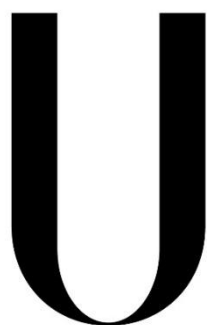


**FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA**  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

## **Validação do Atlas do Potencial Eólico de Portugal**

André Riscado Cristóvão

João Nuno Bergano Fonseca

Orientadora: Professora Doutora Ana Estanqueiro

Responsável pela unidade curricular: Professor Doutor João Serra

**Projeto de Licenciatura em Engenharia da Energia e do Ambiente**

**Maió – Novembro de 2013**

## **Abstract**

The main objective of this project consists in creating a database with the available information from meteorological stations in order to perform the Portugal Wind Atlas validation. The database was developed using *MATLAB* scripts with the available data (pressure, temperature and wind speed and direction) from free database websites. To conclude and interpret the results, a study focused on the wind resource assessment and energy production estimates was performed for two previously validated regions using the *WAsP* and *OpenWind* software. The results obtained demonstrated a poor quality of the wind data from meteorological stations for wind resource assessment intends.

## **Resumo**

O objetivo deste projeto consiste na elaboração de uma base de dados com informação proveniente de estações meteorológicas para utilização na validação do Atlas do Potencial Eólico de Portugal. A base de dados foi desenvolvida recorrendo à criação de *scripts MATLAB* com recurso aos dados de temperatura, pressão, intensidade e direcção do vento disponíveis em bases de dados na internet. Para interpretação e caracterização do resultado foi realizado um estudo focado na avaliação do potencial eólico e estimativas de produção energética, para duas regiões já anteriormente validadas com recurso aos *softwares WAsP* e *OpenWind*. Os resultados obtidos demonstram que os dados provenientes de estações meteorológicas não são adequados para estudos de avaliação de potencial.

## Índice

1.	Introdução .....	1
2.	Base de dados .....	2
2.1.	Pesquisa das bases de dados já existentes .....	2
2.2.	Tratamento dos dados e criação da base de dados .....	4
3.	Atlas do potencial eólico de Portugal.....	6
4.	Validação do atlas do potencial eólico de Portugal.....	7
4.1.	Análise da disponibilidade .....	7
4.2.	Validação estatística.....	8
4.2.1.	<i>Onshore</i> .....	10
4.2.2.	<i>Offshore</i> .....	11
4.3.	Discussão.....	12
5.	Avaliação do potencial eólico nas estações 72 e 83 .....	13
5.1.	Caracterização do vento .....	13
5.1.1.	Distribuição de Weibull .....	13
5.1.2.	Rosa de Ventos.....	13
5.1.3.	Fluxo de Potência do Vento .....	13
5.1.4.	Rosa de Potências.....	14
5.1.5.	Número de horas equivalentes à potência nominal (NEPs) .....	14
5.1.6.	Extrapolação Vertical.....	14
5.2.	Avaliação do potencial eólico da estação 72.....	15
5.2.1.	Caracterização geográfica e rugosidade local .....	15
5.2.2.	Parâmetros estatísticos do escoamento na estação 72 .....	15
5.2.3.	Mapeamento local do recurso eólico.....	16
5.3.	Avaliação do potencial eólico da estação 83.....	18
5.3.1.	Caracterização geográfica e rugosidade local .....	18
5.3.2.	Parâmetros estatísticos do escoamento na estação 83 .....	18
5.3.3.	Mapeamento local do recurso eólico.....	20
5.4.	Discussão.....	21
6.	Estimativas de produção de energia eólica.....	22
6.1.	Estimativas de produção da estação 72 .....	22
6.2.	Estimativas de produção da estação 83 .....	24
6.3.	Síntese dos resultados.....	25
7.	Conclusões .....	26
8.	Referências .....	27
9.	Anexos.....	28

## **Agradecimentos**

Agradecemos à Professora Doutora Ana Estanqueiro, do LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, pelo estágio que nos facultou de modo a desenvolvermos este projeto que nos permitiu adquirir novas e importantes competências tanto a nível profissional como pessoal. Agradecemos também aos bolseiros de investigação Raquel Marujo e António Couto, pela paciência, dedicação, disponibilidade, e conhecimentos transmitidos ao longo destes meses de elaboração do trabalho.

Não podemos deixar de agradecer também aos nossos colegas que também estão a desenvolver trabalhos no LNEG, pelos momentos de descontração e lazer durante a hora de almoço, e sobretudo pelo companheirismo demonstrado.

### 1. Introdução

Há um século atrás, a população mundial era de 1.75 biliões - cerca de um quarto da atual. Nessa altura, as fontes de energia eram limitadas e o próprio consumo global era extremamente reduzido face ao que é hoje. Nesse sentido, devido ao contínuo aumento da população (prevê-se que em 2040 seja cerca de 9 biliões) e à influência das economias emergentes, estima-se que a procura de energia continue a aumentar de forma bastante expressiva [1]. Este facto gera uma grande preocupação a nível global, no que toca à gestão dos recursos usados para a produção de eletricidade, que na sua maioria são de origem fóssil com graves impactos a nível ambiental. Assim, torna-se imperativo garantir as necessidades energéticas da sociedade de uma forma sustentável, através de um portfólio energético com menor dependência de combustíveis fósseis e maior aproveitamento de energia renovável.

Durante as últimas décadas assistiu-se em Portugal a um forte crescimento do investimento na área das energias renováveis. Em 2012, Portugal atingiu cerca de 10.8GW de potência instalada renovável, com cerca de 19.9TWh de produção de eletricidade a partir destas centrais, sendo o terceiro país da União Europeia com maior taxa de penetração de energias renováveis.

Uma das fontes de energia renovável mais expressiva em Portugal é a energia eólica, com um forte crescimento desde 2004. O sector eólico totalizou cerca de 4.45GW de potência instalada no final de 2012 distribuída por 223 parques com 2408 aerogeradores. Ainda neste ano, a produção dos parques com potência instalada estabilizada, situou-se nas 2313 horas equivalentes por MW [2]. Devido ao acentuado investimento e à procura de novos locais energeticamente favoráveis tornou-se necessário o desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação do potencial energético do vento para as diversas regiões do país, de forma a apoiar a implementação e desenvolvimento de projetos eólicos. Em 2004, o LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia - desenvolveu o primeiro Atlas do Potencial Eólico de Portugal, disponibilizando mapas do recurso eólico do país a potenciais investidores.

O presente trabalho foi desenvolvido no LNEG, no âmbito da disciplina de Projeto de Licenciatura em Engenharia da Energia e do Ambiente, e tem como objetivo a criação de uma base de dados para validação de um atlas de longo termo (período de 1992 a 2012), a partir de registos de estações meteorológicas *onshore* e *offshore*, diferentes das estações anemométricas do LNEG já usadas anteriormente para validação. Os registos das estações meteorológicas foram obtidos através de uma pesquisa cuidada de bases de dados gratuitas com variáveis de interesse, e desenvolvendo-se posteriormente algoritmos para tratamento de dados de uma forma intensiva, permitindo assim organizar a informação ponto a ponto (i.e., estação a estação). Depois de selecionadas as estações mais representativas, foi validado pontualmente o atlas, através de parâmetros estatísticos. Com base nos resultados foram selecionadas duas áreas para a avaliação do recurso eólico e respetivas estimativas de produção energética de um parque eólico para um *layout* com 5 turbinas. A metodologia aplicada, permite compreender a qualidade dos registos das estações meteorológicas utilizados para posterior validação e correção da ferramenta em questão. Estes princípios podem ajudar a perceber também quais as limitações do atlas, sendo uma vantagem para futuros trabalhos de otimização desta ferramenta.

## 2. Base de dados

### 2.1. Pesquisa das bases de dados já existentes

Uma vez que o projeto tem como objetivo a validação do Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental, foi de extrema importância fazer uma pesquisa criteriosa de bases de dados em função das necessidades de informação que este projeto implicava. Do vasto lote de escolhas a que se pode ter acesso de uma forma gratuita foram analisados alguns *sites*, de modo a efetuar-se uma pesquisa antes de ser tomada qualquer decisão com vista às bases de dados que seriam escolhidas para extrair os dados.

Numa primeira análise exploratória focada essencialmente no *site* <http://rda.ucar.edu/>, que é um arquivo de pesquisa elaborada na área da Atmosfera e Geociências, verificou-se a existência de 2 bases de dados (BD) - 336.0 e a 461.0 - que disponibilizavam as variáveis meteorológicas de interesse para o corrente projeto. Na BD 336.0, após alguma pesquisa e exploração da mesma, concluiu-se que os ficheiros eram do tipo *netcdf* (binário), o que dificultava bastante a leitura dos mesmos, sendo necessário utilizar-se um código complexo de forma a trabalhar os ficheiros em questão. Ainda assim, o formato dos ficheiros referidos anteriormente não foi a principal causa para esta base de dados ter sido posta de parte, mas sim o facto de apresentar nas variáveis que eram indispensáveis à realização do estudo proposto, uma frequência de amostragem com pior resolução face a BD 461.0, e também com bastante menos homogeneidade nos seus valores para a mesma estação meteorológica, como se apresenta nas Figura 1 e 2.

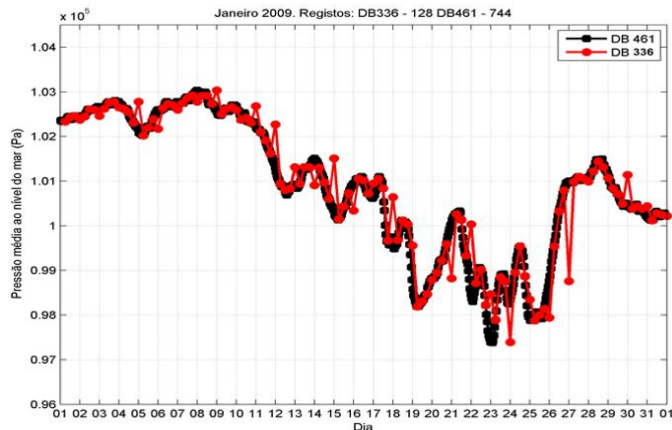


Figura 1 - Pressão média ao nível do mar em ambas as bases de dados, 461.0 e 366.0, em Janeiro de 2009.

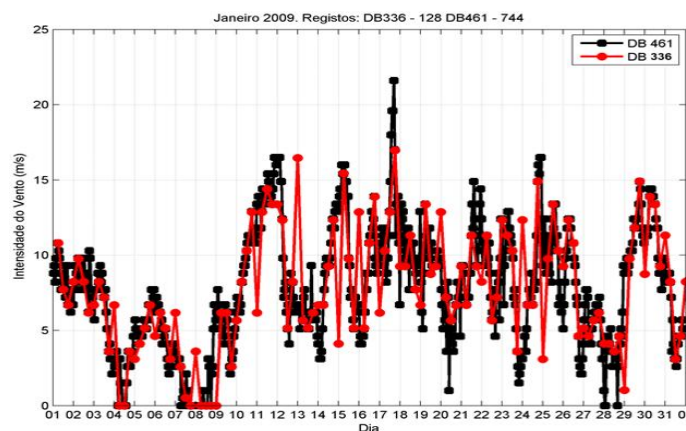


Figura 2 - Intensidade média do vento em ambas as bases de dados, 461.0 e 366.0, em Janeiro de 2009.

Assim, optou-se pela utilização da BD 461.0, uma vez que: 1) contém os ficheiros no formato *ascii*, facilitando a leitura e o tratamento dos dados; 2) apresentava uma maior resolução temporal (12 anos, desde 2000 a 2012) e com uma maior taxa de amostragem,

sendo determinante na validação de um Atlas; 3) continuidade da BD, uma vez que esta encontra-se diariamente a assimilar informação das observações, podendo no futuro implementar-se um sistema automático de obtenção e tratamento dos dados; e 4) reunia as variáveis imprescindíveis para a realização do plano de trabalho: temperatura média do ar, a pressão ao nível médio do mar, a direção e velocidade do vento.

As variáveis em análise neste projeto são as que têm maior influência num estudo de potencial eólico, e são também as mais homogêneas quer no modelo a validar, quer nas observações. Para o presente trabalho a velocidade e a direção do vento assumem um papel mais significativo nas análises elaboradas ao longo do projeto. No entanto, o recurso a variáveis meteorológicas como a pressão do ar e a temperatura permite calcular a densidade do ar, que tem impacto na geração de energia por parte de turbinas eólicas num dado local, devido à sua dependência linear. De referir ainda que, através da temperatura e pressão, nomeadamente devido aos gradientes das mesmas, geram-se as movimentações de massas de ar que consequentemente geram vento, explicando desta forma a importância de ambas as variáveis para os processos em estudo. Devido à participação do LNEG em projetos nacionais e internacionais, a criação de uma base de dados que contém informação sobre as variáveis meteorológicas em análise é de extrema importância, permitindo compreender melhor a variabilidade da produção eólica (uma vez que, é reconhecido pela aproximação geostrófica que o gradiente de pressão é o principal forçador do vento à superfície nas latitudes médias).

Uma vez tomada a decisão da utilização da BD 461.0 procedeu-se à extração da informação das 4 variáveis anteriormente mencionadas. O conteúdo de cada ficheiro era composto por:

- REC TYPE: tipo de medição. Para as estações *onshore* a referência é ADPSFC e no caso das estações *offshore* é SFCSHP;
- OBS TYPE: tipo de observações. No caso *onshore* foram detetados 2 tipos: SYNOP e METAR. No primeiro caso as medições eram efetuadas em horários padronizados internacionalmente de modo a que as observações fossem efetuadas ao mesmo tempo, independentemente da localização geográfica da estação. Nas estações METAR, as observações eram realizadas em estações meteorológicas situadas em aeroportos e aeródromos. Para as estações *offshore* foram detetados 3 tipos de observações: SHIPS, MBUOY e DBUOY. Nas observações SHIPS, as medições que os ficheiros continham eram provenientes de navios, que ao longo do seu percurso iam fazendo medições das condições atmosféricas. As observações MBUOY eram obtidas a partir de bóias fixas, ancoradas, enquanto as DBUOY tinham origem em bóias à deriva, o que poderia significar naturalmente constantes alterações na sua localização, sendo necessário aplicar um filtro quando as suas movimentações eram significativas. No anexo A.1, pode verificar-se um exemplo da disposição típica da informação nos ficheiros iniciais.
- REPORT TIME: tempo de observação no formato YYYYMMDDhhmm;
- STATION: identificação da estação que realizou o registo. De referir, que esta identificação corresponde à designação utilizada pela organização meteorológica mundial;
- LATITUDE: em coordenadas polares;
- LONGITUDE: em coordenadas polares;
- ELEVATION: elevação da estação em relação ao nível médio do mar, em metros;
- PSL: pressão média ao nível médio do mar, em mbar;
- TMDB: temperatura média do ar, em K;
- WDIR: direção do vento (°);
- WSPD: velocidade do vento (m/s).

### 2.2. Tratamento dos dados e criação da base de dados

Uma vez extraídos todos os ficheiros com informação relevante para o estudo, procedeu-se ao tratamento dos dados com recurso à linguagem *MATLAB*, uma vez que permite alguma flexibilidade em termos de operações e porque é uma linguagem de programação bastante comum a este tipo de trabalhos.

Após a análise da informação contida nos ficheiros e a forma como esta estava organizada, realizou-se de uma forma automática a listagem por ordem cronológica de todos os ficheiros disponíveis na base de dados para estações *onshore* e *offshore*.

Dada a natureza dos ficheiros iniciais (em formato – *ascii*) com informação tanto em caracteres como do tipo numérico, todo o conteúdo teve de ser lido linha a linha, separado coluna a coluna, e guardado em vetores do tipo *cell*, uma vez que é o único formato de criação de matrizes em *MATLAB* que permite a agregação de diferentes formatos. Uma vez agrupadas todas as observações para todas as estações ao longo do período de 12 anos, procedeu-se à aplicação de filtros (eliminando *flags*<sup>1</sup> e valores anómalos nas observações) às variáveis de interesse - temperatura, pressão ao nível do mar (PSL), velocidade e direção do vento – para a realização do controlo de qualidade dos dados. Os filtros aplicados podem ser consultados no fluxograma representativo desta fase do projeto, Figura 3. É de realçar, que as variáveis em análise foram tratadas separadamente, i.e., em programas diferentes para não se perder demasiada informação, gerando separadamente ficheiros para a PSL, para a temperatura e para a direção e velocidade do vento.

Nas observações *offshore*, houve um cuidado especial quanto à movimentação das plataformas de registo – navios (SHIPS), bóias ancoradas (MBUOY) e bóias à deriva (DBUOY). No caso dos navios e das bóias à deriva, foi realizado um filtro para eliminar todas as plataformas que percorressem uma determinada distância, isto porque: 1) não se conseguiria referenciar geograficamente as estações com registos geográficos tão distantes, pois pontualmente seria pouco representativo e iria aumentar significativamente o número de *outputs*; e 2) pretendia-se uma validação pontual, e neste caso seria necessário tratar esta informação de um modo bastante diferente porque implicava a criação de um programa que fizesse a identificação geográfica para cada observação do ponto de grelha do Atlas mais próximo. Assumindo que os campos são mais homogéneos em ambiente *offshore* e como a resolução da grelha do modelo é de 5km, optou-se por escolher uma distância máxima de deriva de 12km, eliminando todos os registos com distâncias superiores a este limite. No entanto, os programas desenvolvidos permitem de uma forma prática alterar este valor, para o valor desejável em futuros casos de estudo.

Outra questão bastante importante no tratamento dos dados foi o tempo de amostragem das observações. Nos ficheiros iniciais, consoante a estação, o tempo de amostragem era diferente (6 min, 30 min, 1h, 3h, etc...) e pretendia-se obter nos ficheiros finais observações sincronizadas temporalmente, com disponibilidade de 3 em 3h (base de tempo das simulações dos dados do modelo). Nesse sentido, uniformizou-se o tempo de amostragem para todas as estações de 3h em 3h<sup>2</sup>, considerando a média dos registos em cada intervalo de tempo e escrevendo *flags*<sup>3</sup> nos casos em que não existiam registos.

Após este processo foram obtidos os ficheiros finais (em formato *.mat*) com o seguinte tipo de informação: tipo de registo, tipo de observação, tempo<sup>4</sup>, latitude, longitude, elevação, velocidade e direção do vento (ou PSL, ou temperatura consoante a variável em análise).

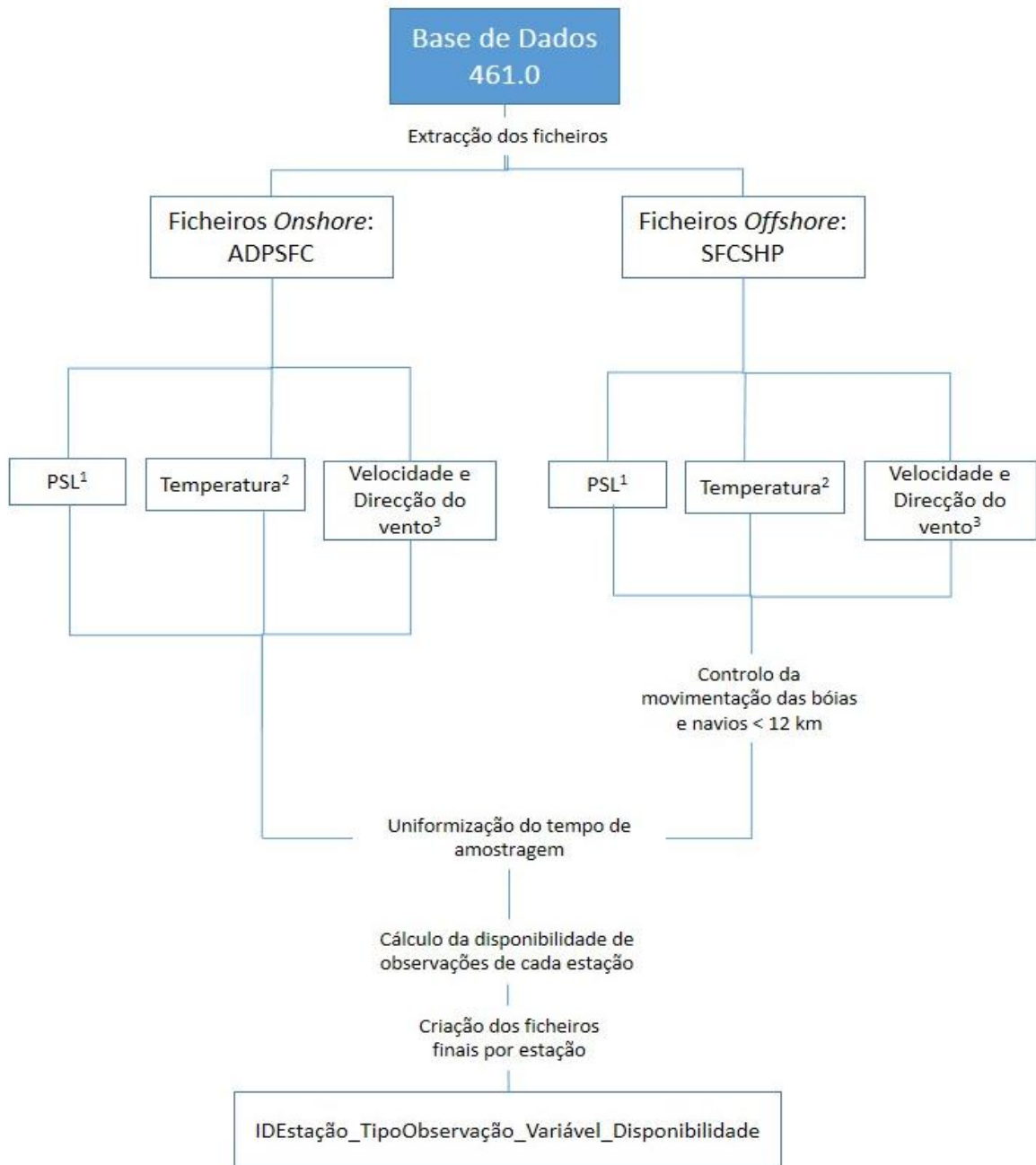
<sup>1</sup> Os *flags* dos ficheiros iniciais tinham o valor de -9999.90 e indicam o instante em que houve uma falha na medição ou no registo da variável.

<sup>2</sup> Também foram criados ficheiros com disponibilidades de 30m e 1h para trabalhos futuros a realizar pelo LNEG.

<sup>3</sup> No caso dos *outputs* os *flags* foram de -50.

<sup>4</sup> O tempo que se registou nos ficheiros corresponde ao tempo do *MATLAB* e não à data e hora comuns, pois facilita o método de programação na análise dos ficheiros.

Cada ficheiro foi guardado com a seguinte designação genérica: **IDEstação\_TipoObservação\_Variável\_Disponibilidade**. Um exemplo de um ficheiro da base de dados pode ser visualizado no anexo A.2. Por fim, procedeu-se à criação de um ficheiro (em formato *.mat*) com indicação da disponibilidade das observações por estação, i.e., a percentagem em que a estação tem observações de 3h em 3h no período de 12 anos. Este passo permite identificar as estações que têm menos falhas ao longo de todo o período de forma a fazermos uma validação pontual estatisticamente significativa do atlas.



<sup>1</sup> O filtro aplicado à pressão foi entre [90000 mbar; 104500 mbar]

<sup>2</sup> O filtro aplicado à temperatura foi entre [218 K; 353 K]

<sup>3</sup> O filtro aplicado à direcção do vento foi entre [0°; 360°]

O filtro aplicado à velocidade do vento foi entre [0,1 m/s; 35 m/s]

Figura 3 - Fluxograma da metodologia aplicada no tratamento dos dados.

### 3. Atlas do potencial eólico de Portugal

Em locais onde não existe uma rede extensa de estações anemométricas é comumente aceite na energia eólica, a realização de atlas de vento recorrendo a modelos numéricos de previsão atmosférica, vulgarmente denominados por modelos de mesoscala. A importância do atlas do potencial eólico prende-se com o facto de ser uma ferramenta bastante útil para a avaliação prévia do potencial do vento. No caso de parques eólicos, pode ser realizado um estudo de avaliação do recurso eólico numa determinada zona antes de se iniciar a campanha, o que representa uma mais-valia no apoio à decisão de futuros investimentos em aproveitamentos de energia eólica. Dada a crescente necessidade da correta caracterização do vento e da sua variabilidade no território português, em projetos de energia eólica, foi realizado no LNEG um atlas do potencial eólico para a região Euro-Atlântica.

A construção deste atlas tem como base o modelo numérico de mesoscala - MM5 (*Fifth-generation Mesoscale Model*), desenvolvido pelo PSU/NCAR – “Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research, EUA”, que se enquadra num dos modelos mais avançados e recorrentes na modelação do escoamento atmosférico. Este modelo recorre às características orográficas da área em questão e a dados históricos [3] para resolver as equações de *Navier-Stokes*, que permite descrever fenómenos atmosféricos e.g., evolução das massas de ar, estratificação da atmosfera e turbulência. Uma vez que se pretende analisar a componente climatológica da intensidade e direção do vento com significado estatístico, foi desenvolvido um atlas para o período compreendido entre 1992 e 2012, de acordo com a metodologia aplicada em [4] e já validado com as estações anemométricas disponíveis na base de dados do LNEG.

A configuração do modelo foi definida para processar mapas e séries das grandezas representativas do potencial eólico para uma dada região, com uma resolução espacial de 3km, uma resolução temporal de 3h, e ainda para três alturas de referência em energia eólica: 10, 60 e 80m. É de realçar, que no trabalho desenvolvido, apenas se teve em conta os mapas da intensidade do vento aos 10 e 80m de altura. Os mapas processados para os 10m de altura foram utilizados para a validação do atlas com as observações recolhidas, e os mapas aos 80m apenas para a avaliação do potencial eólico e respetivas estimativas de produção.

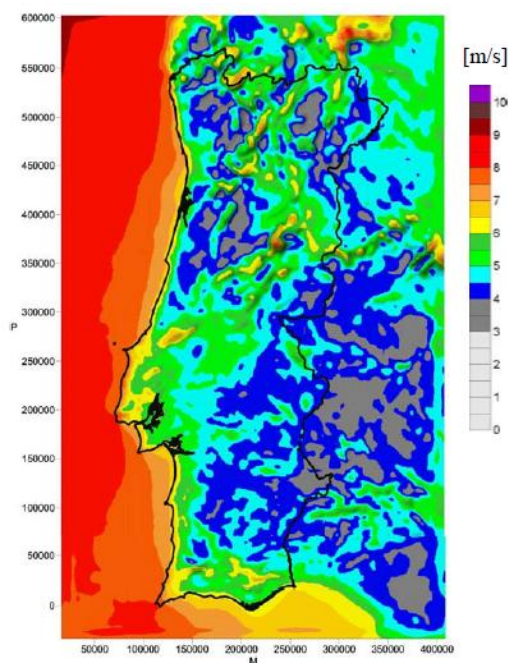


Figura 4 – Mapa médio da intensidade do vento aos 80m de altura, referente ao atlas do potencial eólico de Portugal de 1999 [4].

## 4. Validação do atlas do potencial eólico de Portugal

### 4.1. Análise da disponibilidade

Uma vez criada a base de dados pretendida, após a longa sequência de cuidadas análises e processamento dos dados, procedeu-se à validação do atlas do potencial eólico de Portugal.

Os ficheiros finais das estações meteorológicas foram criados com a resolução temporal do Atlas - 3h - de forma a se conseguir uma comparação o mais fiel e precisa possível. Na figura 5, apresenta-se a localização e a disponibilidade das observações das estações *onshore*.

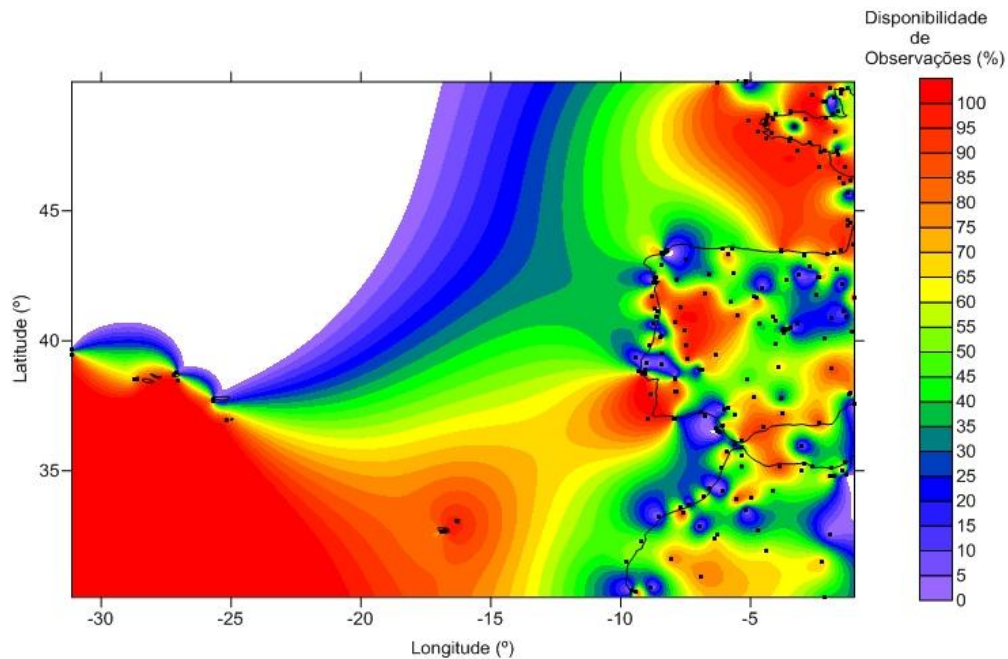


Figura 5 - Mapeamento da disponibilidade de observações das estações *onshore* da base de dados criada.

Sendo o principal objetivo do projeto fazer uma validação do atlas para 20 anos, tornou-se essencial fazer uma restrição às estações a utilizar nesta etapa do trabalho. A validação para um período temporal tão grande necessita de estações, que ao longo desse mesmo período, consigam ter uma frequência de amostragem suficientemente grande para serem consideradas estatisticamente representativas. Nesse sentido, recorrendo ao *software SURFER*, foi elaborado o mapeamento da disponibilidade de observações *onshore*, como consta na figura 5. Nesta figura, podemos ver que ainda existe um número significativo de estações com disponibilidades elevadas.

Deste modo, foi aplicado um filtro à base de dados, usando apenas para a validação as estações *onshore* e *offshore* com disponibilidade superior a 60% (figura 6).

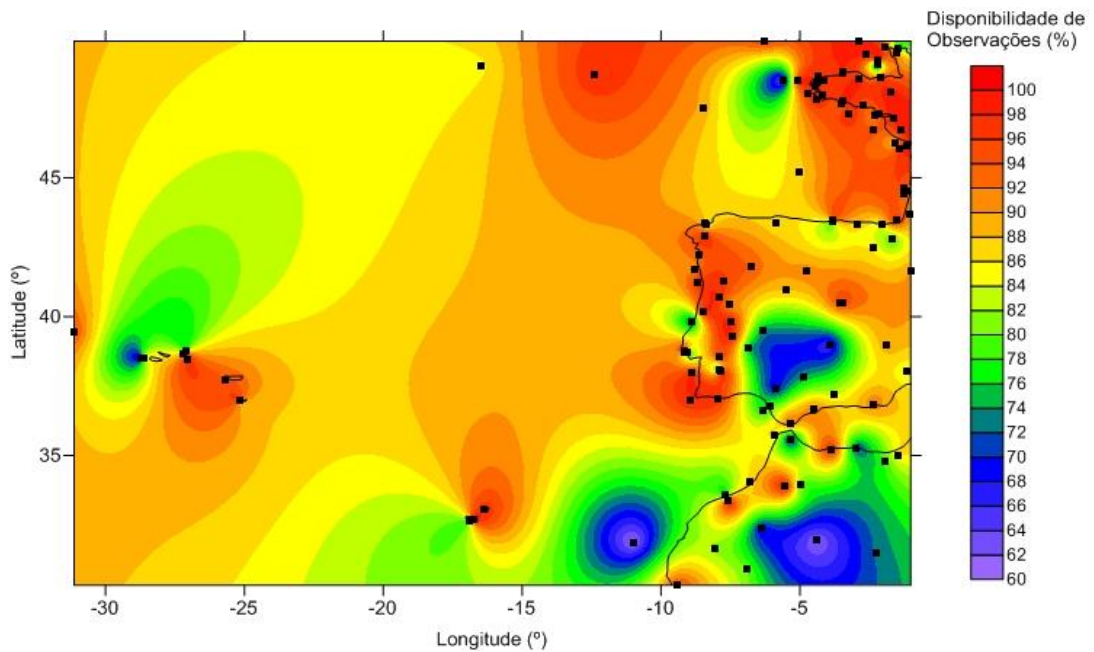


Figura 6 - Mapeamento da disponibilidade de observações das estações *onshore* e *offshore* com disponibilidades acima de 60%.

Na figura 7 apresenta-se o mapeamento da intensidade média do vento para as estações com disponibilidade de dados superior a 60%.

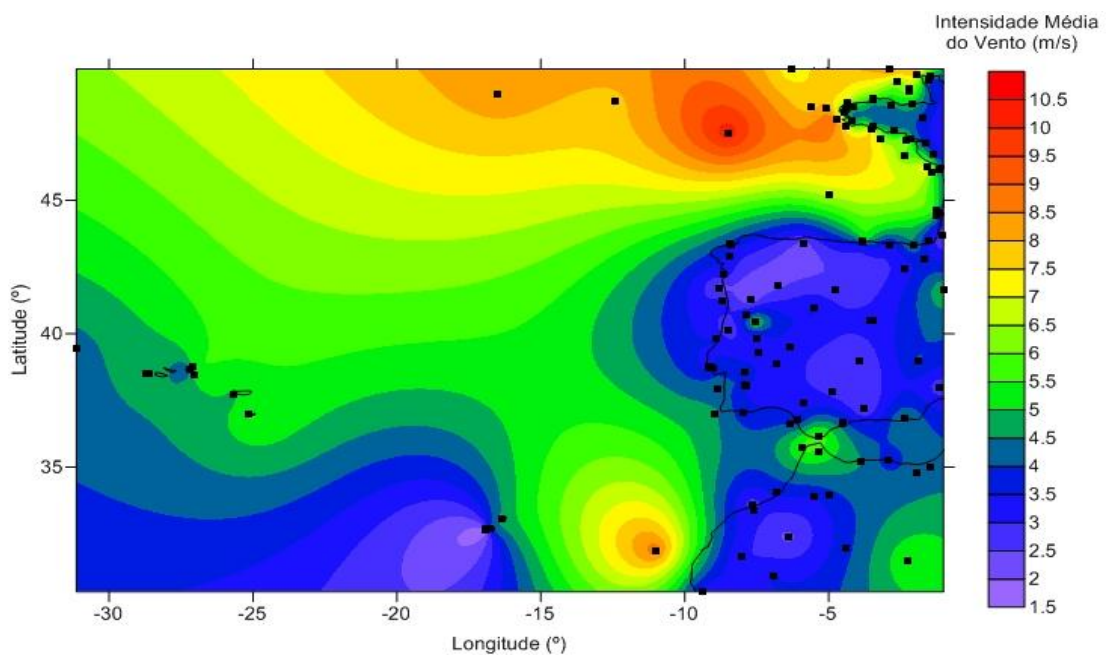


Figura 7 - Mapeamento da intensidade média do vento medida pelas estações *onshore* e *offshore*, cujas disponibilidades de observações eram superiores a 60%.

## 4.2. Validação estatística

Considerando apenas os dados das estações com disponibilidade superior a 60% procedeu-se ao cálculo do parâmetro estatístico viés (equação 1) que permite avaliar as diferenças entre os valores que podemos obter através do modelo do atlas e as medições efetuadas pelas estações selecionadas.

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Atlas,i} - U_{estações,i} \quad (1)$$

O resultado da diferença entre os valores do atlas e das medições das estações, permitiu averiguar, recorrendo novamente a mapeamentos, os locais onde o atlas subestima ou sobrestima a intensidade do vento. A aplicação do viés foi feita para três domínios de simulação, D2, D3 e D4, em que cada um abrange uma determinada área e possui uma determinada resolução espacial. O domínio D2 abrange a maior área dos três e tem uma resolução espacial de 45km, sendo dessa forma o domínio escolhido para os estudos da informação *offshore*. O domínio D4 com uma resolução espacial de 5km, encontra-se mais centrado sobre Portugal Continental, sendo por isso o mais representativo para os estudos de informação unicamente *onshore*. O domínio D3 com resolução de 15km, apresentava uma área intermédia entre os dois anteriormente especificados, e permitiu avaliar o atlas maioritariamente em *onshore*, mas com uma fração de *offshore* também presente. A análise dos resultados do viés para os diferentes domínios (figuras 8 a 10) permitem avaliar o impacto da resolução espacial nos desvios da velocidade do vento.

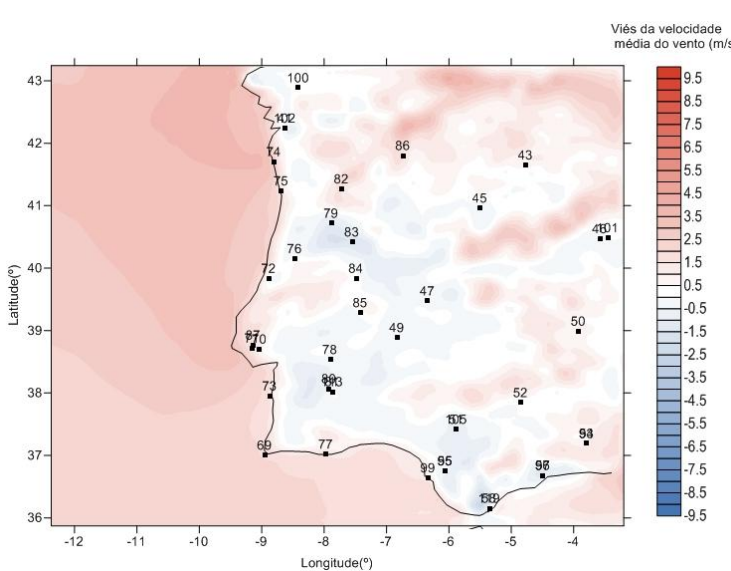


Figura 8 - Viés entre a intensidade do vento registada pelo atlas e a registada pela base de dados, a nível *onshore*. Domínio D3.

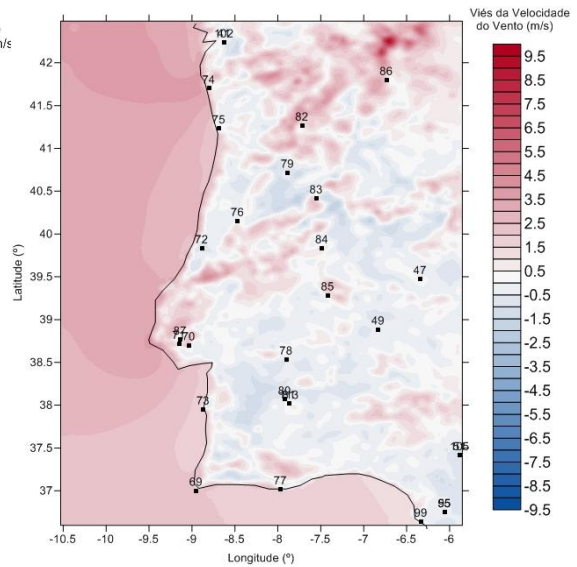


Figura 9 - Viés entre a intensidade do vento registada pelo atlas e a registada pela base de dados, a nível *onshore*.

Domínio D4.

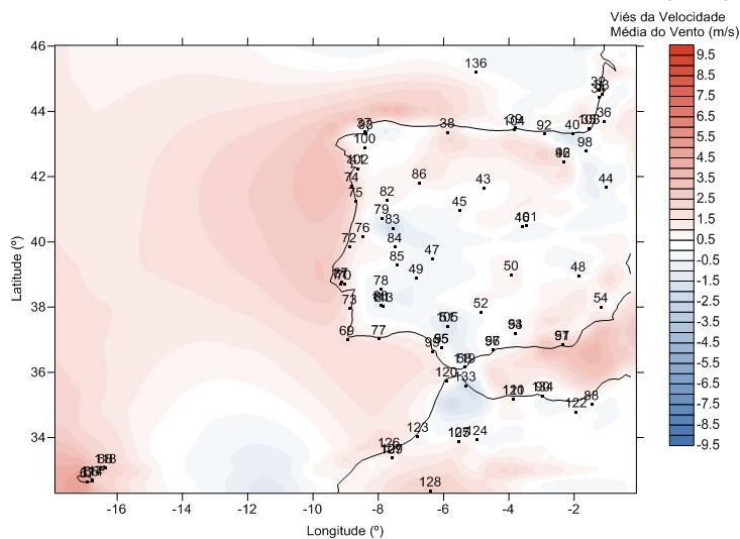


Figura 10 - Viés entre a intensidade do vento registada pelo Atlas e a registada pela base de dados, a nível *onshore* e *offshore*. Domínio D2.

Da análise dos resultados para os diferentes domínios pode verificar-se que o atlas tende a sobrestimar a velocidade do vento nas zonas encarnadas e a subestimar nas zonas a azul. Com base nesta análise foi selecionado um grupo de estações, ao longo da área em estudo, para caracterizar e validar os desvios do modelo. Esta seleção teve por base os pontos das estações que apresentam maiores desvios na velocidade, relativamente às observações. As estações escolhidas foram:

- *Onshore*: 69, 72, 74, 79, 83, 84, 85
- *Offshore*: 67, 117, 136

Da análise efetuada às estações selecionadas é visível uma diminuição do desvio da velocidade do vento com a diminuição da resolução espacial do modelo. Um exemplo significativo é a estação 83, que para os domínios D2 e D3, o modelo tende a subestimar a velocidade do vento, enquanto que no domínio D4 o modelo tende a sobrestimar diminuindo o desvio da velocidade do vento quando comparado com as observações de referência.

Finalmente, com as séries temporais do modelo e do atlas sincronizadas, foi elaborada a validação mais robusta do atlas do potencial eólico. Nesta fase, os estudos realizados tinham como objetivo alcançar resultados em termos de valores e não mapeamentos, e basearam-se, além do parâmetro viés, em correlações (equação 2) e erros médios quadráticos - MSE – (equação 3), segundo as expressões que se seguem.

$$\text{Correlação} = \frac{\text{cov}(U_{\text{Atlas}}, U_{\text{estações}})}{\sigma_{\text{Atlas}}\sigma_{\text{estações}}} \quad (2)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{\text{Atlas},i} - U_{\text{estações},i})^2 \quad (3)$$

#### 4.2.1. *Onshore*

A análise estatística das estações *onshore* foi realizada para os resultados do modelo do domínio D4 (tabela 1).

Tabela 1 - Resultados da validação *onshore* do atlas, domínio D4.

Estação	Correlação	Viés (m/s)	MSE (m/s)
69	0.52	2.05	11.04
72	0.53	-0.52	3.48
74	0.38	1.33	5.09
79	0.53	-0.39	3.32
83	0.36	0.45	22.20
84	0.47	0.74	3.33
85	0.40	0.87	6.79

### 4.2.2. Offshore

Na tabela 2 estão apresentados os resultados da análise estatística entre as observações das estações *offshore* e os resultados do atlas no domínio D2.

Tabela 2 - Resultados da validação *offshore* do atlas, domínio D2.

Estação	Correlação	Viés (m/s)	MSE (m/s)
67	0.33	5.00	32.63
117	0.47	2.61	13.29
136	0.75	0.25	5.82

Para a estação 83, onde os resultados eram bastante diferentes com a diminuição da resolução do modelo de mesoscala, foi efetuada uma análise para cada um dos domínios considerados anteriormente. Na tabela 3 estão indicados os resultados estatísticos da estação 83 para os domínios D2, D3 e D4.

Tabela 3 - Resultados das validações nos três domínios para a estação 83.

Estação	Correlação	Viés (m/s)	MSE (m/s)
83_D2	-0.03	-5.55	49.30
83_D3	-0.05	-4.91	47.52
83_D4	0.36	0.45	22.20

Analisando a tabela 3, nomeadamente nas colunas referentes à correlação e ao viés, podemos mais uma vez confirmar que para terrenos complexos é de extrema importância, para uma correta caracterização de fenómenos locais, a utilização de modelos de alta resolução. De modo a averiguar a influência da topografia nos resultados apresentados foi realizado o cálculo do viés da topografia (figura 11).

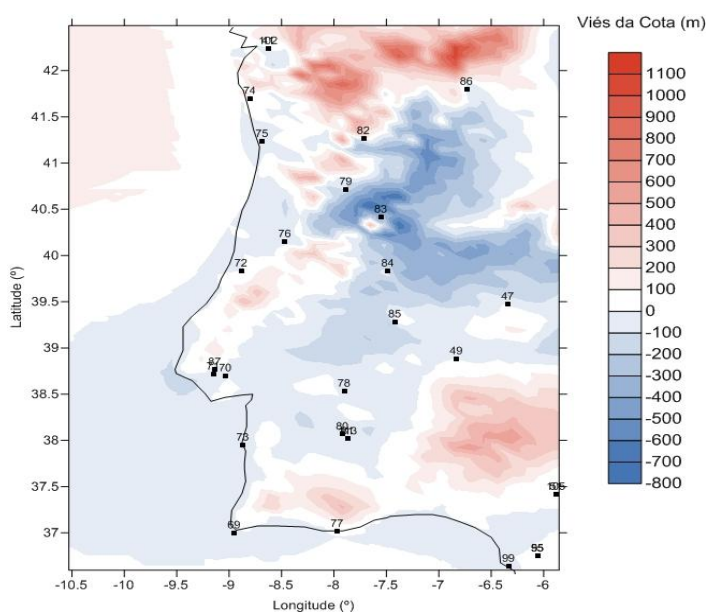


Figura 11 - Viés entre a cota registada pelo Atlas e a registada pela base de dados, domínio D4.

Os resultados apresentados na figura 11 mostram que o modelo subestima significativamente a altitude da estação 83. Estes resultados permitem perceber melhor os resultados apresentados na tabela 1.

### 4.3. Discussão

Após a validação do atlas, podem-se tirar algumas conclusões após a análise dos valores conseguidos nos diferentes parâmetros estatísticos considerados. Da análise dos resultados da tabela 2, validação *offshore* obtida no domínio D2, pode observar-se uma correlação elevada e viés pouco significativo na estação 136. Esta semelhança entre as duas séries de informação é explicada pelo facto de ser uma zona *offshore*, em que o escoamento atmosférico não apresenta grande complexidade quando comparado com zonas em território *onshore*. Deste modo, o modelo consegue simular melhor o escoamento, sendo mais próximo dos registos da base de dados. Contudo, há que ter em conta a pouca resolução espacial com que estes resultados foram obtidos, contribuindo para a falta de exatidão do modelo na correta descrição do comportamento do vento na área em questão.

Através da tabela 3, onde se efetuou a validação para o mesmo ponto, estação 83, nos três domínios por ser uma zona de grande complexidade orográfica, obtêm-se importantes conclusões em relação à importância de uma boa e exata caracterização do relevo por parte do modelo. Nos domínios com uma resolução espacial pouco rigorosa, D2 e D3, é possível constatar que o parâmetro da correlação é bastante inferior quando comparado com os resultados obtidos para o domínio D4. Repetindo a mesma análise para o parâmetro viés, em D2 e D3 obtiveram-se valores negativos bastante superiores ao valor positivo que foi conseguido em D4, o que leva a concluir que um aumento da resolução espacial utilizada nos estudos de validação corresponde a uma maior precisão e homogeneidade entre a informação tanto do modelo do atlas como das bases de dados utilizadas. Na análise da figura 9, onde a maior resolução espacial fornecida pelo domínio D4 é claramente visível, verifica-se um padrão nos resultados da intensidade do vento que o atlas fornece: em zonas montanhosas e muito complexas o atlas sobrestima os registos da base de dados, enquanto que nas zonas com menor complexidade orográfica, tal como as zonas de costa e o próprio Alentejo, os registos da base de dados são claramente subestimados pelo atlas.

## **5. Avaliação do potencial eólico nas estações 72 e 83**

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação do recurso eólico, tendo por base dois pontos validados do atlas do potencial eólico de Portugal. Esta etapa do trabalho tem muita relevância, pois permite, não só, perceber quais as características do recurso eólico disponível nas duas regiões selecionadas, mas também avaliar e comparar os registos monitorizados nas estações da base de dados em análise e os registos obtidos pelo atlas.

Neste sentido, com recurso aos dados disponíveis na base de dados foram selecionadas as estações 72 e 83 para a avaliação do recurso eólico. A estação 72 foi escolhida por ser um local onde o modelo subestimava as medições, e a estação 83 por ser uma zona complexa e controversa aquando da sua validação. Para se avaliar o recurso eólico nas duas regiões, importou-se as séries temporais (já sincronizadas) das duas estações para o *software* WAsP [5] e geraram-se quatro grelhas de recurso (duas com base nos dados das estações selecionadas e outras duas a partir dos dados do modelo numérico). As grelhas geradas têm uma área de 10x10 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 10m.

### **5.1. Caracterização do vento**

De seguida, apresentam-se alguns conceitos comumente utilizados para representar o vento e caracterizar a sua energia.

#### **5.1.1. Distribuição de Weibull**

Como a velocidade do vento ao longo do dia é muito variável, surgiu a necessidade de se agrupar as diferentes intensidades do vento em classes e registar a sua ocorrência. Nesse sentido, considera-se que a distribuição probabilística mais apropriada para representar o regime de ventos é a distribuição de Weibull. Esta função é dada pela seguinte expressão,

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (4)$$

onde  $f(u)$  representa a ocorrência de uma determinada classe de ventos,  $u$  é a velocidade do vento (m/s),  $c$  é um parâmetro de escala (m/s) e  $k$  é o fator de forma, adimensional.

#### **5.1.2. Rosa de Ventos**

Outro fator determinante na caracterização de um determinado local é a direção do vento. Neste caso, o vento é dividido por vários sectores (normalmente, são representados doze) consoante a sua direção e é representada a sua frequência de ocorrência por sector. Esta forma de representação permite-nos perceber de forma intuitiva as direções predominantes do vento. De referir, que esta não representa a energia do vento, mas sim a sua frequência de ocorrência por direção.

#### **5.1.3. Fluxo de Potência do Vento**

A energia contida no vento é aquela que é aproveitada por uma turbina eólica para produzir eletricidade. Essa energia disponível é dada por,

$$E = \frac{1}{2} \rho A x u^2 \quad (5)$$

em que  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  é a área de secção ( $\text{m}^2$ ),  $x$  a espessura do volume de ar (m), e  $u$  a velocidade do vento (m/s). Assim, a potência disponível no vento é

$$P_{disponível} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho A \frac{dx}{dt} u^2 = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (6)$$

pelo que, a potência disponível no vento, em  $W$ , é proporcional ao cubo da sua velocidade. Normalmente, estes valores são apresentados por unidade de área e por causa disso tomam o valor de fluxo de potência ( $W/\text{m}^2$ ):

$$p_d = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (7)$$

#### **5.1.4. Rosa de Potências**

A rosa de potências consiste numa representação análoga à rosa de ventos. Enquanto na primeira se representa a velocidade do vento por sector de direcção, nesta segunda é representado o fluxo de potência incidente por sector de direcção. Assim, a rosa de potências dá-nos informação das direcções energeticamente mais favoráveis, e portanto, com maior potência disponível.

#### **5.1.5. Número de horas equivalentes à potência nominal (NEPs)**

Na avaliação do recurso eólico de um dado local, a quantificação pretendida é a energia. No entanto, calculam-se índices de produção energética que fornecem informação sobre a produção com base na capacidade eólica instalada ou a instalar num local. Um desses índices é dado pelo cálculo do NEPs, em h/ano, que representa o número anual de horas de funcionamento de uma turbina à potência nominal. O NEPs é, então, calculado a partir da seguinte expressão:

$$NEPs = \frac{P_{total} \times t}{P_{turbina}} \quad (8)$$

O valor deste índice é muito importante, pois o custo de distribuição de energia na rede eléctrica nacional é calculado com base nesse índice. Geralmente, se o NEPs for superior a 2000 h/ano considera-se que o parque eólico já é rentável ao promotor [4].

#### **5.1.6. Extrapolação Vertical**

Com base na lei de potências (equação 9), é possível extrapolar os dados para uma cota mais elevada.

$$V_{h_2} = V_{h_1} \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (9)$$

Sendo  $V_{h_2}$  a velocidade extrapolada,  $V_{h_1}$  a velocidade medida no sensor mais elevado,  $h_1$  a altura de medição,  $h_2$  a altura a extrapolar e  $\alpha$  o expoente de extrapolação vertical.

## 5.2. Avaliação do potencial eólico da estação 72

### 5.2.1. Caracterização geográfica e rugosidade local

A estação em estudo encontra-se situada na região centro de Portugal Continental, no concelho de Leiria, com uma cota de 54m. A área em estudo caracteriza-se por valores de rugosidade elevados, por ser uma região com árvores de grande porte. A figura 12 representa o perfil diário de velocidade do vento característico do escoamento nas regiões perto da costa.

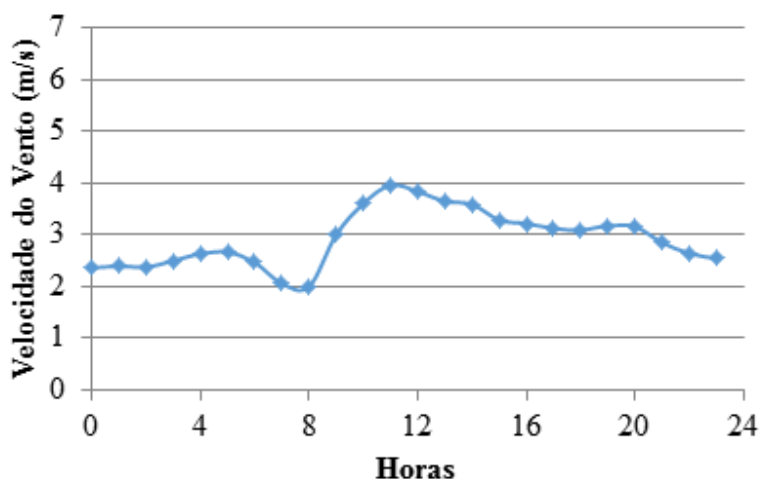


Figura 12 – Perfil diário da velocidade do vento na estação 72 (região de costa).

### 5.2.2. Parâmetros estatísticos do escoamento na estação 72

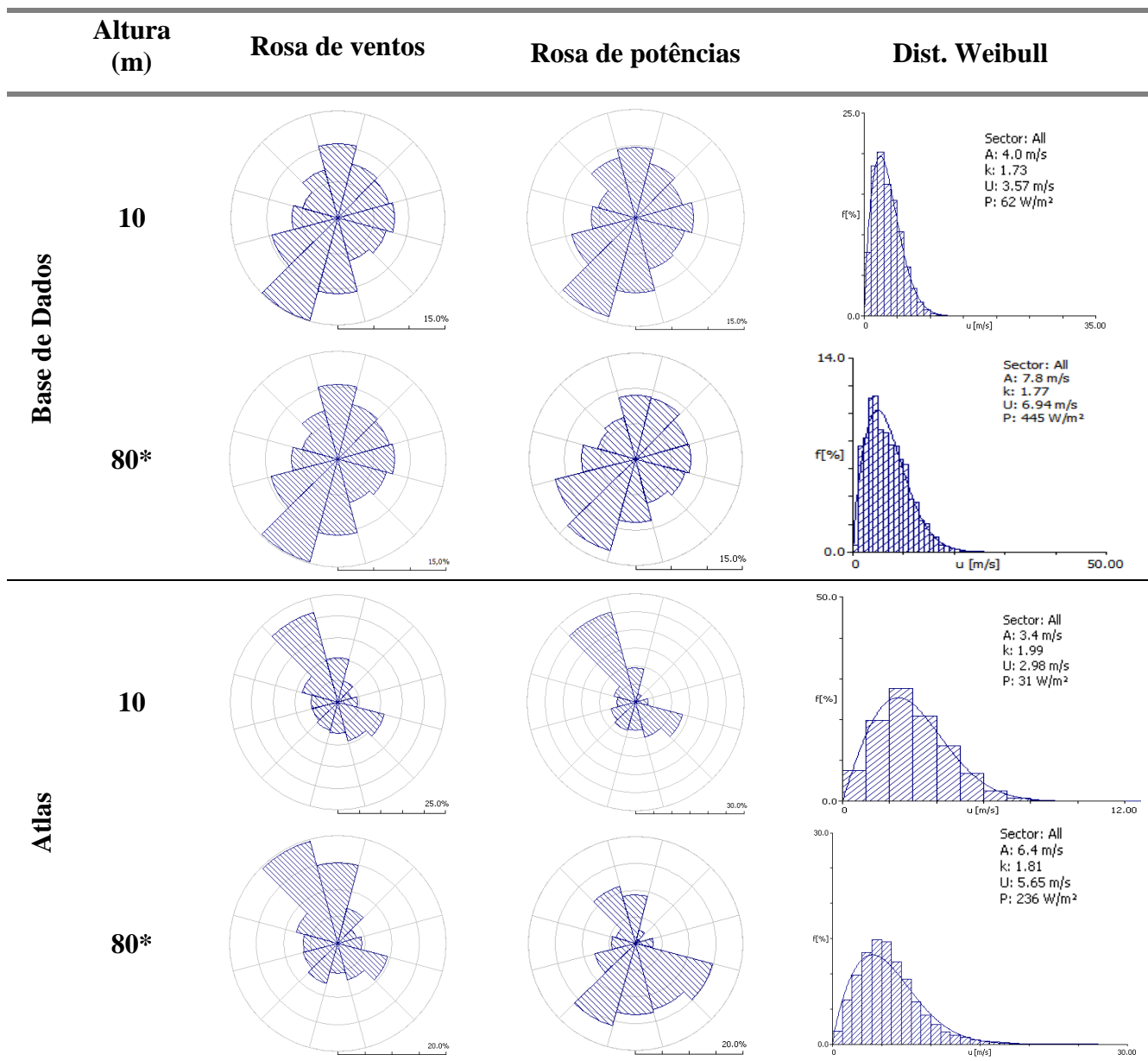
Seguidamente, é apresentada a análise do escoamento atmosférico no local da estação 72 para os dois registos de dados disponíveis. As tabelas 4 e 5 apresentam as estatísticas do vento e escoamento na região, para uma altura de medição de 10 e 80 metros. A extrapolação vertical para os 80 metros foi efetuada com recurso à lei de potências e ao valor do parâmetro alfa calculado através da transposição vertical dos resultados do Atlas dos 10 para os 80 metros.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos do vento na estação 72, no período entre 01.01.2000 – 31.12.2012.

	H (m)	V (m/s)	Fluxo Pot. (W/m <sup>2</sup> )	A (m/s)	K
Base de Dados	10	3.57	62	4.0	1.73
	80*	6.68	405	7.5	1.74
Atlas	10	2.98	31	3.4	1.99
	80	5.65	236	6.4	1.81

\*extrapolado verticalmente com  $\alpha=0.326$ , obtido através do Atlas.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos do escoamento na estação 72, no período entre 01.01.2000 – 31.12.2012.



\*extrapolado com alfa 0.326

### 5.2.3. Mapeamento local do recurso eólico

Seguidamente, nas figuras 13 a 16, apresentam-se os mapas referentes à distribuição espacial da velocidade média e do fluxo de potência incidente.

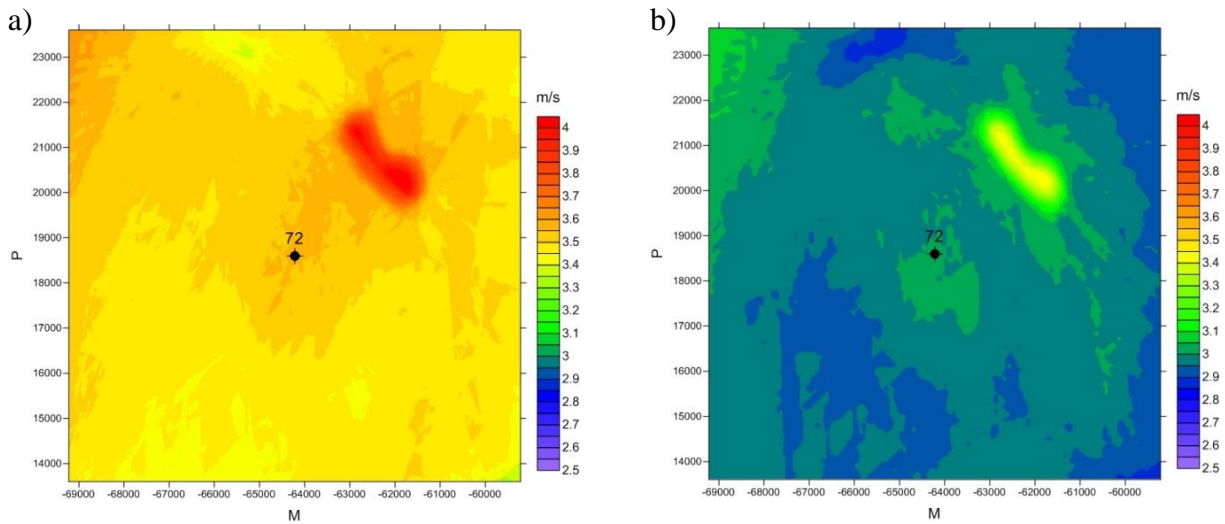


Figura 13 – Velocidade do vento aos 10m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

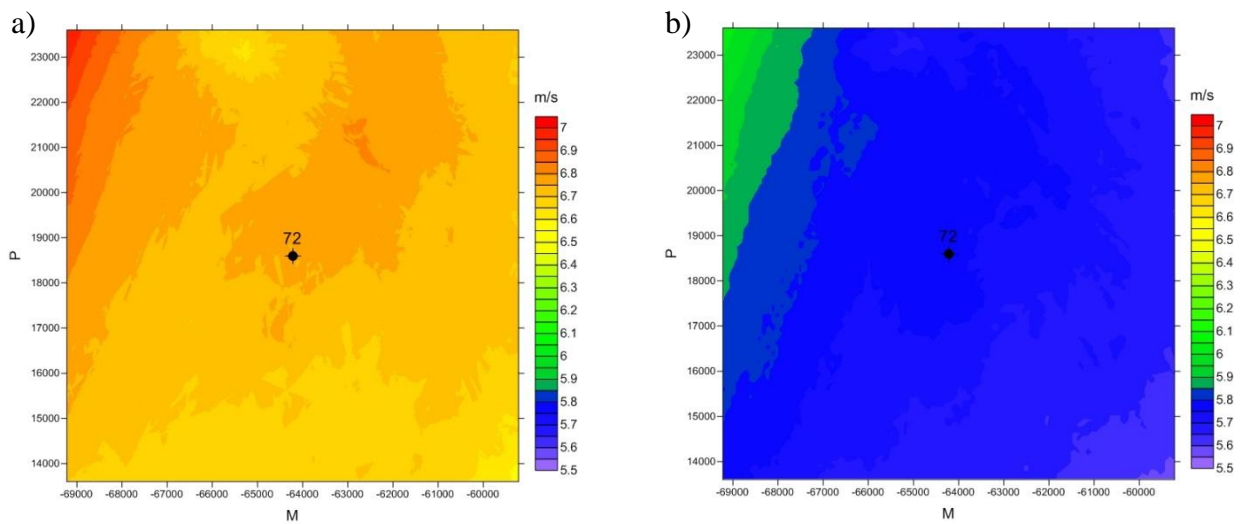


Figura 14 – Velocidade do vento aos 80m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

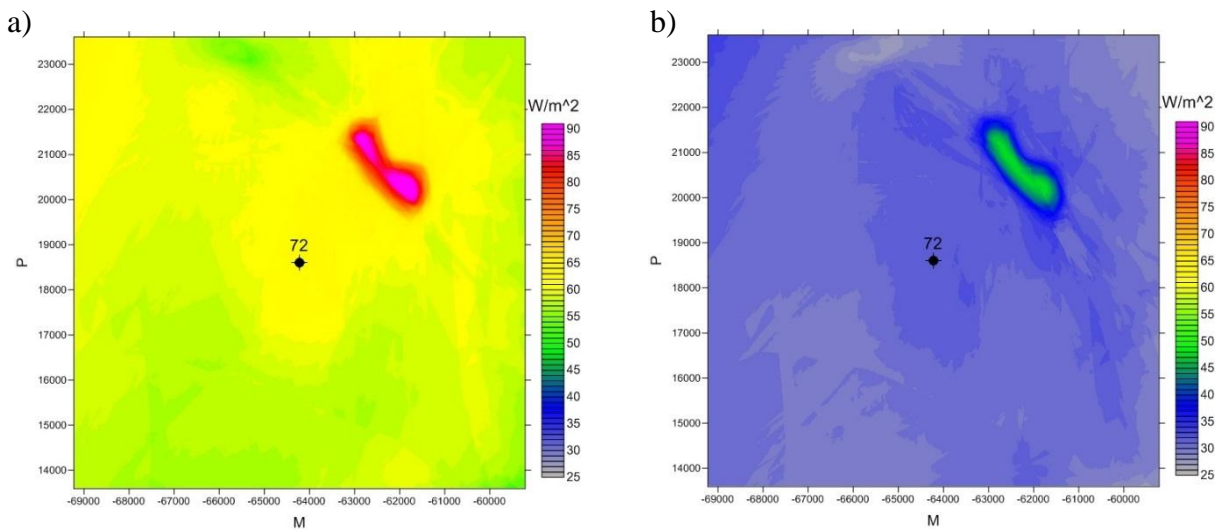


Figura 15 – Fluxo de potência incidente aos 10m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

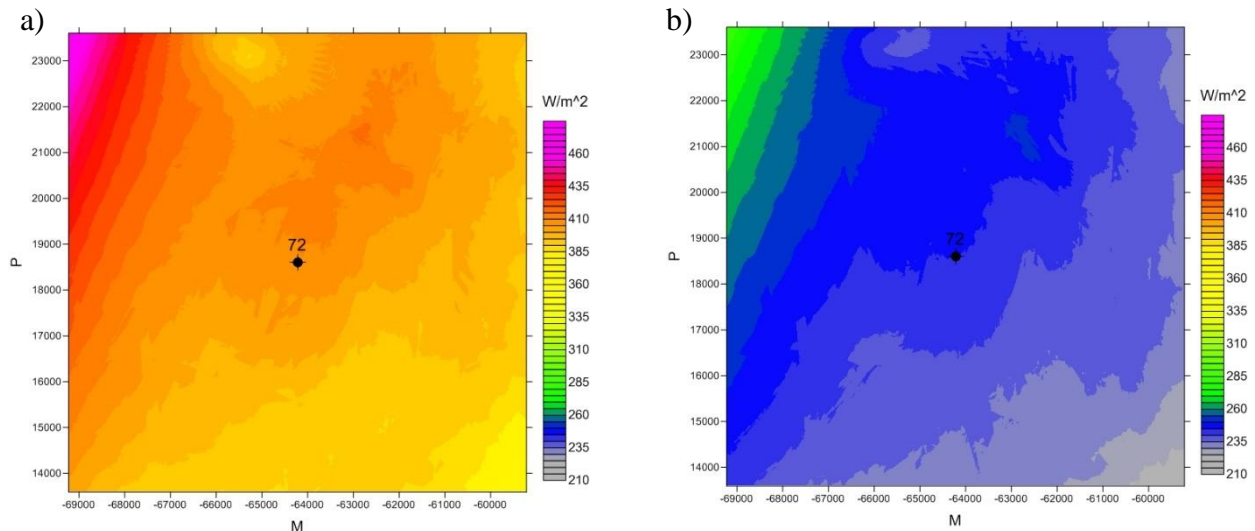


Figura 16 – Fluxo de potência incidente aos 80m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

### 5.3. Avaliação do potencial eólico da estação 83

#### 5.3.1. Caracterização geográfica e rugosidade local

A estação em estudo encontra-se situada na região centro de Portugal Continental, na zona das Penhas Douradas, com uma cota de 1388m. A área em estudo caracteriza-se por valores de rugosidade baixos, pois é uma região com pouca vegetação de grande porte. Contudo, é de realçar que é uma zona com uma orografia muito complexa, pois é uma zona de território montanhoso<sup>5</sup>. Por ser uma região de montanha, apresenta o seguinte perfil diário característico destas regiões (Figura 17).

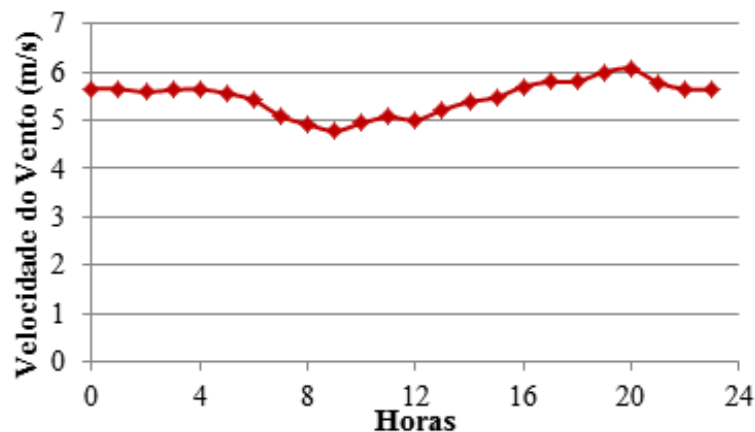


Figura 17 - Perfil diário da velocidade do vento da estação 83 (região de montanha).

#### 5.3.2. Parâmetros estatísticos do escoamento na estação 83

Seguidamente, é apresentada a análise do escoamento atmosférico no local da estação 83 para os dois registos de dados disponíveis. As tabelas 6 e 7, apresentam as estatísticas do vento e escoamento na região, para uma altura de medição de 10 e 80 metros (valor da base de dados extrapolado com base na lei de potências e do

<sup>5</sup> Nos anexos B.1 e B.2, pode consultar os mapas da orografia das regiões que incluem as estações 72 e 83, respetivamente.

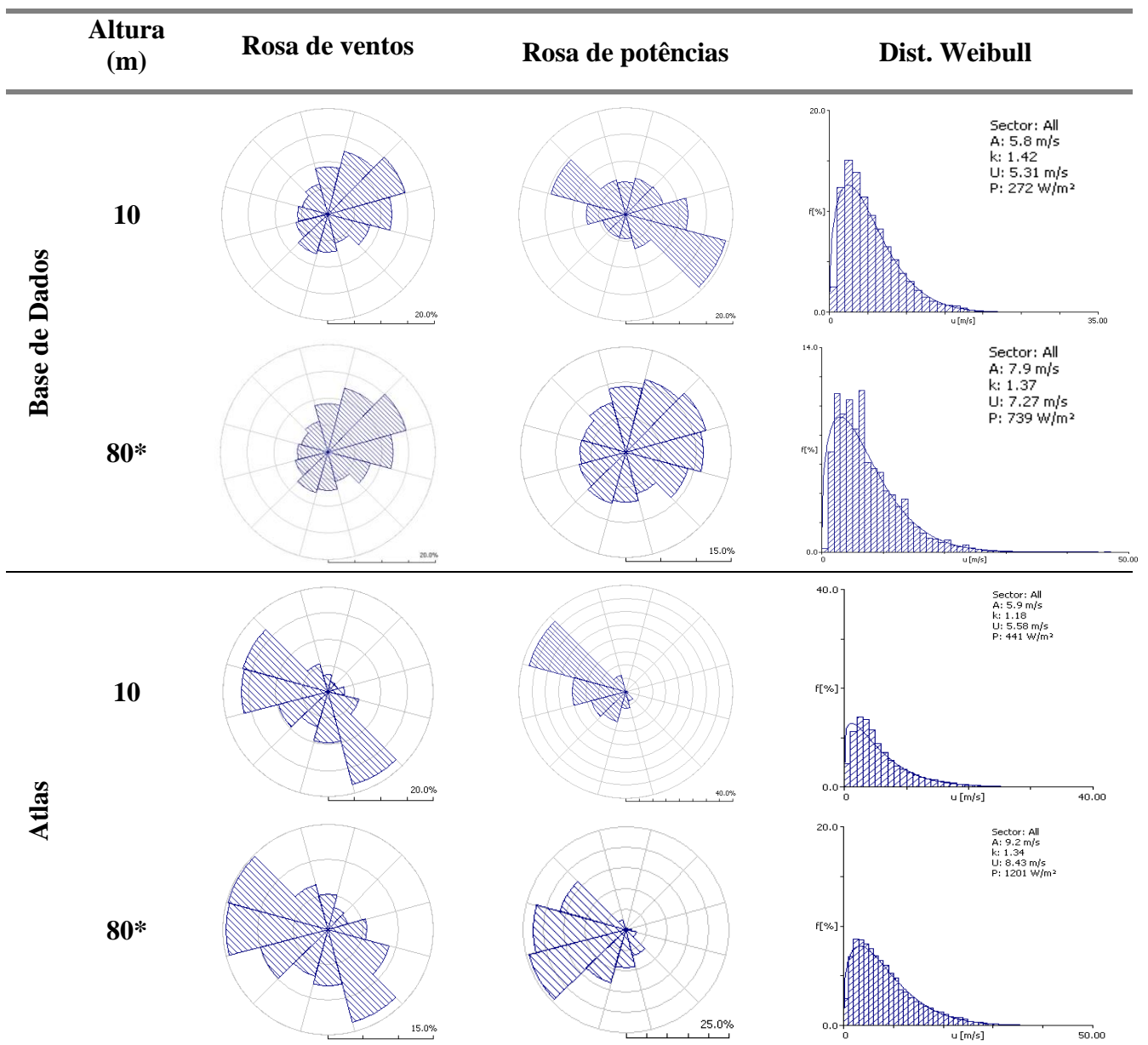
parâmetro alfa obtido com a transposição vertical dos resultados do Atlas entre os 10 e 80 metros).

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos do vento na estação 83, no período entre 01.01.2000 – 31.12.2012.

	<b>H</b> (m)	<b>V</b> (m/s)	<b>Fluxo Pot.</b> (W/m <sup>2</sup> )	<b>A</b> (m/s)	<b>K</b>
Base de Dados	10	5.31	272	5.8	1.42
	80*	7.27	739	7.9	1.37
Atlas	10	5.58	441	5.9	1.18
	80	8.43	1201	9.2	1.34

\*extrapolado verticalmente com  $\alpha=0.161$ , obtido através do Atlas.

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos do escoamento na estação 83, no período entre 01.01.2000 – 31.12.2012.



\*extrapolado com alfa 0.161

### 5.3.3. Mapeamento local do recurso eólico

Nas figuras 18 a 21 são apresentados os mapas referentes à distribuição espacial da velocidade média e do fluxo de potência incidente.

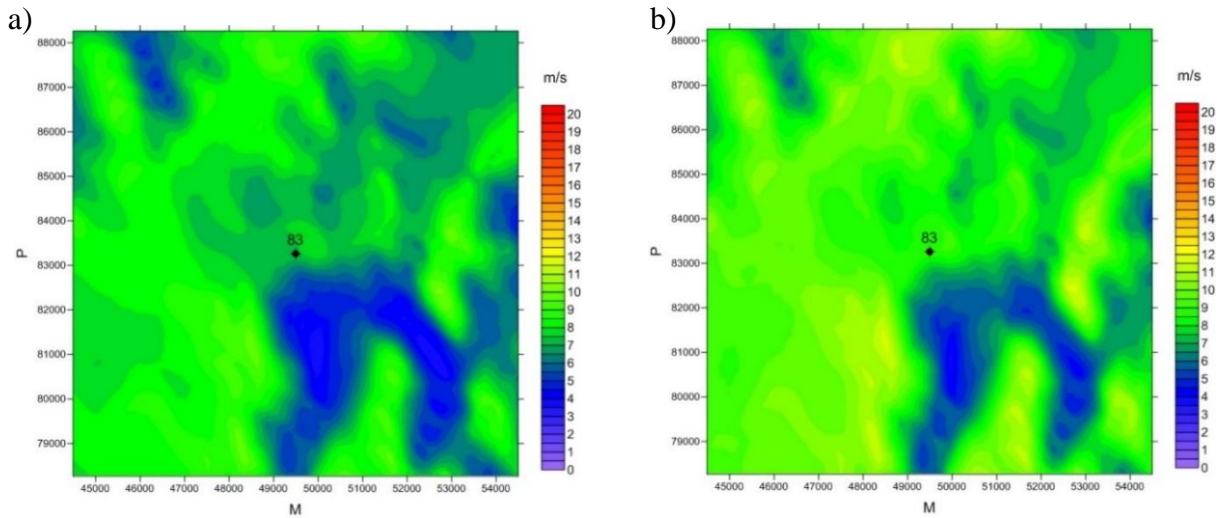


Figura 18 – Velocidade do vento aos 10m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

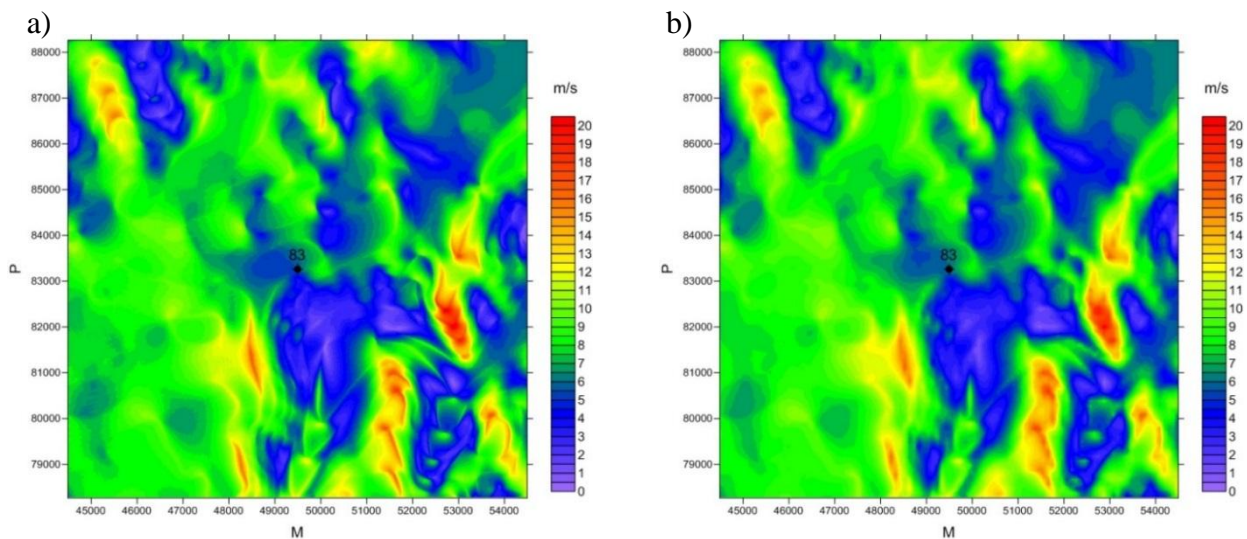


Figura 19 – Velocidade do vento aos 80m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

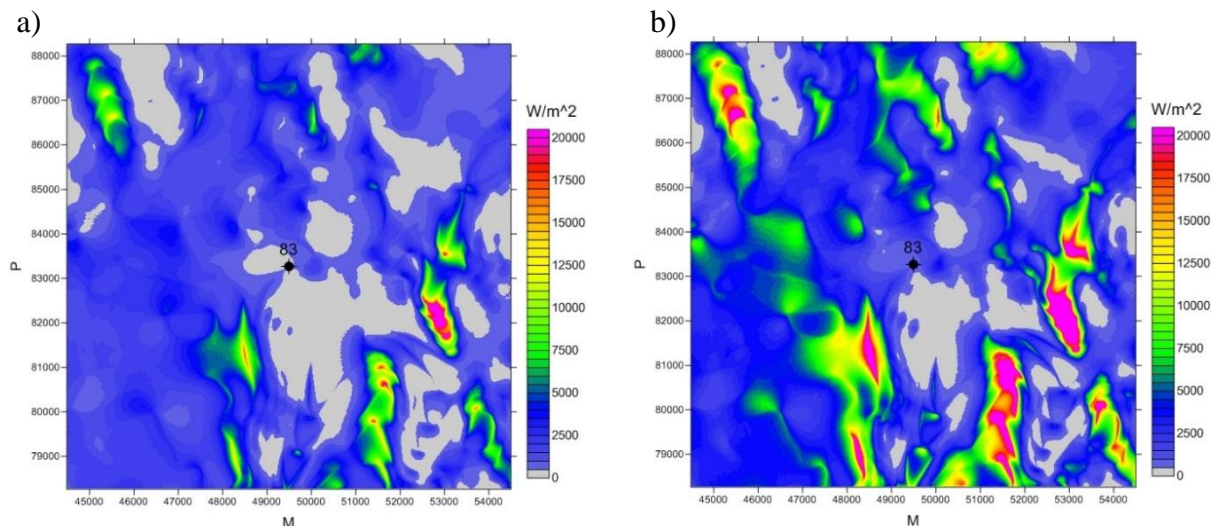


Figura 20 – Fluxo de potência incidente aos 10m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

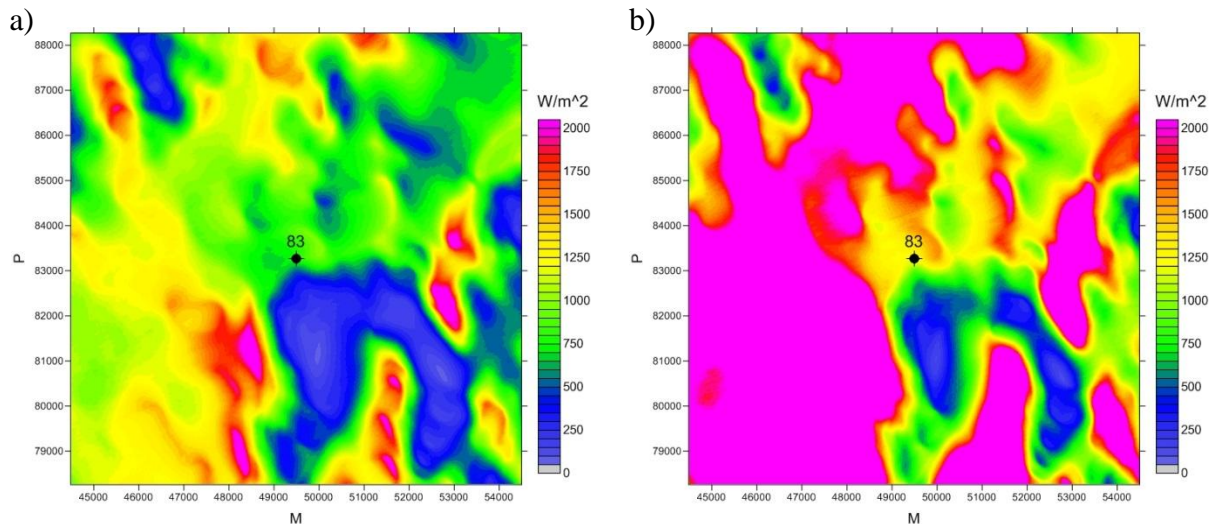


Figura 21 – Fluxo de potência incidente aos 80m de altura para: a) Base de dados; e b) Atlas.

#### 5.4. Discussão

Recorrendo à análise dos resultados apresentados é possível estabelecer algumas comparações entre os resultados do atlas e da base de dados de cada região, e ainda perceber qual das regiões apresenta um maior potencial para o desenvolvimento de um parque eólico.

No caso da região da estação 72, como verificado na validação e de acordo com as curvas de Weibull, os valores do vento médio e do fluxo de potência, os resultados indicam que o modelo do atlas subestima os registos da base de dados. Esta situação também está bem evidenciada nos mapeamentos das figuras 13 a 16. De acordo com as rosas de ventos e potências da zona considerada, verifica-se uma maior ocorrência e intensidade de ventos de su-sudoeste no caso da base de dados, e de nor-noroeste no caso do atlas. As discrepâncias observadas podem ser atribuídas a efeitos de rugosidade do local de instalação da estação meteorológica.

Com os resultados da região da estação 83 pode concluir-se que o atlas sobrestima os registos da base de dados apresentando valores superiores de fluxo de potência e de velocidade do vento (figuras 18 a 21). Da análise da direção dos dados não é possível definir um sector dominante de velocidade do vento devido às discrepâncias observadas entre o modelo e os resultados da base de dados. Estas diferenças podem ser atribuídas a efeitos de rugosidade do local de instalação ou ao mau alinhamento dos sensores de direção nas estações meteorológicas.

Da análise das duas estações é visível que a estação 83 apresenta um potencial eólico superior quando comparada com a estação 72, sendo energeticamente mais favorável. Estes resultados estão relacionados com as diferenças de cota e complexidade do terreno em que se encontram instaladas as estações meteorológicas. Contudo, a orografia muito complexa pode ser um entrave para o desenvolvimento de um parque eólico. Nesse sentido, no capítulo seguinte são realizadas estimativas de produção nas duas regiões, de forma a avaliar os melhores cenários de produção de energia a partir do recurso eólico disponível.

## 6. Estimativas de produção de energia eólica

Neste capítulo, apresentam-se as estimativas de produção energética nos locais das estações meteorológicas 72 e 83, tendo por base os valores obtidos através da base de dados e do atlas, e calculadas com o *software OpenWind* [6]. Este modelo permite o micro-posicionamento energeticamente otimizado das turbinas eólicas, de acordo com a grelha de recurso da área anteriormente simulada pelo *WAsP*. De forma a ser feito um posicionamento das turbinas o mais realista possível, foi adicionado um novo *layer* de informação ao *software*, onde foi feito um *buffer* respeitante aos condicionamentos existentes nas zonas em questão (edifícios, o uso do terreno, reservas naturais, linhas férreas e rodoviárias, cursos de água), considerado um espaçamento de 160m aos limites dos constrangimentos – de forma a não permitir o sobrevoio dos terrenos - e um espaçamento mínimo inter-turbina de três diâmetros.

As estimativas foram obtidas com base nas características do modelo de turbina Enercon E92 com potência nominal de 2.35MW. A escolha deste modelo baseou-se pelo facto de ser um modelo do fabricante com mais turbinas instaladas em Portugal. Na figura 22 estão representadas as curvas de potência e coeficiente de *thrust* ( $C_t$ ) da turbina seleccionada.

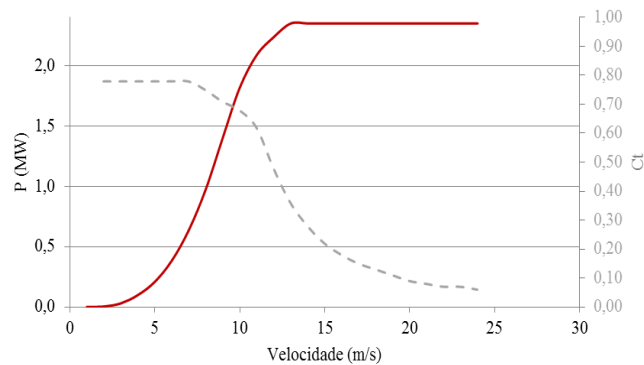


Figura 22 - Curva de potência e coeficiente de thrust da turbina Enercon E92 de 2.35MW.

Foi simulado um cenário teórico com 5 turbinas, o que corresponde a uma capacidade instalada de 11.75 MW. Seguidamente são apresentados os resultados da estimativa de produção para as duas regiões em estudo.

### 6.1. Estimativas de produção da estação 72

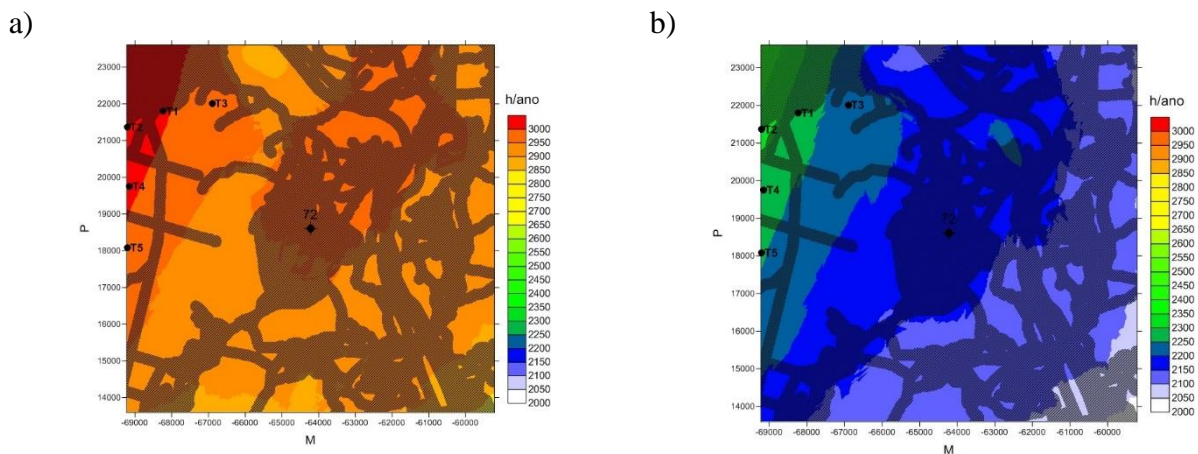


Figura 23 - Distribuição espacial dos NEPs, dos constrangimentos utilizados no processo de otimização energética das estimativas de produção e da disposição das turbinas eólicas do parque na região da estação 72, para: a) Base de dados; b) Atlas.

**Base de dados**

Número de turbinas: **5**

Potência instalada no Parque: **11.75 MW**

Energia produzida pelo Parque (bruta): **35,5 GWh/ano**

Energia útil: **35,3 GWh/ano**

Perda de energia por efeitos de esteira: **0,22 GWh/ano (0.63%)**

N.º de horas equivalentes à potência nominal de 5 x 2350 KW: **3 002 h/ano**

Rendimento do Parque por efeito de esteira: **99.37 %**

Tabela 8 – Estimativas de desempenho do PE da região da estação 72 (base de dados) com cinco turbinas Enercon E92 de 2,35 MW (h = 80 m).

<b>Turbina</b>	<b>Longitude (m)</b>	<b>Latitude (m)</b>	<b>Energia Bruta (MWh/ano)</b>	<b>Perdas por esteira (%)</b>	<b>Energia útil (MWh/ano)</b>	<b>NEP's (h/ano)</b>
<b>T1</b>	-68230,9	21797,7	7115	1,05	7040	2996
<b>T2</b>	-69207,0	21357,9	7153	0,71	7102	3022
<b>T3</b>	-66901,0	22015,1	7046	0,41	7017	2986
<b>T4</b>	-69149,8	19749,3	7125	0,66	7078	3012
<b>T5</b>	-69203,2	18084,3	7062	0,31	7041	2996

**Atlas**

Número de turbinas: **5**

Potência instalada no Parque: **11.75 MW**

Energia produzida pelo Parque (bruta): **25,8 GWh/ano**

Energia útil: **25,7 GWh/ano**

Perda de Energia por efeitos de esteira: **0,16 GWh/ano (0.63%)**

N.º de horas equivalentes à potência nominal de 5 x 2350 KW: **2 184 h/ano**

Rendimento do Parque por efeito de esteira: **99.37 %**

Tabela 9 – Estimativas de desempenho do PE da região da estação 72 (atlas) com cinco turbinas Enercon E92 de 2,35 MW (h = 80 m).

<b>Turbina</b>	<b>Longitude (m)</b>	<b>Latitude (m)</b>	<b>Energia Bruta (MWh/ano)</b>	<b>Perdas por esteira (%)</b>	<b>Energia útil (MWh/ano)</b>	<b>NEP's (h/ano)</b>
<b>T1</b>	-68230,9	21797,7	5174	0,93	5126	2181
<b>T2</b>	-69207,0	21357,9	5284	0,32	5268	2242
<b>T3</b>	-66901,0	22015,1	5018	0,45	4995	2126
<b>T4</b>	-69149,8	19749,3	5212	0,83	5169	2200
<b>T5</b>	-69203,2	18084,3	5135	0,63	5103	2171

## 6.2. Estimativas de produção da estação 83

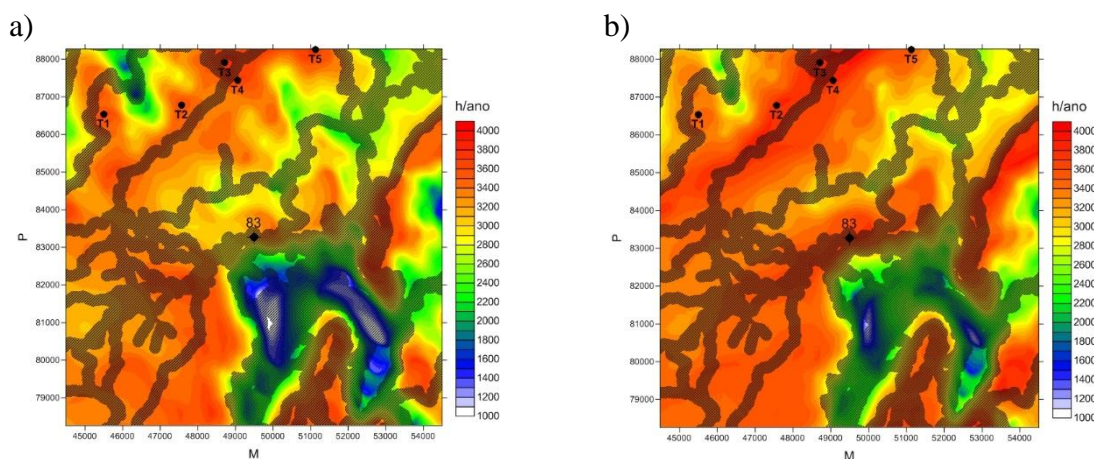


Figura 24 - Distribuição espacial dos NEPs, dos constrangimentos utilizados no processo de otimização energética das estimativas de produção e da disposição das turbinas eólicas do parque na região da estação 83, para: a) Base de dados; b) Atlas.

### Base de dados

Número de turbinas: **5**

Potência instalada no Parque: **11.75 MW**

Energia produzida pelo Parque (bruta): **44,2 GWh/ano**

Energia útil: **44,0 GWh/ano**

Perda de Energia por efeitos de esteira: **0,21 GWh/ano (0.47%)**

N.º de horas equivalentes à potência nominal de 5 x 2350 KW: **3 746 h/ano**

Rendimento do Parque por efeito de esteira: **99.53 %**

Tabela 10 – Estimativas de desempenho do PE da região da estação 83 (base de dados) com cinco turbinas Enercon E92 de 2,35 MW (h = 80 m).

Turbina	Longitude (m)	Latitude (m)	Energia Bruta (MWh/ano)	Perdas por esteira (%)	Energia útil (MWh/ano)	NEP's (h/ano)
<b>T1</b>	45499,4	86541,1	8704	0,30	8677	3693
<b>T2</b>	47570,0	86783,6	8676	0,59	8625	3670
<b>T3</b>	48721,1	87902,9	9097	0,64	9039	3846
<b>T4</b>	49061,4	87436,8	8851	0,67	8792	3741
<b>T5</b>	51130,7	88258,7	8896	0,15	8882	3780

### Atlas

Número de turbinas: **5**

Potência instalada no Parque: **11.75 MW**

Energia produzida pelo Parque (bruta): **44,2 GWh/ano**

Energia útil: **44,0 MWh/ano**

Perda de Energia por efeitos de esteira: **0,21 MWh/ano (0.47%)**

N.º de horas equivalentes à potência nominal de 5 x 2350 KW: **3 748 h/ano**

Rendimento do Parque por efeito de esteira: **99.53 %**

Tabela 11 – Estimativas de desempenho do PE da região da estação 83 (atlas) com cinco turbinas Enercon E92 de 2,35 MW (h = 80 m).

<b>Turbina</b>	<b>Longitude (m)</b>	<b>Latitude (m)</b>	<b>Energia Bruta (MWh/ano)</b>	<b>Perdas por esteira (%)</b>	<b>Energia útil (MWh/ano)</b>	<b>NEP's (h/ano)</b>
<b>T1</b>	45499,4	86541,1	8199	0,22	8181	3481
<b>T2</b>	47570,0	86783,6	9068	0,28	9043	3848
<b>T3</b>	48721,1	87902,9	9296	1,01	9202	3916
<b>T4</b>	49061,4	87436,8	9215	0,54	9166	3900
<b>T5</b>	51130,7	88258,7	8471	0,23	8451	3596

### 6.3. Síntese dos resultados

Na tabela 12, apresenta-se uma síntese dos resultados das estimativas de produção para os cenários estudados.

Tabela 12 - Síntese da produção energética.

	<b>Dados</b>	<b>Energia Bruta (GWh/ano)</b>	<b>Energia útil (GWh/ano)</b>	<b>NEP's (h/ano)</b>
<b>Estação 72</b>	<b>Base de dados</b>	35,5	35,3	3 002
	<b>Atlas</b>	25,8	25,7	2 184
<b>Estação 83</b>	<b>Base de dados</b>	44,2	44,0	3 746
	<b>Atlas</b>	44,2	44,0	3 748

Analisando a tabela 12, concluiu-se que a produção na região da estação 72 apresenta uma estimativa superior com os dados observados na estação quando comparada com a estimativa obtida com os dados do atlas (diferenças de energia produzida de cerca de 10 GWh/ano o que corresponde a 818 h/ano). Este elevado desvio encontra-se relacionada com o valor da extrapolação e da rugosidade elevada da região.

No caso da zona da estação 83 não existe uma diferença significativa entre os registos obtidos pela base de dados e pelo Atlas (o correspondente a 2h/ano).

Por fim, elaborando uma análise mais generalizada entre as 2 regiões estudadas, pode-se constatar que a zona mais produtiva energeticamente localiza-se na região da estação 83. Apesar disso, como já foi referido neste trabalho em várias ocasiões, é uma zona com uma complexidade a nível orográfico bastante assinalável, o que pode apresentar maiores dificuldades na implementação de um parque eólico.

### 7. Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo a criação de uma base de dados de parâmetros meteorológicos de longo termo para validação pontual do atlas do potencial eólico de Portugal. Esta base de dados é constituída com registos de 3h e período de 12 anos (entre 2000 e 2012) das variáveis meteorológicas aos 10 metros (pressão, temperatura, intensidade e direção do vento).

A validação pontual do atlas do potencial eólico de Portugal foi efetuada com recurso à seleção de dez estações que constituem a base de dados, das quais sete correspondem a áreas *onshore* e três a áreas *offshore*. Estes resultados permitem concluir que o atlas para regiões com características de topografia complexa tende a sobrestimar a velocidade do vento, contrariamente ao verificado em regiões de costa. Para áreas *offshore* os resultados indicam que o modelo consegue descrever com desvios pouco significativos o escoamento atmosférico da região.

De forma a analisar e compreender melhor os impactos dos desvios observados na velocidade do vento, realizou-se um estudo de avaliação do potencial eólico e estimativas de produção energética para dois cenários. O primeiro cenário considerado encontra-se numa região costeira com poucas variações topográficas e o segundo cenário por outro lado, localiza-se numa região com características de escoamento montanhoso e terreno complexo. As estimativas de produção foram otimizadas para um parque eólico, a instalar em cada uma das regiões, com cinco turbinas Enercon E92 de 2.35 MW, totalizando uma potência instalada de 11.75MW.

A região costeira situa-se no concelho de Leiria, onde os resultados do Atlas subestimam as observações das estações meteorológicas e as estimativas de produção energética mostram um desvio significativo, cerca de 818 h/ano, entre as duas séries de vento em estudo. A região montanhosa, situada em terreno complexo (Penhas Douradas), apresenta valores de produção energeticamente mais favoráveis para o desenvolvimento de um parque eólico, ainda que, a complexidade da orografia que a caracteriza possa ser um entrave à própria instalação do parque.

De realçar que devido às questões levantadas quanto à fiabilidade dos dados das estações meteorológicas utilizados para a avaliação do recurso eólico, principalmente pelas diferenças obtidas nos dados da direção que podem refletir os efeitos de rugosidade local ou o desalinhamento dos sensores, estas observações não são adequadas para corrigir o atlas. No entanto, devido ao extenso período e a disponibilidade espacial de dados disponíveis, estes dados podem ser utilizados na avaliação da variabilidade do vento para análise do escoamento de longo termo.

## **8. Referências**

- [1] “The Outlook for Energy: a view to 2040,” 2012. [Online]. Disponível em: <http://corporate.exxonmobil.com/en/energy/energy-outlook>. [Acedido a 7 de Novembro de 2013]
- [2] “DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia. Estatísticas rápidas,” 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido a 7 de Novembro de 2013]
- [3] Kalnay, E. *et al.* “The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, pp. 437-471
- [4] P. Costa, “Atlas do Potencial eólico para Portugal Continental,” 2004.
- [5] Mortensen, N. G.; L. Landberg; I. Troen; E. L. Petersen, *Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP), Vol. 1: Getting Started*, Riso National Laboratory, January 1993.
- [6] “OPENWIND - User Manual Version 1.4,” 2012. ReCode Inc. and AWS Truepower, LLC. [Online]. Disponível em: <http://www.awsopenwind.org/>. [Acedido a 10 de Outubro de 2013]

9. Anexos

Anexos A – Exemplo dos ficheiros da base de dados 461.0

A.1 - Ficheiros tipo da base de dados 461.0 (inputs)

REC TYPE	OBS TYPE	REPORT TIME	STATION	LATI- TUDE	LONGI- TUDE	ELE- VATION	PMSL	TMDB	WDIR	WSPD
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08512	37.73	-25.70	72	102890.00	289.25	170.00	1.50
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08532	38.83	-9.33	130	102890.00	275.15	0.00	0.00
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08534	38.70	-9.05	11	102800.00	277.35	30.00	2.10
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08540	39.83	-8.88	54	102920.00	273.35	150.00	0.50
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08543	41.70	-8.80	18	102970.00	273.05	0.00	0.00
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08560	40.72	-7.88	644	102970.00	278.95	40.00	2.10
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08210	40.67	-4.52	1131	-9999.90	271.55	0.00	0.00
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08213	40.95	-4.12	1005	-9999.90	274.55	80.00	1.50
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08215	40.78	-4.02	1888	-9999.90	276.35	360.00	1.00
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08541	37.95	-8.87	103	102750.00	281.55	0.00	0.00
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08555	37.02	-7.92	8	102580.00	282.55	0.00	0.00
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08571	39.28	-7.42	590	102750.00	283.05	300.00	0.50
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08506	38.52	-28.63	62	102820.00	289.85	220.00	1.50
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08511	38.67	-27.22	76	102850.00	289.05	210.00	1.50
ADPSFC	SYNOP	200001010900	08567	41.27	-7.72	562	103160.00	273.25	0.00	0.00
ADPSFC	METAR	200001010300	GMAD	30.33	-9.40	74	-9999.90	282.15	110.00	2.60
ADPSFC	METAR	200001010400	GMAD	30.33	-9.40	74	-9999.90	281.15	80.00	2.10
ADPSFC	METAR	200001010500	GMAD	30.33	-9.40	74	-9999.90	280.15	100.00	2.60
ADPSFC	METAR	200001010600	GMAD	30.33	-9.40	74	-9999.90	280.15	90.00	2.10
ADPSFC	METAR	200001010700	GMAD	30.33	-9.40	74	-9999.90	280.15	100.00	2.60

Figura A.1 - Ficheiro com dados *onshore* da BD 461.0.

REC TYPE	OBS TYPE	REPORT TIME	STATION	LATI- TUDE	LONGI- TUDE	ELE- VATION	PMSL	TMDB	WDIR	WSPD
SFCSHP	SHIPS	200001010300	PPSV	30.10	-15.40	0	102370.00	290.15	40.00	8.80
SFCSHP	SHIPS	200001010000	PPSV	31.00	-15.10	0	102560.00	291.15	40.00	10.30
SFCSHP	SHIPS	200001010000	ZCB05	31.30	-16.30	0	102410.00	291.15	50.00	10.80
SFCSHP	SHIPS	200001010000	4PLC	31.50	-24.70	0	102790.00	290.15	240.00	5.10
SFCSHP	SHIPS	200001010000	MWKB6	31.70	-24.00	0	102490.00	292.15	50.00	6.70
SFCSHP	SHIPS	199912312100	PPSV	31.90	-14.70	0	102560.00	291.15	-9999.90	-9999.90
SFCSHP	SHIPS	200001010000	PJPO	32.20	-19.70	0	102350.00	291.15	60.00	11.00
SFCSHP	SHIPS	200001010000	SHIP	33.80	-30.40	0	-9999.90	292.15	-9999.90	6.70
SFCSHP	SHIPS	200001010000	ZCCY9	47.80	-25.10	0	102100.00	286.15	260.00	9.30
SFCSHP	SHIPS	200001010000	ZCBD2	47.80	-10.10	0	102520.00	286.15	230.00	9.30
SFCSHP	DBUOY	199912312100	62520	30.74	-29.15	0	102490.00	-9999.90	-9999.90	-9999.90
SFCSHP	DBUOY	199912312146	62520	30.74	-29.15	0	102510.00	-9999.90	-9999.90	-9999.90
SFCSHP	DBUOY	199912312233	62520	30.74	-29.15	0	102540.00	-9999.90	-9999.90	-9999.90
SFCSHP	MBUOY	200001010000	62001	45.20	-5.00	0	102800.00	284.95	270.00	4.10
SFCSHP	MBUOY	200001010100	62001	45.20	-5.00	0	102800.00	285.15	250.00	5.10
SFCSHP	MBUOY	200001010300	62001	45.20	-5.00	0	102800.00	284.75	230.00	2.60

Figura A.2 – Ficheiro com dados *offshore* da BD 461.0.

A.2 - Ficheiros produzidos após tratamento de dados (outputs)

'RecType'	'ObsType'	'Matlab Time'	'Latitude(°)'	'Longitude(°)'	'Elevation(m)'	'WindSpeed(m/s)'	'WindDirection(°)'
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	0.8333	127.7324
'ADPSFC'	'SYNOP'	730486	40.4200	-7.5500	1388	0.7500	275
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	0.5000	255.3861
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	0.6667	258.4771
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	0.5000	265.9616
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	1	63.2925
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	0.5000	138.5997
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	1	135
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	0.5000	100
'ADPSFC'	'SYNOP'	730487	40.4200	-7.5500	1388	0.5000	59.6491
'ADPSFC'	'SYNOP'	7.3049e+05	40.4200	-7.5500	1388	-50	-50

Figura A.3 - Informação contida num ficheiro da base de dados criada.

Anexos B – Mapas da orografia das regiões consideradas na avaliação do potencial eólico

B.1 - Mapa da orografia da região da estação 72

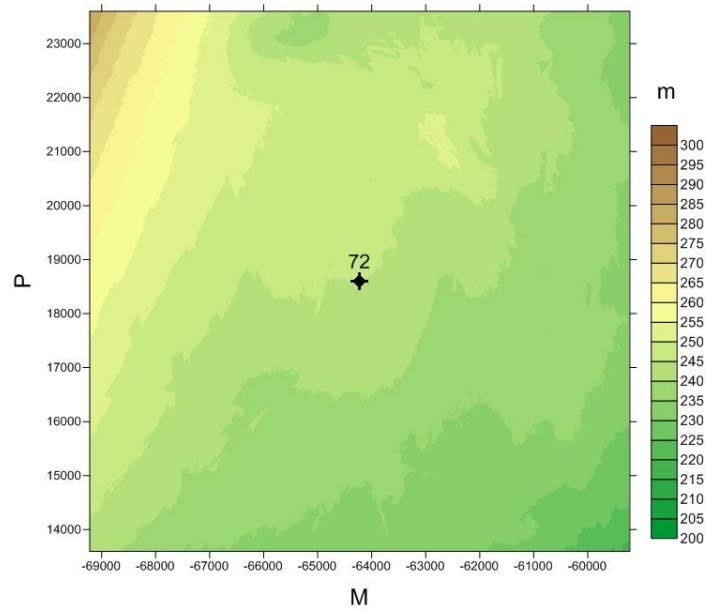


Figura B.1 – Mapeamento da orografia da região envolvente à estação 72.

B.2 – Mapa da orografia da região da estação 83

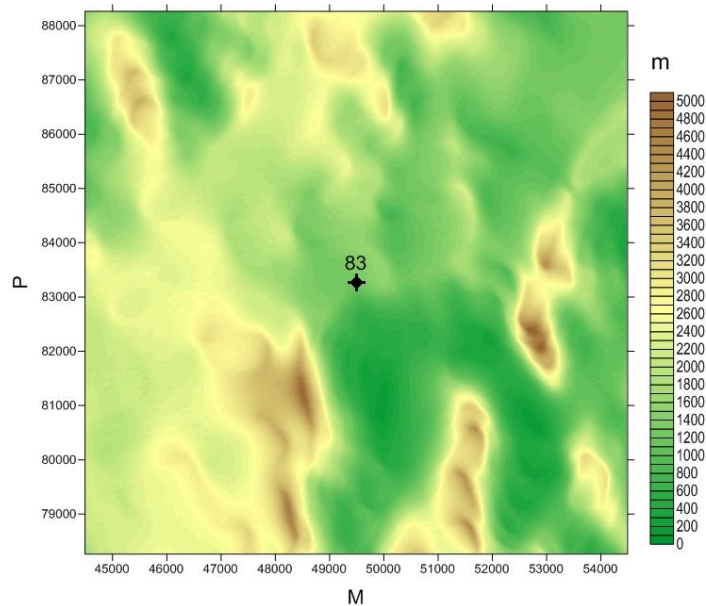


Figura B.2 – Mapeamento da orografia da região envolvente à estação 83.