade de variação do passo, ou por meios activos, i.e., variando o passo das pás (*pitch*) do rotor, ver Figura 33 [20].

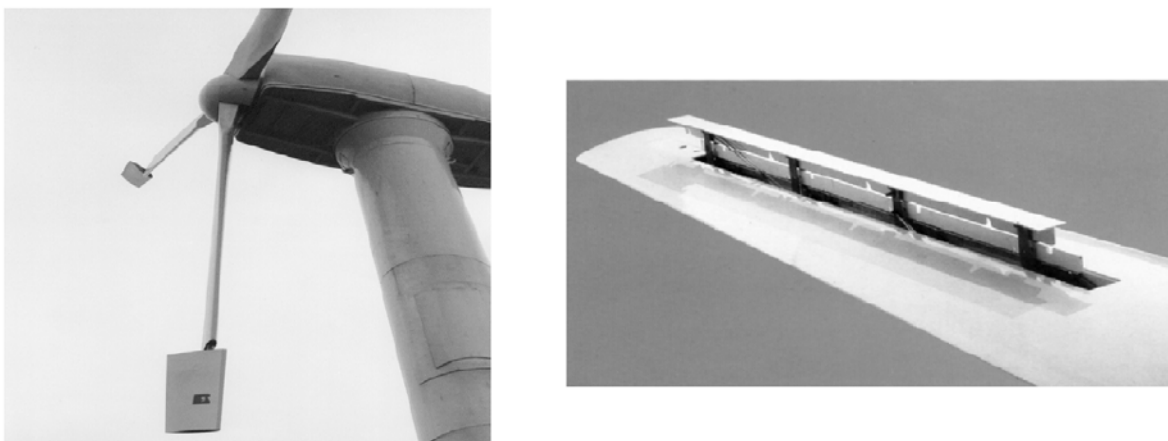


Figura 33 Exemplos de controlo de passo aplicados às HAWTs [58]

O controle de passo ou *pitch control*, ver Figura 34, é um sistema que normalmente necessita da informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal, ou seja, mudam o seu ângulo de passo de modo a reduzir o ângulo de ataque [20]. Ou seja, neste caso o  $C_p$  é dado em função de  $\lambda$  e  $\beta$ . E ao diminuir o  $\beta$ , este por sua vez diminui o  $C_p$ , diminuindo a potência produzida pela turbina.

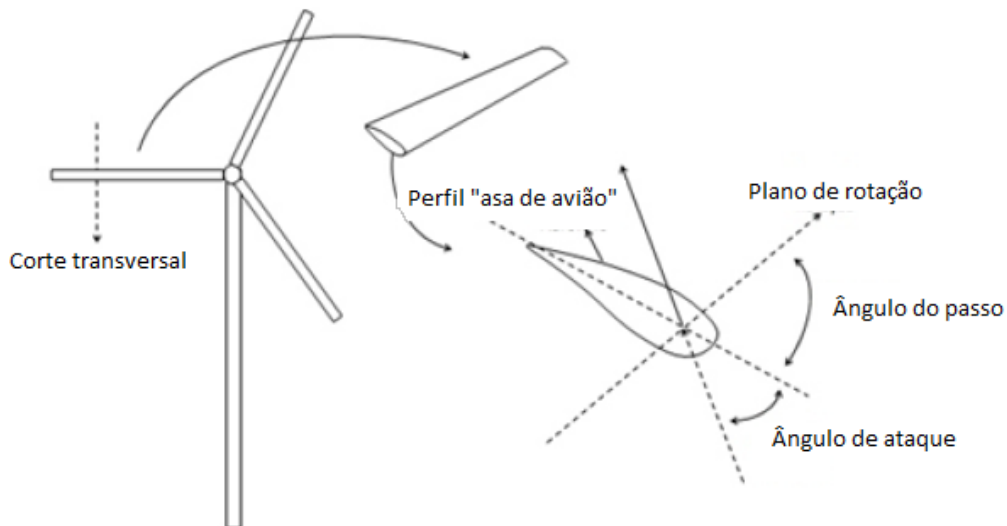
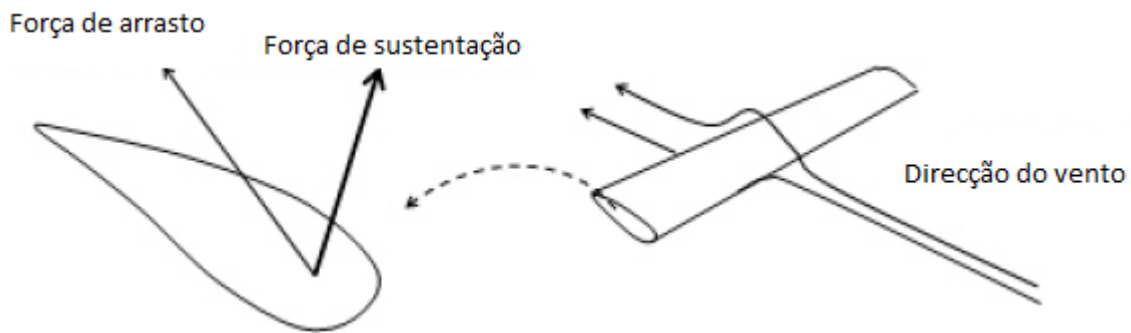


Figura 34 Ângulo de passo e de ataque [20]

Por outro lado, o controle por perda aerodinâmica ou *stall regulation*, é um sistema passivo em que a perda aerodinâmica das pás é controlada através do seu desenho, que só tem efeito para velocidades elevadas do vento. As pás do rotor são fixadas no ângulo de passo e não podem girar em torno do seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma a que, para velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor se afaste da superfície da pá, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto, ver figura seguinte.



**Figura 35** Forças de arrasto e sustentação [20]

Note-se também que, em alguns sistemas são utilizados freios que actuam directamente no sistema de transmissão de forma a complementar os sistemas de controlo. Para além disso, também são utilizados para bloquear a turbina quando o vento atinge valores capazes de comprometer a estabilidade de toda a estrutura.

A maior parte das HAWTs usa controlo de *pitch* ou de *stall* activo, mantendo assim todas as características de qualidade de potência do controlo tipo *stall*. Isto permite ainda a possibilidade da turbina eólica funcionar quase que exactamente com a mesma potência gerada para diferentes faixas de velocidade elevada do vento. Tais sistemas fazem com que o sistema de controlo seja mais complicado, assim como fica mais complexo o sistema mecânico capaz de manter a melhor posição das pás face à direcção do vento.

No caso da turbina *Darrieus* não é possível fazer o controlo de potência usando o controlo *pitch* [50]. O controlo de potência, no caso da *H-rotor* e da *Savonius* é opcional, preferindo-se utilizar controlo de *stall* passivo, de modo a ser mais simples a sua construção.

### **3.4.9. IMPACTO AMBIENTAL E RUÍDO SONORO**

Deve-se assinalar que em termos de ruído existem duas causas principais: ruído aerodinâmico produzido pelas pás ao cortarem o vento e o ruído mecânico produzido pelos componentes de transmissão. Como é de esperar, o ruído aerodinâmico aumenta com o aumento da velocidade de rotação da turbina [8]. Uma vez que as VAWTs apresentam normalmente uma velocidade específica na ponta da pá de aproximadamente metade das HAWTs [52] produzem menos ruído. Algo que também minimiza o ruído produzido pelas

VAWTs é o facto de se poder colocar o equipamento de transmissão no solo, desta forma o ruído produzido por tal equipamento não se propaga tão rapidamente como se estivesse no topo da torre [19]. A turbina *Darrieus* tem uma velocidade de rotação mais elevada que as *H-rotors* e as *Savonious*, sendo, no entanto, menor que as HAWTs do mesmo tamanho logo, produz mais ruído do que as *H-rotors* e as *Savonious* mas menos ruído do que as HAWTs.

As *H-rotors* e as *Savonious*, é de prever, que sejam menos prejudiciais para as aves e morcegos porque as pás têm uma velocidade de rotação menor, e já foi comprovado que a velocidade das pás afecta substancialmente o risco de colisão com as aves [53]. Na figura seguinte, 36, pode-se visualizar um bando de aves no seu percurso de migração próximo a um parque eólico.



**Figura 36 Bando de aves migratórias passando perto de um parque eólico [58]**

#### **3.4.10. CUSTO MONETÁRIO**

O custo global de uma turbina eólica é determinado pelo custo de fabricação, quantidade de energia captada, custo para a preparação do local e instalação, custo de manutenção e custos de financiamento [40]. Quando se compara as VAWTs com as HAWTs, deve-se ter em consideração que as últimas são produzidas há bastante tempo, o

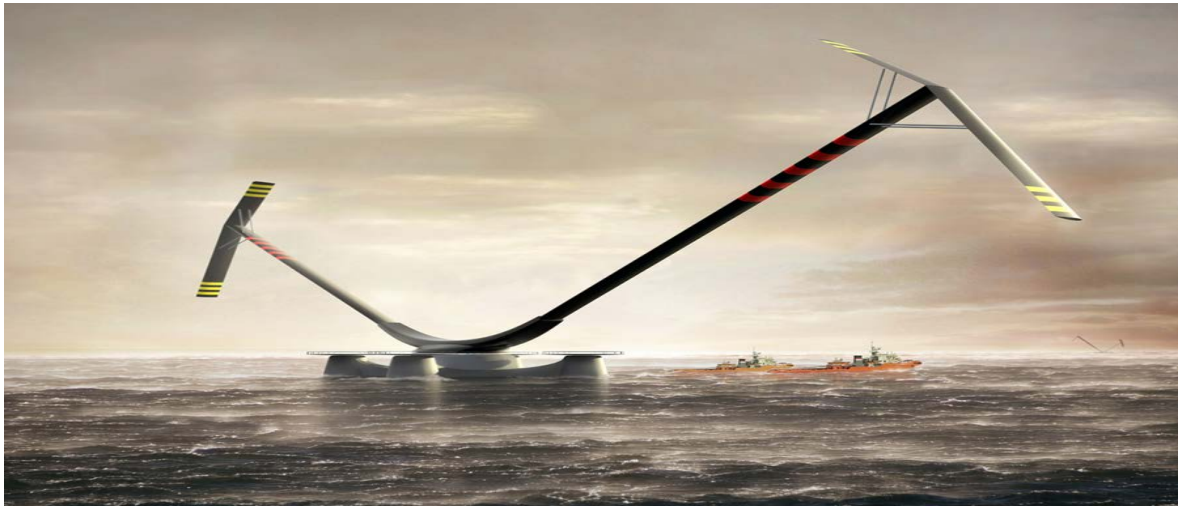
que permite que sejam criadas soluções de produção mais eficientes e com menores custos e em muito maior número, o que permite que algumas peças sejam produzidas em massa, diminuindo assim o custo global da turbina. Repare-se que não existe actualmente nenhuma produção em massa de VAWTs. Para além disso, como a tecnologia das HAWTs é mais madura, isso permitiu aumentar a escala das HAWTs diminuindo ainda o custo por kW instalado.

O custo de uma turbina eólica é medido em custo por energia gerada, ou seja, custo/kWh. Por sua vez, a energia gerada por uma turbina específica depende da eficiência da mesma, que é medida pelo coeficiente de potência,  $C_p$ , eficiência do sistema de transmissão, geradores e ligação à rede.

O valor do  $C_p$  das VAWTs, segundo a referência [40], é de esperar que atinja valores próximos do  $C_p$  das HAWTs. O projecto de uma *H-rotor* e mesmo de uma *Savonious*, é baseado na sua simplicidade ao omitir, por exemplo, um sistema de orientação, de uma *nacelle* (que normalmente é de massa assinalável) e pelo facto de ter pás rectas (no caso de se usar uma *Savonious* de pás rectas), os custos de produção são reduzidos, embora os *H-rotors* normalmente tenham pás maiores que as HAWTs, o que até pode não acontecer no caso das *Savonious*. Note-se que o caso das *Savonious*, visto terem um  $C_p$  menor, não interessa que tenham pás muito grandes, nem que produzam tanta energia como as HAWTs, visto não ser economicamente viável e de acordo com os estudos actuais, possível.

No caso da turbina *Darrieus*, as pás são mais caras e têm um custo de produção maior, pois para além de serem longas são também curvadas ou mesmo torcidas. No entanto, numa análise efectuada por *Walters* e a sua equipa de investigadores [47] as VAWTs podem ter um custo bem competitivo face às HAWTs.

Como se sabe, em termos de mercado *off shore*, o custo associado a operações e manutenções deve ser o mais baixo possível, e neste caso, as VAWTs são mais indicadas para esse tipo de mercado uma vez que têm uma estrutura simples e de poucas peças móveis que, como tal, requerem menos manutenção. Na figura seguinte pode-se visualizar o projecto futurista de uma turbina de eixo vertical, *Aerogenerator X*, actualmente em estado de desenvolvimento pelo ETI – *Energy Technologies Institute*, para ser utilizada em mercado *off-shore* [35].



**Figura 37 Aerogenerator X, turbina de eixo vertical completamente futurista actualmente em desenvolvimento pelo ETI – *Energy Technologies Institute* [35]**

### **3.5. DESENVOLVIMENTOS MAIS ACTUAIS**

Como se pôde verificar, até agora já foram efectuados diversos estudos sobre as VAWTs principalmente das *Savonious*. Porém, tal como foi dito anteriormente, estudos sobre as restantes VAWTs são mais escassos. No entanto existem artigos recentes e equipas de investigadores que realizam projectos e estudos sobre como melhorar as VAWTs.

#### **3.5.1. MELHORAMENTO DA PERFORMANCE DA SAVONIOUS BASEANDO-SE EM ESTUDOS NUMÉRICOS**

No artigo da referência [41] intitulado “*Research on the Improvement of the Performance of Savonious Rotor Based on Numerical Study*”, o objectivo do mesmo é melhorar a performance da *Savonious* de rotor helicoidal. Trata-se de um novo tipo de *Savonious* que ainda é pouco relatada na literatura. No caso deste artigo o rotor tem três metros de diâmetro, seis metros de altura, zero milímetros de distância entre as pás (*overlap distance - e*), como se pode ver Figura 38, sendo a sua intenção a de melhorar o coeficiente de potência da turbina em causa.

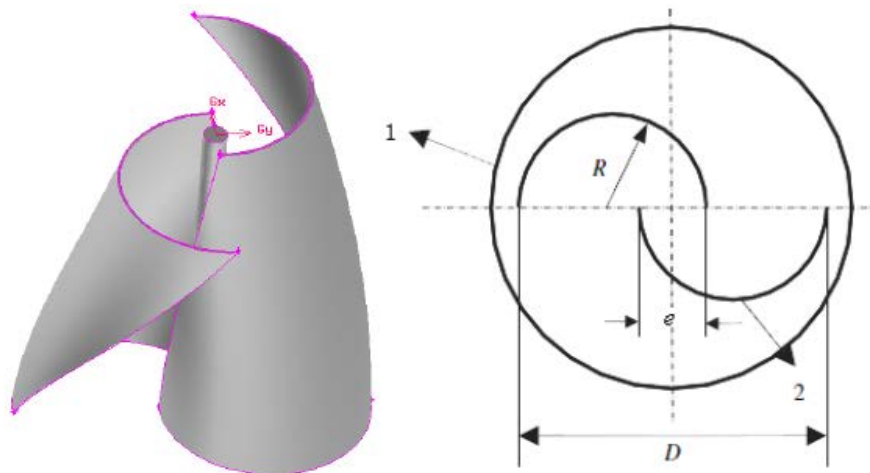
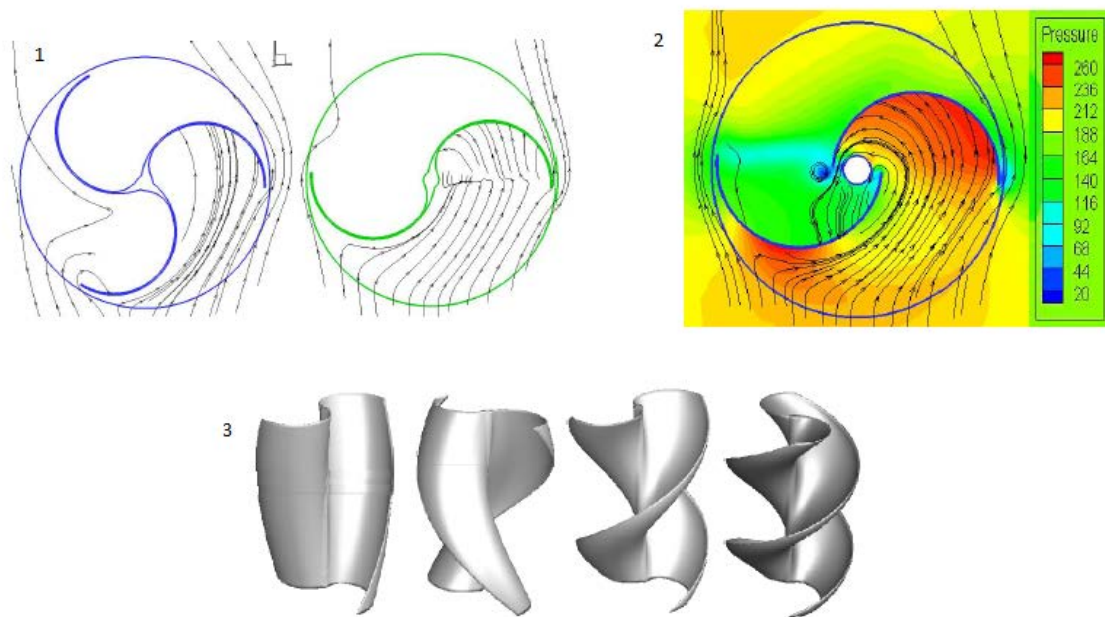


Figura 38 Forma da turbina helicoidal Savonius [41]

Para que tal objectivo fosse concluído com sucesso, foram seguidas as seguintes etapas:

- comparação do desempenho de um rotor de duas pás e de três pás torcidas, de forma a ser analisado o efeito do número de pás na performance geral do rotor.
- com base nos resultados do tópico acima, foi então realizado o estudo sobre o efeito do *overlap* entre as pás.
- com base nos dois tópicos acima, foi estudado o efeito do ângulo de torção das pás
- tendo em conta todos os resultados das análises feitas anteriormente, foi então analisada a eficiência obtida em termos do coeficiente de potência e da TSR (*Tip Speed Ratio- $\lambda$* ).

Para o estudo em causa, foi utilizada uma aplicação baseada na análise computacional da dinâmica dos fluídos (CFD – *Computacional Fluid Dynamics*). A modelação do estudo foi efectuada pelo programa *Gambit*, sendo este um programa capaz de criar um modelo e uma rede do que se quer estudar. Na Figura 39 tem-se algumas imagens presentes neste artigo.



**Figura 39** 1-análise do melhor número de pás, 2- análise do overlap e 3-análise do ângulo de torção [41]

Através do trabalho desenvolvido neste artigo, relativamente à *Savonius* convencional, o coeficiente de potência é melhorado de 0,15 para 0,20, isto sem adicionar mais equipamento à *Savonius* convencional. As conclusões mais importantes a reter neste artigo são:

a *Savonius* de rotor helicoidal com três pás tem um pior coeficiente de potência quando comparado com a de duas pás

a *Savonius* de rotor helicoidal com um *overlap ratio* de 0,3 tem um coeficiente máximo cerca de 0,174 quando comparado com *overlap ratios* de 0, 0,2 , 0,4 e 0,5

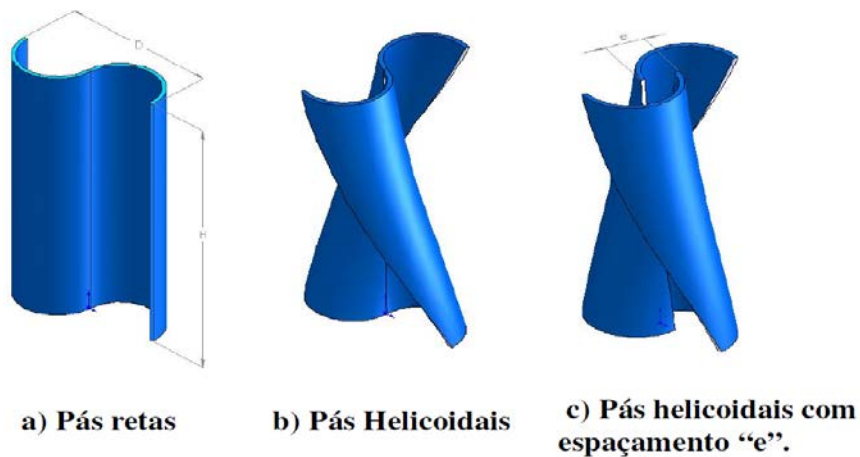
a *Savonius* de rotor helicoidal com ângulo de 180° demonstrou um maior desempenho quando comparada com rotores com ângulos de 90°, 270° e 360°

na *Savonius* de rotor helicoidal, quando se agrega o melhor dos três tópicos anteriores, consegue-se um valor de coeficiente de potência máximo de 0,2

### 3.5.2. ANÁLISE E TESTES A TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL DO TIPO SAVONIOUS

O projecto da referência [48] intitulado “*Testes de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical em Escala*”, vem confirmar o que foi dito no artigo acima referido, i.e. as turbinas de eixo vertical do tipo *Savonius* helicoidal têm melhor performance face às *Savonius* convencionais.

Os rotores testados neste projecto foram do tipo:



**Figura 40** Diversos tipos de rotores utilizados no projecto [48]

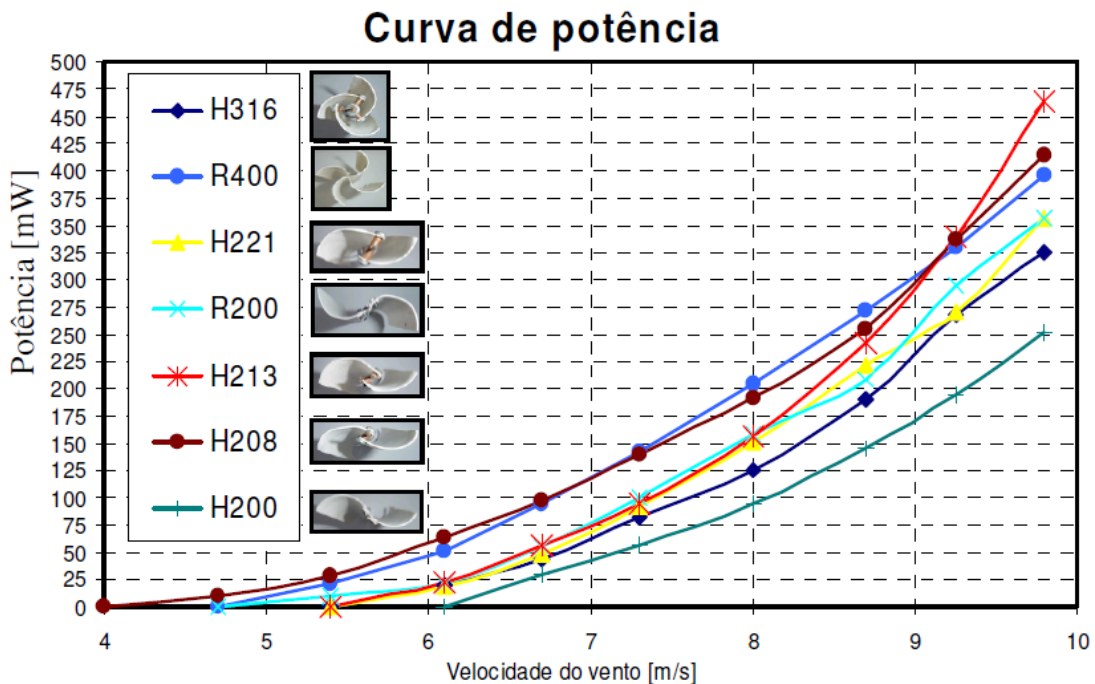
Como se pode ver pela figura anterior, os rotores são de pás rectas a) helicoidais b) e helicoidais com espaçamento “e” em c).

Na Tabela 3, estão as medidas dos rotores utilizados.

**Tabela 3** Medidas dos rotores utilizados na referência [48]

Rotor	H	D	Nº pás	Espaçamento	Tipo de pá
H316	170 mm	55 mm	3	16 mm	Helicoidal
R400	171 mm	92 mm	4	-	Reta
H221	172 mm	73 mm	2	21 mm	Helicoidal
H213	173 mm	77 mm	2	13 mm	Helicoidal
H208	174 mm	82 mm	2	8 mm	Helicoidal
R200	175 mm	93 mm	2	-	Reta
H200	176 mm	95 mm	2	-	Helicoidal

E na Figura 41 estão representadas as curvas de potências obtidas para as turbinas analisadas.



**Figura 41** Curvas de potência obtidas para diferentes tipos de rotores *Savonius* [48]

As principais conclusões, tal como foi dito no início, é que as turbinas *Savonius* do tipo helicoidal têm maior desempenho do que as convencionais. Para além disso as que têm espaçamento “e” têm ainda maior desempenho face às helicoidais sem espaçamento. Fica no entanto por demonstrar, se em termos de fabricação, os 33% de coeficiente de potência dos rotores *Savonius* do tipo helicoidal compensam o seu maior custo de fabrico.

### 3.5.3. NOVO TIPO DE VAWT E OPTIMIZAÇÃO DA ESTRUTURA DAS SUAS PÁS

No artigo da referência [49], intitulado “*A new type of VAWT and blade optimization*” é proposta uma nova VAWT do tipo *Savonius*, com a particularidade de possuir um *Windshield* (WS-VAWT), como se pode ver Figura 42.



Figura 42 Exemplo de uma VAWT com *Windshield* [51]

Na Figura 43 é mostrada uma VAWT tradicional. Repare-se que quando o ar em movimento embate na turbina, é exercida pressão numa pá mas ao mesmo tempo é exercida resistência numa outra pá.

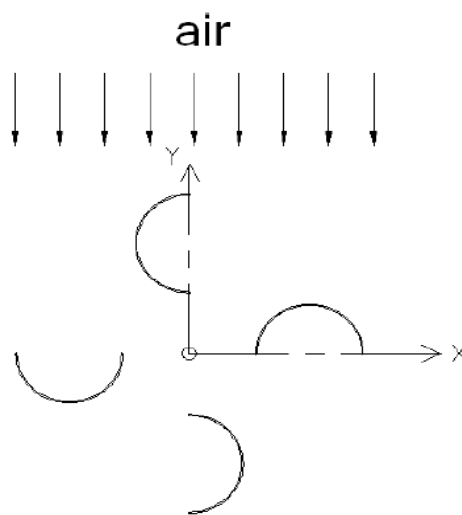


Figura 43 Movimento do ar numa VAWT tradicional [49]

De modo a tentar reduzir o efeito da resistência do vento, é então proposto neste artigo a utilização do *Windshield*, ver Figura 44.

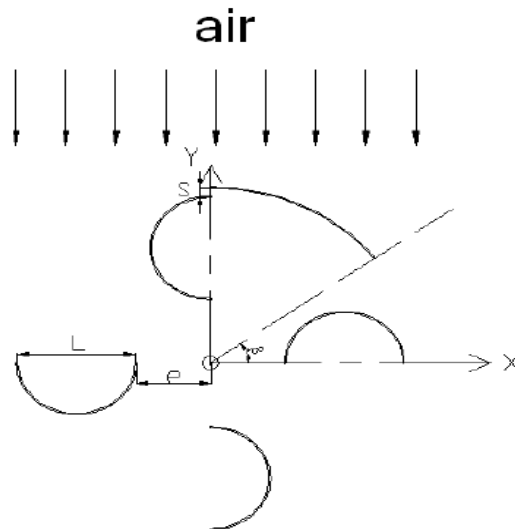


Figura 44 Movimento do ar numa VAWT com *Windshield* [49]

De acordo com a figura anterior, tem-se cinco parâmetros geométricos que foram tidos em conta:

comprimento de corda (*Chord length*),  $C=300$  mm

espaçamento entre as pás e o eixo (*overlap*)  $e = 185$  mm

*windshield* e espaçamento entre as pás,  $s = 25$  mm

ângulo  $\beta$  (variável e determinado numericamente no estudo efectuado)

Na Figura 45, tem-se os resultados obtidos, em a) sem o *windshield*, em b) com *windshield* e  $\beta=-90^\circ$ , em c) com *windshield* e  $\beta=30^\circ$  e em d) com *windshield* e  $\beta=45^\circ$ .

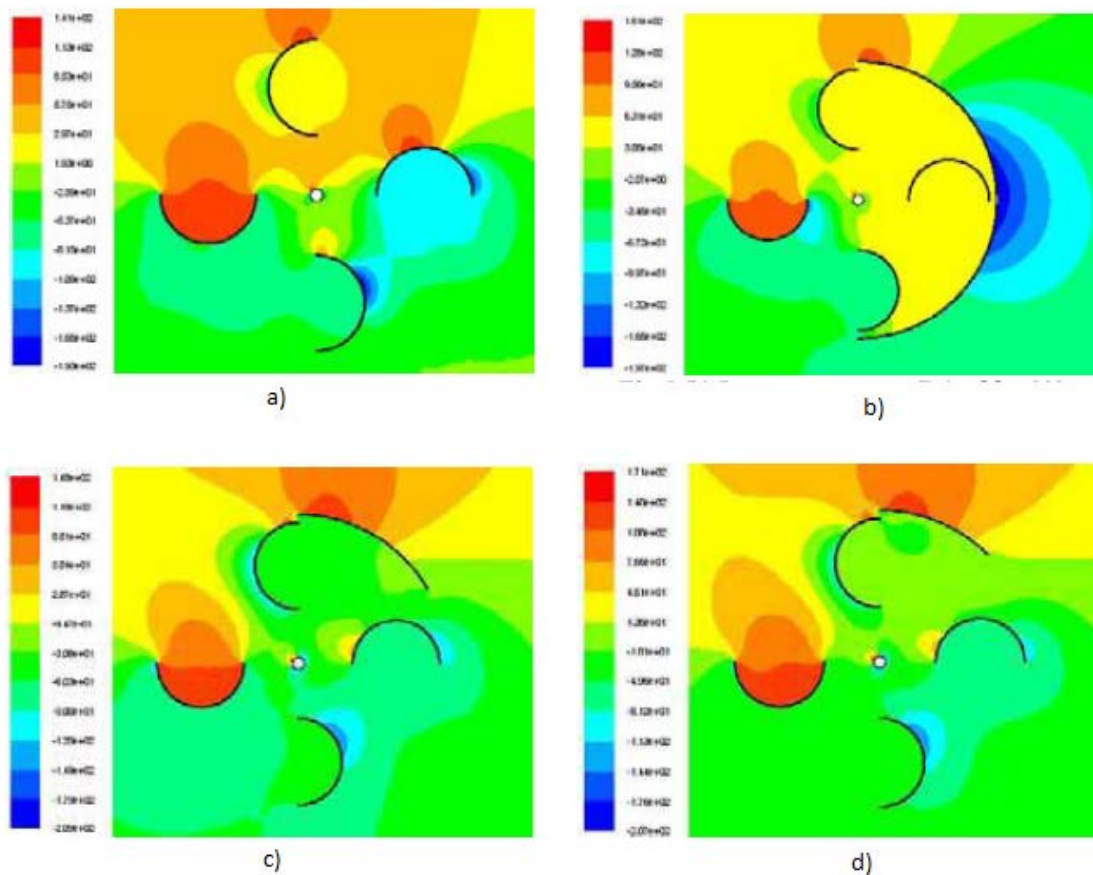


Figura 45 Análises efectuadas: sem *windshield* em a), com *windshield* e  $\beta=-90^\circ$  em b), com *windshield* e  $\beta=30^\circ$  em c) e com *windshield* e  $\beta=45^\circ$  em d) [49]

Neste artigo foi demonstrado que a WS-VAWT proposta tem melhor a performance aerodinâmica que a VAWT tradicional. Os valores óptimos para a inclinação do ângulo  $\beta$  que dão o maior binário são de  $\beta=30^\circ \pm 5^\circ$ . A WS-VAWT é indicada para locais onde a direcção do vento é constante, no entanto, segundo os autores do artigo, nada impede que em estudos realizados posteriormente, a mesma não possa ser aplicada em zonas de ventos turbulentos e inconstantes.

### 3.5.4. MELHORAMENTO DA SOLIDEZ DAS TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL DE PÁS RECTAS UTILIZANDO ESTUDOS NUMÉRICOS

A solidez de uma turbina é um dos factores mais importantes na caracterização da mesma e afecta em grande parte o desempenho das SB-VAWT (*Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine*). No artigo da referência [54], intitulado “*Numerical study on the performance effect of solidity on the straight-bladed vertical axis wind turbine*”, vários cálculos foram realizados tendo em conta um pequeno modelo de uma SB-VAWT,

utilizando diferentes valores de solidez analisando-se o seu efeito no desempenho da mesma.

A solidez  $\sigma$  pode ser calculada simplesmente utilizando a seguinte fórmula matemática:

$$\sigma = \frac{NC}{2\pi R} \quad (5)$$

Onde, N é o número de pás, C é o comprimento de corda das pás (em metros) e R é o raio da turbina (em metros).

O raio da turbina utilizado neste artigo foi de 0.25 m, encontrando-se presentes na Tabela 4, os restantes parâmetros geométricos do modelo utilizado. No estudo efectuado, foram usados dois tipos de perfis NACA: NACA0012 e NACA0018.

**Tabela 4 Parâmetros principais do modelo analisado [54]**

number	$\sigma$	C	N
1	25.48%	0.05(m)	2
2	12.74%	0.1(m)	4

Em termos de simulação de todo o sistema, na Tabela 5, estão sintetizados e identificados por números os diversos modelos simulados, tendo em conta o número de pás, comprimento de corda e perfil NACA utilizado.

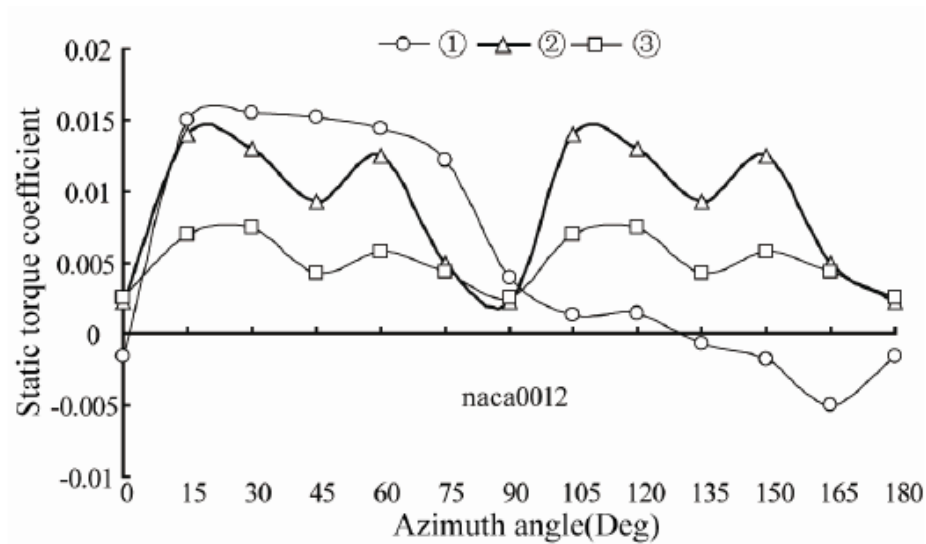
**Tabela 5 Simulações efectuadas [54]**

Aerofoil	$\sigma_1$	$\sigma_2$	
	C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> N <sub>2</sub>
NACA0012	②	①	③
NACA0018	⑤	④	⑥

Após a definição do modelo matemático, foi analisada a performance da turbina. O *static torque coefficient*  $C_{ts}$  é dado por:

$$C_{ts} = \frac{T_s}{\frac{1}{2}\rho ARU^2} \quad (6)$$

Das seis simulações efectuadas com diferentes ângulos de azimute, os resultados obtidos, estão representados na Figura 46 e 47, em que  $T_s$  é o binário estático (N.m),  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  é área total varrida pelas pás da turbina ( $\text{m}^2$ ), e  $U$  é a velocidade do vento ( $\text{m/s}$ ).



**Figura 46** Coeficientes de binário estático do modelo com perfil NACA0012 [54]

Como se pode ver pela Figura 46, diferentes valores de solidez, número de pás e comprimento de corda, afectam significativamente o  $C_{ts}$  quando é utilizado o perfil NACA0012. O mesmo se verifica no perfil NACA0018. Repare-se que no caso do modelo simulado 2 que tem um valor elevado de solidez, o valor do  $C_{ts}$  tem sempre valor positivo e bastante maior do que no modelo simulado 3 e durante todo o período. Isto sugere que o aumento do comprimento de corda permite aumentar o coeficiente de binário estático em alguns graus.

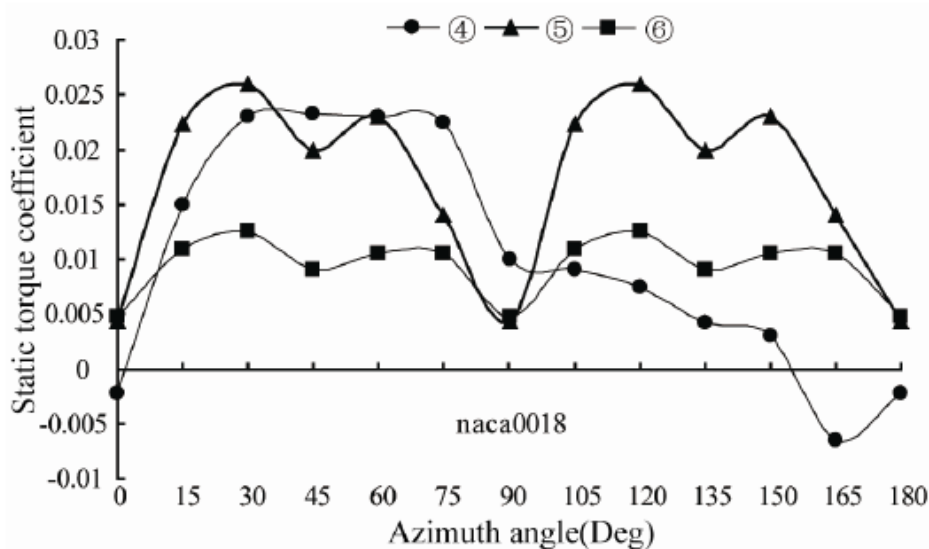


Figura 47 Coeficientes de binário estático do modelo com perfil NACA0018 [54]

De acordo com a Figura 47, a solidez do modelo analisado neste artigo afecta de igual forma a performance tanto no perfil NACA0012 como o NACA0018, no entanto, este último perfil tem melhor desempenho do que o perfil NACA0012.

Em suma, neste artigo, pode-se concluir que em termos de desempenho do binário estático, ao se aumentar a solidez, o valor médio do binário estático num período aumenta, no caso da SB-VAWT, melhorando assim o desempenho de arranque da turbina.

Mas no caso de a turbina já estar em rotação, a SB-VAWT com maior solidez atinge um valor máximo de potência com uma menor velocidade específica na ponta da pá (*tip speed ratio*  $\lambda$ ). No entanto, se o valor da solidez da turbina for muito elevado, tal facto fará com que o coeficiente de potência diminua. Por outro lado, caso exista uma boa relação entre o número e o comprimento de corda das pás, tal facto pode melhorar bastante o desempenho da SB-VAWT.

### 3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram analisadas algumas diferenças entre as turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical. Foi possível verificar que existem algumas vantagens em alguns aspectos na utilização das VAWTs em vez das HAWTs. Dentro das VAWTs analisadas, pôde-se concluir que as *H-rotors* são mais vantajosas que as *Darrieus*. A grande vantagem

da turbina *H-rotor* prede-se com o facto de poderem ser bastante simples, visto não necessitarem de mecanismos de orientação, regulação *pitch* ou caixa multiplicadora de velocidades, logo com poucas peças móveis, o que também diminui a necessidade de manutenção quando comparado com as HAWTs. Alguns tipos de VAWTs não necessitam de tanta manutenção, o que pode ser uma mais-valia para os mercados de tecnologia *off shore*.

No entanto, a turbina *Savonious*, apesar de ter um coeficiente de potência consideravelmente menor que as outras VAWTs, possui uma grande vantagem que as outras não têm, que são os numerosos estudos teóricos efectuados. Desta forma, possui-se alguma informação relativamente à forma como se deve construir uma turbina do tipo *Savonious* de forma a obter-se o máximo de eficiência possível, tornando a mesma muito viável em termos de utilização em ambiente edificado. Poderia, por exemplo, ser utilizada na iluminação pública, nos semáforos, etc.

Algo muito importante, que falta referir, é o problema do binário de arranque. Ora, como se viu até agora, de todas as VAWTs estudadas, as únicas que conseguem arrancar com ventos de fraca intensidade são as *Savonious*. As *H-rotors* e as *Darrieus* necessitam de energia externa para iniciarem a sua rotação. O agora referido, faz com que as *Savonious*, uma vez mais, sejam apetecíveis para a produção de energia eléctrica em ambiente urbano edificado, pois não necessitam de mecanismos “extra” ficando a sua construção menos complexa.

# 4. METODOLOGIA UTILIZADA NA MEDIÇÃO DO VENTO

De modo a caracterizar o local em estudo em termos de potencial eólico, são descritos, neste capítulo, os locais de medida, instrumentos utilizados e a forma como foram armazenados os dados.

## 4.1. REGIÃO A ESTUDAR

O local em análise neste estudo fica situado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), mais concretamente no edifício F, como se pode constatar na Figura 48. Trata-se de um edifício inserido em meio urbano, com edifícios envolventes tornando o vento inconstante e por vezes turbulento, o que nos pareceu ideal para o estudo da utilização de VAWTs.



**Figura 48 Edifício F, do Instituto Superior de Engenharia do Porto [55]**

A recolha dos dados foi efectuada segundo a seguinte tabela:

**Tabela 6** Medições efectuadas durante a recolha de dados do vento

<b>Local</b>	<b>Coordenadas GPS</b>	<b>Número de meses</b>	<b>Altura (relativamente ao nível do mar, em metros)</b>
<b>1</b>	Lat.41°10'44,90''N	1	188
<b>2</b>	Lon. 8°36'27,23''O	1	190
<b>3</b>	Lat.41°10'45,50''N Lon. 8°36'27,43''O	1	192
<b>4</b>	Lat.41°10'45,00''N Lon. 8°36'28,32''O	1	201

Como se pode visualizar na Tabela 6 foram escolhidos locais diferentes para a recolha de dados e alturas diferentes. A única excepção foi a dos locais 1 e 2, em que se utilizou uma extensão do anemómetro de modo a aumentar a altitude do mesmo mas sem mudar de local, de forma a aferir se com uma altitude mais elevada a velocidade do vento tinha ou não variações de intensidade face à altitude do anemómetro anterior.



**Figura 49 Pormenor dos locais escolhidos para recolha de dados do vento**

Na Figura 49 pode-se observar em pormenor os locais onde foram recolhidos os dados do vento. O Local 4 foi o ponto mais elevado onde se fez a recolha dos dados.



**Figura 50 Locais de estudo, imagem de satélite vista de sul**

Na Figura 50 estão representados, de um ponto de vista aéreo, os locais em estudo tendo em conta a sua localização no edifício F.

#### **4.2. INSTRUMENTO UTILIZADO PARA RECOLHA DE DADOS**

De modo a se caracterizar o local em estudo, foi utilizado o anemómetro de copos ilustrado na Figura 51.



**Figura 51 Anemómetro de copos utilizado na recolha de dados de vento**

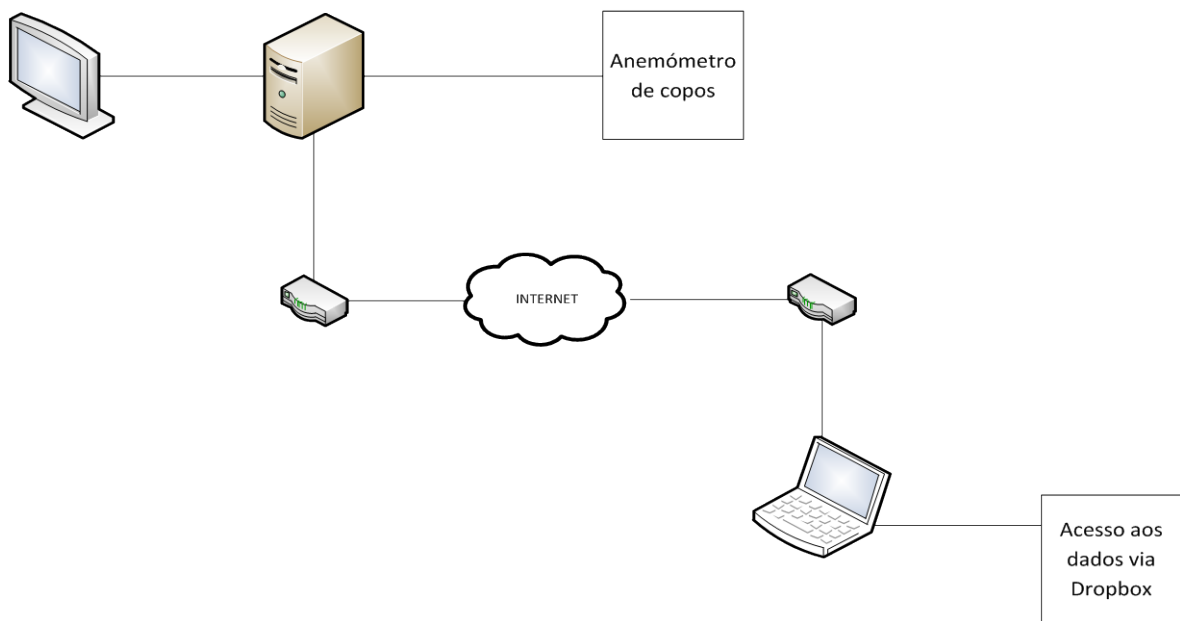
No Capítulo 2 desta tese foram referidas as características e as vantagens da utilização deste tipo de anemómetro. De uma forma sucinta, são relativamente robustos face a ventos mais fortes, mais baratos (face aos anemómetros ultra-sónicos por exemplo) e apesar de terem um tempo de resposta longo para medições de turbulência, são adequados para a medição de perfis de velocidade média.

As características físicas e técnicas do anemómetro utilizado encontram-se no Anexo 1.

#### **4.3. *DATALOGGER* PARA ARMAZENAMENTO DOS DADOS**

A utilização de *dataloggers* é sempre necessária quando se quer realizar trabalhos de campo. Neste caso, trata-se de um sistema capaz de armazenar dados relativos à velocidade do vento.

Nesta tese, o *datalogger* utilizado foi um computador pessoal disponibilizado pelo ISEP.



**Figura 52 Diagrama genérico do sistema utilizado na recolha e armazenamento de dados, com possibilidade de acesso remoto aos mesmos utilizando a Internet**

No entanto, tendo em conta que o sistema iria estar a funcionar durante vários meses, e de modo a que fosse possível detectar atempadamente qualquer problema na recolha de dados, foi utilizado um servidor que permitia aceder remotamente aos dados, ver Figura 52.

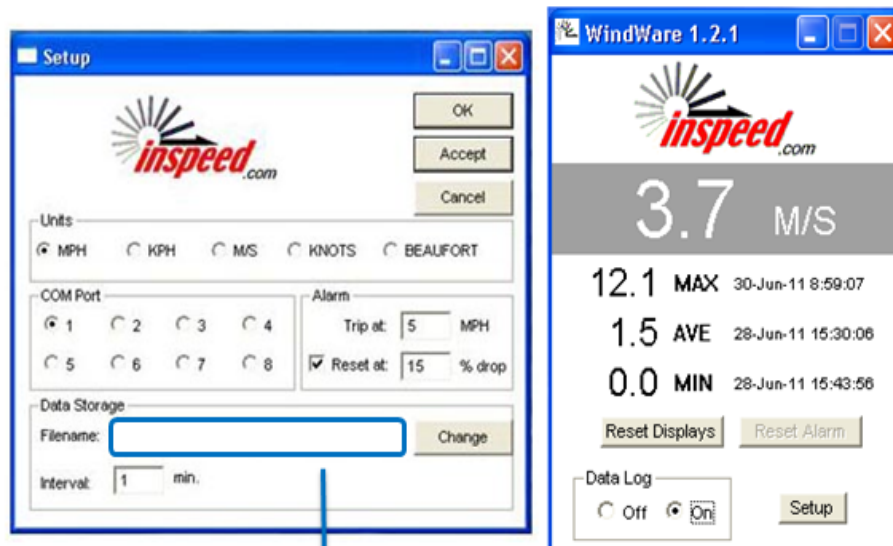
Na Figura 53 está representado o esquema de ficheiros utilizado na recolha de dados. O *software* utilizado sincroniza todo o conteúdo da pasta que se quer partilhar com um outro computador. Ou seja, foi partilhado o conteúdo da pasta que continha os dados da velocidade do vento com um computador pessoal, de modo a que, mesmo não estando pessoalmente presente no local de recolha de dados, fosse possível aceder aos dados e detectar qualquer problema via *Internet*.

File Name	Size	Modified
Parent folder		
Graficos_analise		
Analise_vento_F513_local_0_v1.csv	1.5MB	3/18/2011 4:49 PM
Analise_vento_F513_local_0_v2.csv	2.43MB	5/10/2011 7:02 PM
F513_1.csv	1.7MB	6/16/2011 8:12 PM
F513_2.csv	0.97MB	1 hr ago

**Figura 53 Conjunto de ficheiros com dados do vento disponibilizados remotamente**

Na Figura 54, estão representadas as opções possíveis do *software* utilizado na recolha de dados. No caminho da pasta onde se quer guardar os registos, de modo aos mesmos serem acessíveis remotamente, deve estar contido o caminho para a pasta criada pelo programa *Dropbox* e depois partilhar a mesma com o computador que se pretende que tal seja efectuado. O tipo de ficheiro criado pelo programa de recolha de dados pode ser de dois tipos: txt e csv. São dois tipos de ficheiros que permitem facilmente o tratamento dos dados por diversos *softwares*. Nesta tese, converteu-se o ficheiro criado *csv* para *xls*. Na Figura 55 tem-se um exemplo do ficheiro criado para análise gráfica dos dados recolhidos.

Com estes dados, procedeu-se à sua análise estatística e geoestatística que serão introduzidas no próximo capítulo. Para tal, foram recolhidos em cada mês mais de 44524 amostras da intensidade do vento. As amostras de vento foram recolhidas minuto a minuto durante cerca de um mês. E posteriormente, os dados recolhidos foram organizados em médias horárias, perfazendo um total de cerca de 720h. Com as cerca de 720 amostras de vento (correspondentes às médias calculadas com base nos 60 minutos de amostras de vento – valores máximos registados num minuto), foi posteriormente efectuada a análise estatística e geoestatística.



Caminho da pasta onde se quer guardar os registos do vento

Figura 54 Opções disponíveis no software do anemómetro utilizado, e medição da velocidade do vento

	B	C	D	E	F
1					
2					
3	Time	Current	Min	Max	Ave
4	16:08:27	0	0	2,8	1,4
5	16:09:27	0	0	2,3	1
6	16:10:27	0	0	1,3	0,4
7	16:11:27	0,6	0	2,2	0,4
8	16:12:27	0,8	0	1,6	0,6
9	16:13:27	0,8	0	3,4	1,3
10	16:14:27	0,9	0	2,4	0,9
11	16:15:27	0,9	0	3,2	1,2
12	16:16:27	0	0	2,9	1,2
13	16:17:27	2	0	2,8	1,1
14	16:18:27	1,3	1,3	3,5	2,3
15	16:19:27	2,7	0	2,7	1,4
16	16:20:27	1,5	0	3,4	1,8
17	16:21:27	1,3	0	2,9	1,5
18	16:22:27	0,6	0	2	1,3
19	16:23:27	0,7	0	1,9	1
20	16:24:27	1,1	0	1,3	0,3
21	16:25:27	0	0	0,9	0,1
22	16:26:27	0	0	1,4	0,3
23	16:27:27	1,3	0	1,3	0,4
24	16:28:27	2	0	2	0,9
25	16:29:27	1,2	0	3,4	1,3
26	16:30:27	1,2	0	2,1	1,2
27	16:31:27	1,5	0	2,2	1,2

Figura 55 Ficheiro xls utilizado no tratamento dos dados



# 5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DOS DADOS

Neste capítulo irão ser tratados os dados recolhidos sobre a velocidade do vento. Primeiramente é realizada uma análise estatística, fazendo aproximações de distribuições do vento – *Weibull*. Também é realizado um estudo sobre a energia produzida extrapolando-se de acordo com as especificações das curvas de potência de diferentes VAWTs. Por fim, é realizado um estudo geoestatístico exemplificativo de modo a mostrar como pode caracterizar-se, em termos de intensidade do vento, o local em análise.

## 5.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Como se sabe, o vento apresenta grandes variações de intensidade. Isso faz com que o estudo do vento seja realizado através de análises probabilísticas. Tendo isto em consideração, após diversos estudos científicos, chegou-se à conclusão de que a distribuição de probabilidade que melhor representa a velocidade do vento é a distribuição de *Weibull*.

### 5.1.1. DISTRIBUIÇÃO DE *WEIBULL* APLICADA AOS LOCAIS EM ESTUDO

A distribuição de *Weibull* foi desenvolvida em 1951, pelo professor sueco *Waladdi Weibull*. O vento possui uma característica estocástica e a sua velocidade é uma variável aleatória contínua. Como tal, é necessário fazer uma discretização de modo a facilitar a sua

análise. Para tal, é realizado um histograma e após se ter obtido o histograma, o mesmo é descrito através de uma função de densidade de probabilidade.

A distribuição de *Weibull* permite representar, mais adequadamente, a distribuição de frequência da velocidade do vento, necessitando somente de dois parâmetros:  $A$  que é um factor de escala dado, em m/s e  $K$  é um factor de forma adimensional. Desta forma, deixa de ser necessário trabalhar com todas as medidas da velocidade do vento, bastando somente dois parâmetros.

O factor de forma  $K$ , representa uma medida inversa da oscilação da velocidade do vento em torno da sua velocidade média, ou seja, é uma medida inversa do índice de turbulência. Quanto mais uniforme é a velocidade do vento, maior será o valor de  $K$  uma vez que o índice de turbulência é baixo. O factor de escala  $A$  representa a diversidade de ocorrências das velocidades do vento e está directamente relacionado com a velocidade média, logo, quanto maior for o factor de escala maior será a velocidade média [57].

A equação (7) representa a função densidade de probabilidade de *Weibull*:

$$f(v) = \frac{K}{A} * \left(\frac{v}{A}\right)^{K-1} * e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^K} \quad (7)$$

em que:  $f(v)$  é a frequência da velocidade do vento  $v$ ,  $A$  é o factor de escala [m/s] e  $K$  é o factor de forma [adimensional].

Os parâmetros  $A$  e  $K$  podem ser, aproximadamente determinados de várias formas. A mais simples e expedita consiste em utilizar a relação aproximada da equação (8):

$$K = \left(\frac{\sigma}{V_{méd}}\right)^{-1.086} \quad (8)$$

onde  $V_{méd}$  é a velocidade média do vento e  $\sigma$  é o desvio padrão da velocidade do vento [m/s].

Com o valor de  $K$  e a função gama  $\Gamma$ , o parâmetro de escala  $A$  é obtido utilizando a equação (9).

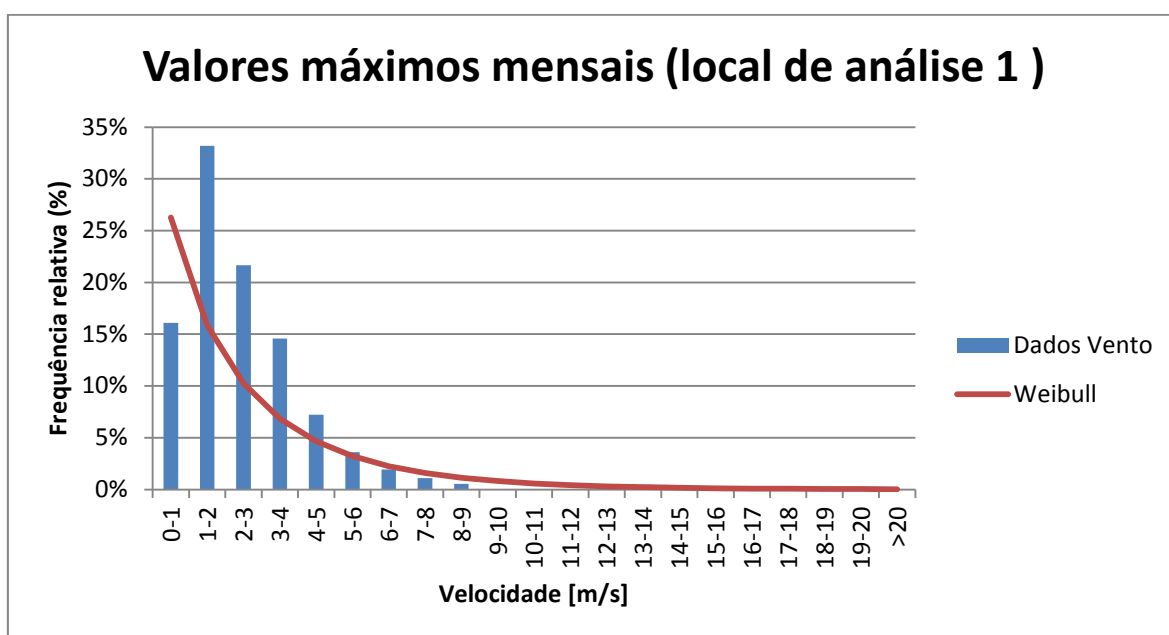
$$A = \frac{V_{méd}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \quad (9)$$

onde  $\Gamma$  é a função gama.

Nas figuras seguintes são apresentados os dados relativos aos locais em estudo, aplicando a distribuição de *Weibull* mais adequada. Desta forma, pode-se comparar com base nos dois parâmetros da referida distribuição (A e K) os locais em análise.

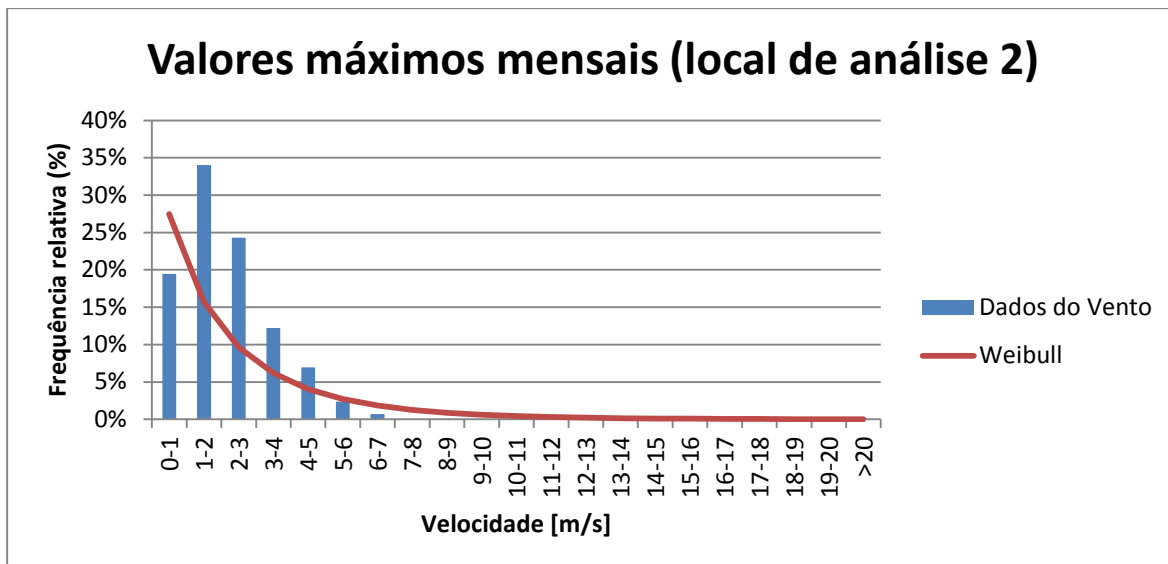
Para a análise estatística, tal como foi dito anteriormente, foram utilizadas cerca de 44524 amostras da intensidade do vento. Em ficheiros Excel, foram criadas colunas com dados sobre as médias, os valores máximos e os valores da intensidade do vento, para os diferentes dias amostrados.

Na Figura 56, está representado o histograma relativamente ao local 1. Constata-se facilmente pela análise gráfica que a ocorrência de ventos mais significativa (cerca de 33%) é a relativa à velocidade de vento compreendida entre 1 e 2 m/s. Os parâmetros caracterizadores de *Weibull* são  $A=1.128$  e  $K=0.92$ .



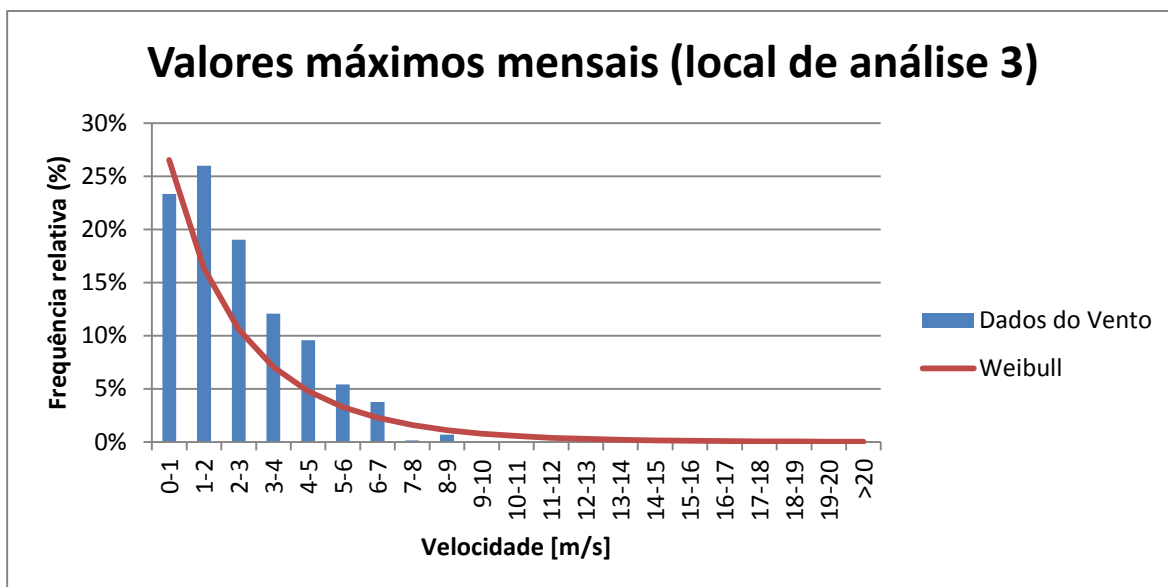
**Figura 56 Histograma dos valores máximos mensais do local 1. Distribuição de *Weibull*  $A=1.128$   $K=0.92$**

Na Figura 57, está representado o histograma relativamente ao local 2. Constata-se facilmente pela análise gráfica que a ocorrência de ventos mais significativa (cerca de 34%) é a relativa à velocidade de vento compreendida entre 1 e 2 m/s. Os parâmetros caracterizadores de *Weibull* são  $A=1.938$  e  $K=0.85$ .



**Figura 57** Histograma dos valores máximos mensais do local 2. Distribuição de *Weibull*  $A=1.938$   
 $K=0.85$

Na Figura 58, está representado o histograma relativamente ao local 3. Neste caso, pela análise gráfica, a ocorrência de ventos mais significativa está entre 1 m/s e 3 m/s. Os parâmetros caracterizadores de *Weibull* são  $A=2.273$  e  $K=0.89$ .



**Figura 58** Histograma dos valores máximos mensais do local 3. Distribuição de *Weibull*  $A=2.273$   
 $K=0.89$

Na Figura 59, está representado o histograma relativamente ao local 4. Neste caso, e tal como no local anterior, pela análise gráfica, a ocorrência de ventos mais significativa está entre 1 m/s e 3 m/s. Os parâmetros caracterizadores de *Weibull* são  $A=2.410$  e  $K=0.89$ .

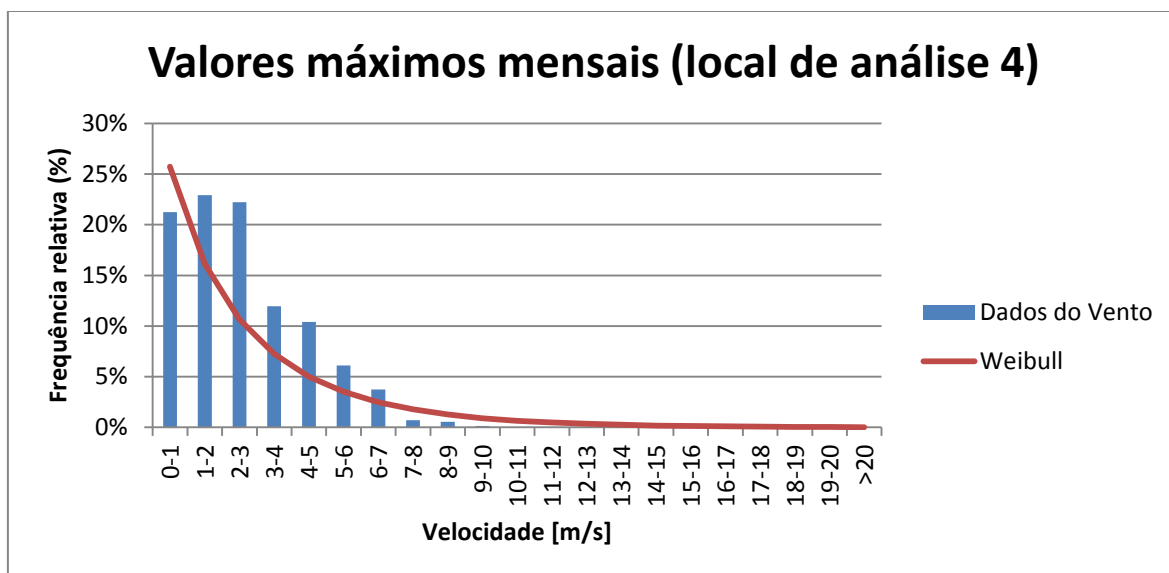


Figura 59 Histograma dos valores máximos mensais do local 4. Distribuição de *Weibull*  $A=2.410$   
 $K=0.89$

Tabela 7 Comparação de parâmetros *Weibull* aplicados aos locais em estudo

Parâmetros <i>Weibull</i>	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
$A$	1.128	1.938	2.273	2.410
$K$	0.92	0.85	0.89	0.89

Na Tabela 7 estão sintetizados os valores obtidos para os parâmetros característicos da distribuição de *Weibull*, para cada um dos locais em estudo. Relativamente ao parâmetro  $A$ , o local que tem maior média da velocidade do vento é o local 4. Por outro lado, segundo o parâmetro  $K$ , o local 1 é onde o vento é mais constante. Note-se porém que os locais em estudo correspondem a meses diferentes de medição da velocidade do vento, no entanto isto já permite elaborar uma ideia da velocidade média e do índice de turbulência de cada local analisado.

### 5.1.2. COMPARAÇÃO DE CAPACIDADE PRODUTIVA DE DIFERENTES VAWTs

Com base nos locais em análise, e com os dados recolhidos dos mesmos, foi também efectuada uma análise energética. A avaliação energética teve por base turbinas eólicas de eixo vertical comercializadas e disponíveis para consulta na referência [71]. Todos os cálculos energéticos e gráficos utilizados nesta análise, foram reproduzidos utilizando o Excel.

De seguida são apresentados os dois melhores resultados de cada local em estudo. A análise foi efectuada tendo em conta os coeficientes de potência de cada uma das VAWTs analisadas.

No caso do local 1, o melhor dos dois melhores resultados obtidos em termos de potência produzida foi a *Ropatec Big Star*, que se encontra ilustrada na Figura 60.

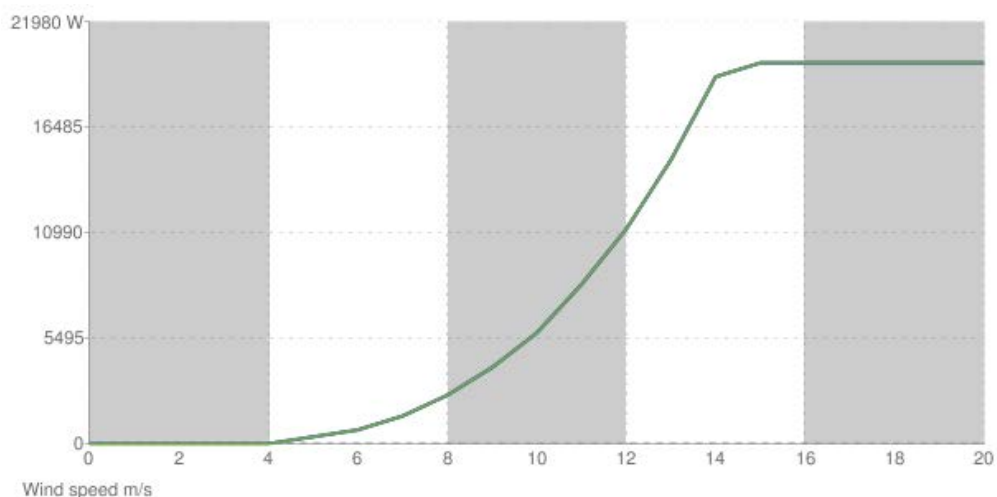


Figura 60 Ropatec Big Star [71]

As características mais relevantes desta turbina são:

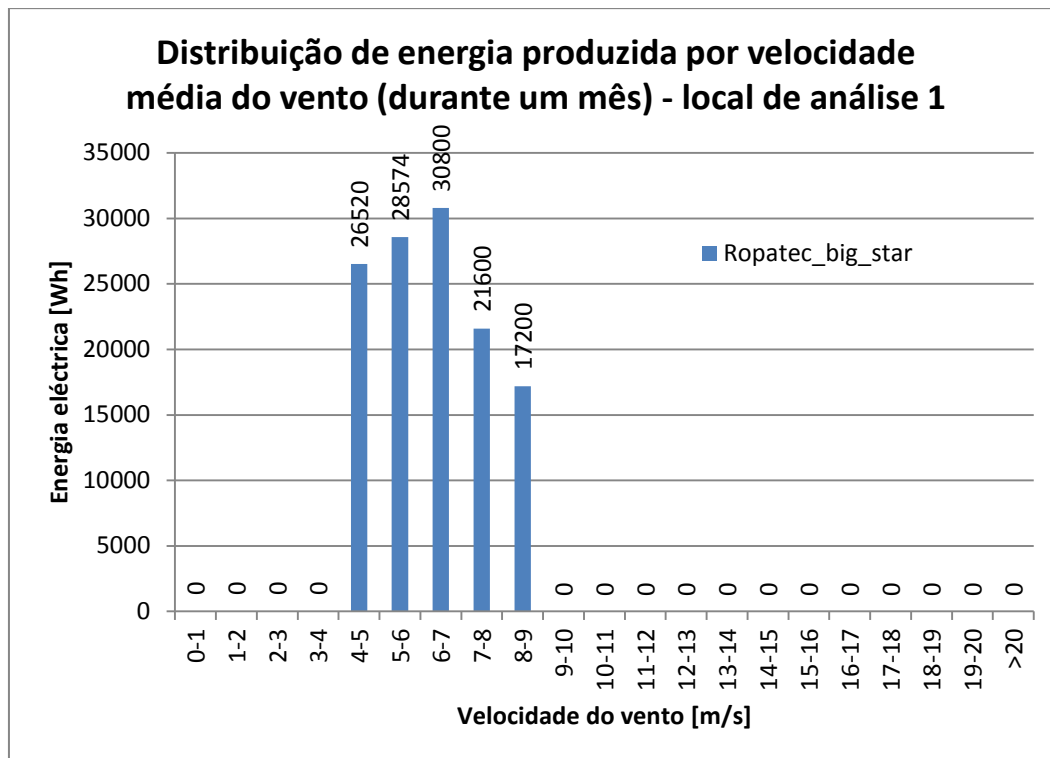
<b>Diâmetro das pás</b>	8 m
<b>Potência nominal (W)</b>	20000
<b>Fabricante</b>	Ropatec
<b>Níveis de ruído</b>	42dB

A potência produzida por esta turbina a diferentes velocidades do vento, está representada na Figura 61.



**Figura 61** Curva de potência produzida pela *Big Star* a diferentes velocidades do vento, de acordo com os dados do fabricante *Ropatec* [71]

Com base nos dados da Figura 61 e dos valores obtidos nas distribuições de frequências da velocidade do vento para o local 1, foi elaborado um novo histograma. Esse histograma, como se pode ver na Figura 62, representa a potência que seria produzida caso as condições de vento fossem as descritas no histograma de frequências do vento do local 1.



**Figura 62 Distribuição de potência produzida no local 1 pela *Ropatec Big Star***

Como se pode constatar pela distribuição de potência obtida para o local 1 utilizando a turbina *Ropatec Big Star*, a maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 4 e 7 m/s. O total de potência produzida por esta turbina seria, nestas condições, de 124694 Wh.

O segundo melhor valor obtido, em termos de potência produzida, foi o da turbina *Urban Green Energy UGE-4kW*, que se encontra ilustrada na Figura 63.

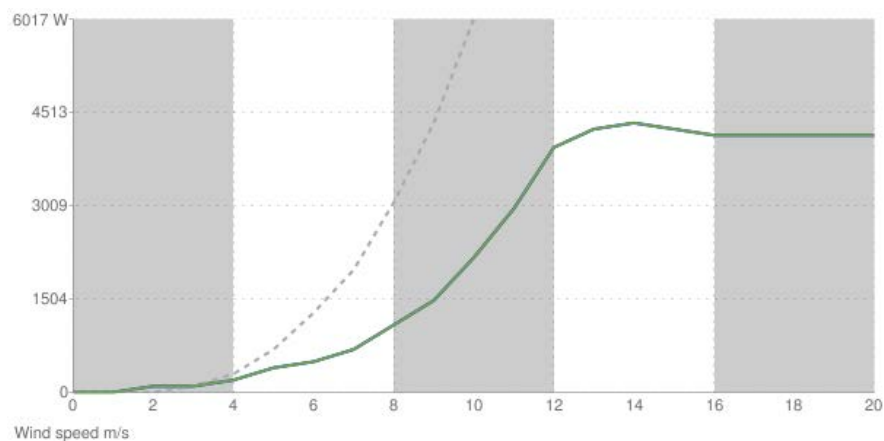


**Figura 63 *Urban Green Energy* [71]**

As características mais relevantes desta turbina são:

<b>Diâmetro das pás</b>	3 m
<b>Potência nominal (W)</b>	4000
<b>País de origem</b>	China
<b>Níveis de ruído</b>	baixo (não quantificado no manual do fabricante)

A potência produzida por esta turbina a diferentes velocidades do vento, está representada na Figura 64.



**Figura 64** Curva de potência produzida pela *Urban Green Energy* a diferentes velocidades do vento, de acordo com os dados do fabricante [71]

A linha a tracejado representa o valor teórico máximo que esta turbina poderia alcançar de acordo com o limite de *Betz's*. A linha a verde representa o valor real da potência produzida pela turbina.

Com base nos dados da Figura 64 e dos valores obtidos nas distribuições de frequências da velocidade do vento para o local 1, foi elaborado um novo histograma que representa a potência que seria produzida caso as condições de vento fossem as descritas no histograma de frequências do vento do local 1, ver Figura 65.

Como se pode ver pela distribuição de potência obtida para o local 1 utilizando a turbina *Urban Greenn Energy*, a maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 3 e 5 m/s. O total de potência produzida por esta turbina foi de 116080 Wh.

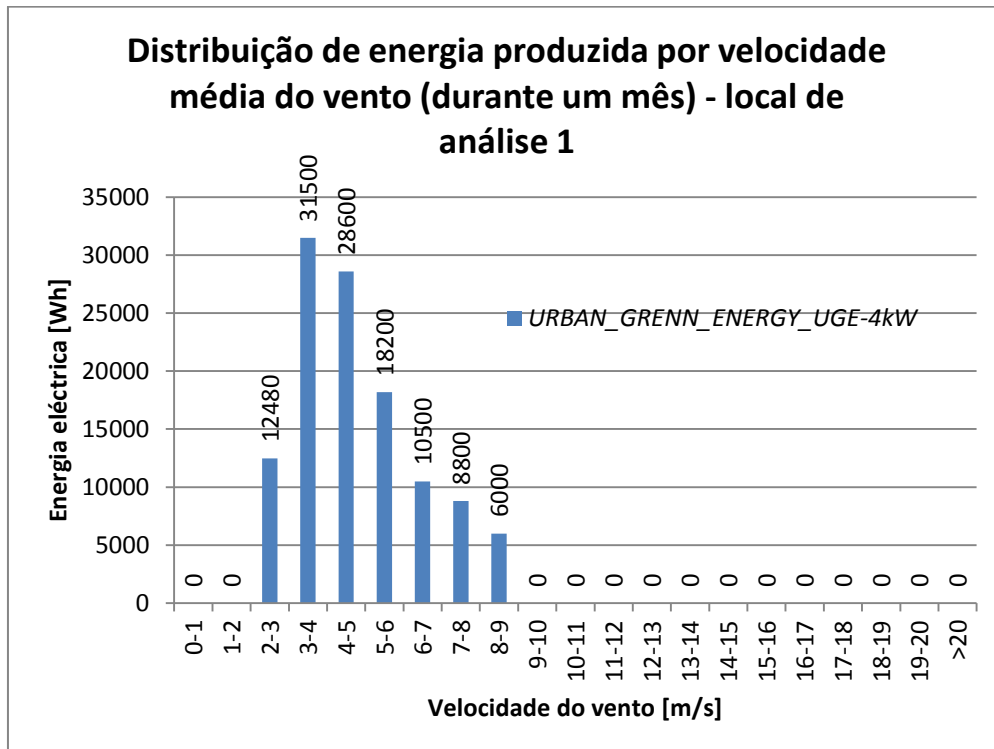


Figura 65 Distribuição de potência produzida no local 1 pela *Urban Greenn Energy* uge-4kW

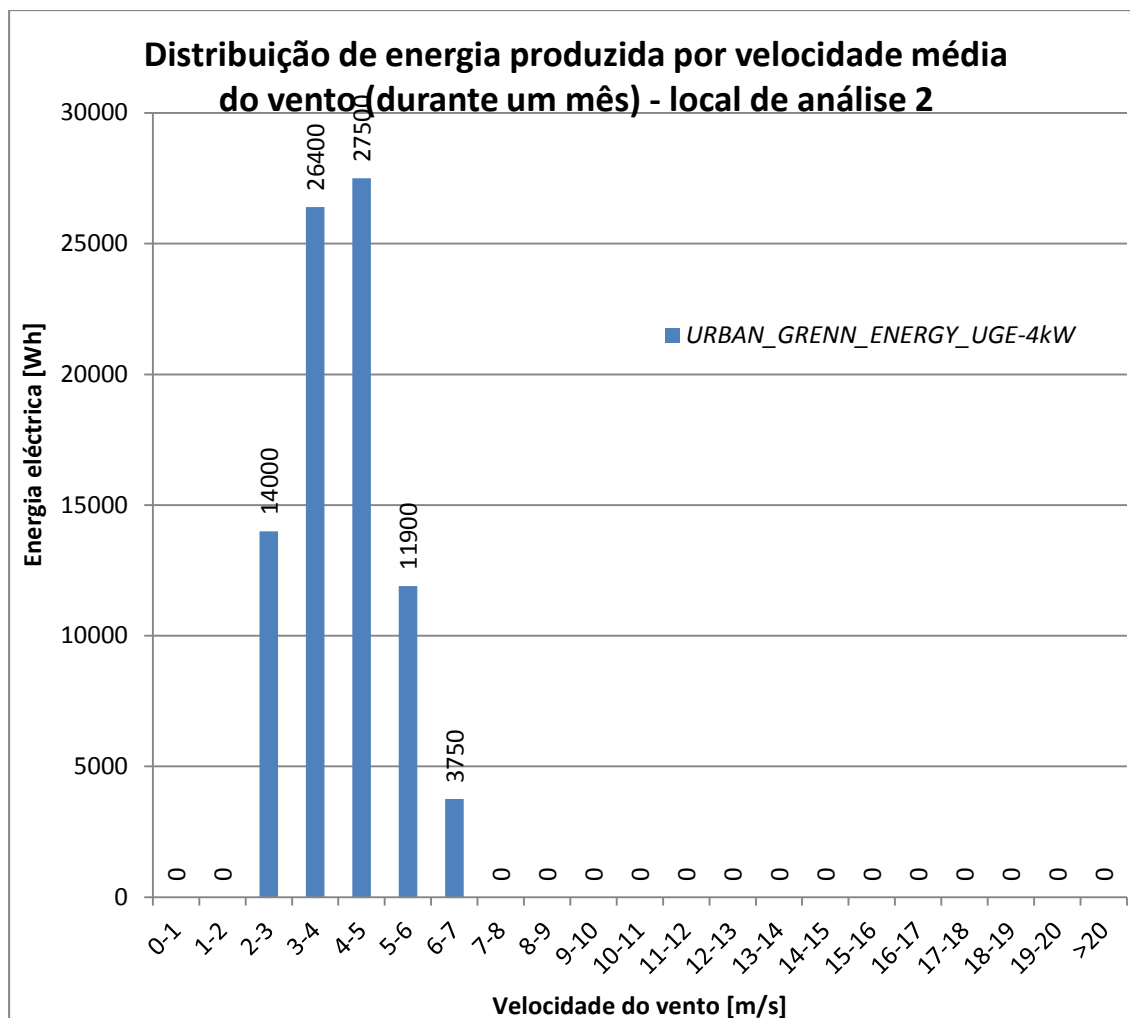
Na tabela seguinte estão sintetizados os valores obtidos de potência mensal produzida e de utilização mensal da potência instalada, para cada uma das duas turbinas.

**Tabela 8 Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 1**

<b>VAWT Local 1</b>	<b>Potência mensal produzida</b>	<b>Utilização mensal da potência instalada</b>
<i>Ropatec_big_star</i>	124694 Wh	6.23 h
<i>URban Grenn energy uge-4kW</i>	116080 Wh	29.02 h

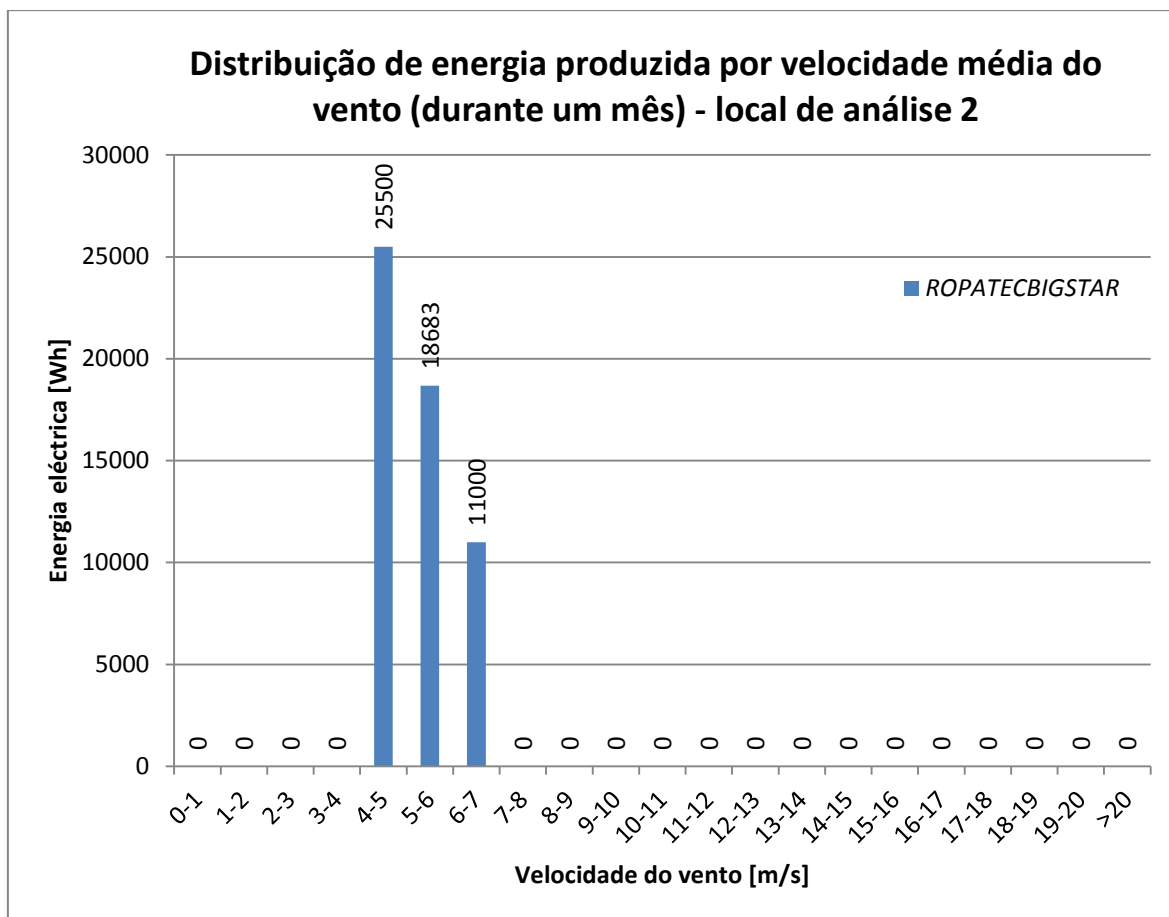
No caso do local 2, o melhor dos dois melhores resultados obtidos em termos de potência produzida foi a *Urban Grenn Energy*, (ver Figura 66).

Na Figura 66, pode-se visualizar o histograma da distribuição de potência produzida por esta turbina. A maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 3 e 5 m/s. O total de potência produzida por esta turbina foi de 83550 Wh. Tem-se também presente na tabela os valores obtidos sobre a utilização mensal da potência instalada, fazendo o quociente entre a potência total produzida por determinada turbina e a potência instalada. Este valor fornece a quantidade de horas que de facto a turbina estaria a trabalhar num mês (de acordo com a potência instalada).



**Figura 66** Distribuição de potência produzida no local 2 pela *Urban Grenn Energy uge-4kW*

Na Figura 67 encontra-se representado o segundo melhor resultado obtido, em termos de potência produzida, para o local 2. Trata-se da *Big Star da Ropatec*. A maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 3 e 4 ,4 e 5 m/s. O total de potência produzida por esta turbina foi de 55183 Wh.



**Figura 67 Distribuição de potência produzida no local 2 pela Ropatec Big Star**

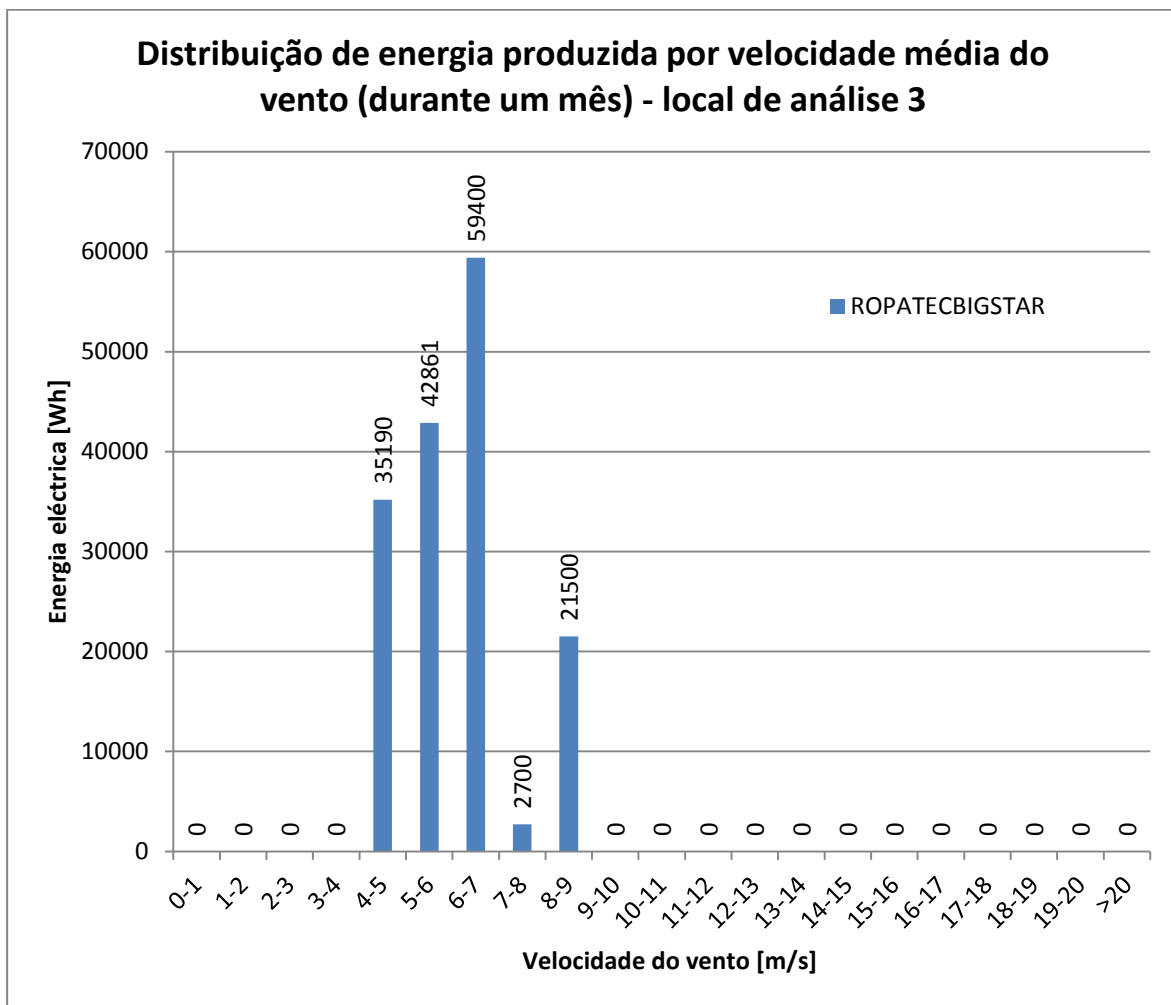
Na tabela seguinte estão sintetizados os valores obtidos de potência mensal produzida e de utilização mensal da potência instalada, para cada uma das duas turbinas.

**Tabela 9 Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 2**

<b>VAWT Local 2</b>	<b>Potência mensal produzida</b>	<b>Utilização mensal da potência instalada</b>
<i>Ropatec_big_star</i>	55183 Wh	2.75h
<i>URban Grenn energy UGE-4kW</i>	83550 Wh	20.88h

No caso do local 3, o melhor dos dois melhores resultados obtidos em termos de potência produzida foi a *Ropatec Big Star*, (ver Figura 68).

Na Figura 68, pode-se visualizar o histograma da distribuição de potência produzida por esta turbina. A maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 5 e 7 m/s. O total de potência produzida por esta turbina foi de 161651 Wh.



**Figura 68** Distribuição de potência produzida no local 3 pela *Ropatec Big Star*

No caso do local 3, o segundo melhor valor obtido (em termos de potência produzida) foi o da turbina *Windturbine.cc* PK10kW, (ver Figura 69).

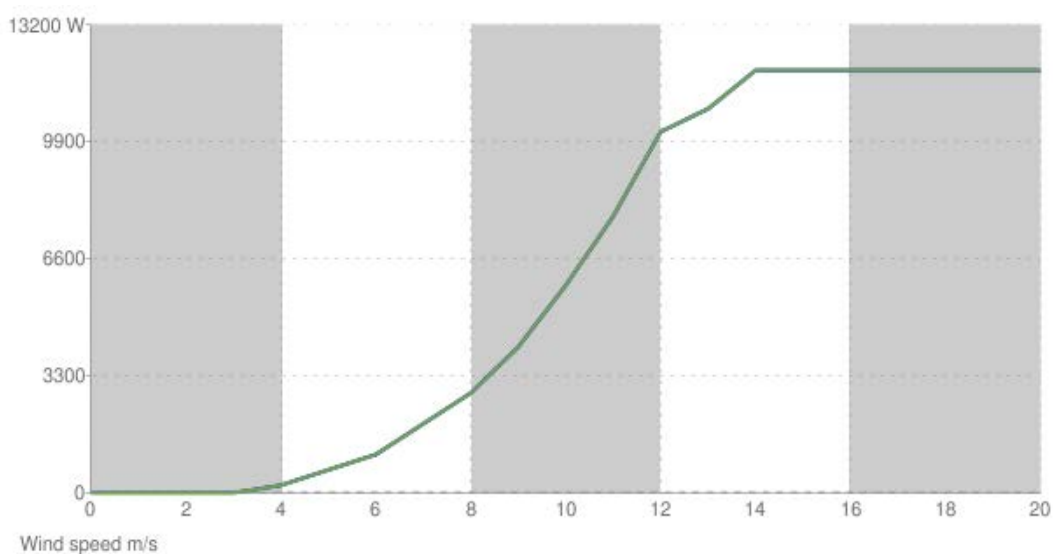


**Figura 69** *Windturbine.cc* PK10kW[71]

As características mais relevantes desta turbina são:

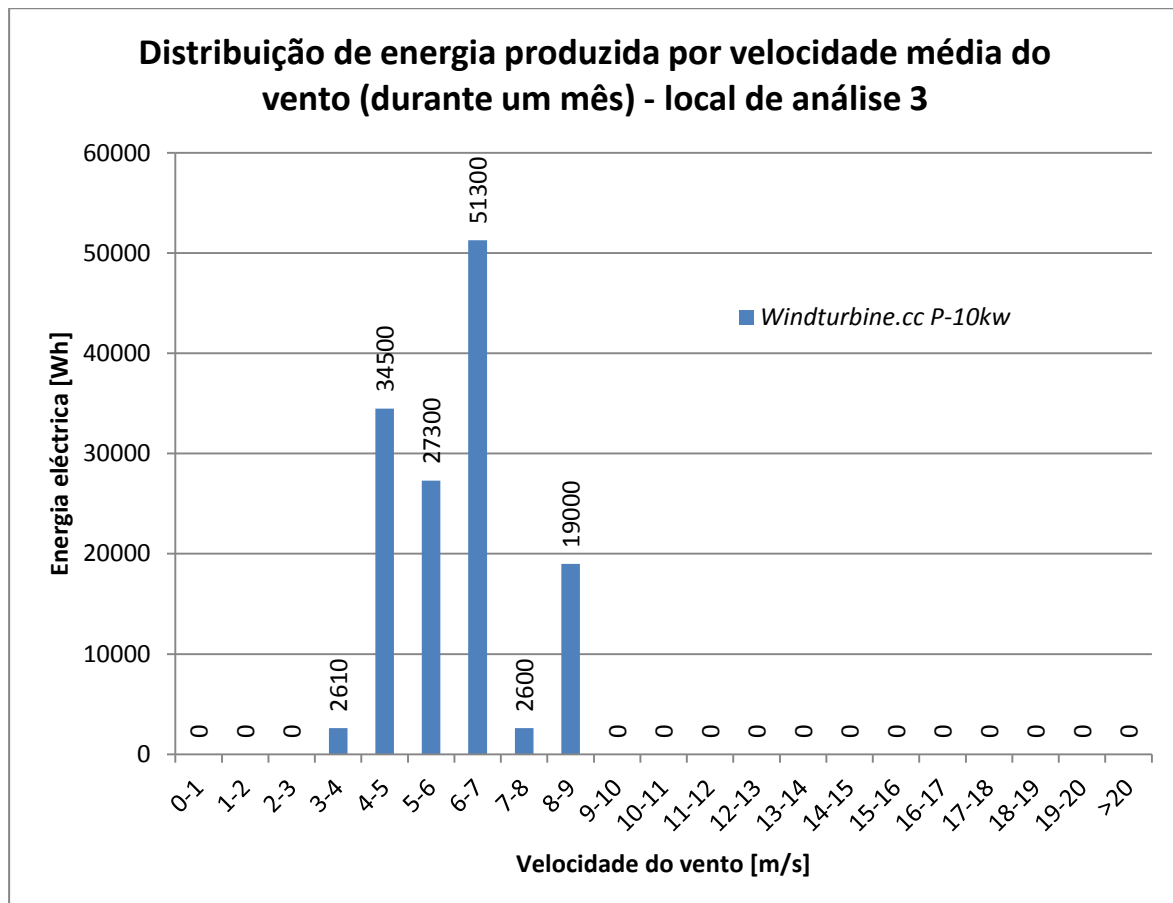
<b>Diâmetro das pás</b>	6 m
<b>Potência nominal (W)</b>	10000
<b>Fabricante</b>	Windturbine.cc
<b>Níveis de ruído</b>	37 dB

A potência produzida por esta turbina a diferentes velocidades do vento, está representada na Figura 70.



**Figura 70** Valores de potência produzida pela *Windturbine.cc* PK10kW a diferentes velocidades do vento, de acordo com os dados do fabricante [71].

Com base na informação presente na Figura 70 e dos valores obtidos nas distribuições de frequências da velocidade do vento para o local 3, foi elaborado um novo histograma. Esse histograma, ver Figura 71, representa a potência que seria produzida caso as condições de vento fossem as descritas no histograma de frequências do vento do local 3.



**Figura 71 Distribuição de potência produzida no local 3 pela Windturbine.cc PK10kW**

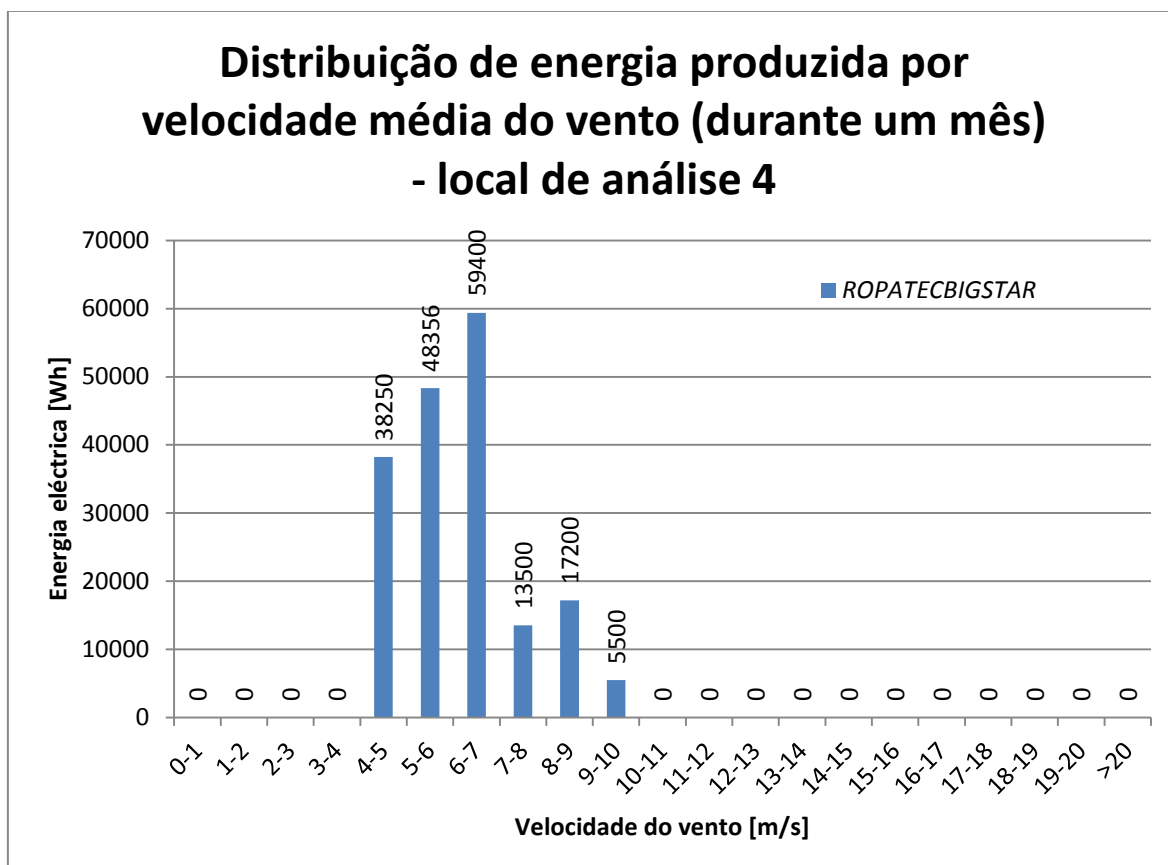
Na Figura 71, pode-se visualizar o histograma da distribuição de potência produzida por esta turbina. A maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 6 e 7 m/s. O total de potência produzida por esta turbina foi de 137310 Wh.

Na tabela seguinte estão sintetizados os valores obtidos de potência mensal produzida e de utilização mensal da potência instalada, para cada uma das duas turbinas.

**Tabela 10 Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 3**

<b>VAWT Local 3</b>	<b>Potência mensal produzida</b>	<b>Utilização mensal da potência instalada</b>
<i>Ropatec Big Star</i>	161651 Wh	8.08 h
<i>Windturbine.cc PK10kW</i>	137310 Wh	13.73 h

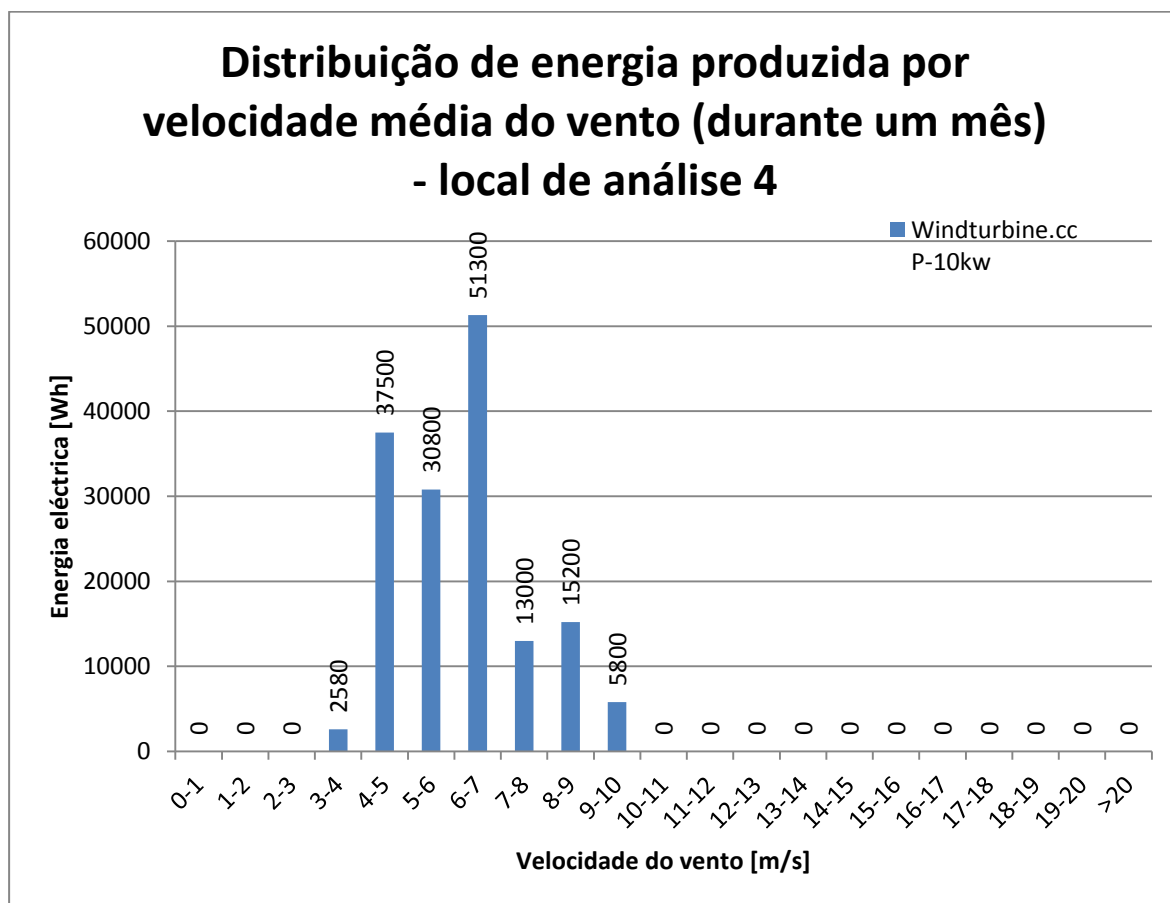
No caso do local 4, o melhor dos dois melhores resultados obtidos em termos de potência produzida foi a *Ropatec Big Star*, (ver Figura 72).



**Figura 72 Distribuição de potência produzida no local 4 pela *Ropatec Big Star***

Na Figura 72 pode-se visualizar o histograma da distribuição de potência produzida por esta turbina. A maior parte da potência produzida obteve-se para velocidades do vento compreendidas entre 5 e 7 m/s. O total de potência produzida por esta turbina foi de 182206 Wh.

No caso do local 4, o segundo melhor valor obtido (em termos de potência produzida) foi o da turbina *Windturbine.cc* PK10kW, ver Figura 73.



**Figura 73 Distribuição de potência produzida no local 4 pela *Windturbine.cc* PK10kW**

Na tabela seguinte estão sintetizados os valores obtidos de potência mensal produzida e de utilização mensal da potência instalada, para cada uma das duas turbinas.

**Tabela 11 Potência mensal produzida e utilização mensal da potência instalada para os dois melhores casos de VAWTs obtidos para o local 4**

<b>VAWT Local 4</b>	<b>Potência mensal produzida</b>	<b>Utilização mensal da potência instalada</b>
<i>Ropatec Big Star</i>	182206 Wh	9.11 h
<i>Windturbine.cc PK10kW</i>	156180 Wh	15.61 h

Por fim, são resumidos na Tabela 12 os valores de potência produzida por cada uma das duas melhores VAWTs analisadas.

**Tabela 12 Síntese dos resultados obtidos para cada local analisado em termos de potência mensal produzida por cada uma das VAWTs**

<b><u>Potência mensal produzida</u></b>	<b>Local 1</b>	<b>Local 2</b>	<b>Local 3</b>	<b>Local 4</b>
<i>Ropatec_big_star</i>	124694 Wh	55183 Wh	161651 Wh	182206 Wh
<i>Windturbine.cc PK10kW</i>	-	-	137310 Wh	156180 Wh
<i>URban Grenn energy uge-4kW</i>	116080 Wh	83550 Wh	-	-

Como se pode visualizar pela tabela anterior, o Local 4 foi o que obteve melhor resultado em termos de potência mensal produzida, isto se se usasse a *Ropatec Big Star*. Note-se que se trata do ponto mais alto de todos os locais analisados. No entanto, tal como se esperaria, foi no local mais elevado que se obteve maior potencial eólico, como se pode constatar pela tabela. Algo que se deve ter em atenção é que nos outros locais as medições do vento foram efectuadas em meses diferentes (para se comprovar definitivamente seria necessário utilizar diferentes locais mas no mesmo período temporal).

## 5.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Foi também efectuado neste documento um estudo exemplificativo sobre a velocidade do vento que seria encontrada na área ocupada pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Para isso foi feita uma análise de geoestatística e para tal recorreu-se ao programa *GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences Professional Edition 9*, disponível no site <http://www.gammadesign.com/Demo.aspx>. Tratou-se de um estudo preliminar e a título de exemplo, e que para que o mesmo pudesse ser encarado de forma consistente, deveria ter sido realizado, utilizando diversos anemómetros a recolher dados em simultâneo em locais distintos. Assim, como para além do anemómetro utilizado neste estudo havia um outro, localizado no edifício E do ISEP e deduzindo o vento em mais alguns locais do ISEP foi possível realizar mais esta análise. Fica aqui um exemplo de uma abordagem desejável neste tipo de estudos que, por limitações da mais variada natureza, não se pôde concretizar como se almejava.

De seguida são introduzidos primeiramente alguns conceitos sobre geoestatística sendo posteriormente revelados os resultados obtidos para o local em estudo.

### 5.2.1. CONCEITOS DE GEOESTATÍSTICA

Fenómenos naturais tais como a chuva, a concentração de metais no solo, entre outros, apresentam frequentemente certas semelhanças entre amostras e nas variações entre amostras vizinhas. Isto leva a crer que tais amostras não são necessariamente aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial. Devido a essa não aleatoriedade de amostras a análise espacial surge como uma alternativa e/ou complemento da análise clássica dos dados (média, histogramas, desvio padrão, etc), sendo que este tipo de análise considera as correlações entre as observações quando se fazem as estimativas. E é então aí que surge a geoestatística [69].

A geoestatística está interessada em determinar a dependência espacial das observações de uma variável pelo que recebeu tal denominação devido sobretudo aos trabalhos desenvolvidos por *Krige* na Africa do Sul. Este pesquisador foi homenageado com o nome do método de interpolação utilizado na geoestatística, a krigagem (utilizada no caso prático desta tese) [69].

Em termos gerais, a aplicabilidade e a utilização da geoestatística como metodologia de análise de dados no espaço ou no tempo, está difundida em vários ramos da ciência, nomeadamente nas áreas das ciências humanas, biológicas e exactas.

Para que seja possível aplicar a geoestatística a um determinado problema em análise, é necessário começar por determinar se as amostras são dependentes espacialmente. Existem duas funções específicas capazes de fazer isso que são: a autocorrelação, que gera o autocorrelograma e a função semivariância, que gera o semivariograma. Nesta tese foi utilizado o semivariograma, isto porque utilizou-se o método da krigagem para fazer o mapeamento da variável intensidade de vento. Ir-se-á de seguida fazer uma breve referência ao mesmo.

A definição de semivariograma em termos matemáticos é dada por:

$$y(h) = \frac{1}{2} \{Var[Z(t) - Z(t + h)]\} \quad (10)$$

Note-se que  $Var[Z(t) - Z(t + h)]$  é a variância dos dados separados por uma distância  $h$ , mas como a equação 10 está dividida por 2 (esta divisão por dois surge das deduções e simplificações matemáticas), esse é o motivo pelo qual se chama de semivariância. Deste modo, obtém-se a semivariância  $y(h)$  e o semivariograma para o gráfico de  $y(h)$  em função de  $h$ .

Analisando a expressão da função semivariância, pode-se imaginar que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e, portanto, menor a semivariância; e quanto mais distantes estiverem os pontos amostrados menor será a semelhança e, conseqüentemente, maior a dispersão (variância).

Na teoria, temos que para a distância  $h = 0$  a semivariância  $y(0) = 0$  e a semivariância  $y(h)$  cresce com o incremento de  $h$ , até atingir um valor constante para  $y(h)$  que corresponde às variações aleatórias, ou seja, variações que não são justificadas pela semelhança de um ponto com outro. A distância  $h$  a partir da qual  $y(h)$  se torna aproximadamente constante é chamada de **alcance** da dependência espacial (**a**) sendo que as medições realizadas a distâncias maiores que **a**, têm distribuição espacial aleatória e, portanto, são independentes entre si. O valor de  $y(h)$  constante é chamado de **patamar** (**C**) [69].

Na figura seguinte está representado o comportamento ideal de um semivariograma e também mostrados os parâmetros caracterizadores do mesmo, enunciados anteriormente.

Na Figura 74 (B) surge um novo parâmetro  $C_0$  chamado de efeito pepita. Este efeito pepita surge quando existem erros de análise de laboratório, etc, donde o patamar passar a ser definido por  $C_0 + C$ .

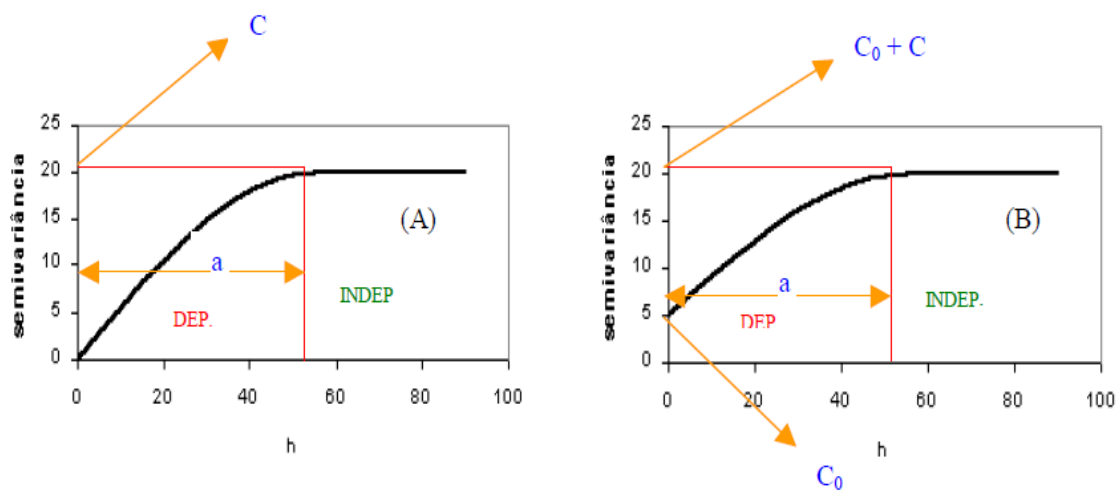


Figura 74 Semivariogramas: (A) sem efeito pepita; (B) com efeito pepita [69]

Se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de  $h$ , temos o efeito pepita puro e, neste caso, temos a ausência total de dependência espacial, ou seja, a dependência espacial, se existir, será manifestada à distância ou tempo menor do que o menor espaçamento entre amostras.

O método utilizado para medir a dependência espacial utilizando o semivariograma, consiste, após a obtenção do mesmo, em analisar as seguintes situações:

**Variável com forte dependência espacial**

*Se o efeito pepita for menor ou igual a 25% do patamar  $\left(\frac{C_0}{C_0+C} < 0.25\right)$*

**Variável com moderada dependência espacial**

*Se o efeito representar entre 25% e 75 % do patamar  $\left(0.25 < \frac{C_0}{C_0+C} < 0.75\right)$*

**Variável com fraca dependência espacial**

*Se a relação entre o efeito pepita e o patamar estiver compreendida entre 75% e 100%  $\left(0.75 < \frac{C_0}{C_0+C} < 1\right)$*

**Variável independente espacialmente**

*Se a relação entre o efeito pepita e o patamar for igual a 100%, neste caso temos o semivariograma com efeito pepita puro  $\left(\frac{C_0}{C_0+C} = 1\right)$*

Para além do que foi referido, é necessário modelar o semivariograma através de um modelo matemático. Os modelos mais utilizados são:

i) modelo linear com patamar

$$y(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C}{a}h & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (11)$$

ii) modelo esférico

$$y(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (12)$$

iii) modelo exponencial

$$y(h) = C_0 + C \left[ 1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad 0 < h < d \quad (13)$$

iv) modelo gaussiano

$$y(h) = C_0 + C \left[ 1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right] \quad 0 \leq h \leq d \quad (14)$$

v) modelo sem patamar

$$y(h) = C_0 + Ah^B \quad 0 < B < 2 \quad (15)$$

Uma vez obtido o modelo que mais se aproxima do semivariograma, a última etapa consiste em utilizar um interpolador. Note-se que o semivariograma é a ferramenta da geoestatística que permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável. Os valores obtidos pelo semivariograma são depois utilizados na interpolação, isto é, na estimativa dos dados e posterior mapeamento da variável em análise, o que no caso desta tese tratou-se de analisar a velocidade do vento. O interpolador que utiliza o semivariograma na sua modelagem é chamado de krigagem, em homenagem ao matemático sul-africano *Krige*.

Em termos matemáticos a aplicação da krigagem assume: que sejam conhecidas as realizações  $z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_n)$  da variável  $Z(t)$ , nos locais  $t_1, t_2 \dots t_n$ , que o semivariograma da variável já tenha sido determinado e que o interesse seja estimar um valor  $z^*$  na posição  $t_0$ .

O valor estimado  $z^*(t_0)$  é dado por:

$$z^*(t_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(t_i) \quad (16)$$

em que:  $n$  é o número de amostras de  $Z(t)$  envolvidas na estimativa de  $z^*(t_0)$ , e  $\lambda_i$  são os pesos associados a cada valor medido,  $z(t_i)$ .

## 5.2.2. GEOESTATÍSTICA APLICADA AOS LOCAIS DE ESTUDO

Para realizar a análise geoestatística foram utilizados os dados obtidos de um outro anemómetro situado num outro local do ISEP. Na Tabela 13 estão representadas as coordenadas GPS do anemómetro e a respectiva altura relativamente ao nível do mar.

**Tabela 13 Coordenadas GPS e altura do anemómetro do local S relativamente ao nível do mar**

Local	Coordenadas GPS	Altura (relativamente ao nível do mar, em metros)
S	Lat.41°10'42,4194''N Lon. 8°36'24,8184''O	180

Na Figura 75, pode-se observar as diferentes posições dos anemómetros utilizados nesta tese. Como se pode verificar, foram utilizadas três posições diferentes no edifício F e uma posição no edifício E do ISEP.



**Figura 75 Pormenor da localizacao dos anemómetros no ISEP**

Uma vez identificados geograficamente os locais em análise, mediu-se as distâncias que separam os dois anemómetros envolvidos neste estudo. O objectivo é o de criar um rectângulo, de modo a geostatisticamente obter os dados de toda a área envolvida.

Através do mapa que o Google oferece foi possível medir o comprimento desde o edifício F até à rua Dr. António Bernardino de Almeida, e obteve-se um valor de 157.89 metros, (ver Figura 76).



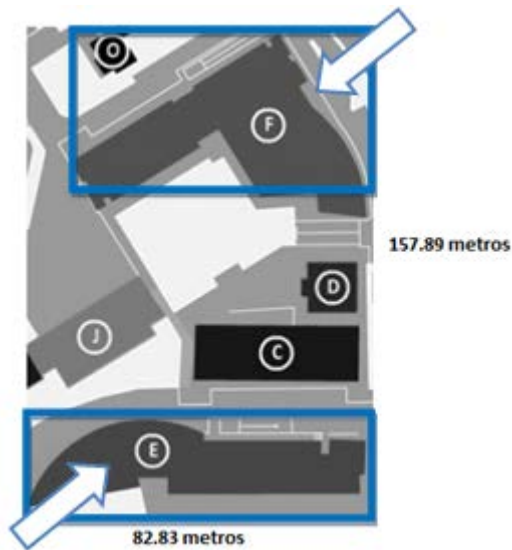
**Figura 76** Medição do comprimento da área em análise

Do mesmo modo, obteve-se a largura da área em análise, registando um valor de 82.829 metros, ver figura seguinte.



**Figura 77** Medição da largura da área em análise

Ou seja, a área em análise tem como medidas 82.829 metros por 157.89 metros, como se pode verificar na figura seguinte.



**Figura 78** Área em análise utilizando a geoestatística

Após se haver definido a área em estudo, foram sintetizados os valores medidos em cada mês por cada um dos anemómetros, como se pode ver na Tabela 14. Com as medidas da velocidade do vento registadas durante um mês, foi calculado o seu valor médio. Ou seja, para cada mês obteve-se um conjunto de dois pares de resultados referentes a locais diferentes mas correspondentes a momentos temporais idênticos. A partir daqui partiu-se para a análise geoestatística propriamente dita.

**Tabela 14 Síntese dos valores médios máximos medidos durante um mês nos dois anemômetros em simultâneo, mas em locais diferentes**

<b>Media Valores Máximos</b>	<b>Local1</b>	<b>LocalS</b>	<b>Periodo:15Fev_a_15Mar</b>
<b>Mês 1</b>	2,3975	3,7254	

<b>Media Valores Máximos</b>	<b>Local2</b>	<b>LocalS</b>	<b>Periodo:18Mar_a_18Abr</b>
<b>Mês 2</b>	2,1038	3,6063	

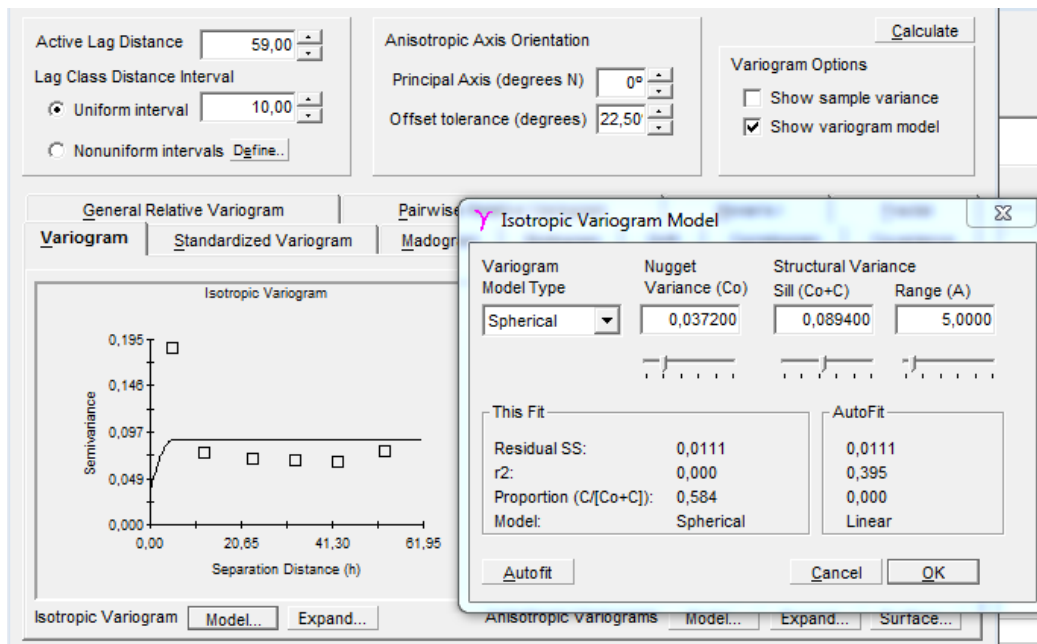
<b>Media Valores Máximos</b>	<b>Local3</b>	<b>LocalS</b>	<b>Periodo:12Mai_a_12Jun</b>
<b>Mês 3</b>	2,4016	3,6577	

<b>Media Valores Máximos</b>	<b>Local3</b>	<b>LocalS</b>	<b>Periodo:17Jun_a_17Jul</b>
<b>Mês 4</b>	2,5547	3,8675	

Uma vez que na elaboração desta tese só se teve acesso a dois anemômetros em simultâneo, e como para realizar uma análise geoestatística consistente tal número é insuficiente, foram atribuídos valores de intensidade de vento a mais alguns locais, tendo por base os dois anemômetros referidos. Eis o motivo pelo qual, desde o início do texto aqui apresentado, se insiste no termo análise geoestatística exemplificativa.

#### **5.2.2.1. MÊS 1 – ANÁLISE GEOESTATÍSTICA**

Tal como foi referido anteriormente, primeiro verificou-se se os dados obtidos eram espacialmente dependentes. Para isso foi utilizado o semivariograma.

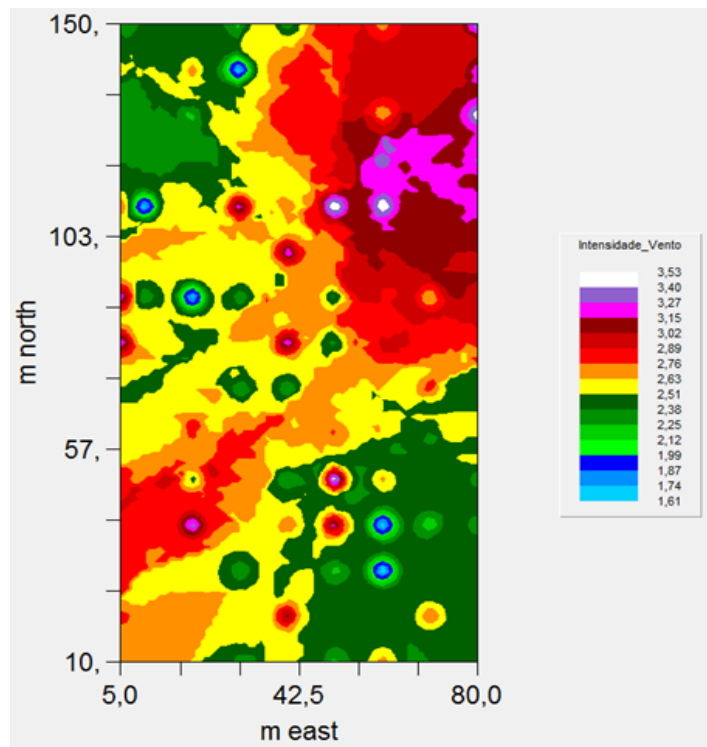


**Figura 79 Semivariograma obtido para o mês 1**

Como se pode ver na Figura 79, obteve-se um valor de  $\frac{C_0}{C_0+C} = 0.584 < 0.75$ , concluindo-se assim, que os dados têm moderada dependência espacial. O modelo matemático que melhor descreve o semivariograma obtido é o modelo esférico.

Com estes dados, e utilizando a interpolação de *Krige* foi obtido o mapeamento da variável em análise, ou seja, a intensidade da velocidade do vento em diferentes posições.

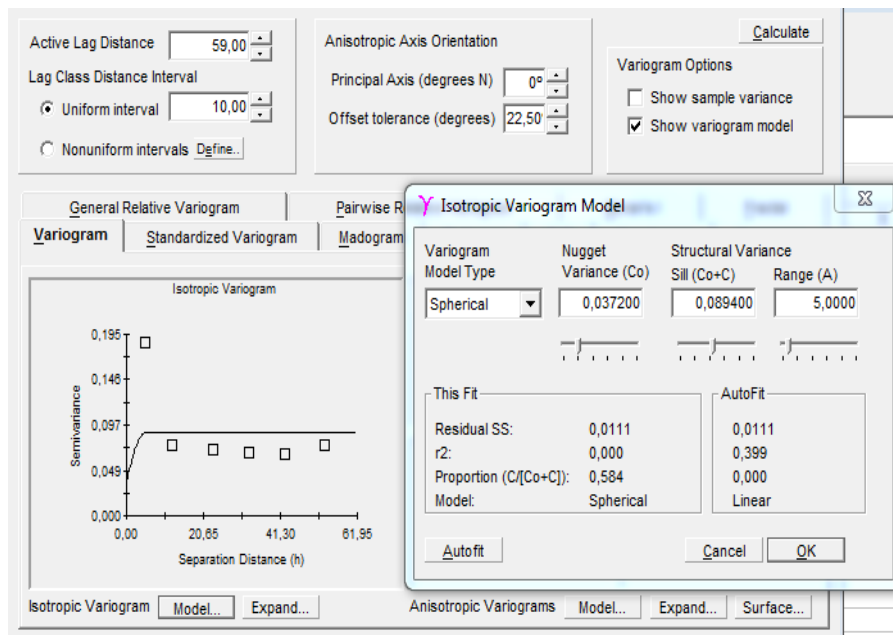
Como se pode ver na Figura 80, os valores mais elevados situam-se na zona virada a norte do edifício F, com valores máximos próximos de 4 m/s.



**Figura 80** Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 1

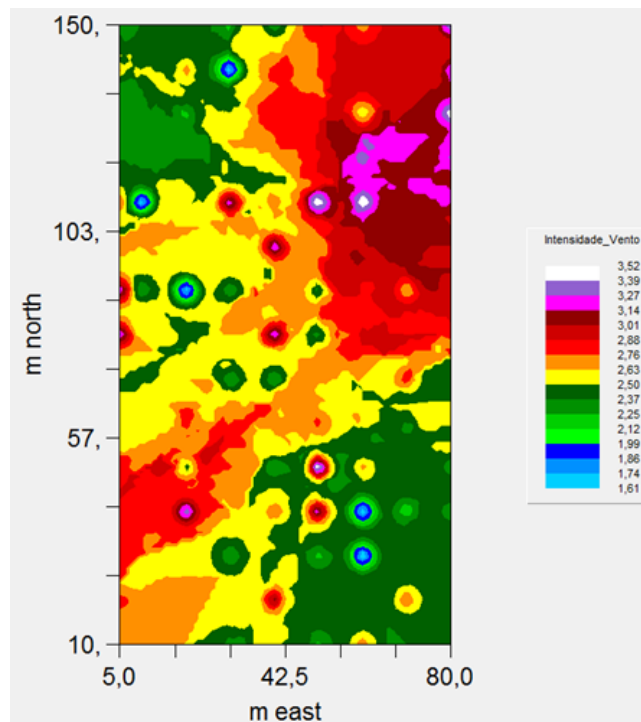
### 5.2.2.2. MÊS 2 – ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

No caso do mês 2 de análise, o anemômetro do edifício F esteve no mesmo local mas numa posição mais alta. Na Figura 81, pode-se observar o semivariograma obtido para este caso. Obteve-se um valor de  $\frac{C_0}{C_0+C} = 0.584 < 0.75$ , concluindo-se, uma vez mais, que as amostras têm moderada dependência espacial.



**Figura 81 Semivariograma obtido para o mês 2**

Utilizando a interpolação de *Krige*, na Figura 82, tem-se o mapeamento da variável. Como era de esperar, as diferenças face ao mês anterior são quase nulas, apresentando novamente a zona virada a norte do edifício F como a que tem maior intensidade de vento.

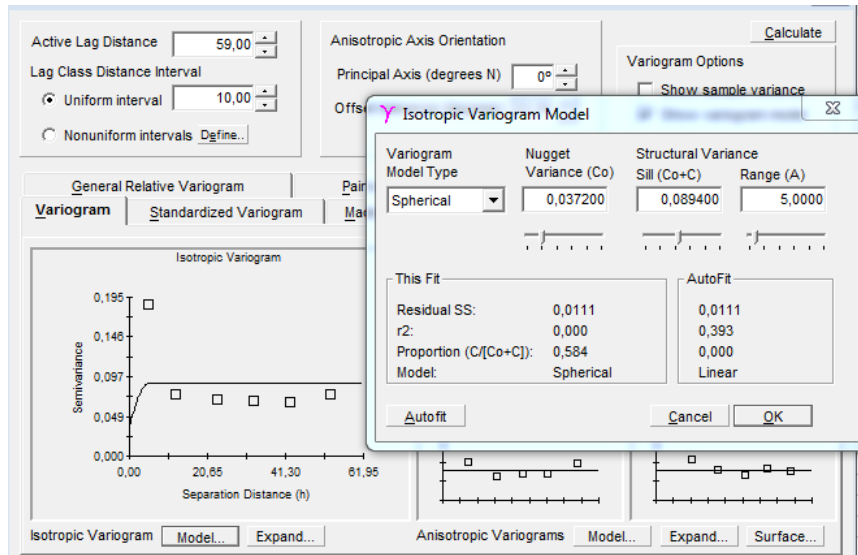


**Figura 82 Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 2**

### 5.2.2.3.

### MÊS 3 – ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

No caso no mês 3 de análise, o anemómetro do edifício F foi colocado mais a norte e numa posição mais alta do que a utilizada anteriormente. O semivariograma obtido nesta situação está representado na Figura 83.



**Figura 83 Semivariograma obtido para o mês 3**

Obteve-se um valor de  $\frac{C_0}{C_0+C} = 0,584 < 0,75$ , constatando-se que as amostras têm moderada dependência espacial. O modelo matemático que melhor descreve o semivariograma obtido é o modelo esférico.

Na Figura 84 tem-se o mapeamento da variável intensidade de vento utilizando a interpolação de *Krige*. Nota-se que o valor de intensidade de vento mais elevado continua a ser na zona do edifício F virada a norte, mas com mudanças subtis face às análises anteriormente realizadas.

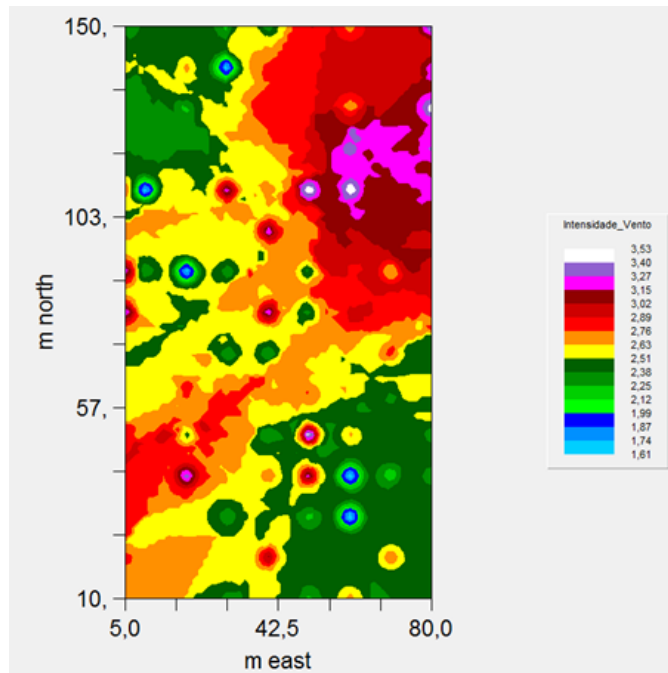


Figura 84 Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 3

#### 5.2.2.4. MÊS 4 – ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Por fim, foi efectuada a análise geoestatística num local ainda mais elevado do edifício F. Novamente obteve-se um valor de  $\frac{C_0}{C_0+C} = 0.584 < 0.75$ , ou seja, as amostras têm moderada dependência espacial. O modelo matemático que melhor descreve o semivariograma obtido é o modelo esférico, como se pode ver na Figura 85.

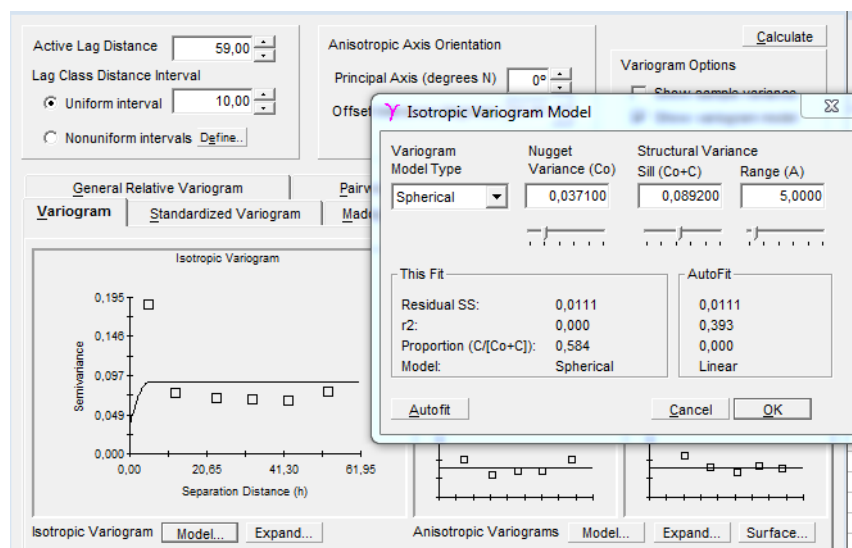
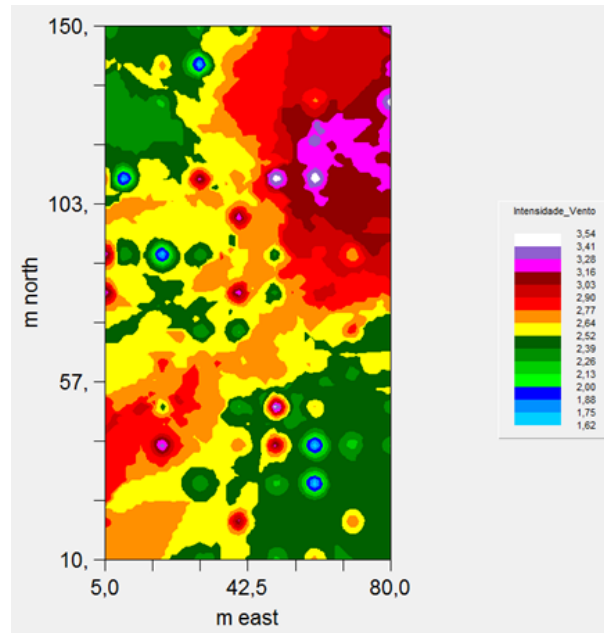


Figura 85 Semivariograma obtido para o mês 4

O mapeamento da variável foi também efectuado utilizando a interpolação de *Krige*. Face aos resultados obtidos, neste caso, a área onde se tem maior intensidade de vento continua a ser na zona norte do edifício F, porém, nestas circunstâncias a sua área é aumentada ligeiramente, ver figura seguinte.



**Figura 86** Mapeamento da variável intensidade do vento para o mês 4

Assim, terminadas as análises relatadas no capítulo presente, pode-se sugerir de modo confiável que o recurso a turbinas de eixo vertical para produção de energia no contexto estudado, desde que seleccionadas atendendo, quer às respectivas curvas quer aos dados de vento recolhidos no local, permitiriam uma produção de energia eléctrica significativa.

Complementarmente, uma recolha de dados mais completa e num contexto de análise geoestatística iria conduzir a um mapeamento do recurso muito mais rico em informação e sem que a análise em si se revista de uma complexidade de teor impeditivo ou contraproducente.

No caso desta tese, a análise geoestatística foi aplicada a um local específico compreendida entre os edifícios F e E do ISEP. Ora, numa abordagem mais abrangente, poder-se-ia perfeitamente aplicar este mesmo estudo a todo o campus do ISEP, fazendo o mapeamento da variável intensidade do vento para toda a localização geográfica do ISEP. E, a partir daí ir progressivamente aumentando a área de incidência de modo a caracterizar de forma mais

abrangente os efeitos que o vento tem em ambiente edificado urbano, neste caso, na cidade do Porto.

Em termos de turbinas a ser utilizadas nos locais indicados pela análise geoestatística, tendo em conta a potência que seria produzida pela turbina *Urban Green Energy* e pelo facto de esta arrancar com cerca de 2 m/s, esta seria a opção mais viável



## 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como inicialmente foi mencionado, o principal objectivo desta tese seria contribuir para novas perspectivas de produção de energia eléctrica face ao que actualmente se faz, usando a energia proveniente do vento, num ambiente urbano, edificado e recorrendo a turbinas eólicas de eixo vertical. Assim, este documento procurou analisar o comportamento de várias VAWTs relativamente à colocação das mesmas em ambiente urbano edificado, atendendo aos valores recolhidos num cenário compatível, durante um dado período temporal. Tendo efectuado o estudo do estado da arte, o mesmo revelou algumas vantagens das VAWTs face às HAWTs, como por exemplo: utilizarem vento oriundo de qualquer direcção para produzir energia, facilidade de construção e bom rendimento em zonas de elevada turbulência do vento, comportamento este típico de um ambiente edificado e pouco atraente para aproveitamentos energéticos com as convencionais turbinas de eixo horizontal. Porém, também revelou desvantagens, tais como o facto de alguns tipos de turbinas VAWTs (não todos) necessitarem de energia externa para iniciarem o seu movimento de rotação por não assegurarem sempre a capacidade de disporem de binário de arranque, sobretudo a baixas velocidades de vento. Note-se que, no seio das VAWTs, as *Savonious* não necessitam de binário de arranque, uma vez que mesmo com pouco vento a sua geometria assegura que elas arrancam, embora venham posteriormente a funcionar a baixas rotações impondo a necessidade de recorrer a geradores de tipo *direct drive* com elevado número de pólos indutores para compensar esse facto. Em contrapartida, é entre os modelos de VAWTs que funcionam a rotações mais elevadas que se verificam dificuldades no arranque. Alguns fabricantes conseguem já

contornar esse aspecto por introdução de alterações patenteadas aos *designs* clássicos deste tipo de VAWTs. Fica no entanto evidente a falta de I&D no que às dimensões e *designs* óptimos (e otimizados) diz respeito. Precisamente em virtude deste facto o campo de estudo das VAWTs torna-se assim um campo do saber científico e tecnológico particularmente apetecível, tendo em conta que pouco desenvolvimento houve desde que a energia eólica se revelou tão importante com a procura de energia a crescer e as reservas de combustíveis fósseis a diminuir. É também pelas perspectivas de futuros cenários energéticos complexos, que tal I&D se torna não só apetecível como ainda crucial na busca de alternativas eficazes e passíveis de permitir o aproveitar de recursos renováveis em locais e circunstâncias até aqui descartados.

Os ventos citadinos são, pela configuração construtiva e geográfica do meio, habitualmente turbulentos e rapidamente cambiantes de direcção e intensidade. Assim, Algo que aqui também ficou claramente sublinhado, é o facto de as VAWTs aceitarem vento oriundo de todas as direcções e terem mesmo comportamentos de auto-regulação natural que dispensam sistemas de travagem se o vento atingir valores muito intensos ou elevados. Este “mecanismo”, consequência do *design*, estabiliza a turbina numa dada velocidade, mesmo que o vento possa continuar a aumentar. Trata-se de um aspecto de particular relevância se atendermos a critérios de exigência de segurança na instalação de turbinas eólicas em edifícios citadinos. Tendo isto em consideração, e associado ao facto de o custo da energia aumentar de ano para ano, acrescido do caso de haver países como a Alemanha que irão fechar as centrais nucleares até 2020, e ao facto de uma grande fatia da energia consumida sê-lo em edifícios de serviços (em termos mundiais cerca de 40 % da energia total consumida corresponde aos consumos em edifícios de serviços), faz com que a pergunta “Como vamos suprir as necessidades crescentes de uma população necessitada de energia?” esteja na ordem do dia.

Isto conduz e sustenta o empenho e a preocupação com a aposta nas energias renováveis, e neste caso na energia eólica, seja de extrema importância e acalentem esforços de toda a natureza.

Por todos estes motivos, a utilização de energia eólica assume um papel ainda mais relevante na produção de energia eléctrica. Associando a isto o facto de os principais centros urbanos das grandes cidades conterem cada vez mais edifícios altos (sobretudo devido ao elevado custo por m<sup>2</sup>) e nesse ambiente edificado urbano essa configuração

construtiva fomentar o efeito de tunelamento de vento, que provoca aceleração do fluído (neste caso do ar), o interesse pelas turbinas tipo VAWTs assume, nestes casos particulares, ainda maior importância. Note-se que o seu funcionamento como omnidireccional, torna-as numa primeira escolha para este tipo de situações.

Relativamente ao estudo efectuado, para o caso particular do *campus* do ISEP, e entre o conjunto de VAWTs analisadas, tendo em conta os locais escolhidos para essa mesma análise, as que apresentaram melhor desempenho (em termos de energia produzida) foram a *Ropatec Big Star*, a *Windturbine.cc* e a *Urban green energy*. Tendo em conta estes resultados, tais turbinas poderiam, por exemplo (e admitindo que o enquadramento legal da microprodução não colocava quaisquer entraves), contribuir para injeção da energia produzida na rede de baixa tensão (diminuindo o custo energético total do edifício, uma vez que se vende parte da energia produzida) ou simplesmente complementando as necessidades energéticas locais do edifício.

Relativamente à análise geoestatística, o melhor local onde se poderia instalar turbinas eólicas de eixo vertical seria no topo do edifício F na zona virada a norte, visto que foi este o local que melhores resultados apresentou. De realçar que para que a análise geoestatística fosse a mais assertiva o possível, seria necessário utilizar dados reais provenientes de pelo menos 15 a 20 anemómetros a efectuarem amostragens no mesmo período de tempo, algo que não foi possível obter para a realização desta tese, visto só ter acesso a dois anemómetros. No entanto, deduzindo a intensidade do vento em mais alguns locais, com base nos dados recolhidos pelos anemómetros utilizados, foi possível obter um mapeamento da variável intensidade do vento, na área considerada neste estudo, e assim prever a intensidade do vento em pontos onde não se tinha amostras do mesmo.

Em termos de desenvolvimentos futuros, tendo em conta que as VAWTs apresentam actualmente carências de mais estudos científicos, uma análise mais profunda às diferentes opções das mesmas (*Savonious*, *H-rotor*, *Darrieus*) poderia revelar ainda mais potencialidades do que as que já se conhecem ou mesmo aspectos construtivos capazes de melhorar a sua eficiência. Relativamente à análise do vento em ambiente edificado urbano, seria deveras interessante mapear o potencial eólico de por exemplo uma zona específica de uma cidade (por exemplo do Porto), complementando esse mesmo estudo com a geoestatística.



## Referências Documentais

- [1] Sítio da Internet: [http://www.factorelevante.pt/loja/product.php?id\\_product=168](http://www.factorelevante.pt/loja/product.php?id_product=168),  
acedido em 19/04/2011
- [2] PEACE, Steven - Another approach to wind (cover story), *Mech Eng* 126 (2004),  
pp. 28-31
- [3] RIEGLER, Hannes - HAWT versus VAWT: small VAWTs find a clear niche,  
*Refocus* 4 (2003), pp. 44-46
- [4] URBAN, Knight - wind power: breezing into town, *Nature* 2004;
- [5] Sítio da Internet:  
<http://www.meteorologyshop.eu/produkte/bilder2007/14050004x.jpg>,  
acedido em 20/04/2011
- [6] Sítio da Internet:  
<http://www.motherearthnews.com/uploadedImages/articles/issues/1974-05-01/027-038-01-S-Rotor.jpg>,  
acedido em 30/05/2011
- [7] NEVES, Betina; GUEDES, Pedro - *Vertical axis wind turbine (VAWT) for micro-energy generation: spinning students' minds*, 2008
- [8] MANWELL, J.F.; MCGOWAN J.G.; ROGERS A.L. - *Wind energy explained*, 1<sup>st</sup>  
ed. Amherst, USA, Wiley 2002
- [9] DARRIEUS, G.J.M. - Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of  
the current. Us Patent no.1.835.018, 1931
- [10] GERMAN, J. - The end of an era: Sandia's 17-meter vertical axis wind turbine  
comes down after two decades. *Sandia Lab News* 1997
- [11] SAHA, U.K.; THOTLA S.; MAINTY D. - *Optimum design configuration of  
Savonius rotor through wind tunnel experiments*, 2008
- [12] PEACE, Steven - Why not vertical axis? *Refocus* 2003
- [13] CARLIN, P.W.; LAXSON A.S.; MULJADI E.B. - "The history and state of the  
art of variable-speed wind turbine technology". National Renewable Energy  
Laboratory 2001, Technical report: NREL/TP-28607
- [14] MUSGROVE, P.J. - Wind energy conversion: recent progress and future  
prospects. *Sol Wind Technology*, 1987
- [15] MORGAN C.A.; GARDNER P.; Mays I.D.; Anderson M.B. - "The  
demonstration of a stall regulated 100 kW vertical axis wind turbine". In  
*Proceedings 1989 European wind energy conference*, Glasgow, Scotland, 1989

- [16] MAYS I.D.; MORGAN C.A. – “The 500 kW VAWT 850 demonstration project”. In: Proceedings 1989 European wind energy conference, Glasgow, Scotland, 1989
- [17] BEEK, Van J. - Keeping Antarctica pollution free. *Windpower Monthly*, Holland, March 1990.
- [18] Technical Sheet of THERMIE Project Renewables Wind Energy (RWE-8). Contract no: WE/00010/91/DE. Project end date: 31/08/1994. OPET Sweden, Drottninggatan 50, 111 21 Stockholm, Sweden.
- [19] BROTHERS C. – “Vertical axis wind turbines for cold climate applications”. Renewable Energy Technologies in Cold Climates, Montreal 1998, private communication 2005-04-13.
- [20] LOPES, Alexandre - “Produção eólica e enquadramento técnico-económico em Portugal”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho 2009
- [21] Sítio da Internet: <  
[http://www.sustainableenergy.com/fileadmin/user\\_upload/news/06-11-29\\_Sustainable\\_Energy\\_to\\_License\\_Wind\\_Turbine\\_For\\_Indian\\_Market.pdf](http://www.sustainableenergy.com/fileadmin/user_upload/news/06-11-29_Sustainable_Energy_to_License_Wind_Turbine_For_Indian_Market.pdf)>,  
acedido em 2010-04-12
- [22] Sítio da Internet: <<http://www.turby.nl/>>, acedido em 2010-04-12
- [23] MERTENS, S. - The energy yield of roof mounted wind turbines, *Wind Eng* 27 (2003), pp. 507–518
- [24] SCOTT, George; ELLIOTT, Dennis; SCHWARTZ, Marc – *Wind Monitoring Equipment and measurement programs*, National Renewable Assessment Team
- [25] SATHYAJITH, Mathew - Wind Energy – Fundamentals, *Resource Analysis and Economics*, ISBN 3-540-30905-5
- [26] Sítio da Internet: <[http://www.ropatec.com/index\\_n.php?pid=01&lin=3#](http://www.ropatec.com/index_n.php?pid=01&lin=3#)>,  
acedido em 2010-04-12
- [27] Sítio da Internet <<http://www.neuhaeuser.com/neuhaeuser/index1024.php>>,  
acedido em 2010-04-12
- [28] KOMATINOVIC, Nemanja – “Investigation of the Savonius-type Magnus Wind Turbine, Technical University of Denmark”, October 2006
- [29] Sítio da Internet: <<http://mckenziebay.com/>>, acedido em 2010-04-12
- [30] Sítio da Internet: <<http://www.aes-energie.de/>>, acedido em 2010-04-12
- [31] Sítio da Internet: <<http://www.eurowind-uk.net/>>, acedido em 2010-04-12
- [32] Sítio da Internet: <<http://www.wind-sail.com/>>, acedido em 2010-04-12

- [33] ROYNARIN, W.; LEUNG P.S.; DATTA P.K. – “The performances of a vertical Darrieus machine with modern high lift airfoils”. In: Proceedings from IMAREST conference MAREC 2002, Newcastle, UK.
- [34] BAUER P.; DE, Haan S.W.H.; DUBOI M.R. – “Windenergy and offshore windparks: state of the art and trends”. In: 10th International power electronics and motion control conference EPE-PEMC 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia.
- [35] Sítio da Internet: <http://cleantechnica.com/2011/03/25/offshore-vertical-axis-wind-turbines/>, acessado em 09/06/2011
- [36] Sítio da Internet: <<http://www.enercon.de/de-de/>>, acessado em 2010-04-12
- [37] SHANKAR, P.N. - Development of vertical axis wind turbines, *Rural Technol Indian Academy Sci* (1980), pp. 145–162.
- [38] IEC 61400-12-1 Ed.1: Wind turbines – Part 12-1: *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*
- [39] SEKI, K.; SHIMIZU Y.; MATSUMOTO T. – “A study of straight blade VAWT and its application”. In: Proceedings 1984 European wind energy conference, Hamburg, FRG, 1984: 436-42.
- [40] PARASCHIVOIU, I. - *Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept* (1st ed), Polytechnic International Press, Canada (2002).
- [41] ZHAO, Zhenzhou; ZHENG, Yuan; XU, Xiaoyun; LIU, Wenming; HU, Guaxiang – “Research on the Improvement of the performance of savonious rotor based on numerical study”, 2008, IEEE
- [42] ÅGREN, O.; BERG, M.; LEIJON, M. – “A time-dependent potential flow theory for the aerodynamics of vertical axis wind turbines”, *J Appl Phys* **97** (2005), p. 104913
- [43] MCGOWAN, J.G.; CONNORS, S.R. - Windpower: a turn of the century review, *Ann Rev Energy Environ* **25** (2000), pp. 147–197
- [44] MARSH, G.; PEACE, S. - Tilting at windmills: utility-scale VAWTs: towards 10MW and beyond?, *Refocus* **6** (2005), pp. 37–42
- [45] MULJADI, E.; PIERCE, K.; MIGLIORE, P. – “Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines”. National Renewable Energy Laboratory 1989; NREL/CP-500-24311-UC Category:1211.
- [46] ASHWILL, T.D. – “Measured data for the Sandia 34-meter vertical axis wind turbine”. Sandia National Laboratories 1992; SAND91-2228.
- [47] WALTERS, R.E.; FANUCCI, J.B.; HILL, P.W.; MIGLIORE, P.G. – “Vertical axis wind turbine development”. US Department of energy 1979, W.V.U. A.E. Report no. TR-58

- [48] GIOVANELLA, Carlos – “Testes de Turbinas de eixo vertical em escala”, Universidade Católica do Rio Grande do Sul – faculdade de engenharia, 2004
- [49] HU, Yonghai; TONG, Zhengmin; WANG, Shanshan – “A new type of vawt and blade optimization”, University of Shanghai for Science and Technology, 2007, IEEE
- [50] VANDENBERGHE, D.; DICK, E. - A free vortex simulation method for the straight bladed vertical axis wind turbine, *J Wind Eng Ind Aerodyn* **26** (1987), pp. 307–324
- [51] Sítio da internet: <http://www.youtube.com/watch?v=c8ofKpBG26I>, acessado em 15/07/2011
- [52] LIDA, A.; MIZUNO, A.; FUKUDOME, K. – “Numerical simulation of aerodynamic noise radiated from vertical axis wind turbines”. In: Proceedings of ICA2004, the 18th international congress on acoustics, 4–9 April 2004 Kyoto, Japan.
- [53] TUCKER, V.A. - Using a collision model to design safer wind turbine rotors for birds, *J Sol Eng* **118** (1996), pp. 263–269
- [54] SHENGMAO, Li; YAN, Li – “Numerical study on the performance effect of solidity on the straight-bladed vertical axis wind turbine”, Engineering College Northeast Agricultural University Harbin, China, 2010, IEEE
- [55] Sítio da Internet: <http://www.flickr.com/photos/politecnicodoporto/3521592313/in/set-72157617338475549>, acessado em 15/07/2011
- [56] CASTRO, Rui M.G. – Energias renováveis e produção descentralizada, Introdução à energia Eólica. Instituto Superior Técnico, 2007
- [57] PINHEIRO, Larissa M.G. – Estudos da geração eólico-elétrica levando em consideração as características dos ventos, seus aspectos probabilísticos e influência do terreno. Universidade Federal do Ceará, centro de tecnologia, programa de graduação em engenharia elétrica, Fortaleza, Novembro de 2009
- [58] HAU, Erich - *Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition* (October 6, 2005), Springer, ISBN-13: 978-3540242406
- [59] Sítio da Internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Charles\\_F.\\_Brush](http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_F._Brush), acessado em 2010-04-21
- [60] ERIKSON, Sandra; BERNHOFF, Hans; LEIJON, Mats – “Evaluation of different turbine concepts for wind power”, 2006, IEEE
- [61] Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, UEO – Unidade de Energia Eólica e dos Oceanos, EOLOS – Base de Dados do Potencial Energético do vento em Portugal, disponível no sítio, [http://www.ineti.pt/projectos/projectos\\_frameset.aspx?id=299](http://www.ineti.pt/projectos/projectos_frameset.aspx?id=299), acessado em

01/06/2011

- [62] COSTA, P.; MIRANDA, P.; ESTANQUEIRO, A. - “Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas”. Proceedings of the European Wind Energy Conference 2006, paper 841
- [63] LUTGENS, F.K.; TARBUCK, E.J. - *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995, 6<sup>th</sup> ed.
- [64] WIKIPEDIA. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>, acessado em 20/04/2011
- [65] Sítio da Internet, <http://www.everthron-marine.com.ar/Instrumentaci%C3%B3n.html>, acessado em 20/04/2011
- [66] Sítio da Internet, <http://megaarquivo.files.wordpress.com/2011/03/anemómetro-gradiente-peq.jpg?w=300&h=300>, acessado em 20/04/2011
- [67] MAURO, Pinto – “Especificações de projecto para medição de velocidade de vento utilizando anemómetro ultra-sónico com o método de diferença de fase”, Universidade Federal do Maranhão, 2006
- [68] ECSITE. Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo. Disponível em: <http://www.museoscienza.org/english/leonardo/anemómetro.asp>, acessado em 20/04/2011
- [69] GUIMARAES, Ednaldo C. – *Geoestatística básica e aplicada*. Universidade Federal de Uberlândia, faculdade de matemática, núcleo de estudos estatísticos e biométricos, Fevereiro de 2004
- [70] Sítio da Internet: <http://www.petroleumnews.net/storyview.asp?storyid=44264&sectionsourc=s0#>, acessado em 16/07/2011
- [71] Sítio da Internet: <http://www.bettergeneration.com/>, acessado em 10/08/2011



## Anexo A. Características técnicas do anemómetro

### *Ficha Técnica*

Tipo	Rotor de 3 pás
Sinal de saída	1 impulso por rotação (2 mph por Hz)
Diâmetro do rotor	125 mm
Faixa de medição	5 a 200 km/h (1.4 a 56 m/s)
Velocidade de máxima	200 km/h (56 m/s)
Temperatura	-10° a 60° C
Precisão	+/- 4% (ex: 20 mph +/- 0.8 mph)
Tipo de contacto	Magnético
Contacto eléctrico	12 VDC máx e 0.1 A máx
Cabo eléctrico	8 metros de cabo tipo YCY 2x0.8 mm <sup>2</sup> de qualidade de áudio. Leitura até 500 metros de distância sem distorção de sinal.
Ligação	Equipado com ficha Jack 3.5 mm fêmea. Ligação PC por meio de adaptador Jack 3.5 mm/ficha de 9 pinos para porta série
Protocolo	RS-232
Acessórios	Mini mastro em barra chata de alumínio, parafusos para fixação, buchas 8 mm e abraçadeiras de serrilha
Energia	Não necessita de fornecimento de energia

Manutenção	Limpeza e lubrificação de veio (grafite) quadrimestral
<i>Software</i>	Armazenamento de dados no formato ASCII de tal ordem que pode ser lido por praticamente qualquer software de gráficos (*CSV (XLS)). Os dados armazenados incluem a velocidade corrente, máximo, mínimo e média durante o intervalo de tempo seleccionado (mínimo 1 minuto).
<i>Hardware</i>	PC com sistema operativo Windows XP até versão mais actual



## *Histórico*

- 09 de Junho de 2011, Versão 1.0, <mailto:1060852@isep.ipp.pt>
- 24 de Outubro de 2011, Versão 2.0, <mailto:1060852@isep.ipp.pt>
- 26 de Outubro de 2011, Versão 3.0, <mailto:1060852@isep.ipp.pt>
- 10 de Novembro de 2011, Versão 4.0, <mailto:1060852@isep.ipp.pt>

\$Id:MEEC-TEDI.dot v1.0b Date:16-11-2007\$