



Licenciatura em Engenharia de Energias Renováveis
Escola de Ciências e Tecnologia
Universidade de Évora

Prática de Sistemas Energéticos

Medição e caracterização do vento na estação meteorológica da Mitra



Aluno: Filipe Gonçalves
Nº28101
Orientador: Prof. Rui Salgado

Évora, 25 de Janeiro de 2015



Agradecimentos

Antes de tudo, agradecer à Comissão do curso de Engenharia das Energias Renováveis pela oportunidade de realizar o meu estágio no Centro de Geofísica de Évora, ainda para mais sendo este numa área que me desperta bastante interesse, nomeadamente a energia eólica.

Depois quero agradecer ao meu coordenador de estágio, Prof. Rui Salgado, por toda a paciência e disponibilidade que sempre apresentou, e ao Prof. Paulo Canhoto, pelas ajudas pontuais que me foi dando ao longo do estágio.

Por último, um agradecimento muito especial ao Sr. Samuel Ramos Bárias, auxiliar do Centro de Geofísica da Universidade de Évora, por toda a inestimável ajuda, competência, amabilidade e disponibilidade que sempre demonstrou para comigo ao longo de todo o estágio.



Resumo

O presente relatório está enquadrado na unidade curricular da Prática de Sistemas Energéticos, uma componente mais prática da licenciatura em Engenharia das Energias Renováveis, da Universidade de Évora.

O estágio foi realizado na Universidade de Évora, no Colégio Luís António Verney, tendo-se iniciado no dia 16 de Setembro de 2014, prolongando-se até ao dia 19 de Dezembro de 2014, tendo portanto uma duração de cerca de 3 meses.

Neste relatório encontram-se descritas as actividades realizadas ao longo desse período de tempo, estando este dividido em 7 capítulos:

- O primeiro é a introdução, onde se define alguns dos objectivos a cumprir ao longo do trabalho;
- O segundo a descrição e localização da estação;
- O terceiro dando um plano geral sobre a anemometria e os sistemas de aquisição de dado;
- O quarto a análise e o tratamento dos dados recebidos pela Estação Meteorológica da Mitra;
- O quinto a conclusão, onde se realça o que foi concluído na elaboração deste trabalho;
- O sexto as referências do trabalho;
- E por último os anexos.

Índice

1. Introdução	8
1.1 O Vento	9
2. Localização e Descrição	10
2.1 Localização da Estação	10
2.2 Topografia e meio envolvente ao terreno.....	11
2.3 A Estação.....	13
3. Anemometria e registo dos valores	15
3.1 Anemometria.....	15
3.2 Registo dos valores.....	21
4. Análise e tratamento dos dados	23
4.1 Análise de falhas.....	24
4.2 Windographer.....	25
4.3 Análise dos valores.....	27
4.3.1 Anemómetro de copos novo – Anemómetro de copos velho.....	27
4.3.2 Anemómetro ultrassónico dos 10 metros - Anemómetro ultrassónico dos 6 metros.....	43
4.3.3 Anemómetro de copos novo – Anemómetro ultrassónico dos 6 metros.....	56
5. Conclusão	63
6. Referências	64
7. Anexos	65



Lista de figuras

Figura 1: Esquema de formação do vento (Fonte: http://360graus.terra.com.br)	9
Figura 2: Figura 2: Atlas Português do Vento, a 60 metros de altitude, com a seta a apontar a localização da Estação Meteorológica da Mitra (FCUL, Junho 2004)	9
Figura 3: Localização da Estação Meteorológica da Mitra (Google Earth).....	10
Figura 4: Estação Meteorológica da Mitra (21/11/2014)	11
Figura 5: Aceleração do vento num monte (Maroney, 1991)	11
Figura 6: Valores da rugosidade da superfície (U. Hassan e D.M. Sykes,1990)	12
Figura 7: Escoamento a jusante de uma barreira vegetal (Wedley et al., 1980)	13
Figura 8: Escoamento perturbado pela presença de um edifício (Hiester, T.R. e W.T. Pennell,1983)	13
Figura 9: Instalação dos sensores na estação (21/11/2014).....	14
Figura 10: Exemplo de um anemómetro de copos	16
Figura 11: Exemplo de um anemómetro ultrassónico.....	18
Figura 12: Esquema do comportamento de um sensor ultrassónico	19
Figura 13: Pontos cardeais num sensor ultrassónico.....	19
Figura 14: Arranjo dos transdutores no anemómetro ultrassónico e a sua respectiva forma .	19
Figura 15: Expressões para o cálculo do tempo necessário para que o pulso electrónico viaje de um transdutor para outro e a velocidade da intensidade do ar segundo esses valores de tempo.....	20
Figura 16: Descrição do DT80.....	21
Figura 17: Caixa de registo dos valores, com o CR1000 instalado e o multiplexer por baixo	22
Figura 18: Exemplo de uma falha nos dados	24
Figura 19: Menu geral do Windographer.....	26
Figura 20: Gráfico de correlação VCN - VCV	29
Figura 21: Gráfico de série temporal para os anemómetros de copos novo e velho	30
Figura 22: Perfil médio horário para os sensores de copos novo e velho	31
Figura 23: Distribuição de Weibull do anemómetro de copos novo	33
Figura 24: Distribuição de Weibull do anemómetro de copos velho	34
Figura 25: Gráfico de dispersão entre os valores de correlação dos anemómetros de copos e a percentagem de valores aproveitados da série de dados da Mitra.....	38
Figura 26: Gráfico de dispersão entre os valores de velocidade filtrados e os valores de correlação entre os dois anemómetros de copos	38
Figura 27: Gráfico de dispersão entre os dois anemómetros antes da filtragem dos dados ...	40
Figura 28: Gráfico de dispersão entre os dois anemómetros depois da filtragem dos dados .	40
Figura 29: Histograma de frequências da série de dados da Mitra, depois da filtragem dos valores	41
Figura 30 Série de dados da velocidade do vento na Mitra já com o código de erro incluído	42
Figura 31: Gráfico de correlação da velocidade entre os anemómetros ultrassónicos dos 10 e 6 metros.....	44
Figura 32: Gráfico de série temporal para os anemómetros ultrassónicos dos 6 e 10 metros	45
Figura 33: Perfil médio horário para os anemómetros ultrassónicos dos 10 metros e 6 metros	46



Figura 34: Gráfico de distribuição de Weibull do sensor ultrassónico dos 10 metros	48
Figura 35: Gráfico de distribuição de Weibull do sensor ultrassónico dos 6 metros	49
Figura 36: Gráfico de correlação entre os anemómetros de copos novo e ultrassónico dos 6 metros.....	57
Figura 37: Gráfico de série temporal para os anemómetros de copos novo e ultrassónico dos 6 metros.....	58
Figura 38: Perfil médio horário para os sensores de copos novo e ultrassónico dos 6 metros	59
Figura 39: Gráfico de distribuição de Weibull para o sensor de copos novo.....	61
Figura 40: Gráfico da distribuição de Weibull para o sensor ultrassónico dos 6 metros	62
Figura 41: Dimensões do anemómetro de copos A100R.....	66

Lista de tabelas

Tabela 1: Número de dados aproveitados e respectiva percentagem.....	23
Tabela 2: Quadro-resumo com os principais dados estatísticos entre o anemómetro de copos novo e velho.....	28
Tabela 3: Valores de velocidade do perfil médio horário dos anemómetros de copos novo e velho.....	32
Tabela 4: Dados com os valores de velocidade do sensor de copos velho filtrados, os valores de correlação entre os dois anemómetros, com o nº de valores aproveitados da série de dados do vento da Mitra e a respectiva percentagem.....	37
Tabela 5: Quadro-resumo com os principais dados estatísticos entre os anemómetros ultrassónicos dos 10 metros e 6 metros.....	43
Tabela 6: Valores de velocidade do perfil médio horário dos anemómetros ultrassónicos dos 10 metros e 6 metros.....	47
Tabela 7: Quadro-resumo com os principais dados estatísticos entre o anemómetro de copos novo e ultrassónico dos 6 metros.....	56
Tabela 8: Valores de velocidade do perfil médio horário dos anemómetros de copos novo e ultrassónico dos 6 metros.....	60

Lista de equações

(1) Cálculo da função de distribuição de Weibull.....	27
(2) Cálculo da equação logarítmica.....	52
(3) Cálculo do comprimento de rugosidade Z_0	52
(4) Cálculo da lei de potência.....	55
(5) Cálculo do expoente da lei de potência α	55



Nomenclatura

VS1 – Velocidade do anemómetro ultrassónico dos 10 metros

VS2 – Velocidade do anemómetro ultrassónico dos 6 metros

VCN – Velocidade do anemómetro de copos novo

VCV – Velocidade do anemómetro de copos velho

Z_0 – Comprimento de rugosidade

α – Expoente da lei de potência



1.Introdução

Nos tempos actuais, com uma sociedade e uma indústria cada vez mais modernizada e evoluída, a energia desempenha um papel nuclear em todo esse processo. Podemos afirmar, sem qualquer tipo de dúvida, de que ela está na base de todo o desenvolvimento e tecnologia existentes actualmente.

Ora, seguindo esta linha de pensamento, e sabendo que ao nível do consumo energético actual, a energia proveniente das fontes não renováveis de energia, como o petróleo, o gás natural ou o carvão, não durará muitos mais anos, as energias provenientes de fontes renováveis apresentam-se como a alternativa mais provável e mais credível a estas, não só por serem de fontes inesgotáveis, como pelo seu impacte ambiental ser muito mais reduzido.

Dentro do campo das energias renováveis, e sabendo que todas elas possuem um papel bastante importante a desempenhar, uma das que me desperta mais interesse trata-se da energia proveniente de fontes eólicas, pois para além de ser usada desde a antiguidade pela humanidade, possui um potencial enorme por explorar, tanto no presente como no futuro.

Este estágio, realizado na Universidade de Évora, no Colégio Luís António Verney, e no pólo da Mitra, estava inserido nos trabalhos de recuperação da Estação Meteorológica da Mitra, pertencente ao Centro de Geofísica da Universidade de Évora, e tinha 3 objectivos diferentes:

1. Comparar os valores registados por 2 anemómetros diferentes entre si, nomeadamente um de partes móveis (ou como é usualmente conhecido, um anemómetro de copos) com um ultrassónico, para um nível de altitude igual, e verificar se os valores seriam semelhantes ou diferentes entre si;
2. Comparar os valores registados por dois anemómetros iguais entre si, nomeadamente dois anemómetros ultrassónicos, mas para um nível de altitude diferente, estando um a uma altura de 10 metros e o outro a uma altura de 6 metros, e verificar qual seria a variabilidade apresentada pelos resultados, e o quanto influencia a altura na caracterização do recurso eólico de uma região, através de resultados práticos e objectivos;
3. Comparar os valores apresentados por dois anemómetros iguais entre si, nomeadamente 2 anemómetros de copos, a uma altitude igual, mas um com mais de 20 anos utilização (o anemómetro de copos que está na estação desde a sua inauguração, em 1994) e, portanto, desgastado e com necessidade de ser substituído, e um nunca utilizado anteriormente. O objectivo seria o de tentar fazer a ligação entre o conjunto de dados do anemómetro antigo e o conjunto de dados do anemómetro novo.

Em suma, a análise dos dados permitirá corrigir a série de dados do vento medido na estação, fazendo assim com que haja uma melhoria da caracterização do recurso eólico na Mitra, objectivo último do trabalho.

1.1 O vento

O que é o vento?

O vento pode ser definido como o movimento horizontal do ar em relação à superfície da Terra. Além do movimento horizontal do ar, também se verificam na atmosfera a existência de correntes verticais, que são da maior importância na génese de alguns fenómenos atmosféricos (nuvens, precipitação, trovoadas, turbulência, etc.). A causa primária do vento reside na desigual distribuição da pressão atmosférica a determinado nível e surge como mecanismo de compensação quer da temperatura quer da pressão.



Figura 1: Esquema de formação do vento
(Fonte: <http://360graus.terra.com.br>)

Analisando o Atlas Português do vento, observamos que a Estação Meteorológica da Mitra localiza-se numa zona geográfica onde o vento possui uma velocidade entre os 4 m/s e os 5 m/s.

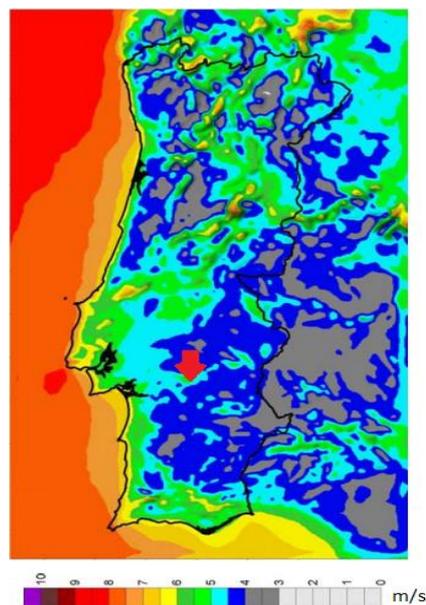


Figura 2: Figura 2: Atlas Português do Vento, a 60 metros de altitude, com a seta a apontar a localização da Estação Meteorológica da Mitra (FCUL, Junho 2004)

2. Localização e Descrição

2.1 Localização da Estação

A estação onde foram instalados os sensores utilizados para este trabalho corresponde à Estação Meteorológica da Mitra, pertencente ao Centro de Geofísica da Universidade de Évora. Foi inaugurada no ano de 1994 e está localizada na Herdade da Mitra, a uma latitude de 38.525387° Norte e uma longitude de 8.016568° Oeste.

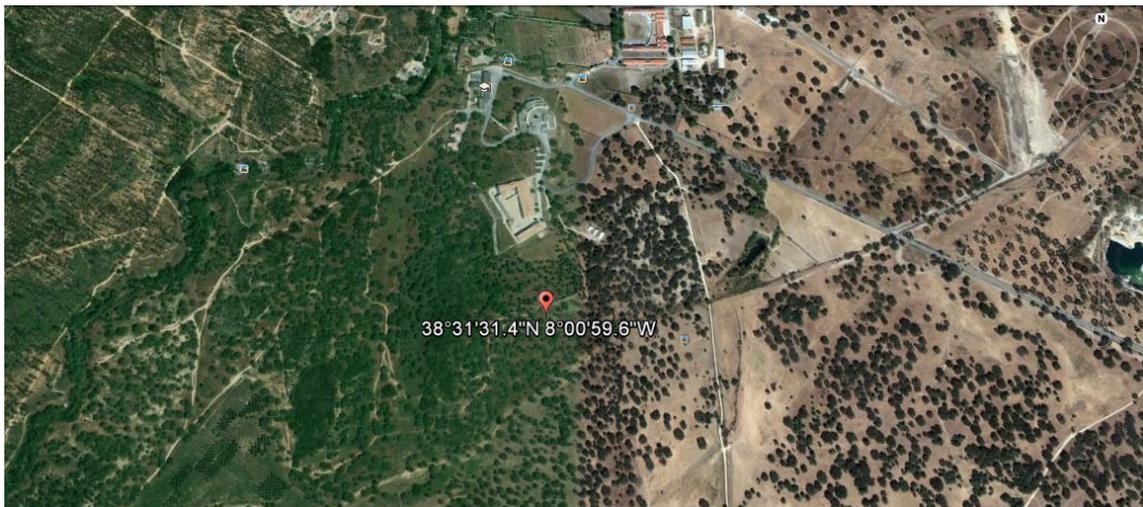


Figura 3: Localização da Estação Meteorológica da Mitra (Google Earth)

Como se pode ver pela imagem de satélite, a estação tem um meio envolvente constituído por árvores, com mais densidade a oeste, e por edifícios, incluindo um pólo universitário pertencente à Universidade de Évora, a norte. O meio onde se insere a estação é importante de ser referido porque as árvores e os edifícios são precisamente factores que afectam a rugosidade (Z_0) do terreno e que, por consequência, afectam a intensidade do vento medido no local.

Observando a figura 4, o solo da estação é constituído por relva, isto porque faz parte das normas da Organização Mundial de Meteorologia que todas as estações meteorológicas tenham condições uniformes entre si. Assim as condições do terreno são iguais de estação para estação, fazendo com que os resultados das medições de cada uma possam ser comparáveis com todas as outras.

A Estação Meteorológica da Mitra possui uma área relvada de aproximadamente 16 m^2 ($4 \times 4 \text{ m}$).



Figura 4: Estação Meteorológica da Mitra (21/11/2014)

2.2 Topografia e meio envolvente ao terreno

A complexidade do terreno de uma determinada região possui um papel determinante no escoamento do ar para essa mesma região, influenciando assim o valor da rugosidade (Z_0) do local. Por exemplo a intensidade do ar num terreno montanhoso, por norma, terá tendência a ser maior do que num terreno plano. Podemos verificar isso ao observarmos a figura 5. O ar ao aproximar-se de uma zona montanhosa terá que aumentar a sua velocidade para contornar essa elevação, diminuindo depois a sua velocidade. A instalação de aerogeradores terá de ter bastante atenção a este pormenor, sendo preferível assim a instalação destes num local montanhoso do que num terreno plano ou com uma inclinação mais suave.



Figura 5: Aceleração do vento num monte (Maroney, 1991)



A Estação Meteorológica da Mitra está numa elevação com cerca de 254 metros acima do nível do solo. E a altura acima do nível do solo de uma determinada região influencia bastante a velocidade do ar dessa região. De uma maneira geral, pode-se dizer que quanto maior for a altura acima do solo, maior será a intensidade do vento para essa região.

Este facto poderá ser constatado mais à frente, quando os resultados da velocidade do ar para os 6 metros forem comparados com os obtidos para os 10 metros.

Outro dos factores que influenciam a turbulência, e conseqüentemente, o valor do comprimento de rugosidade de um determinado local, é o meio envolvente a que este está sujeito. A turbulência irá afectar negativamente o escoamento do ar, sendo que isso terá efeitos nas medições efectuadas pela estação, e por consequência, no recurso eólico da mesma.

Como já foi referido a Estação Meteorológica da Mitra está rodeada maioritariamente por árvores, mas também por edifícios. Tanto um como o outro contribuem negativamente para o escoamento do ar, como se pode verificar pela tabela 1, sendo que cada um à sua maneira irá afectar o valor do Z_0 local.

Tipo de terreno	z_0 (m) min.	z_0 (m) Max.
Lama / gelo	10^{-5}	3.10^{-5}
Mar calmo	2.10^{-4}	3.10^{-4}
Areia	2.10^{-4}	10^{-3}
Neve	10^{-3}	6.10^{-3}
Campo de cereais	10^{-3}	10^{-2}
Relva baixa / estepes	10^{-2}	4.10^{-2}
Descampados	2.10^{-2}	3.10^{-2}
Relva alta	4.10^{-2}	10^{-1}
Terreno com árvores	10^{-1}	3.10^{-1}
Floresta	10^{-1}	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Figura 6: Valores da rugosidade da superfície (U. Hassan e D.M. Sykes,1990)

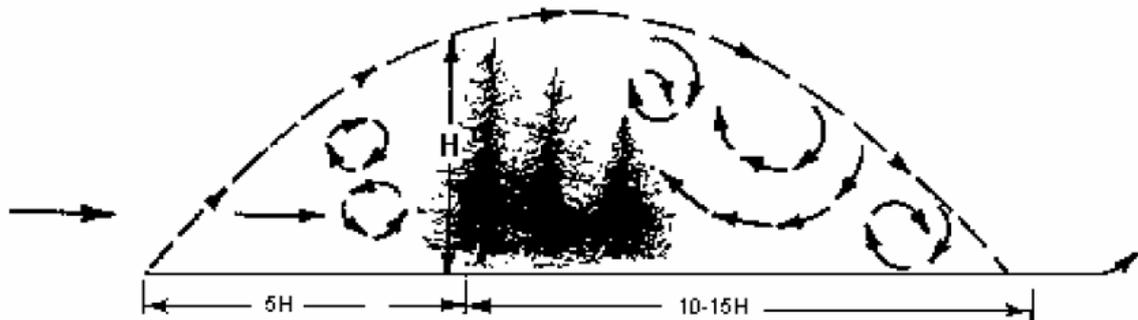


Figura 7: Escoamento a jusante de uma barreira vegetal (Wedley et al., 1980)

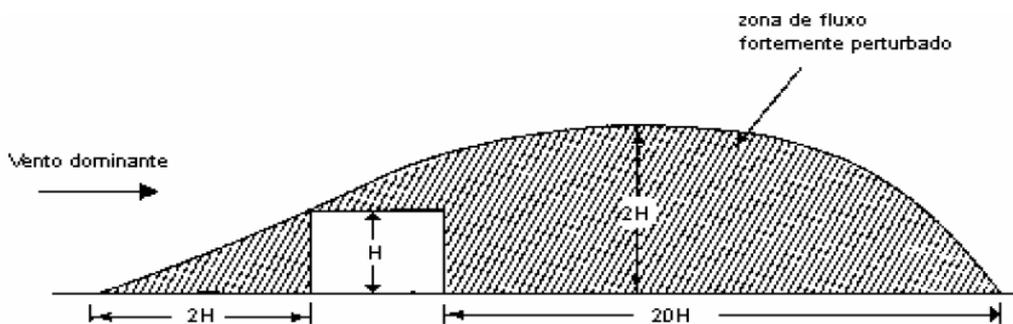


Figura 8: Escoamento perturbado pela presença de um edifício (Hiester, T.R. e W.T. Pennell, 1983)

2.3 A Estação

Na estação Meteorológica da Mitra são recolhidos, tal como noutras estações pertencentes ao Centro de Geofísica da Universidade de Évora, dados meteorológicos, tais como a temperatura do ar, a humidade do ar, a velocidade e direcção do vento, precipitação, radiação solar global e radiação total líquida., ou a temperatura do solo a várias profundidades.

A estação possui actualmente piranómetros, um pluviómetro, higrómetros, entre outros sensores, que não são necessários para a realização deste trabalho. No dia 17/10/2014 foram instalados na estação, no decorrer deste trabalho, mais dois anemómetros, um ultrassónico (que estava instalado na Barragem de Alqueva, inserido no Projecto ALEX¹) e outro de conchas, este nunca antes utilizado. Como se pode verificar na figura 8, os sensores de copos, o antigo (com mais de 20 anos de existência) e o novo, foram instalados paralelamente um ao outro, e o ultrassónico recolhido do Alqueva na perpendicular a estes dois, a uma altitude de 6 metros. O ultrassónico que já se encontrava na estação ficou onde já estava inicialmente, a uma altitude de 10 metros.

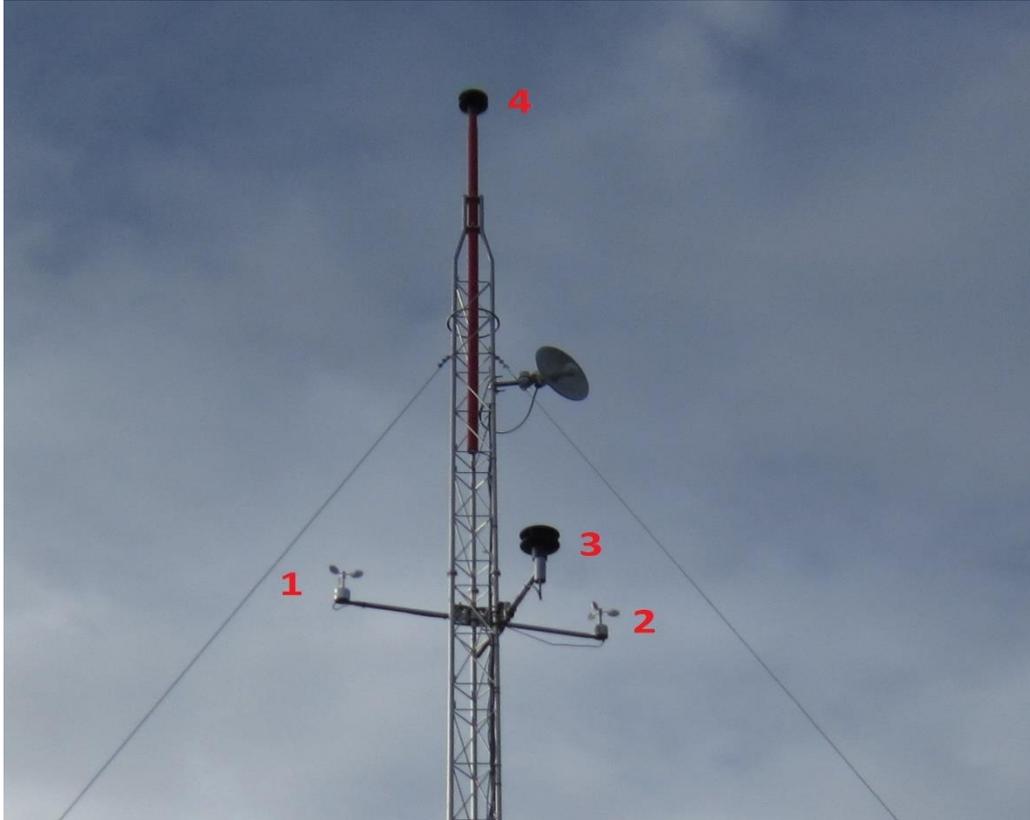


Figura 9: Instalação dos sensores na estação (21/11/2014)

¹ ALqueva hydro-meteorological EXperiment

Descrição da figura 8:

1. Anemómetro de conchas novo dos 6 metros;
2. Anemómetro de conchas velho dos 6 metros;
3. Anemómetro ultrassónico dos 6 metros;
4. Anemómetro ultrassónico dos 10 metros.



3. Anemometria e registo dos valores

3.1 Anemometria

O tipo de anemómetro mais comumente utilizado é o chamado **anemómetro de copos**, assim denominado por ter copos (normalmente três) que rodam em torno de um eixo vertical, e que vem frequente acompanhado de um cata-vento, aparelho que tem como finalidade determinar a direcção do vento. Mas para além deste, existem outro tipo de sensores para medir a intensidade do vento, tais como:

- **Anemómetros ultrassónicos:** medem a velocidade e a direcção do vento (sendo que por isso não necessitam de ser acompanhados de um cata-vento) até 3 dimensões, com uma qualidade de dados bastante elevada e precisa;
- **Anemómetros de hélice:** são de custo barato e têm um baixo consumo energético. Apesar disso, os anemómetros de hélice são pouco utilizados nas técnicas de medição da velocidade do vento e, na grande maioria dos casos, são utilizados unicamente em situações complexas de vento. De referir também que a hélice transmite em sinal analógico.
- **Anemómetros de fio quente:** podemos explicar este tipo de sensores ao dizer, basicamente, que estes utilizam um filamento aquecido que fica exposto ao escoamento de um fluido. Este filamento estará então conectado a um circuito electrónico, que é capaz de monitorizar a resistência eléctrica, que varia através da acção de escoamento desse fluido. Pode-se, então, estabelecer uma relação entre a velocidade do escoamento e a resistência observada no filamento aquecido.
- **Anemómetros de tubo de Pitot:** é um sensor robusto e bastante económico, que é usado tanto na medição da pressão estática como na medição da velocidade do ar, e funciona através do uso de um tubo de pitot².

Neste relatório irei analisar e detalhar mais aprofundadamente apenas os anemómetros de copos e ultrassónico, pois são os sensores de interesse para este trabalho.

² Um tubo de pitot permite a determinação da velocidade de escoamento de um fluido através da diferença das pressões estática e dinâmica desse fluido.

Anemómetro de Copos



Figura 10: Exemplo de um anemómetro de copos

O anemómetro de copos é provavelmente o instrumento mais comum para medir a velocidade do vento em locais onde as observações meteorológicas são realizadas rotineiramente. E isto acontece porque este tipo de anemómetros, para além de serem os mais antigos (foram inventados por um astrónomo irlandês chamado T.R Robinson, em 1846) são um instrumento robusto e confiável que pode operar sem supervisão durante largos períodos de tempo.

O anemómetro de copos necessita de um aparelho que determine a direcção do vento, denominado por cata-vento. Este aparelho é essencial para uma determinação optimizada da orientação do parque eólico, sendo bastante importante que o transmissor de direcção do vento abranja um raio de 360°. Os cata-ventos têm um grau de resolução pequeno (1 grau) e um consumo de energia extremamente reduzido. Anemómetros de copos e cata-vento são comercializados em vários tipos e formas. O tipo mais comum de configuração é um anemómetro com 3 copos e um cata-vento montados em extremos opostos de um braço horizontal de suporte vertical em forma de T, como é mostrado na figura 9. Ambos rodam em torno de um eixo vertical, e estão separados horizontalmente de forma a evitar interferência entre si. A vantagem deste tipo de anemómetros em relação aos anemómetros fixos de rotor é a sua capacidade de responder a ventos de qualquer direcção.



Anemómetro de Copos A100R

Este é o modelo de anemómetro de copos que está actualmente instalado no pólo da Mitra, pertencente à Universidade de Évora.

Este é um instrumento de precisão que é facilmente conectado com o dispositivo electrónico Datalogger (ou sistema de aquisição de dados) que é um dispositivo que tem como finalidade a aquisição e o registo de dados de um determinado local, ao longo do tempo, neste caso da marca Campbell.

Este anemómetro, tal como todos os outros, tem como objectivo efectuar medições da velocidade instantânea e da velocidade média do vento, e funciona da seguinte maneira: um íman gira através do eixo do rotor, produzindo um campo magnético variável, que faz com que um *reed switch*² de mercúrio humidificado estabeleça, e quebre, um contacto com o rotor por cada rotação do mesmo. De realçar que não é necessário mais nenhum gasto de energia para além do que é preciso para detectar a ligação dos contactos. Por isto o A100R é o tipo de anemómetro adequado para ser utilizado em locais remotos. De salientar que o rotor do A100R é testado por comparação com um rotor calibrado pelo *National Physical Laboratory* (Laboratório Nacional de Física, sediado na Grã-Bretanha), sendo que cada instrumento vem sempre acompanhado por um diagrama de calibração. O anemómetro A100R é constituído por uma liga de alumínio anodizado, aço inoxidável e por um plástico resistente a más condições atmosféricas (ventos fortes, chuvas torrenciais,...).

Duas bolas de rolamento resistentes à corrosão percorrem um rolamento de eixo de aço inoxidável, que tem como propósito reduzir o atrito rotacional do íman com o rotor e apoiar cargas radiais e axiais existentes. Este rolamento está protegido contra a entrada de humidade e de pó, resultando num instrumento adequado para a exposição permanente a qualquer tipo de condição atmosférica.

As especificações do anemómetro de copos A100R podem ser vistas nos anexos deste trabalho.

Anemómetro Ultrassónico



Figura 11: Exemplo de um anemómetro ultrassónico

Os anemómetros ultrassónicos medem a velocidade e a direcção do vento, até três dimensões, não necessitando por isso que sejam acompanhados de um cata-vento, com uma qualidade de dados bastante elevada e precisa.

O anemómetro ultrassónico mede a velocidade do ar por meio da medida da velocidade do som no ar, ou seja, através do incremento ou decréscimo da velocidade do som é possível estimar a velocidade do ar. Este anemómetro é mais robusto e confiável se comparado com os anemómetros de peças móveis (como o anemómetro de copos), já que pode operar em qualquer meio físico.

Este tipo de anemómetro apresenta óptimos resultados em equipamentos com fornecimento de energia através da rede pública, pois este é um tipo de sensor que requer um elevado consumo energético, superior, por exemplo, aos anemómetros de copos.

São frequentemente utilizados em projectos com bom fornecimento de energia (por exemplo em *Offshore*), sendo hoje em dia utilizados nas modernas estações meteorológicas, nomeadamente na rede meteorológica nacional.

As principais vantagens dos sensores ultrassónicos utilizados na medição da velocidade de fluídos são:

- Boa exactidão;
- Respostas mais rápidas do que os sensores de partes móveis;
- Não obstrução do fluxo do fluido no objeto da medição;
- Ausência de partes móveis;
- Pode ser usado em fluidos perigosos, como os corrosivos e/ou contaminados sem risco para o transdutor (dispositivo que transforma um tipo de energia noutra).

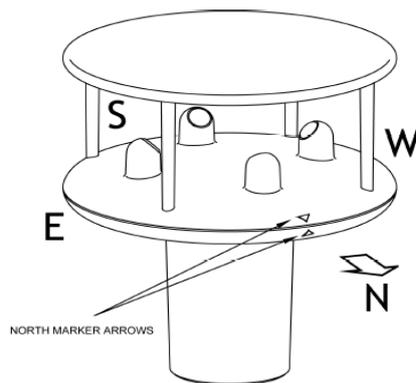


Figura 13: Pontos cardeais num sensor ultrassónico

No diagrama de blocos (ver figura 12) é apresentado o comportamento do sensor ultrassónico, onde se percebe que esse sensor necessita de um sinal de excitação, o qual é enviado para o transdutor-transmissor. Por sua vez, este transmitirá o sinal ultrassónico para o transdutor-receptor. O sinal a ser transmitido sofrerá variações no caminho, conforme a velocidade do som e do vento. Quando o sinal chega ao transdutor-receptor, ele é processado e é observada a alteração do sinal transmitido.

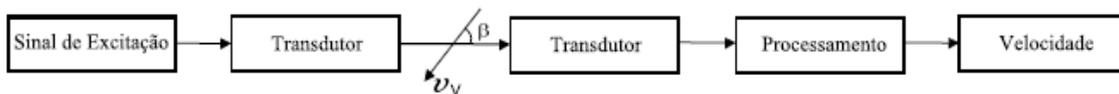
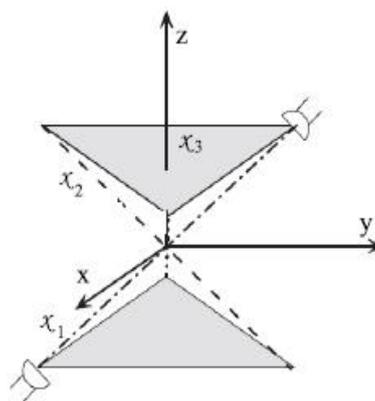


Figura 12: Esquema do comportamento de um sensor ultrassónico



(a) Anemómetro 3D Campbell



(b) Eixos no anemómetro 3D

Figura 14: Arranjo dos transdutores no anemómetro ultrassónico e a sua respectiva forma

Na figura 14 (a), mostra-se um dos arranjos de transdutores encontrados comercialmente para medição da velocidade do vento em 3D. Este anemómetro tem a forma de dois tetraedros opostos por um vértice, com três pares de transdutores, como na figura 14 (b). Os três pares de transdutores estão alinhados sobre os eixos x_1 , x_2 e x_3 e alocados em cada vértice do tetraedro.

Anemómetro Ultrassónico Gill Windsonic

O sensor ultrassónico Gill WindSonic é o tipo de anemómetro que está instalado na Estação Meteorológica do pólo da Mitra, sendo que este é um sensor mais leve, mas ao mesmo tempo mais robusto, do que um anemómetro de copos, não possuindo partes móveis.

As unidades da velocidade do vento, potência de saída e os formatos de arquivo são todos seleccionáveis e ajustáveis pelo utilizador. O WindSonic pode ser utilizado em conjunto com um PC, um *data logger* ou qualquer outro dispositivo, desde que seja compatível com um dos formatos de comunicação padrão fornecidos pelo WindSonic. O sensor WindSonic tem o seguinte esquema de funcionamento: mede o tempo necessário para que um pulso ultrassónico de som viaje a partir do transdutor do Norte (N) para o transdutor do Sul (S), comparando-o com o tempo necessário para que um pulso ultrassónico viaje do transdutor do Sul para o transdutor do Norte. E exactamente o mesmo processo acontece entre os transdutores do Este (E) e do Oeste (W). Se, por exemplo, um vento soprar de Norte, isto vai fazer com que o tempo necessário para o pulso viaje a partir de Norte para Sul seja mais rápido do que a partir de Sul para Norte, e vice-versa, acontecendo o mesmo processo entre os transdutores de Este e Oeste. A velocidade e direcção do vento podem então ser calculadas a partir das diferenças temporais necessárias para que o pulso ultrassónico percorra a distância entre cada eixo. Este cálculo é independente de outros factores, como a temperatura, por exemplo.

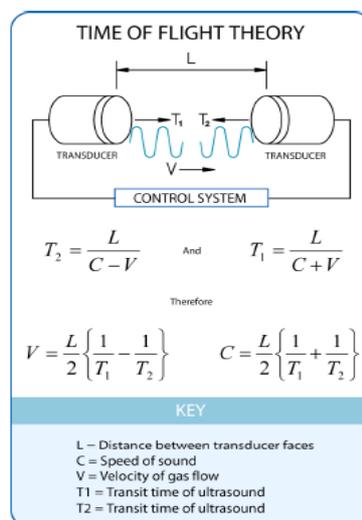


Figura 15: Expressões para o cálculo do tempo necessário para que o pulso electrónico viaje de um transdutor para outro e a velocidade da intensidade do ar segundo esses valores de tempo

As especificações referentes ao anemómetro ultrassónico Gill Windsonic podem ser vistas nos anexos deste trabalho.

3.2 Registo dos valores

O DT80, o sistema de aquisição de dados da *DATATAKER*, foi inicialmente o aparelho responsável pela leitura e extracção dos dados enviados pelos sensores de vento na estação, tendo sido substituído ao fim de cerca de um mês pelo sistema de aquisição de dados CR1000.



Figura 16: Descrição do DT80

Ambos os aparelhos, tanto o DT80 como o CR1000, têm de ser programados e configurados antes de poderem ser utilizados pelo utilizador. Possuem uma memória interna, que recebe os sinais enviados pelos anemómetros e faz os cálculos de acordo com o que foi programado, e uma memória externa, para onde são transferidos os resultados desses cálculos. A partir da memória externa, os dados são depois transferidos para o computador, onde se procederá depois à sua análise e tratamento. As leituras realizadas pelo datalogger, apesar de serem feitas de segundo em segundo, são apresentadas de minuto em minuto, ou seja, o aparelho dá a média por minuto das velocidades registadas em cada segundo. No caso do DT80 houve a necessidade de realizar um acerto, pois este inicialmente fazia as leituras dos dados de 5 em 5 segundos.

Os dados relativos aos sensores instalados no local (o datalogger também traz dados relativos a outros aparelhos instalados na estação da Mitra, mas que não interessam para o trabalho em questão), depois da sua transferência, podem ser apresentados e organizados num folha de cálculo, contendo os seguintes outputs acerca do vento no local: a média por minuto das velocidades e direcções registadas em cada segundo

(V_Avg e D_Avg), a velocidade máxima registada naquele minuto (V_Max) e o desvio-padrão em relação à média de cada minuto (média + desvio padrão e média – desvio-padrão correspondem aos limites superior e inferior, respectivamente, em que a maioria dos valores desse minuto estão inseridos), em termos de velocidade e direcção (V_Std e D_Std).

Para o trabalho em questão apenas me interessam os valores da velocidade média em cada minuto (V_Avg) para cada um dos 4 sensores instalados na estação.



Figura 17: Caixa de registo dos valores, com o CR1000 instalado e o multiplexer por baixo

A principal razão para a troca dos sistemas de aquisição de dados prendeu-se com o facto de um temporal que houve na zona da Herdade da Mitra ter feito com que um raio caísse perto da estação, e que esta acabasse por ter um “apagão”. Quando a mesma foi reiniciada, o DT80 estava algo danificado (a porta da Ethernet avariou-se) e não trabalhava com a mesma eficácia.

Poderia ter sido substituído por um datalogger igual ao que já lá estava, mas chegou-se à conclusão que o CR1000, apesar de algumas desvantagens, acaba por ser mais simples e prático de usar, sendo que possui uma velocidade de transferência de dados da memória externa para o computador bastante superior à do DT80.



4. Análise e tratamento dos dados

Para este trabalho foram usados os dados da intensidade do vento desde o dia em que os sensores foram instalados, ou seja, no dia 17/10/2014, a partir das 16:01 h, até ao dia 30/10/2014, às 23:49 h.

Como os dados foram registados de minuto em minuto, isto daria um total de 63839 dados, mas como existiram algumas falhas na estação, o número total de dados é inferior a este valor. O número de dados aproveitados em cada uma das comparações entre os sensores e a sua respectiva percentagem em relação ao número total de dados pode ser vista na tabela 2.

Tabela 1: Número de dados aproveitados e respectiva percentagem

	Nº de dados	Percentagem
VS1 - VS2	50149	78,56%
VS2 - VCN	50143	78,55%
VCN - VCV	63548	99,54%

Para este trabalho foram usadas duas ferramentas de análise dos dados, o Microsoft Excel e o Windographer (ver capítulo 4.2). O primeiro trata-se de um software por demais conhecido, que tem como função organizar, calcular e analisar conjuntos de dados, e o segundo é um dos principais softwares no que toca à análise e ao tratamento de dados de energia eólica.

Como já foi referido antes, foram apenas contabilizados para este trabalho os valores da velocidade média por minuto (V_{Avg}) de cada um dos 4 sensores, tendo sido excluídos todos os outros outputs referentes a valores de velocidade (como por exemplo a velocidade máxima por minuto), todos os valores de direcção, para além dos valores referentes a outros aparelhos da estação, e que não interessavam para este trabalho.

Os dados foram, depois de serem transferidos do datalogger para o computador, sendo organizados numa folha de EXCEL, sendo acrescentados à medida que os ia recebendo do Centro de Geofísica da Universidade de Évora, verificando sempre a existência de possíveis falhas e erros.

4.1 Análise de falhas

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Data	Hor.		V_S_2_Avg (m/s)		V_C_N_Avg (m/s)		Diferença
4333	20/10/2014	16:12		1,3825		1,551362		0,168862
4334	20/10/2014	16:13		1,563334		1,593292		0,029958
4335	20/10/2014	16:14		1,304167		1,299791		-0,004376
4336	20/10/2014	16:15		1,278333		1,362683		0,08435
4337	20/10/2014	16:16		1,685		1,614256		-0,070744
4338	20/10/2014	16:17		1,863334		1,949686		0,086352
4339	20/10/2014	16:18		1,55		1,509434		-0,040566
4340	20/10/2014	16:19		1,644999		1,614256		-0,030743
4341	20/10/2014	16:20		1,684167		1,509434		-0,174733
4342	20/10/2014	16:21		1,365833		1,446541		0,080708
4343	20/10/2014	16:22						
4344	20/10/2014	16:23						
4345	20/10/2014	16:24						
4346	20/10/2014	16:25						
4347	20/10/2014	16:26						
4348	20/10/2014	16:27		1,825556		2,562311		0,736755
4349	20/10/2014	16:28		1,672857		1,590297		-0,08256
4350	20/10/2014	16:29		1,163929		0,925427		-0,238502
4351	20/10/2014	16:30		1,546667		1,492662		-0,054005
4352	20/10/2014	16:31		2,260001		2,01258		-0,247421

Figura 18: Exemplo de uma falha nos dados

A detecção de possíveis falhas ou erros nos valores fornecidos pela estação foi feita através do Excel, à medida que estes iam sendo fornecidos pelo Centro de Geosífrica de Évora.

A grande maioria das falhas nos dados deve-se a pequenos erros no datalogger, mas também a períodos temporais onde os anemómetros ou outros aparelhos presentes na estação iam sendo calibrados e ajustados no datalogger, não sendo registados por esse motivo.

As falhas iam sendo detectadas através da filtragem dos dados que chegavam. Os dados iam sendo recolhidos, por norma, de 7 em 7 dias, o que dá um total de 10080 linhas de dados de cada vez. Se este valor batesse certo, isto significaria então que não existiam falhas na amostra de dados recolhida. Se este valor fosse menor do que esse valor total, então haveria períodos temporais em que não existiam dados. Filtrava-se esta amostra para períodos de 60 em 60 minutos para todos os dias desse período temporal, e depois verificava-se quais os que possuíam períodos de 59 minutos ou menos.

Este aspecto das falhas é importante, pois para colocar os dados no software do Windographer, é necessário apresentar o número total de dados, pois este ao importar o ficheiro de Excel e fazer a leitura dos dados, assume que estes não possuem falhas.



O maior período temporal com falhas nos dados ocorreu entre os dias 01/11/2014 (05:37 h) a 10/11/2014 (12:43 h). Isto porque houve um erro no sensor ultrassónico aos 6 metros (VS2), fazendo com que o valor registado por este sensor tenha sido sempre constante nesse período de tempo, com um valor de velocidade média do vento em cada minuto de 3,19 m/s.

Estes dados, por se tratar de um erro do sensor, não puderam ser recuperados. O erro que ocorreu, não podendo ser do datalogger (DT80), pois se assim fosse os dados registados pelos restantes sensores também seriam afectados, terá sido provocado, provavelmente, pelo bloqueio do relógio digital do sensor, registando desde o minuto em que terá ocorrido esse bloqueio até ao minuto em que foi feito o reset ao sistema, que resolveu o problema, o mesmo valor da velocidade média desse minuto.

Não se sabe a razão do bloqueio do relógio digital do sensor, mas aparentemente é um problema recorrente da marca (Campbell Scientific, Inc).

4.2 Windographer

O Windographer, como já foi referido, é um dos softwares mais utilizados no que toca ao estudo do recurso eólico de uma determinada região. Ele lê os dados medidos a partir de aparelhos que meçam a intensidade do vento, como aerogeradores ou anemómetros, importando praticamente todo o tipo de ficheiros em que os valores da velocidade do vento possam estar inseridos, como ficheiros Excel, folhas de cálculo, ficheiros de texto, etc.

Possui um funcionamento bastante simples: ao abrir o programa, selecciona-se o comando *File*, depois *Open* e selecciona-se o ficheiro onde estejam os valores da intensidade do vento. A partir daqui o programa irá ler e analisar esse ficheiro, fazendo o seu melhor para interpretar todos os valores que estejam inseridos nesse ficheiro, incluindo, para além dos valores da intensidade do vento (valores médios, máximos, mínimos, etc), valores de direcção do vento, valores horários e as datas correspondentes, valores de desvio-padrão, temperatura, pressão ou humidade relativa. No meu caso, para além do facto de não trabalhar com valores da direcção do vento, o programa não conseguia reconhecer os valores inseridos na coluna correspondente à data. Assim, para além do facto de assumir que o ficheiro não continha quaisquer tipo de falhas ou lacunas, pedia ao utilizador para inserir o dia e a hora em que as medições da intensidade do vento começaram a ser feitas e o intervalo de tempo entre cada um dos valores (se os valores eram dados de minuto em minuto, de 10 em 10 minutos, de hora a hora, etc.).

A partir daqui abre uma janela (ver figura 19) onde deixa o utilizador fazer algumas alterações e correções, se necessário, tais como se os dados são ou não relativos à intensidade do vento, a altura a que os aerogeradores ou anemómetros estão, as unidades (m/s ou mph), ou as cores dos gráficos estatísticos do programa.

Fechando esta janela, o programa irá abrir todo o tipo de gráficos relacionados com a energia eólica, tais como gráficos de séries temporais, rosa-dos-ventos, perfis médios diários, histogramas de frequência, gráficos de dispersão ou tabelas de resumo estatísticas.

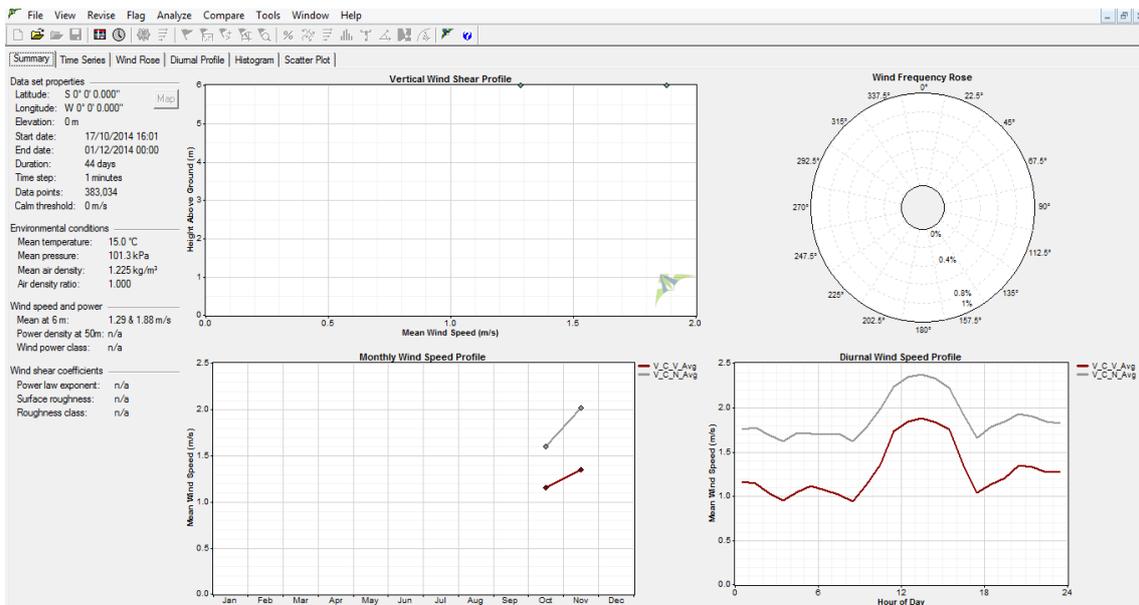


Figura 19: Menu geral do Windographer

³ A função de Weibull descreve a densidade da probabilidade de ocorrência do vento numa determinada classe de velocidade, sendo por isso uma função que se aproxima à distribuição representada nos histogramas de velocidade. Pode definir-se segundo a seguinte expressão:

$$F(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

Onde u é a velocidade do vento, c é o parâmetro de escala, com as dimensões de velocidade, que define a escala da distribuição de Weibull e k é o parâmetro de forma, sem dimensões, que define a forma da distribuição e está relacionado com o desvio padrão, variando de local para local.



4.3 Análise dos valores

Neste subcapítulo vou analisar os dados da velocidade média do vento para cada um dos anemómetros instalados na estação, comparando os valores, como já referido anteriormente, entre os sensores ultrassónicos dos 10 metros e dos 6 metros, os sensores de copos novo e velho, ambos aos 6 metros, e os sensores ultrassónico e de copos novo, ambos aos 6 metros também.

As comparações entre os anemómetros, para além do que já foi descrito na introdução deste trabalho (Capítulo 1), tiveram como base os seguintes objectivos:

- Sensores ultrassónicos (10 metros e 6 metros): calcular o comprimento de rugosidade (Z_0) e o expoente da lei de potência (α) (mais à frente vai ser explicado o que são estas duas variáveis), para a partir daí poder extrapolar a velocidade do vento para qualquer nível de altitude;
- Sensores de copos novo/velho: poder recalibrar os últimos anos da série de vento para os 6 metros de altitude;
- Sensores ultrassónico/copos novo: Verificar qual o impacto de mudar o tipo de sensor.

As conclusões retiradas desta análise serão depois apresentadas no capítulo referente à conclusão do trabalho.

4.3.1 Anemómetro de copos novo – Anemómetro de copos velho

A necessidade de fazer esta comparação entre os dados referentes ao anemómetro de copos antigo, em funcionamento na Mitra desde a inauguração da estação, e um anemómetro de copos nunca utilizado antes partiu do trabalho de estágio feito anteriormente por um aluno deste curso, no caso Germilly Barreto. Nesse trabalho era avaliado o recurso eólico da Mitra desde 1994 (ano da inauguração da estação) até ao ano de 2011, usando para isso os dados da velocidade e direcção do vento registados por um anemómetro de copos (o mesmo anemómetro usado neste trabalho) e respetivo cata-vento instalados aos 6 metros de altura (daí os anemómetros de copos terem sido instalados agora na estação à mesma altitude). Este verificou que nos últimos anos em estudo havia cada vez mais sequências de vários registos com valores de velocidade do vento nulas, com especial incidência para os anos de 2010 e 2011, tendo por isso estes sido totalmente eliminados do seu trabalho.

Este facto prendia-se com o desgaste cada vez maior do rotor do sensor, por este ter estado a trabalhar durante tantos anos ininterruptamente, que fazia com que este tivesse muitos momentos de paragem. Este desgaste provocava fricção e causava um elevado atrito no rotor do sensor, fazendo com que este tivesse muitos momentos de paragem, principalmente a baixas velocidades do vento.

Assim o Centro de Geofísica de Évora considerou que o melhor seria substituir este sensor de copos já desgastado e com defeito, por um sensor de copos novo. Mas havia



a necessidade de fazer a ligação entre o conjunto de dados do anemómetro antigo e o conjunto de dados do anemómetro novo, e de preferência que os dados medidos pelo sensor antigo não fossem totalmente excluídos da série de dados do vento da Mitra.

Como pode ser visto na tabela 2, dos 63839 dados esperados, puderam ser aproveitados 63548, ou seja, praticamente todos os dados (99,54 %) presentes na série puderam ser aproveitados, isto porque o erro que originou uma falha nos dados de quase 10 dias foi no anemómetro ultrassónico dos 6 metros, portanto nada influenciando os valores destes dois sensores.

Os dados estatísticos mais relevantes na análise dos valores entre estes dois sensores podem ser vistos na seguinte tabela:

Tabela 2: Quadro-resumo com os principais dados estatísticos entre o anemómetro de copos novo e velho

Média velocidade VCN_avg (m/s)	1,8818816
Média velocidade VCV_avg (m/s)	1,2861401
Correlação	0,9130833
VIES	0,5957415
Erro quadrático médio	0,7001214
Erro médio absoluto	0,6167654
Máximo valor de velocidade VCN_avg (m/s)	8,893618
Mínimo valor de velocidade VCV_avg (m/s)	0
Máximo valor de velocidade VCN_avg (m/s)	9,099426
Mínimo valor de velocidade VCV_avg (m/s)	0

Como se pode ver pela tabela 3, a média dos de velocidade do anemómetro de copos novo é relativamente superior à média de velocidade de copos velho, com uma diferença de cerca de 0,596 m/s de média de velocidade entre os dois.

Isto sucede porque, como já foi referido antes, o anemómetro de copos velho tem o seu rotor já bastante desgastado, tendo demasiados momentos de paragem, com quase 40 % dos seus valores de velocidade totais a serem valores de velocidade nulos. Este problema tem tendência a desaparecer se aumentarmos a sua velocidade, fazendo com que a correlação entre os dois anemómetros aumente à medida que a velocidade do anemómetro de copos velho aumenta. Este fenómeno pode ser visível no gráfico de correlação entre os dois anemómetros.

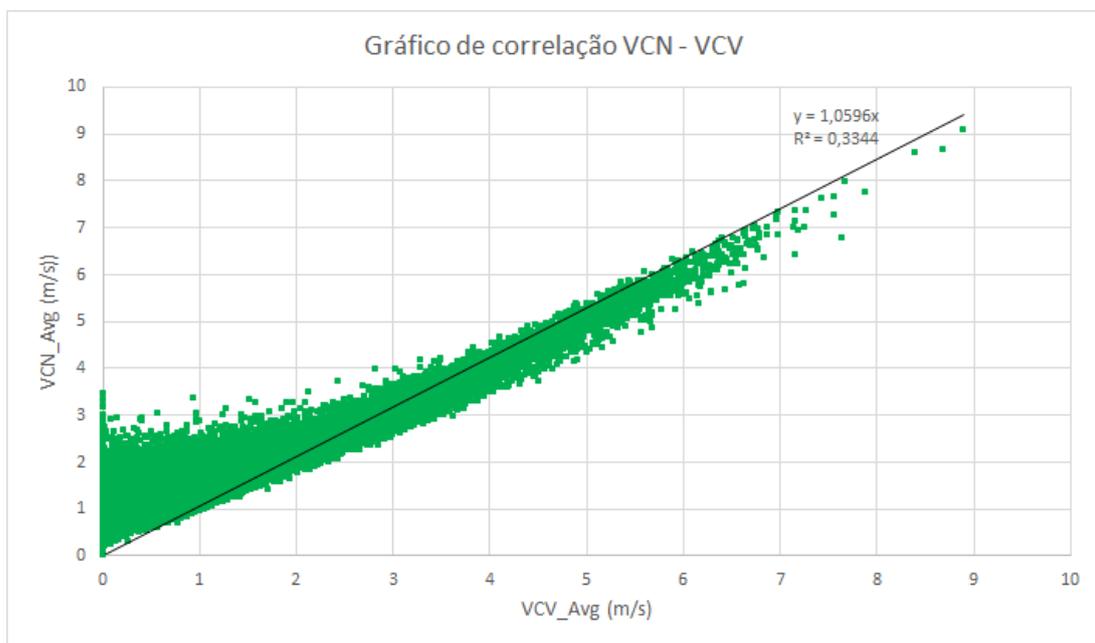


Figura 20: Gráfico de correlação VCN - VCV

Como podemos verificar na figura 19, à medida que a velocidade dos dois anemómetros aumenta a dispersão entre os valores torna-se cada vez menor, verificando-se também um elevado número de valores de velocidade nula para o anemómetro de copos velho.

Podemos verificar isto mesmo também ao analisarmos o gráfico de série temporal para os dois anemómetros, onde vemos a variação do valor de velocidade ao longo do período de tempo em análise.

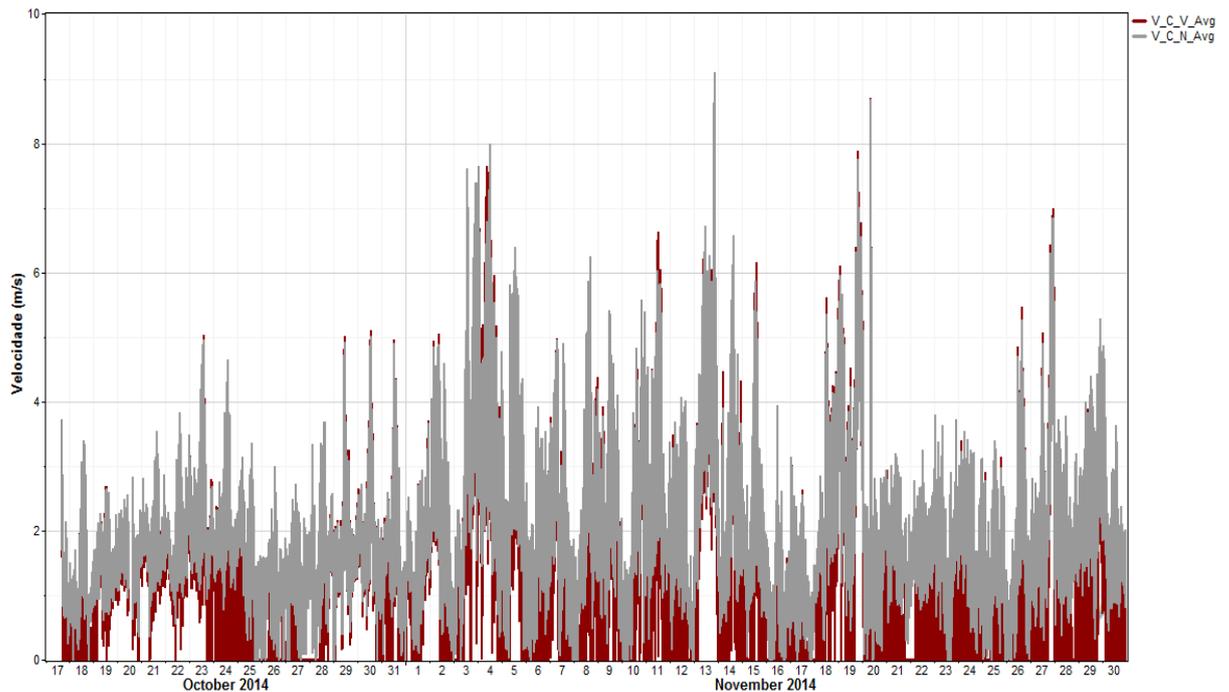


Figura 21: Gráfico de série temporal para os anemómetros de copos novo e velho

O gráfico de cor acastanhada corresponde, como está legendado na figura, ao anemómetro de copos velho e o gráfico de cor cinzenta ao anemómetro de copos novo.

Daqui podemos retirar algumas conclusões, tais como:

- Podemos verificar que a maioria dos valores de velocidade, tanto para um sensor como para outro, situa-se entre os 0 e os 4 m/s, podendo pontualmente, em períodos geralmente nunca superiores a um dia, passar estes valores de velocidade;
- São muito raros, praticamente inexistentes até, os períodos em que a velocidade do anemómetro de copos velho é superior ao anemómetro de copos novo;
- Os elevados períodos de tempo em que a velocidade do anemómetro de copos velho é nula.

Um gráfico que também é importante de ser analisado, de forma a mostrar em que períodos de tempo ao longo do dia a velocidade atinge o seu máximo e o seu mínimo, é o do Perfil Médio Horário, que mostra o comportamento médio da velocidade ao longo de 24 horas.

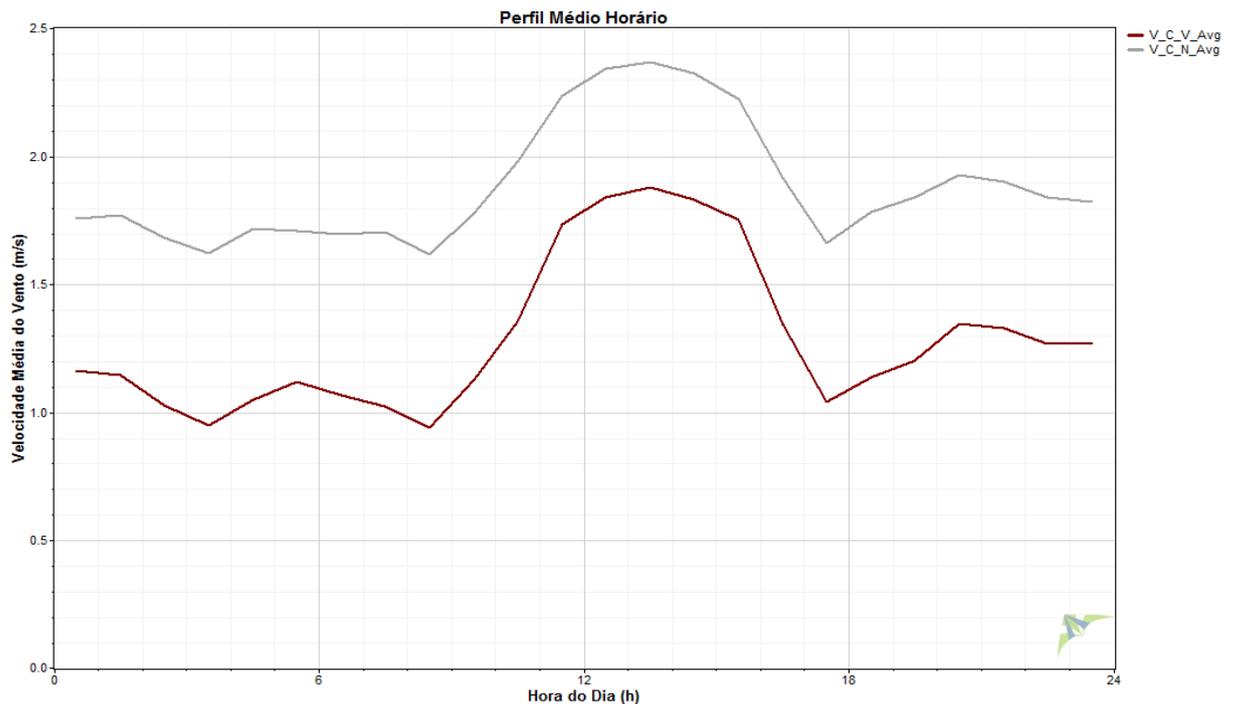


Figura 22: Perfil médio horário para os sensores de copos novo e velho

O anemómetro de copos velho está representado pela cor acastanhada e o anemómetro de copos novo pela cor cinzenta.

Daqui podemos retirar algumas conclusões, tais como:

- A velocidade do vento, para os dois anemómetros, atinge os seus valores máximos no período entre as 11 h e as 15 h;
- A velocidade do anemómetro de copos novo mantém-se entre os valores de 1,6 m/s e 1,8 m/s desde as 0 h até às 9 h, aumentando o seu valor até atingir o pico máximo por volta das 13 h 30 min, com um valor de velocidade de quase 2,4 m/s, baixando depois até atingir o valor de cerca de 1,65 m/s, às 17 h. A partir daqui a intensidade do vento irá aumentar até atingir praticamente os 1,9 m/s, por volta das 20 h 30 min, baixando depois o seu valor a partir daqui, até atingir os 1,7 m/s por volta das 24 h;
- A velocidade do anemómetro de copos velho varia entre os valores de 0,9 m/s e 1,2 m/s desde as 0 h até às 9 h, aumentando depois o seu valor até atingir o pico máximo por volta das 13 h 30 min, com um valor de velocidade de quase 1,9 m/s, baixando depois até atingir o valor de cerca de 1,05 m/s, às 17 h. A partir daqui a intensidade do vento irá aumentar até atingir praticamente os 1,35 m/s, por volta das 20 h 30 min, baixando depois o seu valor a partir daqui, até estabilizar a partir das 22 h 30 min no valor de velocidade de cerca de 1,3 m/s.



Podemos observar melhor os valores de velocidade se os metermos numa tabela, mostrando a variação da intensidade do vento de hora em hora, ao longo do dia.

Tabela 3: Valores de velocidade do perfil médio horário dos anemómetros de copos novo e velho

Hora do Dia (h)	V_C_N_Avg (m/s)	V_C_V_Avg (m/s)
00:00 - 01:00	1,76	1,16
01:00 - 02:00	1,77	1,15
02:00 - 03:00	1,68	1,03
03:00 - 04:00	1,62	0,947
04:00 - 05:00	1,72	1,05
05:00 - 06:00	1,71	1,12
06:00 - 07:00	1,69	1,06
07:00 - 08:00	1,70	1,02
08:00 - 09:00	1,62	0,939
09:00 - 10:00	1,78	1,13
10:00 - 11:00	1,98	1,35
11:00 - 12:00	2,24	1,74
12:00 - 13:00	2,34	1,84
13:00 - 14:00	2,37	1,88
14:00 - 15:00	2,32	1,83
15:00 - 16:00	2,22	1,75
16:00 - 17:00	1,92	1,34
17:00 - 18:00	1,66	1,04
18:00 - 19:00	1,78	1,14
19:00 - 20:00	1,84	1,20
20:00 - 21:00	1,93	1,35
21:00 - 22:00	1,90	1,33
22:00 - 23:00	1,84	1,27
23:00 - 24:00	1,20	1,27

Um dos parâmetros também bastante importante na análise da variação da intensidade do vento numa determinada região é a distribuição de Weibull, já explicada anteriormente.

A distribuição de Weibull, por ser o histograma de frequências da velocidade do ar, irá indicar qual a frequência (em termos percentuais, no caso dos gráficos feitos pelo

software Windographer e utilizados por mim neste trabalho) das diferentes classes de velocidades do vento numa determinada região.

Irei então mostrar a Distribuição de Weibull para estes dois anemómetros de copos, analisando-os em seguida.

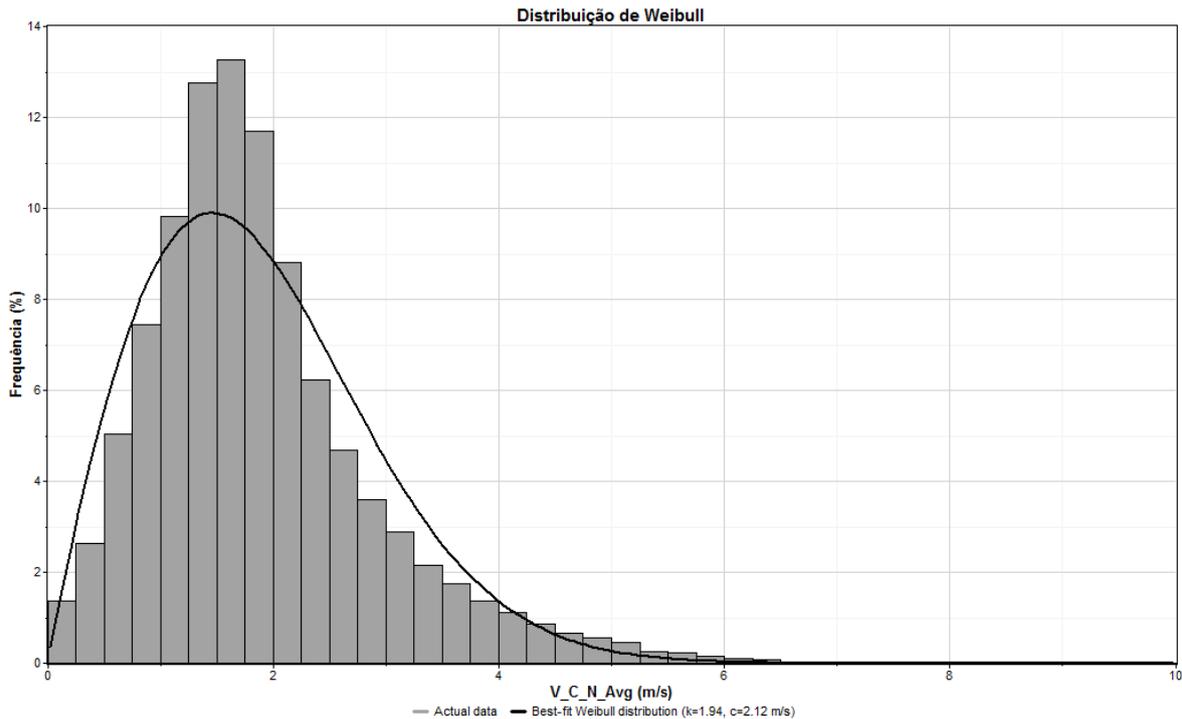


Figura 23: Distribuição de Weibull do anemómetro de copos novo

Ao observar o gráfico, reparamos que cada classe de velocidades tem um intervalo de 0,25 m/s entre si, sendo que parâmetro de escala (c) desta distribuição tem um valor de 2,12 m/s e o parâmetro de forma (k) tem um valor de 1,94. Se o parâmetro de forma tivesse um valor de 2, então esta distribuição seria chamada de distribuição de Rayleigh, sendo que os fabricantes de aerogeradores produzem gráficos de rendimento para suas máquinas usando a distribuição de Rayleigh.

A distribuição estatística das velocidades do vento varia de um lugar para outro no globo, dependendo das condições climáticas locais, da paisagem e da sua superfície, portanto a distribuição de Weibull pode variar tanto em forma como em valor médio.

Algumas conclusões que se podem tirar a partir desta distribuição de Weibull:

- A área da curva do gráfico vale exactamente 1, sendo que a probabilidade de que o vento sopra a qualquer uma das velocidades, incluindo a velocidade nula, deve ser de 100%;
- As classes de velocidades com maior valor percentual de frequência são aquelas entre os 1,25 m/s e os 2,0 m/s, com valores percentuais acima dos 11 % para cada uma das classes de velocidades;
- A classe de velocidades que tem um maior valor percentual de frequência é aquela entre os 1,5 m/s e os 1,75 m/s, com uma percentagem de 13,3%. Quer isto dizer que esta classe de velocidades, por ter os maiores valores percentuais, é a que tem maior probabilidade de ocorrência;
- As classes de velocidades que têm uma menor probabilidade de ocorrência são aquelas entre os 0 m/s e os 0,5 m/s e todas aquelas acima dos 3,0 m/s, com valores percentuais abaixo dos 3%.

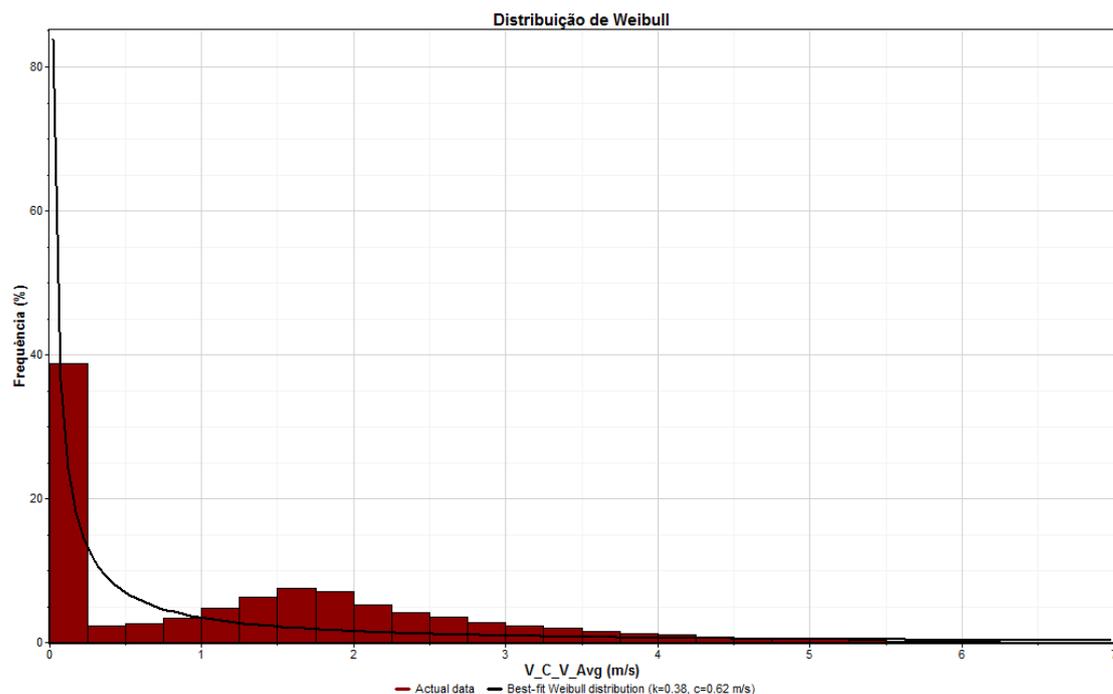


Figura 24: Distribuição de Weibull do anemómetro de copos velho



O parâmetro de escala (c) desta distribuição de Weibull possui um valor de 0,62 m/s, enquanto o parâmetro de forma (k) possui um valor de 0,38. O parâmetro de forma influencia essencialmente o desvio-padrão da distribuição, sendo que este aumenta à medida que o valor de K diminui, podendo afirmar-se que o parâmetro de forma pode ser considerado como uma medida da “dispersão” da velocidade do vento no local em estudo. Tal como o gráfico da distribuição de Weibull do sensor de copos novos, cada classe de velocidades dista entre si 0,25 m/s.

Não se podem tirar conclusões desta distribuição, pois não faz sentido ajustar directamente a distribuição de Weibull a este anemómetro, isto porque a elevada frequência de valores nulos não é real, mas sim resultado de deficiência do sensor. Para estimar a distribuição de Weibull a partir desta série, seria necessário alterar o algoritmo, o que está para além dos objectivos do trabalho.

Correcção da série de dados do vento na Mitra

Como já foi referido antes, um dos principais motivos para fazer uma comparação e uma análise entre os valores dos anemómetros de copos novo e velho tem a ver com a necessidade do Centro de Geofísica da Universidade de Évora não excluir totalmente os dados da velocidade do vento medidos na estação da Mitra desde Janeiro de 2010 até Maio de 2014 (período temporal em que estes dados não sofreram qualquer tipo de análise ou tratamento), altura em que o sensor foi desmantelado. O objectivo com esta comparação de valores seria fazer a ligação entre o conjunto de dados do anemómetro antigo e o conjunto de dados do anemómetro novo.

No início do estágio a ideia passava por arranjar uma expressão, possivelmente linear, que correlacionasse os valores dos dois anemómetros, que depois seria usada para calcular os valores da velocidade do vento que deveriam estar medidas no anemómetro antigo.

Mas o que se verificou foi que nunca haveria total certeza quanto aos valores da velocidade do vento que deveriam estar medidos no lugar dos valores baixos ou nulos. Isto porque, como pode ser visto na figura 20 (Gráfico de correlação VCN – VCV), quando o valor da velocidade do anemómetro antigo é nulo ou baixa, o valor da velocidade no anemómetro novo tanto pode variar entre os 0 m/s e os 3,5 m/s. Então optou-se por outro método: filtrar os valores medidos na Estação da Mitra nesses cerca de 4 anos e meio, procurando um valor de velocidade abaixo do qual nunca haveria certezas quanto à sua veracidade e legitimidade, e portanto, filtrando apenas os valores iguais ou superiores a esse valores de velocidade, eliminando todos os outros abaixo.



Para isso recorreu-se ao seguinte método, explicado passo-a-passo:

- Primeiro houve a necessidade de fazer uma média de 10 em 10 minutos dos valores medidos pelos anemómetros de copos novo e velho, que como já referido foram medidos para um intervalo de tempo de minuto em minuto, de maneira a que ficasse numa escala de tempo equivalente aos valores medidos pela estação da Mitra, que desde 1994 até 2014 foram medidos para um intervalo de tempo de 10 em 10 minutos;
- Depois, relativamente ao anemómetro de copos velho (o anemómetro comum às duas medições) houve uma filtragem nos valores (para esse intervalo de tempo de 10 em 10 minutos), que começou nos valores apenas iguais ou superiores a 0,5 m/s, acabando nos valores apenas iguais ou superiores a 2,5 m/s;
- Por fim, comparou-se as correlações entre os valores dos anemómetros de copos novo e velho (para esse intervalo de tempo de 10 em 10 minutos), que iam aumentando sucessivamente, com a percentagem de valores de intensidade do vento aproveitados pela estação da Mitra para esses cerca de 4 anos e meio (de Janeiro de 2010 a Maio de 2014), percentagem essa que ia diminuindo à medida que os valores de velocidade filtrados iam aumentando.

Para ajudar a perceber melhor o método explicado, e para que a comparação dos valores de correlação entre os anemómetros e a percentagem de valores aproveitados seja mais facilmente visualizada e percebida, foi construída uma tabela com todos esses dados.



Tabela 4: Dados com os valores de velocidade do sensor de copos velho filtrados, os valores de correlação entre os dois anemómetros, com o nº de valores aproveitados da série de dados do vento da Mitra e a respectiva percentagem

Valores de VCV_Avg filtrados (m/s)	Correlação	Nº de valores aproveitados	% de valores aproveitados
Sem filtro	0,932613	226616	100%
≥ 0,5	0,951223	194617	85,9%
≥ 0,6	0,955178	191968	84,7%
≥ 0,7	0,958329	189051	83,4%
≥ 0,8	0,961957	185869	82,0%
≥ 0,9	0,964944	182264	80,4%
≥ 1,0	0,967712	178361	78,7%
≥ 1,1	0,970274	173867	76,7%
≥ 1,2	0,972407	168837	74,5%
≥ 1,3	0,974431	163399	72,1%
≥ 1,4	0,975872	157483	69,5%
≥ 1,5	0,977199	151027	66,6%
≥ 1,6	0,978349	144004	63,5%
≥ 1,7	0,979036	136488	60,2%
≥ 1,8	0,979457	128734	56,8%
≥ 1,9	0,979493	120791	53,3%
≥ 2,0	0,979482	112893	49,8%
≥ 2,1	0,979595	104598	46,2%
≥ 2,2	0,979333	97106	42,9%
≥ 2,3	0,979199	90126	39,8%
≥ 2,4	0,979252	83541	36,9%
≥ 2,5	0,979117	77432	34,2%

Uma forma de perceber melhor qual a relação entre os valores de correlação dos dois anemómetros e a percentagem de valores aproveitados na série de dados do vento da Mitra, de forma a poder escolher qual o valor da velocidade do vento abaixo do qual os valores serão eliminados, seria colocar esses valores de correlação e percentagem de valores aproveitados num gráfico.

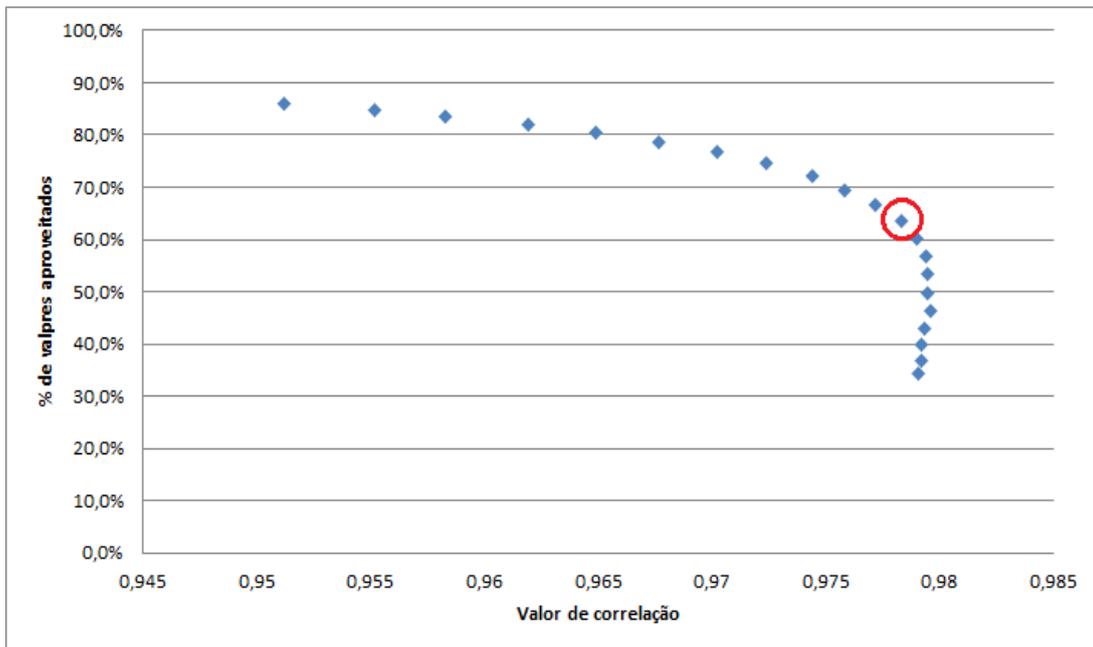


Figura 25: Gráfico de dispersão entre os valores de correlação dos anemómetros de copos e a percentagem de valores aproveitados da série de dados da Mitra

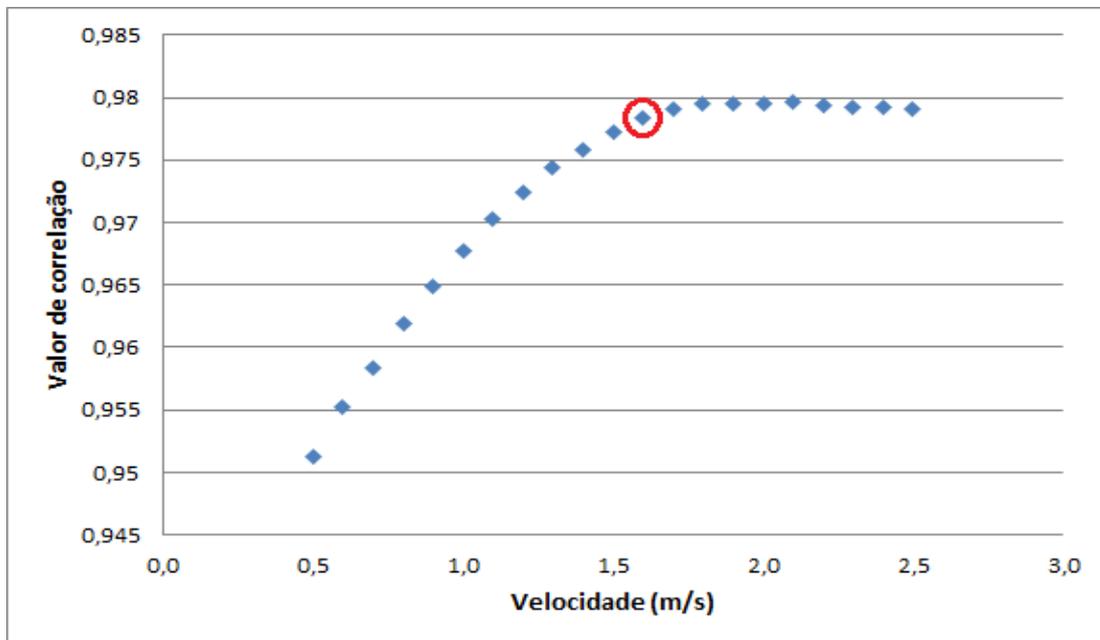


Figura 26: Gráfico de dispersão entre os valores de velocidade filtrados e os valores de correlação entre os dois anemómetros de copos



O valor realçado a vermelho corresponde ao valor de velocidade de 1,6 m/s, que foi o valor de velocidade escolhido por mim, significando isto que todos os valores de intensidade do vento no período temporal entre Janeiro de 2010 e Maio de 2014 abaixo dos 1,6 m/s foram desconsiderados, sendo substituídos por um código de erro (ver figura 27).

Olhando para a tabela 5 e para os gráficos das figuras 25 e 26, observamos que a partir do valor de velocidade dos 1,7 m/s, o valor de correlação entre os dois anemómetros tem um aumento muito pouco considerável, tendo em conta o elevado número de perda de valores da série de dados que isso representa. Por outras palavras, pode-se dizer que não é viável perder tantos dados para um tão pequeno aumento no valor de correlação entre os anemómetros.

Um valor de velocidade antes dos 1,5 m/s também não deve ser considerado, pois se observarmos os gráficos das figuras 25 e 26, verificamos que até esse valor de velocidade as diferenças entre os valores de correlação são acentuadas (a distância entre os pontos do gráfico vai diminuindo à medida que a velocidade aumenta). Portanto o valor a ser escolhido terá de estar dentro do intervalo entre os 1,5 m/s e os 1,7 m/s. Optei pelo valor de valor de velocidade de 1,6 m/s, porque considerei que comparativamente ao valor de 1,5 m/s a diferença nos valores de correlação era relativamente significativa ($0,978349 - 0,977199 = 0,00115$), já não sucedendo o mesmo se compararmos com a diferença nos valores de correlação para os valores de velocidade 1,7 m/s e 1,6 m/s ($0,979036 - 0,978349 = 0,000687$).

Apesar do valor de correlação para a velocidade de 1,7 m/s ser superior ao valor de correlação para a velocidade de 1,6 m/s, filtrar os valores abaixo dos 1,7 m/s implicava uma perda de 3,3 % dos dados totais, ou seja, 7516 dos 226616 valores totais da série de dados do vento na Mitra. Essa perda, na minha opinião, não compensava dado a diferença nos valores de correlação entre as duas velocidades ser tão pouco significativa.

Podemos ver a diferença na série de dados antes e depois dos dados terem sido filtrados, observando os gráficos de correlação entre os valores de velocidade (para a média de 10 minutos) entre os dois sensores.

No primeiro gráfico temos os valores de velocidade antes dos dados serem filtrados, no outro temos apenas os valores de velocidade que são iguais ou superiores a 1,6 m/s. As diferenças nos dois são notórias.

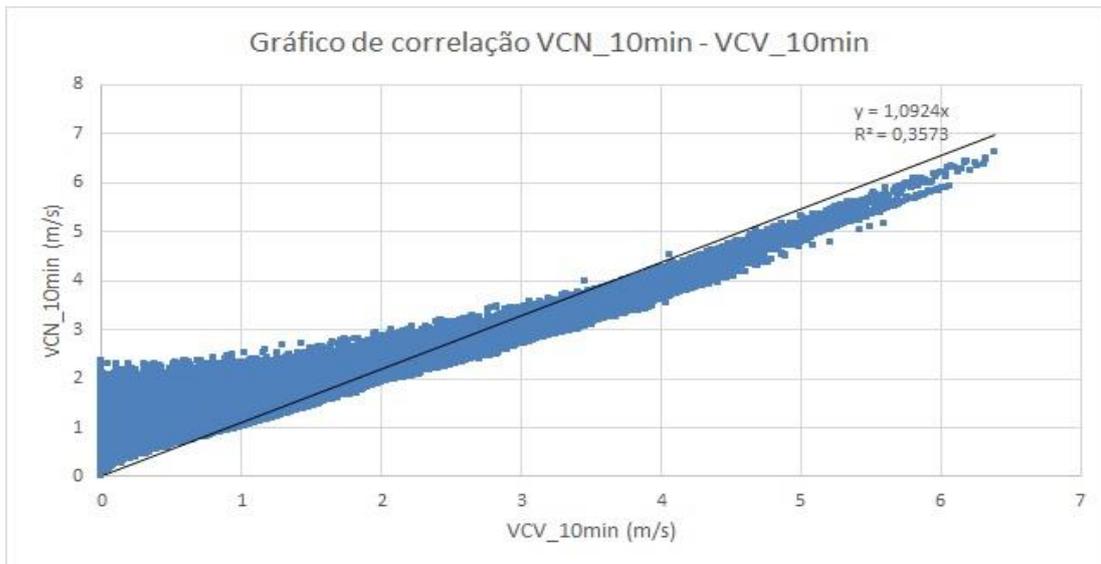


Figura 27: Gráfico de dispersão entre os dois anemómetros antes da filtragem dos dados

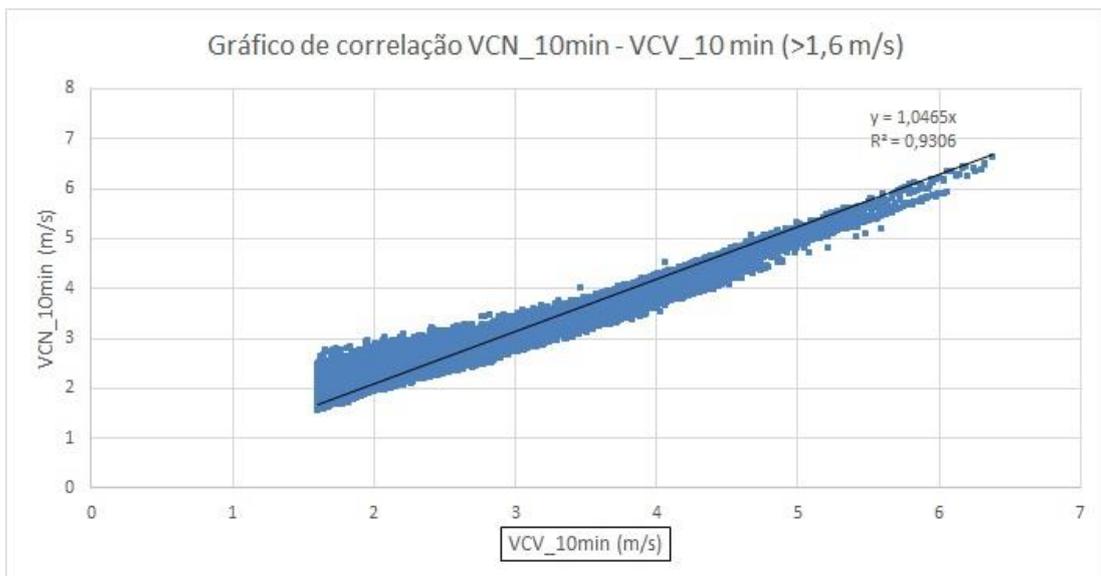


Figura 28: Gráfico de dispersão entre os dois anemómetros depois da filtragem dos dados

Podemos observar que no gráfico da figura 27 a dispersão dos valores relativamente à recta de regressão linear é bastante menor que no gráfico da figura 26. A correlação entre os dados aumentou bastante, passando de um valor de 0,933, antes da filtragem dos dados, para um valor de 0,978, depois da filtragem.

O valor do coeficiente de determinação⁴ (R^2) também aumentou consideravelmente, passando de um valor de 0,3573, antes da filtragem dos dados, para um valor de 0,9306, depois dos dados filtrados.

Isto quer dizer que os dados, depois de filtrados, ajustam-se muito melhor ao espaço da amostra, do que antes da filtragem.

Recorrendo também a um histograma de frequências, podemos observar melhor a quantidade de dados que foram eliminados da série depois de filtrados os valores abaixo dos 1,6 m/s, comparando-os com a quantidade de dados da série que foram aproveitados.

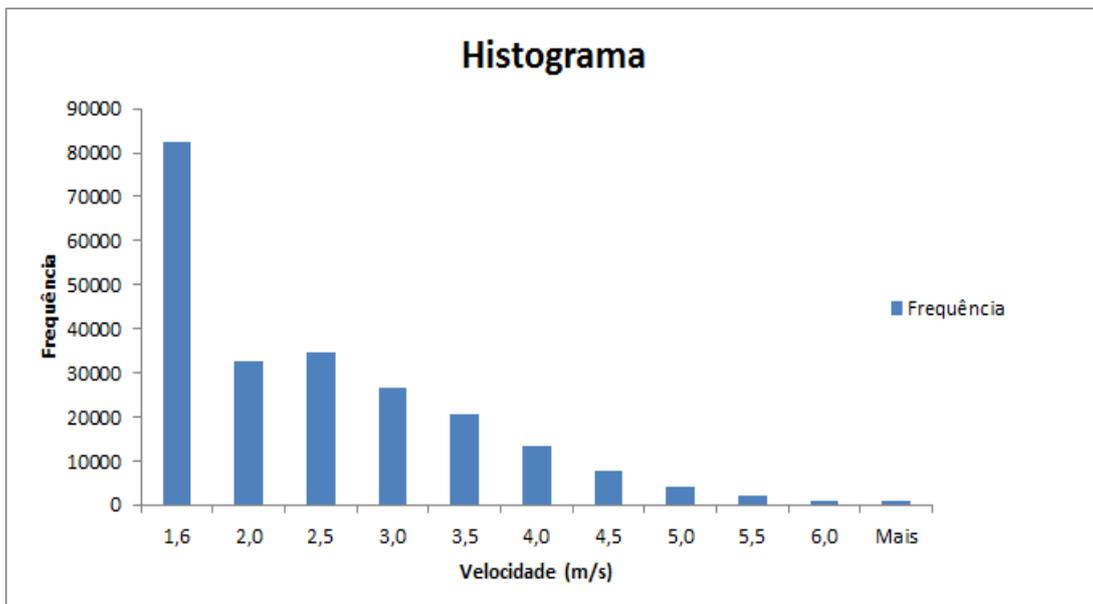


Figura 29: Histograma de frequências da série de dados da Mitra, depois da filtragem dos valores

⁴ O coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a a regressão linear, em relação aos valores de um espaço amostral. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é modelo, melhor ele se ajusta à amostra.



Olhando para o histograma, podemos observar que a classe de valores entre os 0 m/s e os 1,6 m/s é bastante superior a todas as outras classes de velocidade. Mas este facto, no meu entender, não invalida que esta série ainda seja útil no que toca a avaliação do recurso eólico, pois cerca de 2/3 dos valores totais (144004 em 226616) ainda são aproveitados, podendo esta série de dados ainda ser aproveitada no que concerne a estudos sobre o potencial eólico da região da Mitra.

Por fim, falta referir que no código de erro da série de dados, foi utilizado o algarismo de 88888, para diferenciar do código erro da estação, que é o algarismo 99999. Ao aparecer este algarismo (ver figura 29), significa que o valor de velocidade que devia estar no lugar dele é um valor de velocidade abaixo dos 1,6 m/s, tendo sido portanto desconsiderado da série de dados da estação.

Os valores da série de dados com o código de erro já inserido foram guardados numa folha de cálculo e entregues ao Centro de Geofísica de Évora.

A série de vento continua a poder ser utilizada para algum tipo de estudos, sem se ter recalibrado os dados, mas sabendo que a única informação que temos sobre os valores inferiores a 1,6 m/s é que são apenas isso mesmo.

Data	Hora	V (m/s)	V (valores filtrados) (m/s)	Dv (°)
01/01/2010	0:10	1,92	1,92	241,1
01/01/2010	0:20	2,1	2,1	234,09
01/01/2010	0:30	1,85	1,85	237,54
01/01/2010	0:40	1,71	1,71	230,35
01/01/2010	0:50	1,68	1,68	241,06
01/01/2010	1:00	1,36	888888	227,48
01/01/2010	1:10	1,61	1,61	216,8
01/01/2010	1:20	1,71	1,71	219,57
01/01/2010	1:30	1,32	888888	215,82
01/01/2010	1:40	0,96	888888	212,76
01/01/2010	1:50	1,1	888888	223,31
01/01/2010	2:00	1,3	888888	260,41
01/01/2010	2:10	1,49	888888	230,06
01/01/2010	2:20	1,66	1,66	221,01
01/01/2010	2:30	1,75	1,75	220,09
01/01/2010	2:40	1,64	1,64	230,97
01/01/2010	2:50	1,66	1,66	237,26
01/01/2010	3:00	2,09	2,09	223,96
01/01/2010	3:10	1,93	1,93	223,15
01/01/2010	3:20	1,76	1,76	227,12

Figura 30 Série de dados da velocidade do vento na Mitra já com o código de erro incluído



4.3.2 Anemómetro ultrassónico dos 10 metros - Anemómetro ultrassónico dos 6 metros

O objectivo com a comparação entre estes dois sensores ultrassónicos, seria o de verificar qual a influência que a altitude tem na caracterização do recurso eólico de uma região e qual a variabilidade dos resultados apresentados pelos dois sensores. O anemómetro ultrassónico dos 10 metros já estava instalado na estação antes de ser instalado o dos 6 metros, que foi recolhido da barragem do Alqueva. Este foi instalado apenas para o propósito de analisar a influência da altura nas velocidades do vento de uma região, sendo que depois de finalizado este trabalho, será instalado noutra local.

Como podemos observar na tabela 2, dos 63839 dados esperados, puderam ser aproveitados 50149, o que perfaz um total de 78,56% de dados aproveitados. A quase totalidade dos dados com falhas, que não puderam ser aproveitados, deveu-se ao erro já explicado no anemómetro ultrassónico dos 6 metros. Os dados estatísticos mais relevantes na análise dos valores entre estes dois sensores podem ser vistos na seguinte tabela:

Tabela 5: Quadro-resumo com os principais dados estatísticos entre os anemómetros ultrassónicos dos 10 metros e 6 metros

Média velocidade VS1_avg (m/s)	2,5790375
Média velocidade VS2_avg (m/s)	1,7879852
Correlação	0,9243610
VIÉS	0,7910523
Erro quadrático médio	0,9047825
Erro médio absoluto	0,8070033
Máximo valor de velocidade VS1_avg (m/s)	11,419564
Mínimo valor de velocidade VS1_avg (m/s)	0,060833
Máximo valor de velocidade VS2_avg (m/s)	7,925534
Mínimo valor de velocidade VS2_avg (m/s)	0,068

Como se pode observar na tabela 6, a média de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 10 metros é bastante superior à média de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 6 metros, com uma diferença média de velocidade de 0,791 m/s entre si. Esta

diferença põe em evidência o factor determinante que é a altura no aproveitamento eólico de uma região.

Podemos dizer que, de um modo geral, quanto maior for a altura acima do solo, maior é a velocidade do vento numa mesma região.

Os ventos de interesse no que toca ao aproveitamento em equipamentos eólicos são os que ocorrem a cerca de 50 metros acima do nível do solo, daí que as torres dos aerogeradores tenham normalmente essa altura de 50 metros.

Embora já existam também aproveitamentos eólicos para aerogeradores com torres até 100 metros, estas por enquanto ainda não são muito comuns. Isto porque aproveitamentos eólicos para alturas maiores que 50 metros, implicam um nível de complexidade e custos superiores, daí que não sejam tão rentáveis para quem investe.

Uma boa maneira de ver a relação entre os dois anemómetros ultrassónicos é observando o gráfico de dispersão entre eles, como pode ser visto na figura 30.

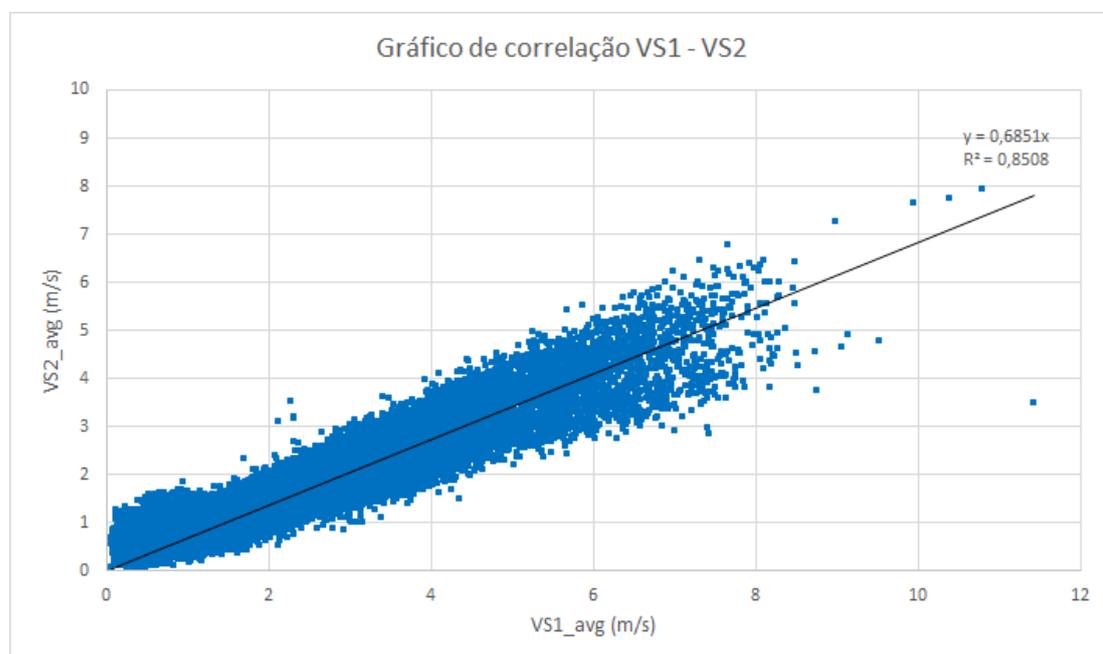


Figura 31: Gráfico de correlação da velocidade entre os anemómetros ultrassónicos dos 10 e 6 metros

Através do gráfico conseguimos observar, tal como seria expectável, que os valores de velocidade do sensor dos 10 metros são quase sempre superiores aos valores de velocidade do sensor dos 6 metros, sendo que existe uma ligeira dispersão dos dados em relação à recta de regressão linear

Os pontos que estejam bastante dispersos do gráfico, longe da recta de regressão linear, significam que algumas rajadas de vento na região da Mitra fizeram-se sentir com bastante mais força para uma altura de 10 metros, atingido velocidades aos 10 metros de altura bastante superiores do que em relação aos 6 metros.

As variações dos valores de intensidade do vento ao longo do período de análise podem ser mais facilmente observáveis num gráfico de série temporal, que mostra e compara os valores da velocidade do vento nos dois anemómetros.

Devido ao problema no sensor ultrassónico dos 6 metros, o gráfico tem uma falha nos dados desde o dia 1 de Novembro, às 05:37 h, até ao dia 10 de Novembro, às 12:42 h.

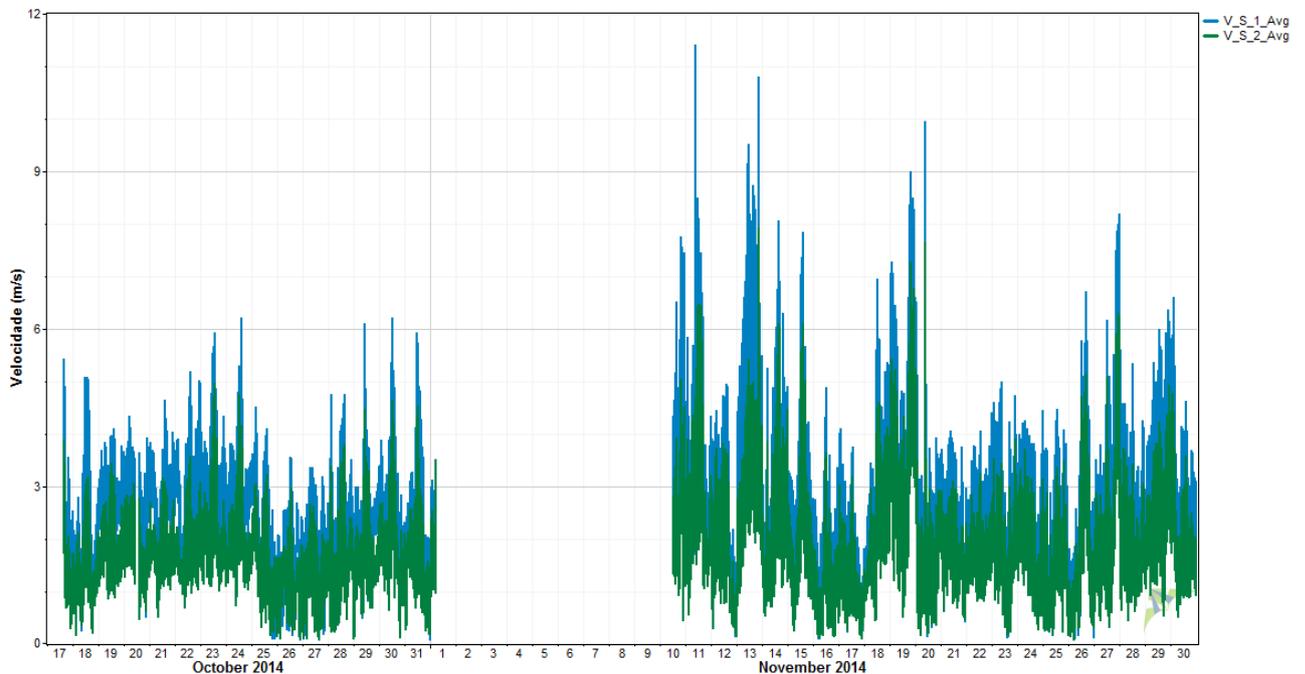


Figura 32: Gráfico de série temporal para os anemómetros ultrassónicos dos 6 e 10 metros

O gráfico de cor verde corresponde, como está legendado na figura, ao anemómetro ultrassónico dos 6 metros e o gráfico de cor azul ao anemómetro ultrassónico dos 10 metros.

Daqui podemos retirar algumas conclusões, tais como:

- Tal como foi possível observar no gráfico de correlação da figura 32, os valores de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 10 metros são praticamente sempre superiores aos valores de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 6 metros;
- Exceptuando alguns períodos, que nunca são superiores a algumas horas, todos os valores de velocidade do vento dos dois anemómetros situaram-se no intervalo entre os 0 m/s e os 6 m/s, sendo que para o anemómetro dos 6 metros o intervalo maioritário foi entre os 0 m/s e os 4 m/s;

- Não existe nenhum período de tempo, tanto para o sensor dos 10 metros como para o dos 6 metros, em que a velocidade do vento tenha sido nula. Este facto pode ser confirmado na tabela 6.

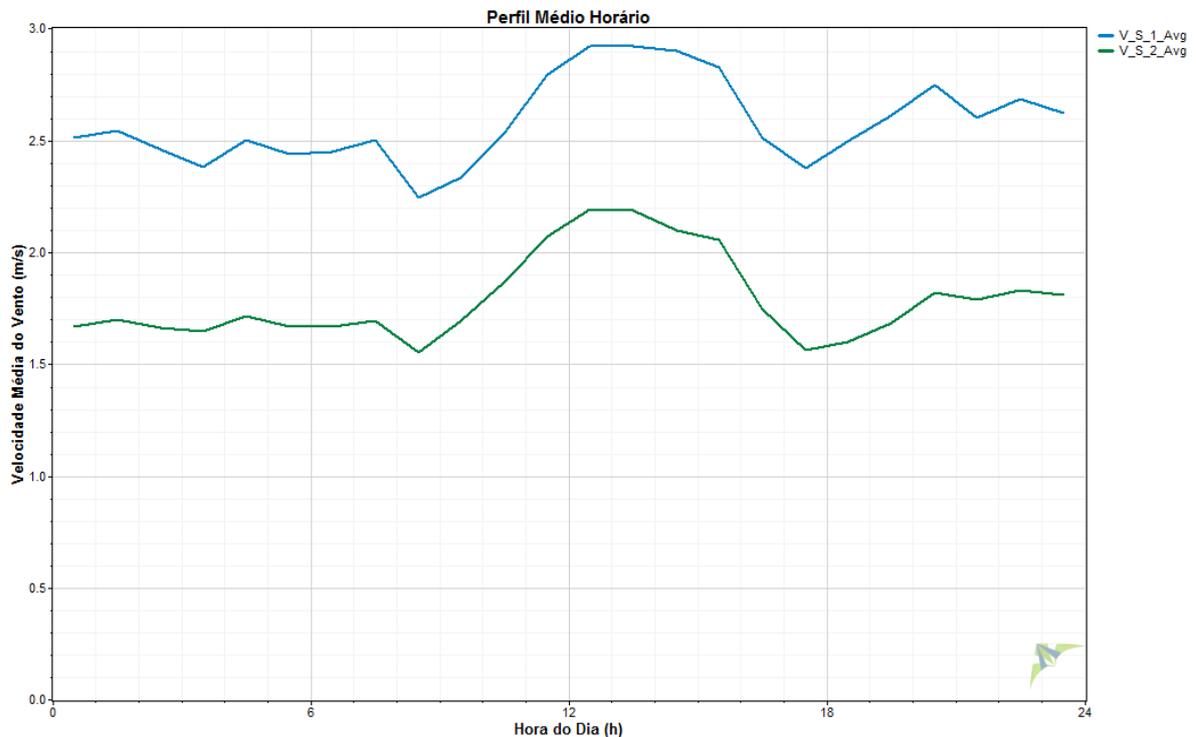


Figura 33: Perfil médio horário para os anemómetros ultrassónicos dos 10 metros e 6 metros

O perfil médio horário é também um gráfico interessante de ser analisado, pois este vai traduzir, tal como já foi referido antes, o comportamento médio da velocidade ao longo de 24 h. Ou seja, este gráfico irá mostrar a média de todos os valores de velocidade em análise, agrupando-os para uma classe horária de uma hora, podendo esses valores ser comparados entre os dois anemómetros.

Assim torna-se mais fácil perceber em que períodos do dia a velocidade é maior e em que períodos é menor.

O anemómetro ultrassónico dos 10 metros está representado pela cor azul e o anemómetro ultrassónico dos 6 metros pela cor verde.

Daqui podemos retirar algumas conclusões, tais como:

- A velocidade média do vento, para os dois anemómetros, atinge os seus valores máximos no período entre as 13 h e as 14 h;
- Em média, a velocidade mais baixa do vento, para o sensor dos 10 metros, é registada por volta das 8 h 30 min. No período entre as 0 h e as 8h 30 min, a velocidade do vento para este sensor varia entre os 2,55 m/s e os 2,25 m/s, aumentando o seu valor até atingir, no período entre as 13 h e as 14 h, em média, o valor máximo de velocidade, de cerca de 2,9 m/s. A partir daqui, a

velocidade irá baixar até às 17 h 30 min, atingindo aqui um valor de velocidade de cerca de 2,4 m/s, voltando outra vez a aumentar o seu valor até por volta das 20 h 30 min, em que atinge uma velocidade média de cerca de 2,75 m/s. Daqui até às 24 h, velocidade do vento irá oscilar entre os 2,75 m/s e os 2,6 m/s;

- Tal como no sensor dos 10 metros, a velocidade média mais baixa registada pelo sensor dos 6 metros foi por volta das 8 h 30 min, com um valor de cerca de 1,55 m/s, atingindo semelhante velocidade por volta das 17 h 30 min. No período entre as 0 h e as 8h 30 min a velocidade média variou entre os 1,7 m/s e os 1,55 m/s, aumentando o seu valor até estabilizar, no período entre as 13 h e as 14 h, nos 2,3 m/s. A partir daqui a velocidade baixa até aos 2,05 m/s, por volta das 15 h 30 min, baixando depois, com um declive mais acentuado, até por volta dos 17 h 30 min. A velocidade média irá depois aumentar até ao valor de cerca de 1,8 m/s, por volta das 20 h 30 min, mantendo-se mais ou menos estável nesse valor de velocidade até às 0 h.

Podemos observar melhor os valores de velocidade se os metermos numa tabela, mostrando a variação da intensidade do vento de hora em hora, ao longo do dia.

Tabela 6: Valores de velocidade do perfil médio horário dos anemómetros ultrassónicos dos 10 metros e 6 metros

Hora do dia (h)	VS1_Avg (m/s)	VS2_Avg (m/s)
00:00 - 01:00	2,51	1,67
01:00 - 02:00	2,54	1,70
02:00 - 03:00	2,46	1,66
03:00 - 04:00	2,38	1,65
04:00 - 05:00	2,50	1,72
05:00 - 06:00	2,44	1,67
06:00 - 07:00	2,45	1,67
07:00 - 08:00	2,50	1,69
08:00 - 09:00	2,24	1,55
09:00 - 10:00	2,33	1,69
10:00 - 11:00	2,53	1,86
11:00 - 12:00	2,79	2,07
12:00 - 13:00	2,92	2,19
13:00 - 14:00	2,92	2,19
14:00 - 15:00	2,90	2,10
15:00 - 16:00	2,83	2,06
16:00 - 17:00	2,51	1,75
17:00 - 18:00	2,38	1,56
18:00 - 19:00	2,50	1,60
19:00 - 20:00	2,61	1,68
20:00 - 21:00	2,75	1,82
21:00 - 22:00	2,60	1,79
22:00 - 23:00	2,68	1,83
23:00 - 24:00	2,62	1,81

Tal como já foi feito na comparação entre os anemómetros de copos, irei analisar agora a distribuição de Weibull dos dois sensores ultrassónicos, pois este é um parâmetro indispensável no cálculo do potencial eólico de uma região.

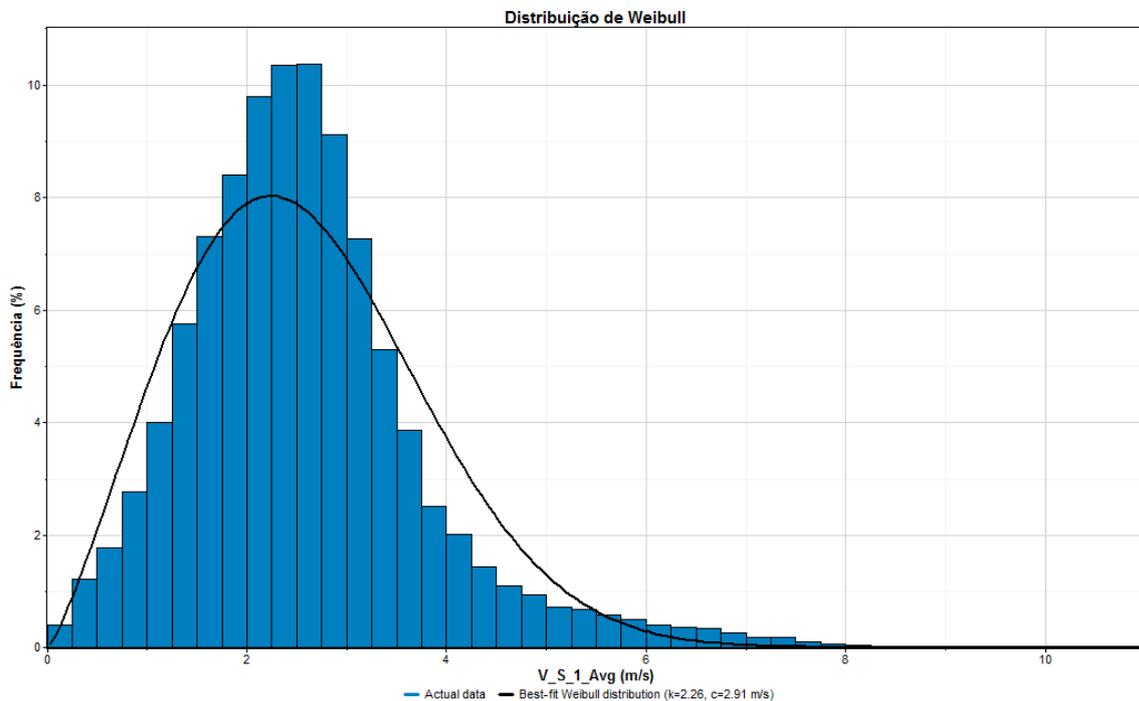


Figura 34: Gráfico de distribuição de Weibull do sensor ultrassónico dos 10 metros

O parâmetro de escala c desta distribuição de Weibull tem um valor de 2,91 m/s, sendo que o parâmetro de forma k tem um valor de 2,26.

Ao observar o gráfico, reparamos que cada classe de velocidades tem um intervalo de 0,25 m/s entre si.

Algumas conclusões que se podem tirar a partir desta distribuição de Weibull:

- As classes de velocidades com maior valor percentual de frequência são aquelas entre os 2,25 m/s e os 2,75 m/s, com valores percentuais de cerca de 10,5 % (o valor percentual da classe de velocidades entre os 2,25 e os 2,5 m/s é apenas ligeiramente superior) para cada uma das classes de velocidades. Quer isto dizer que estas duas classes de velocidades, por terem os maiores valores percentuais, são as que têm maior probabilidade de ocorrência;
- As classes de velocidades que têm uma menor probabilidade de ocorrência são aquelas entre os 0 m/s e os 1 m/s e todas aquelas acima dos 3,75 m/s, com valores percentuais abaixo dos 3%;

- Como se pode observar pelo gráfico, a distribuição das velocidades do vento não é simétrica, sendo que à medida que aumentamos o valor da velocidade o valor de frequência percentual vai diminuindo até possuir um valor nulo.

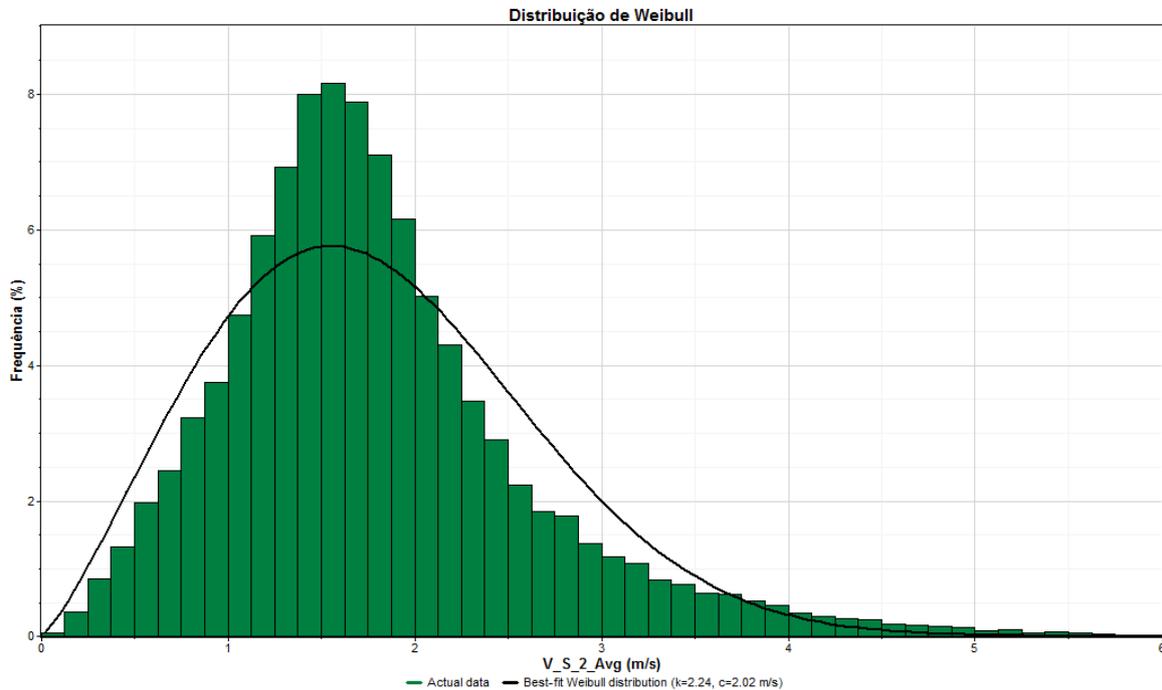


Figura 35: Gráfico de distribuição de Weibull do sensor ultrassónico dos 6 metros

O parâmetro de escala c desta distribuição de Weibull tem um valor de 2,02 m/s, sendo que o parâmetro de forma k tem um valor de 2,24.

Ao contrário do gráfico da distribuição de Weibull do sensor dos 10 metros, cada classe de velocidades dista 0,125 m/s entre si.

Algumas conclusões que se podem tirar a partir desta distribuição de Weibull:

- As classes de velocidades com maior valor percentual de frequência são aquelas entre os 1,375 m/s e os 1,75 m/s, com valores percentuais acima dos 7,5% para cada uma das classes de velocidades. A única classe de velocidades com valores acima dos 8% é aquela entre os 1,5 m/s e os 1,625 m/s, sendo que por isso os valores de velocidade dentro desta classe são os que têm maior probabilidade de ocorrência;
- As classes de velocidades que têm uma menor probabilidade de ocorrência são aquelas entre os 0 m/s e os 0,625 m/s e todas aquelas acima dos 2,625 m/s, com valores percentuais abaixo dos 2%;



Extrapolação vertical da velocidade do vento

Um dos objectivos ao fazer esta comparação entre dois anemómetros iguais, mas com alturas diferentes, é o de poder calcular a intensidade do vento em função da altura na região da Mitra, utilizando os métodos e expressões mais indicados a esse cálculo. Para isso importa estimar algumas variáveis importantes na análise ao perfil vertical da velocidade do ar, tais como o comprimento de rugosidade (Z_0) ou o expoente da lei de potência (α).

O Z_0 representa a altura a qual a velocidade do vento possui valor nulo (devido a interferências no terreno, como árvores ou vegetação) e varia em função do tipo de terreno, tal como o valor de α . E a importância de ambas as variáveis advém do facto de, assim que for possível fazer uma estimativa do comprimento de rugosidade ou do expoente da lei de potência do local, a extrapolação da velocidade do vento em função da altura pode ser efectuada.

Uma maneira então de calcular a velocidade do vento em função da altura na zona da Mitra seria saber o valor do Z_0 e do α característicos do local. Como tanto o valor de Z_0 como o valor de α podem variar de acordo com as estações do ano, o valor de Z_0 e α calculados seriam apenas válidos para o período temporal em análise neste trabalho.

Voltando ao cálculo da velocidade do vento em função da altura, este pode ser descrito segundo dois modelos matemáticos: a lei logarítmica e a lei de potência. Cada uma das leis tem especificidades e segue equações diferentes, mas ambas são aceites e podem ser utilizadas no cálculo do vento em função da altitude.

A lei logarítmica e lei de potência, como aplicam-se para terrenos planos e homogéneos, possuem em consequência algumas limitações, tais como:

- Dependência do tipo de terreno;
- Velocidade do vento;
- Modificações na rugosidade da superfície;
- Influência de factores meteorológicos, tais como a temperatura do ar e a pressão atmosférica.



Lei Logarítmica

A lei logarítmica, que apenas deve ser utilizada em locais de terreno simples e em condições estáveis, segue a seguinte equação logarítmica (e.g. Manwell et al, 2002):

$$\frac{U(z)}{U_R} = \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \leftrightarrow U(z) = U_R \times \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \quad (2)$$

Em que:

Z_R - altura de referência da medida de velocidade do ar (m)

U_R - Velocidade do ar em Z_R (m/s)

E como se calcula o Z_0 ?

Para se poder calcular o Z_0 são necessários dois anemómetros, iguais entre si. Este registará 2 velocidades do vento diferentes entre si (U_1 e U_2) para duas alturas diferentes (Z_1 e Z_2).

O Z_0 calcula-se então utilizando a seguinte equação logarítmica:

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)} \leftrightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{\ln(Z_1) - \ln(Z_0)}{\ln(Z_2) - \ln(Z_0)} \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow U_1(\ln(Z_2) - \ln(Z_0)) = U_2(\ln(Z_1) - \ln(Z_0)) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow (U_1\ln(Z_2) - U_1\ln(Z_0)) = U_2\ln(Z_1) - U_2\ln(Z_0) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow U_2\ln(Z_0) - U_1\ln(Z_0) = U_2\ln(Z_1) - U_1\ln(Z_2) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \ln(Z_0)(U_2 - U_1) = U_2\ln(Z_1) - U_1\ln(Z_2) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \ln(Z_0) = \frac{U_2\ln(Z_1) - U_1\ln(Z_2)}{U_2 - U_1} \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow Z_0 = e^{\frac{U_2\ln(Z_1) - U_1\ln(Z_2)}{U_2 - U_1}} \quad (3) \end{aligned}$$



Em que:

U_1 e U_2 – Intensidade do vento em 1 e 2 (m/s)

Z_1 e Z_2 – Altura em 1 e 2 (m)

Como os valores de Z_0 são tipicamente calculados para valores horários de velocidade, foram usados valores médios horários medidos pelos 2 anemómetros, em vez dos de minuto em minuto. O valor de Z_0 foi então obtido utilizando a equação apresentada em (3) para cada um dos valores médios horários, filtrados apenas para os valores de velocidade do sensor dos 10 metros superiores aos do sensor dos 6 metros (se assim não fosse o valor de Z_0 obtido iria tender para $+\infty$) de velocidade, fazendo a média de todos no fim. Chegou-se então a um valor de Z_0 igual a 1,8654.

Utilizando agora os valores da média horária de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 10 metros e da média horária de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 6 metros, iremos calcular o valor de Z_0 utilizando a equação apresentada em (3) e comparar esse valor com o valor de Z_0 obtido anteriormente:

U_1 (velocidade média horária para o sensor dos 10 metros) = 2,580 m/s

U_2 (velocidade média horária para o sensor dos 6 metros) = 1,789 m/s

$$Z_0 = e^{\frac{U_2 \ln(Z_1) - U_1 \ln(Z_2)}{U_2 - U_1}} \leftrightarrow Z_0 = e^{\frac{1,789 \ln(10) - 2,58 \ln(6)}{1,789 - 2,58}} \leftrightarrow$$

$$Z_0 \approx 1,890 \text{ m}$$

Comparando os dois valores de Z_0 , eles são bastante semelhantes entre si. De acordo com a literatura seria de esperar que o valor de Z_0 fosse consideravelmente mais baixo, num intervalo entre os 0,5 e os 1,0 m/s. Na conclusão do trabalho irei apresentar algumas possíveis razões para este facto.

Usando agora este valor de Z_0 , podemos extrapolar velocidades do vento para valores acima dos 50 metros. Irei extrapolar para 3 alturas diferentes (50 metros, 75 metros e 100 metros), usando a média horária do valor de velocidade aos 10 metros, por exemplo, através da equação da lei logarítmica:



1. Altura igual a 50 metros

$$U(z) = U_R \times \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \leftrightarrow U(50) = 2,58 \times \left(\frac{\ln\left(\frac{50}{1,89}\right)}{\ln\left(\frac{10}{1,89}\right)}\right) \leftrightarrow$$
$$U(50) = 5,072 \text{ m/s}$$

2. Altura igual a 75 metros

$$U(z) = U_R \times \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \leftrightarrow U(75) = 2,58 \times \left(\frac{\ln\left(\frac{75}{1,89}\right)}{\ln\left(\frac{10}{1,89}\right)}\right) \leftrightarrow$$
$$U(50) = 5,7 \text{ m/s}$$

3. Altura igual a 100 metros

$$U(z) = U_R \times \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \leftrightarrow U(100) = 2,58 \times \left(\frac{\ln\left(\frac{100}{1,89}\right)}{\ln\left(\frac{10}{1,89}\right)}\right) \leftrightarrow$$
$$U(50) = 6,146 \text{ m/s}$$

Ao observar os valores de velocidade obtidos podemos verificar que são consideravelmente mais baixos do que o esperado, significando então que o valor do Z_0 é superior ao que seria de esperar.



Lei de Potência

O modelo matemático da Lei da Potência é um modelo matemático semelhante à lei logarítmica e representa-se pela seguinte equação (e.g. Manwell et al, 2002):

$$\frac{U(z)}{U_R} = \left(\frac{z}{z_R}\right)^\alpha \leftrightarrow U(z) = U_R \times \left(\frac{z}{z_R}\right)^\alpha \quad (4)$$

Em que:

z_R - altura de referência da medida de velocidade do ar (m)

U_R - Velocidade do ar em z_R (m/s)

Pegando na expressão apresentada em (4) podemos calcular α da seguinte maneira:

$$U(z) = U_R \times \left(\frac{z}{z_R}\right)^\alpha \leftrightarrow \alpha = \frac{\text{Log}\left(\frac{U(z)}{U_R}\right)}{\text{Log}\left(\frac{z}{z_R}\right)} \quad (5)$$

Para terrenos planos podemos considerar que α tem um valor aproximadamente igual a 0,14.

Tal como o z_0 , também os valores de α são tipicamente calculados usando valores horários de velocidade, daí terem sido usados valores médios horários medidos pelos 2 anemómetros, em vez dos de minuto em minuto.

O valor de α foi então obtido utilizando a equação apresentada em (5) para cada um dos valores médios horários de velocidade, fazendo a média de todos no fim. Chegou-se então a um valor de α igual a 0,7064.

Utilizando agora os valores da média horária de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 10 metros e da média horária de velocidade do anemómetro ultrassónico dos 6 metros, iremos calcular o valor de α utilizando a equação apresentada em (5) e comparar esse valor com o valor de α obtido anteriormente:

U_z (velocidade média horária para o sensor dos 10 metros) = 2,580 m/s

U_R (velocidade média horária para o sensor dos 6 metros) = 1,789 m/s



$$\alpha = \frac{\text{Log}\left(\frac{U(Z)}{UR}\right)}{\text{Log}\left(\frac{Z}{ZR}\right)} \leftrightarrow \alpha = \frac{\text{Log}\left(\frac{2,58}{1,789}\right)}{\text{Log}\left(\frac{10}{6}\right)} \leftrightarrow \alpha = 0,7167$$

Comparando os dois valores de α , eles são bastante semelhantes entre si. Mas o valor de α , tal como o valor de Z_0 , deveria ser consideravelmente mais baixo, aproximando-se, tal como indicado anteriormente, do valor de 0,14. Na conclusão do trabalho irei então apresentar algumas possíveis razões para este facto.

Usando agora este valor de α , podemos extrapolar velocidades do vento para valores acima dos 50 metros. Tal como havia feito usando o valor de Z_0 , irei extrapolar para 3 alturas diferentes (50 metros, 75 metros e 100 metros), usando a média horária do valor de velocidade aos 10 metros, por exemplo, através da equação da lei de potência:

1. Altura igual a 50 metros

$$U(z) = UR \times \left(\frac{Z}{ZR}\right)^\alpha \leftrightarrow U(Z) = 2,58 \times \left(\frac{50}{10}\right)^{0,7167} \leftrightarrow \\ U(Z) = 8,177 \text{ m/s}$$

2. Altura igual a 75 metros

$$U(z) = UR \times \left(\frac{Z}{ZR}\right)^\alpha \leftrightarrow U(Z) = 2,58 \times \left(\frac{75}{10}\right)^{0,7167} \leftrightarrow \\ U(Z) = 10,934 \text{ m/s}$$

3. Altura igual a 100 metros

$$U(z) = UR \times \left(\frac{Z}{ZR}\right)^\alpha \leftrightarrow U(Z) = 2,58 \times \left(\frac{100}{10}\right)^{0,7167} \leftrightarrow \\ U(Z) = 13,438 \text{ m/s}$$

Apesar de os valores de velocidade até estarem dentro do esperado, estes não podem ser considerados válidos, pois o valor do α deveria ser consideravelmente mais baixo, aproximando-se, tal como já foi referido, de 0,14

4.3.3 Anemómetro de copos novo - Anemómetro ultrassónico dos 6 metros

O objectivo ao comparar um sensor de copos com um sensor ultrassónico, ou seja, dois sensores diferentes entre si, para um nível de altitude igual, seria o de verificar se estes obteriam valores semelhantes entre si, ou se pelo contrário, obteriam valores de velocidade díspares.

Se os resultados obtidos fossem semelhantes entre si, isto significaria que não faria diferença entre usar um sensor ou outro, no que toca apenas à medição dos valores de velocidade.

Como se pode observar na tabela 2, dos 63839 valores de velocidade esperados, puderam ser aproveitados 50143, o que perfaz um total de 78,55% de dados aproveitados, devendo-se a quase totalidade dos dados com falhas ao problema já explicado anteriormente no anemómetro ultrassónico dos 6 metros. Os dados estatísticos mais relevantes na análise dos valores entre estes dois sensores podem ser vistos na seguinte tabela:

Tabela 7: Quadro-resumo com os principais dados estatísticos entre o anemómetro de copos novo e ultrassónico dos 6 metros

Média velocidade VS2_avg (m/s)	1,7880248
Média velocidade VCN_avg (m/s)	1,8125922
Correlação	0,9739448
VIES	0,0245674
Erro quadrático médio	0,0532331
Erro médio absoluto	0,1578788
Máximo valor de velocidade VS2_avg (m/s)	7,925534
Mínimo valor de velocidade VS2_avg (m/s)	0,068
Máximo valor de velocidade VCN_avg (m/s)	9,099426
Mínimo valor de velocidade VCN_avg (m/s)	0

Como se pode observar na tabela, as médias de velocidades dos dois sensores são bastante semelhantes entre si, ao passo que o valor de correlação é bastante alto, significando então que os valores de velocidade medidos pelos dois sensores estão fortemente correlacionados. O valor do VIES, juntamente com o valor do erro quadrático médio e do erro médio absoluto, são valores bastante baixos, dando ainda mais ênfase à forte correlação que estes dois conjuntos de dados têm entre si. Podemos observar melhor a correlação entre os dois sensores, observando o seu gráfico de dispersão.

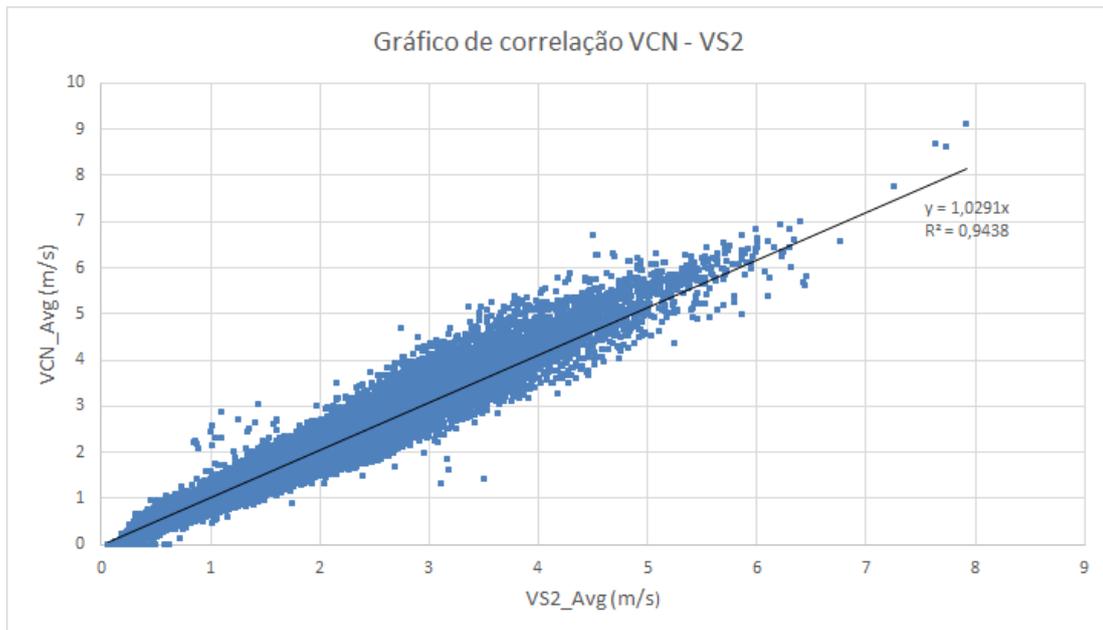


Figura 36: Gráfico de correlação entre os anemómetros de copos novo e ultrassónico dos 6 metros

Podemos observar pelo gráfico que existe uma baixa dispersão dos valores relativamente à recta de regressão linear, confirmando as semelhanças dos valores de velocidade dos dois anemómetros. O valor do coeficiente de determinação (R^2), que está presente no gráfico, por ser um valor bastante alto ($R^2 = 0,9438$) também confirma essa semelhança, pois quanto maior o valor R^2 melhor ele se ajusta à amostra de valores.

As variações dos valores de intensidade do vento ao longo do período de análise para os dois anemómetros podem ser observáveis num gráfico de série temporal, que mostra e compara os valores da velocidade do vento nos dois anemómetros durante esse período.

Devido ao problema no sensor ultrassónico dos 6 metros, o gráfico tem uma falha nos dados desde o dia 1 de Novembro, às 05:37 h, até ao dia 10 de Novembro, às 12:42 h.

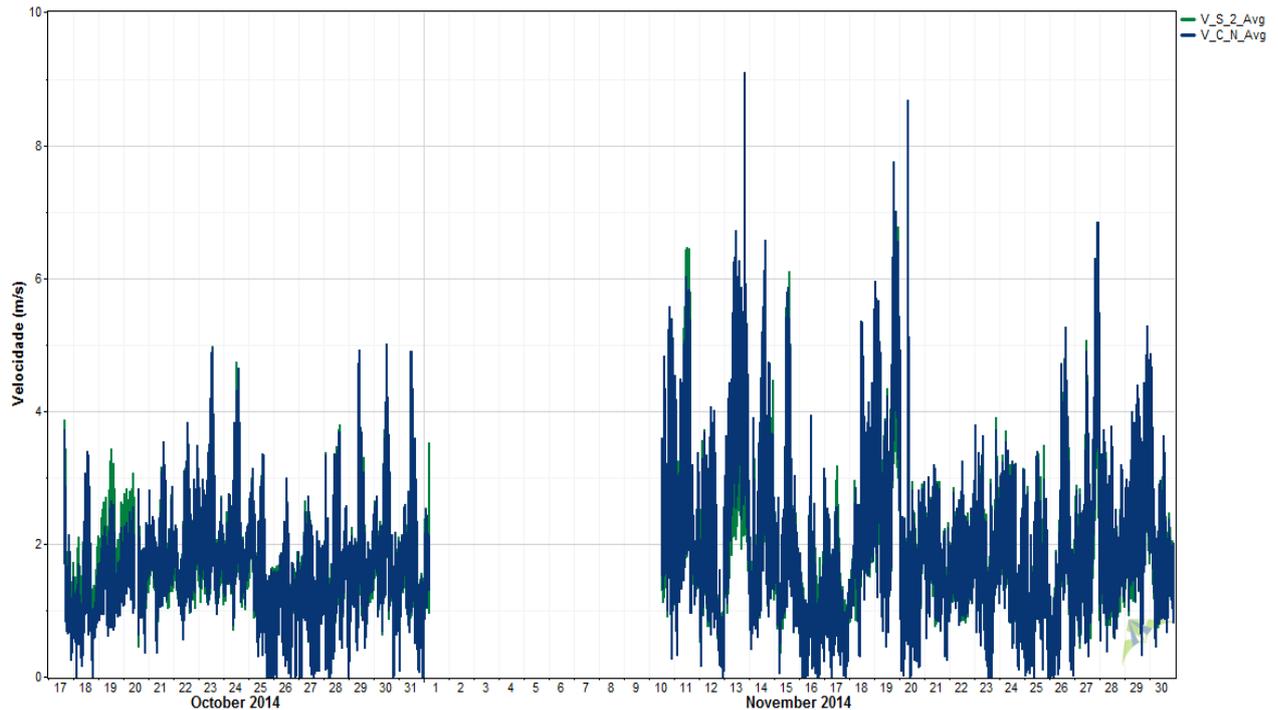


Figura 37: Gráfico de série temporal para os anemómetros de copos novo e ultrassónico dos 6 metros

O anemómetro ultrassónico dos 6 metros está representado no gráfico a verde, enquanto o anemómetro de copos novo está representado a azul.

Embora à primeira vista o gráfico possa parecer a variação da velocidade ao longo do tempo apenas para um dos sensores, no caso do sensor de copos novo, observando melhor reparamos que existem alguns períodos em que é possível ver a cor verde no gráfico. Isto quer dizer que os valores de velocidade dos dois sensores foram tão similares, que praticamente se sobrepuseram um ao outro.

No gráfico também é possível observar que, exceptuando alguns períodos, que nunca são superiores a algumas horas, praticamente todos os valores de velocidade do vento dos dois anemómetros situaram-se no intervalo entre os 0 m/s e os 4 m/s.

Vamos agora analisar o gráfico que mostra o comportamento médio da velocidade ao longo de 24 horas, que é o perfil médio horário, de forma a observar em que períodos de tempo ao longo do dia a velocidade atinge o seu máximo e o seu mínimo. O que se espera é que os gráficos dos dois anemómetros atinjam valores semelhantes de velocidade.

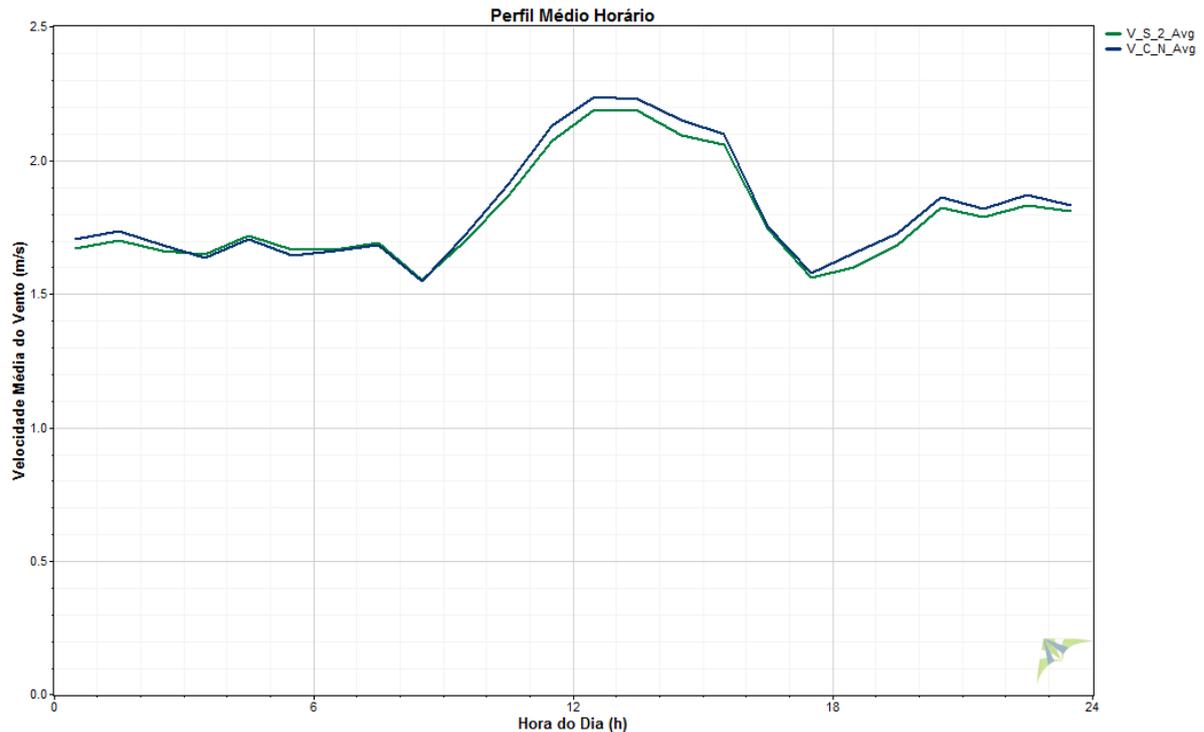


Figura 38: Perfil médio horário para os sensores de copos novo e ultrassónico dos 6 metros

O anemómetro de copos novo está representado pela cor azul e o anemómetro de ultrassónico verde.

Daqui podemos retirar algumas conclusões, tais como:

- Tal como seria previsto, os valores de velocidade dos dois anemómetros são bastante semelhantes, praticamente se sobrepondo um ao outro;
- A velocidade média do vento atinge os seus valores máximos no período entre as 12 h 30 min e as 13h 30 min, com o sensor de copos novo a atingir um valor de cerca de 2,25 m/s e o anemómetro ultrassónico um valor de cerca de 2,2 m/s;
- Em média, a velocidade mais baixa do vento, para os dois sensores, é registada por volta das 8 h 30 min e das 17 h 30 min, com uma velocidade á volta dos 1,55 m/s, No período entre as 0 h e as 8h 30 min, a velocidade dos dois sensores varia entre os 1,55 m/s e os 1,75 m/s, aumentando o seu valor até atingir, no período entre as 12:30 h e as 13:30 o valor máximo de velocidade. A partir daqui, a velocidade irá baixar até às 17 h 30 min, voltando outra vez a aumentar o seu valor até por volta das 20 h 30 min, em que a velocidade média do sensor de copos é de cerca de 1,85 m/s, sendo que a do sensor ultrassónico é próxima dos 1,8 m/s. Daqui até às 24 h, velocidade do vento para os dois anemómetros irá andar à volta desses dois valores, com ligeiras oscilações.

Podemos, tal como já foi feito na comparação entre os outros sensores, observar melhor os valores de velocidade se os metermos numa tabela, mostrando a variação da intensidade do vento de hora em hora, ao longo do dia.

Tabela 8: Valores de velocidade do perfil médio horário dos anemómetros de copos novo e ultrassónico dos 6 metros

Hora do dia (h)	VCN_Avg (m/s)	VS2_Avg (m/s)
00:00 - 01:00	1,70	1,67
01:00 - 02:00	1,74	1,70
02:00 - 03:00	1,68	1,66
03:00 - 04:00	1,63	1,65
04:00 - 05:00	1,70	1,72
05:00 - 06:00	1,64	1,67
06:00 - 07:00	1,66	1,67
07:00 - 08:00	1,68	1,69
08:00 - 09:00	1,55	1,55
09:00 - 10:00	1,72	1,69
10:00 - 11:00	1,91	1,86
11:00 - 12:00	2,13	2,07
12:00 - 13:00	2,24	2,19
13:00 - 14:00	2,23	2,19
14:00 - 15:00	2,15	2,10
15:00 - 16:00	2,10	2,06
16:00 - 17:00	1,75	1,75
17:00 - 18:00	1,58	1,56
18:00 - 19:00	1,65	1,60
19:00 - 20:00	1,73	1,68
20:00 - 21:00	1,86	1,82
21:00 - 22:00	1,82	1,79
22:00 - 23:00	1,87	1,83
23:00 - 24:00	1,83	1,81

Irei agora analisar a distribuição de Weibull para os dois sensores, esperando que estes atinjam frequências de velocidade do vento bastante semelhantes entre si.

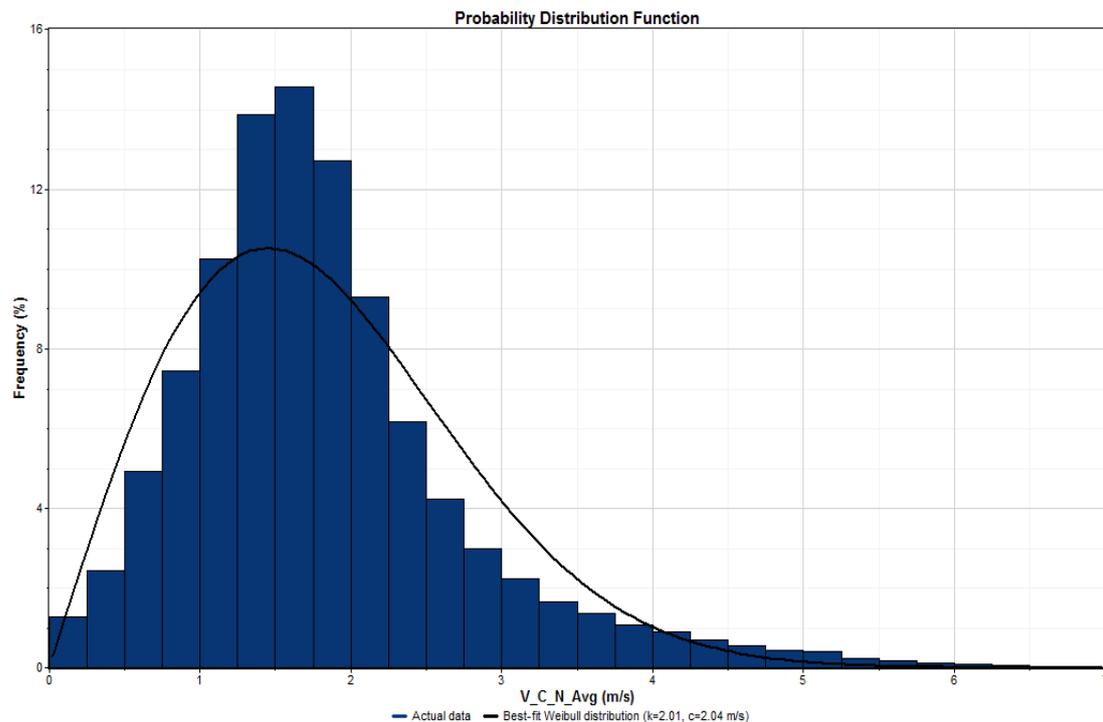


Figura 39: Gráfico de distribuição de Weibull para o sensor de copos novo

O parâmetro de escala c desta distribuição de Weibull tem um valor de 2,04 m/s, sendo que o parâmetro de forma k tem um valor de 2,01.

Observando o gráfico, reparamos que cada classe de velocidades tem um intervalo de 0,25 m/s entre si.

Já foi efectuada uma análise à distribuição de Weibull do sensor de copos novo, na comparação entre os anemómetros de copos novo e velho (Capítulo 4.3.1). Mas como os valores de velocidade nesta comparação entre o sensor de copos e o sensor ultrassónico são bastante inferiores, devido à falha no sensor ultrassónico, é de interesse fazer uma nova análise aos valores da distribuição.

Algumas conclusões que se podem tirar a partir desta distribuição de Weibull:

- As classes de velocidades com maior valor percentual de frequência são aquelas entre os 1,25 m/s e os 2,0 m/s, com valores percentuais acima dos 12 % para cada uma delas. Destas, a classe de velocidades entre os 1,5 m/s e os 1,75 m/s é a única com valores percentuais acima dos 13%, sendo por isso aquela cuja probabilidade de ocorrência é maior.
- As classes de velocidades que têm uma menor probabilidade de ocorrência são aquelas entre os 0 m/s e os 0,5 m/s e todas aquelas acima dos 2,75 m/s, com valores percentuais abaixo dos 3%;

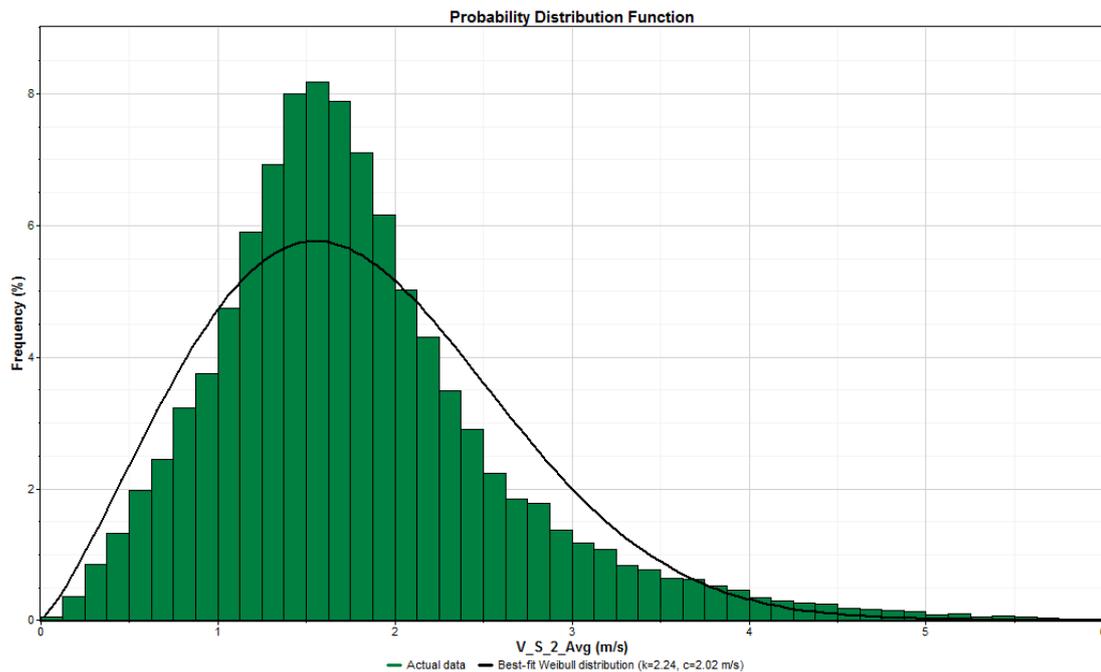


Figura 40: Gráfico da distribuição de Weibull para o sensor ultrassónico dos 6 metros

O parâmetro de escala c desta distribuição de Weibull tem um valor de 2,02 m/s, sendo que o parâmetro de forma k tem um valor de 2,24.

Ao contrário do gráfico da distribuição de Weibull do sensor de copos novo, cada classe de velocidades dista 0,125 m/s entre si.

A análise desta distribuição de Weibull já foi efectuada antes, na comparação entre o sensor ultrassónico dos 10 metros e o sensor ultrassónico dos 6 metros (subcapítulo 4.3.2), não havendo por isso a necessidade de ser feita de novo.



5. Conclusão

Primeiramente gostaria de começar por dizer que esta foi uma experiência bastante enriquecedora do ponto de vista de aprendizagem e da capacidade de conseguir trabalhar autonomamente, tentando recorrer apenas pontualmente à ajuda inestimável do orientador.

Depois dizer que os objectivos propostos para este trabalho foram, na sua grande maioria, cumpridos.

O primeiro, e um dos mais importantes, seria o de fazer a ligação dos dados do antigo sensor de copos presente na Estação Meteorológica da Mitra com os dados do actual sensor de copos instalado na estação. Esse objectivo foi cumprido, sendo que a forma de o concretizar foi explicada neste trabalho, nomeadamente no subcapítulo 4.3.1.

Um dos objectivos também propostos para este trabalho seria o de verificar a correspondência entre os valores de velocidade de um anemómetro ultrassónico com os valores de velocidade de um anemómetro de copos, para um mesmo nível de altitude. O que se concluiu foi que, para o período de tempo em análise, os valores dos dois sensores acabaram por ser bastante similares, com médias de velocidade muito semelhantes e uma correlação entre si bastante forte. Isto significa que, apenas no que toca ao registo dos valores de velocidade, não existe grande diferença entre instalar um sensor ou instalar o outro.

Também na realização deste trabalho, pretendia-se averiguar o quanto influencia a altura na caracterização do recurso eólico de uma região. Para além disso, pretendia-se calcular o valor do comprimento de rugosidade (Z_0) e o valor do expoente da lei de potência (α) para a zona de Mitra no período de tempo em que foram registados os valores. Quanto à altura verificou-se, como se estava à espera, que esta claramente influencia os valores da velocidade do vento, e a prova disso é a diferença nas médias dos valores de velocidade observadas entre o sensor dos 10 metros e o sensor dos 6 metros. No que toca ao cálculo do valor de Z_0 e do valor de α verificou-se que estes não correspondiam ao valor esperado, tendo valores bastante acima do que seria expectável. Uma das causas que pode estar na origem deste problema pode ter sido uma possível má calibração dos sensores da estação. A outra seria uma medição das alturas a que estão os sensores possivelmente mal efectuada. Deixo aqui uma nota ao Centro de Geofísica de Évora de que seria de interesse verificar novamente as alturas dos sensores instalados na Estação Meteorológica da Mitra, de forma a averiguar se estão correctamente medidas ou não.

Por último, acrescentar que para uma melhor avaliação do recurso eólico de uma determinada região, um tempo de análise amplo é o mais aconselhável. Isto advém do facto, mais ou menos óbvio, de que quantos mais dados se obtém acerca de determinado assunto, mais certezas se tem sobre o mesmo. Estando eu limitado apenas aos meses de Outubro e Novembro, qualquer conclusão que se possa retirar deste trabalho terá de ter em conta esse período de tempo



6. Referências

Manwell, McGowan e Rogers; *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*; 2002

Tresher et al (1999); An international journal for progress and applications in wind power conversion technology; *Wind Energy*, Volume 2, Número 1, págs. 59-75

Ribeiro, Luís Manuel Frolen; *Utilização da anemometria sónica no estudo de escoamentos atmosféricos*; 1998

Koyama, Marcela Hitomi; *Desenvolvimento de um Anemómetro 3D Ultrassónico baseado em Apenas Quatro Transdutores*; 2009

Camelo et al, *Métodos de Extrapolação de Velocidade do Vento para Regiões Litorâneas do Nordeste Brasileiro*; 2010

Salvador, Pedro Costa; *Influência do perfil vertical de velocidades no funcionamento de um aerogerador*; 2012

(Online)

http://www.portalenergia.com/downloads/aulas/Aula04_Energia%20Produzida.pdf

<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce5702/Anemometro.pdf>



7. Anexos

Especificações do anemómetro de copos A100R

Velocidade de arranque: 0.20 m/s

Velocidade de corte: >75 m/s

Precisão: 1% ($\pm 0,1$ m/s) entre 10 m/s e 55 m/s; 2% ($\pm 0,2$ m/s) acima de 55m/s

Distância constante: 2.3 m \pm 10%

Calibração: 0,80 rotações do rotor por metro, 1 contacto por cada rotação do rotor

Variação de Temperatura: -30 ° C até + 70 ° C

Rotor: 150 mm de diâmetro

Peso: 350g, incluindo o peso do cabo

Tempo de vida: 25 x 10⁹ operações no mínimo, equivalente a pelo menos 20 anos de tempo de vida útil

Ciclo de trabalho: 50% \pm 5% até 50 m/s

Tensão recomendada: 1 V a 5 V

Tensão máxima: 75 V (DC)

Potência máxima: 28 W

Corrente recomendada: <1 mA

Corrente máxima: 40 mA

Impedância: Resistência de 120 ohm em série com o interruptor, mais 10 nF do condensador através da linha de corrente, para a supressão de interferências

Resistência de contacto: 0,05 ohm

Tempo de actuação: 1,5 m/s

Dimensões: Ver figura 2

Tamanho padrão do cabo: 3 m, sendo que por encomenda o tamanho do cabo pode chegar até ao máximo de 115

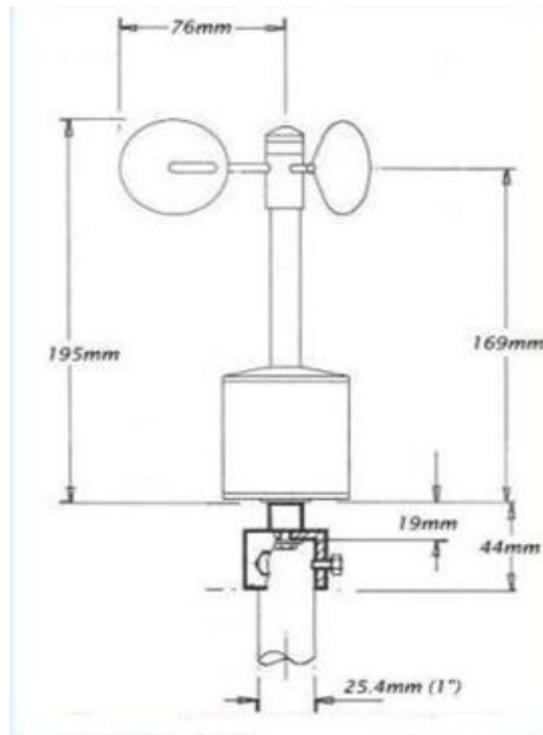


Figura 41: Dimensões do anemómetro de copos A100R

Especificações do anemómetro ultrassónico Gill WindSonic

Velocidade do vento

- Alcance: 0 – 60 m/s
- Precisão: $\pm 2\%$ (aos 12 m/s)
- Resolução: 0.01 m/s

Direcção do vento

- Alcance: 0 – 359⁰
- Precisão: $\pm 3^0$ (aos 12 m/s)
- Resolução: 1⁰

Formatos de saída analógica:

Impedância analógica de saída: 1 k Ω

Resistência de carga entre as saídas analógicas e o sinal de Terra (ponto de referência = 0 V): ≤ 300 ohms, incluindo a resistência do cabo



Formatos de saída digital:

Contínuo ou alternado (saída a pedido pelo *host system*⁵)

Polar (velocidade e direção) ou UV (2 eixos)

Parâmetros ambientais

Temperatura:

- Operacional: -35°C até $+70^{\circ}\text{C}$
- De armazenamento: -40°C até $+80^{\circ}\text{C}$

Humidade:

- Operacional: $<5\%$ até 100%

Requisitos de alimentação

5-30 V DC

O menor consumo de energia possível é obtido através das seguintes características de tensão e corrente: aproximadamente 5.5mA a 12v.

Parâmetros mecânicos

Tamanho: 42 mm de diâmetro x 160 mm

Peso: 0,5 Kg

Montagem: montagem em tubo de 1,75 polegadas (44,45 mm) de diâmetro

Tipo de material: Externo - acrilato acrilonitrila, de policarbonato

*Host system*⁵ - Qualquer computador em rede que forneça serviços a outros sistemas ou serviços de utilizadores. Estes podem incluir, embora não estando apenas limitados a tal, uma impressora, web ou banco de dados.



Actividades práticas

Foram realizadas também algumas actividades práticas, fora do contexto laboratorial, ao longo do estágio, tais como:

- Ida à barragem do Alqueva, ajudando o Centro de Geofísica de Évora na desmontagem das estações instaladas referentes ao projecto ALEX. O objectivo principal com esta ida seria o de obter o anemómetro ultrassónico que estava instalado numa dessas estações.
- Ajuda na instalação, montagem e calibração dos sensores usados no decorrer deste trabalho na Estação Meteorológica da Mitra;
- Ajuda na manutenção dos sensores usados no decorrer deste trabalho na Estação Meteorológica da Mitra.