

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



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

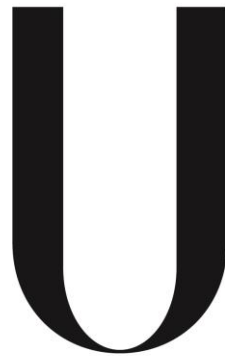
**Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação  
na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável**

**Gonçalo Correia da Fonseca Rodrigues**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

**2014**

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



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação  
na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável**

**Gonçalo Correia da Fonseca Rodrigues**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada pelo Professor Doutor Pedro Miranda

**2014**

## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS DO TRABALHO</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>O ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>DEPRESSÕES E ANTICLONES</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>CIRCULAÇÕES LOCAIS E REGIONAIS</b> .....	<b>5</b>
2.2.1	<i>Brisa marítima e brisa terrestre</i> .....	5
2.2.2	<i>Brisa de vale e brisa de montanha</i> .....	6
<b>2.3</b>	<b>CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>6</b>
2.3.1	<i>Divisão vertical da CLA</i> .....	7
2.3.2	<i>Perfil logarítmico</i> .....	7
2.3.3	<i>Lei de Potências</i> .....	8
2.3.4	<i>Caraterização da energia do vento</i> .....	8
<b>3</b>	<b>MODELOS DE PREVISÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>OS MODELOS NUMÉRICOS</b> .....	<b>10</b>
3.1.1	<i>Modelos globais</i> .....	10
3.1.2	<i>Modelos regionais ou de mesoscala</i> .....	10
3.1.3	<i>Modelo WRF</i> .....	11
<b>3.2</b>	<b>SIMULAÇÕES E MÉTODOS DE VALIDAÇÃO</b> .....	<b>13</b>
3.2.1	<i>Definição das condições impostas ao modelo WRF</i> .....	13
3.2.2	<i>Métodos de validação e índices estatísticos utilizados</i> .....	14
<b>4</b>	<b>CARATERIZAÇÃO DA ILHA DAS FLORES</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>LOCALIZAÇÃO E GEOGRAFIA</b> .....	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>CLIMA DA ILHA DAS FLORES</b> .....	<b>19</b>
4.2.1	<i>Climatologia da ilha das Flores (Aeroporto)</i> .....	19
4.2.2	<i>Avaliação do efeito orográfico na precipitação da ilha das Flores</i> .....	22
<b>4.3</b>	<b>CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA ELECTROPRODUTOR DA ILHA DAS FLORES</b> .....	<b>23</b>
4.3.1	<i>O consumo energia elétrica</i> .....	23
4.3.2	<i>O sistema de produção de energia</i> .....	25
4.3.3	<i>A produção de energia elétrica</i> .....	26
4.3.4	<i>Caracterização do sistema electroprodutor em 2011</i> .....	29
<b>5</b>	<b>APROVEITAMENTO DO POTENCIAL EÓLICO</b> .....	<b>35</b>

<b>5.1</b>	<b>O RECURSO EÓLICO DISPONIVEL</b> .....	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISE DO RECURSO EÓLICO EXPLORADO</b> .....	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO WRF</b> .....	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>VARIÁVEL METEOROLÓGICA: VENTO</b> .....	<b>44</b>
6.1.1	<i>Comparação entre observações</i> .....	44
6.1.2	<i>Validação do modelo WRF com as observações no aeroporto</i> .....	49
6.1.3	<i>Validação do modelo WRF com as observações no parque eólico</i> .....	54
<b>6.2</b>	<b>VARIÁVEL METEOROLÓGICA: PRECIPITAÇÃO</b> .....	<b>60</b>
6.2.1	<i>Validação do modelo WRF com as observações no aeroporto</i> .....	61
6.2.1.1	<i>Performance global do modelo WRF</i> .....	61
6.2.1.2	<i>Acerto nos dias de precipitação</i> .....	64
6.2.2	<i>Histograma e extremos</i> .....	65
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>

## Índice de Tabelas

TABELA 2.3-1	- CLASSIFICAÇÃO DE RUGOSIDADES PROPOSTA DAVENPORT E ATUALIZADA POR WIERINGA (1992).....	7
TABELA 3.2-1	TABELA DE CONTINGÊNCIA 2 X 2 PARA VERIFICAÇÃO DA OCORRÊNCIA OU NÃO DA PREVISÃO DE CHUVA. ....	16
TABELA 4.1-1	- DISTRIBUIÇÃO ALTIMÉTRICA DA ILHA DAS FLORES (ADAPTADO DE PGRH).....	18
TABELA 4.1-2	- DISTRIBUIÇÃO DOS DECLIVES DA ILHA DAS FLORES (ADAPTADO DE PGRH).....	18
TABELA 6.1-1	VARIABILIDADE INTER E INTRA-ANUAL OBSERVADA (10 M AST) NA ESTAÇÃO DO AEROPORTO (REGISTOS DE 1H). ....	44
TABELA 6.1-2	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA VELOCIDADE DO VENTO ENTRE AS OBSERVAÇÕES NO AEROGERADOR 1 E AS SIMULAÇÕES DO MODELO WRF (PONTO B E D) PARA OS MESES DO ANO DE 2011 .....	55
TABELA 6.2-1	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ACUMULADA NOS PERIODOS APRESENTADOS. ....	62
TABELA 6.2-2	PARAMETROS ESTATISTICOS DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ACUMULADA DIÁRIA POR CADA MÊS DO ANO. ....	62
TABELA 6.2-3	TABELA DE CONTIGENCIA PARA PRECIPITAÇÃO > 1 MM.....	65
TABELA 6.2-4	TABELA DE CONTIGENCIA PARA PRECIPITAÇÃO > 0.1 MM.....	65
TABELA 6.2-5	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA AS DUAS CLASSES DE PRECIPITAÇÃO.....	65

## Índice de Figuras

FIGURA 2.3-1 - SUBDIVISÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA. ILUSTRAÇÃO CONCEPTUAL DA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA VELOCIDADE HORIZONTAL E TENSÃO DE CORTE NA CAMADA LIMITE (ADAPTADO DE ZHANG, 2009). .....	7
FIGURA 3.1-1 - COMPONENTES DO SISTEMA WRF (SHAMAROCK, 2008).....	12
FIGURA 3.1-2 - GRADE ALTERNADA DO TIPO C DE ARAKAWA, HORIZONTAL (A) E VERTICAL (B) (SKAMAROCK ET AL., 2008). .....	12
FIGURA 4.1-1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES. ILHA DAS FLORES NO GRUPO OCIDENTAL.....	17
FIGURA 4.1-2 - CARTA HIPSOMÉTRICA DA ILHA DAS FLORES .....	18
FIGURA 4.1-3 – MAPA DE EXPOSIÇÕES (À ESQUERDA) E MAPA DE DECLIVES (À DIREITA) DA ILHA DAS FLORES (PGRH). .....	18
FIGURA 4.2-1 – PRECIPITAÇÃO, NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (1970-1990). ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO IPMA, AEROPORTO DAS FLORES (H = 32M). .....	20
FIGURA 4.2-2 - TEMPERATURA, NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (1970-1990). ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO IPMA, AEROPORTO DAS FLORES (H = 32 M).....	20
FIGURA 4.2-3 - ROSA DE VENTOS MÉDIA DE 1970-1990 (10 M AST) OBSERVADA NA ESTAÇÃO DO IPMA (AEROPORTO). .....	21
FIGURA 4.2-4 - VELOCIDADE MÉDIA MENSAL (1970-1990) DO VENTO OBSERVADA (10 M AST) NA ESTAÇÃO DO IPMA (AEROPORTO)....	21
FIGURA 4.2-5 - ROSA DE VENTOS MÉDIA (1970-199) PARA O MÊS DE JANEIRO. ....	21
FIGURA 4.2-6 – ROSA DE VENTOS MÉDIA (1970-199) PARA O MÊS DE JULHO. ....	21
FIGURA 4.2-7 PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL DE LONGO TERMO (1958-1988) PARA 4 POSTOS UDOMÉTRICOS DA ILHA DAS FLORES (PGRH). .....	22
FIGURA 4.3-1 - EVOLUÇÃO ANUAL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA REPARTIDA PELOS SETORES DE ATIVIDADE NO PERÍODO DE 1995 A 2012. ....	24
FIGURA 4.3-2 - REPRESENTAÇÃO DE CADA SETOR DE ATIVIDADE FACE AO CONSUMO TOTAL DE ENERGIA DESDE 1995 A 2012. ....	24
FIGURA 4.3-3 - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA DAS CENTRAIS ELÉTRICAS INSTALADA NA ILHA DAS FLORES, DESDE 1995 A 2012 .....	25
FIGURA 4.3-4 - EVOLUÇÃO ENERGIA ELÉTRICA FORNECIDA POR CADA CENTRAL PRODUTORA E PERDAS NO SISTEMA ELECTROPRODUTOR DE 1995 A 2012.....	26
FIGURA 4.3-5 - CONTRIBUIÇÃO ANUAL DAS FONTES DE ENERGIA PARA O CONSUMO TOTAL DA ILHA DAS FLORES DESDE 1995 A 2012. ....	27
FIGURA 4.3-6 - EVOLUÇÃO DO FATOR DE CAPACIDADE DAS CENTRAIS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ENTRE O PERÍODO DE 1995 E 2012. ....	28
FIGURA 4.3-7 – CONSUMO ANUAL DE COMBUSTÍVEL DIESEL (UNITÁRIO E QUANTIDADE TOTAL) REALIZADO NA ILHA DAS FLORES, CONSUMO DE DIESEL PREVISTO SE NÃO TIVESSE SIDO INSTALADO O VOLANTE DE INÉRCIA E POUAPANÇA DIESEL DEVIDO À INSTALAÇÃO DO VOLANTE DE INÉRCIA. A ESTIMATIVA DE POUAPANÇA OBTIDA E CONSUMO DIESEL PREVISTO FORAM CALCULADAS COM BASE NO CONSUMO MÉDIO UNITÁRIO VERIFICADO EM 2003 E 2004.....	29
FIGURA 4.3-8 - CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MENSAL FORNECIDA POR CADA CENTRAL PRODUTORA EM 2011. .	30
FIGURA 4.3-9 - PONTA MÁXIMA E VAZIO VERIFICADOS MENSALMENTE NO SISTEMA ELECTROPRODUTOR DAS FLORES NO ANO 2011. ....	30
FIGURA 4.3-10 - FATOR DE CAPACIDADE MENSAL DAS CENTRAIS PRODUTORAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM 2011. ....	31
FIGURA 4.3-11 - CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA POR CENTRAL AO LONGO DO MÊS DE JANEIRO DE 2011 (MÉDIAS DE 30 MIN). ....	31
FIGURA 4.3-12 - CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA POR CENTRAL AO LONGO DO MÊS DE ABRIL DE 2011 (MÉDIAS DE 30 MIN). ....	32
FIGURA 4.3-13 - CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA POR CENTRAL AO LONGO DO MÊS DE JULHO DE 2011 (MÉDIAS DE 30 MIN).....	32
FIGURA 4.3-14 - CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA POR CENTRAL AO LONGO DO MÊS DE OUTUBRO DE 2011 (MÉDIAS DE 30 MIN). ...	32
FIGURA 4.3-15 - DIAGRAMA DE CARGA PARA O DIA DE PONTA MÁXIMA ANUAL (09 DE FEVEREIRO DE 2011, QUARTA-FEIRA).....	33
FIGURA 4.3-16 - DIAGRAMA DE CARGA PARA O DIA DE VAZIO ANUAL (08 DE JULHO DE 2011, SEXTA-FEIRA) .....	33
FIGURA 5.1-1 - MAPA DO POTENCIAL EÓLICO DA ILHA DAS FLORES: DENSIDADE DE POTÊNCIA (50 M AST) COM A LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO DO VENTO NA ILHA (GREEN ISLANDS, 2014). .....	36
FIGURA 5.1-2 - DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NA ILHA DAS FLORES NO AEROGERADOR 1 (À ESQUERDA) E AEROGERADOR 2 DO PARQUE EÓLICO (À DIREITA) A 40 M (AST) PARA O ANO COMPLETO DE 2011 E RESPECTIVO AJUSTE PELA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL. ....	37
FIGURA 5.1-3 - ESTIMATIVA DA ENERGIA PRODUZIDA PELO AEROGERADOR INSTALADO NA ILHA DAS FLORES, ENERCON E-33 COM 330 kW DE POTÊNCIA NOMINAL, PARA A DISTRIBUIÇÃO DO VENTO REGISTADA NO ANEMÓMETRO 1 NO ANO COMPLETO DE 2011. ....	38
FIGURA 5.2-1 - COMPARAÇÃO POR CLASSE DE VENTO, ENTRE A ENERGIA PRODUZIDA PELOS AEROGERADORES DO PARQUE EÓLICO E A ENERGIA DISPONÍVEL PELOS MESMOS PARA A FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO VENTO OBSERVADO (PERÍODOS DE 30 MIN) NA ILHA EM 2011. O CÁLCULO DA ENERGIA DISPONÍVEL CONSIDERA UMA DISPONIBILIDADE DE OPERAÇÃO DOS AEROGERADORES DE 95 %. ....	39

FIGURA 5.2-2 - COMPARAÇÃO HORÁRIA, ENTRE A ENERGIA PRODUZIDA PELOS AEROGERADORES DO PARQUE EÓLICO E A ENERGIA DISPONÍVEL PELOS MESMOS PARA A FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO VENTO OBSERVADO (PERÍODOS DE 30 MIN) NA ILHA EM 2011. O CÁLCULO DA ENERGIA DISPONÍVEL CONSIDERA UMA DISPONIBILIDADE DE OPERAÇÃO DOS AEROGERADORES DE 95 %.	39
FIGURA 5.2-3 - DIAGRAMA DE CARGA E CONTRIBUIÇÃO DE CADA FONTE DE ENERGIA PARA O CONSUMO TOTAL NOS PRIMEIROS DIAS DO ANO DE 2011. CONTRIBUIÇÃO EÓLICA REJEITADA FACE AO CONSUMO TOTAL E À ENERGIA EÓLICA DISPONÍVEL. REGISTOS MÉDIOS DE PERÍODOS DE 30 MIN.	40
FIGURA 5.2-4 - DIAGRAMA DE CARGA VERIFICADO NO DIA 20 DE DEZEMBRO DE 2010 NA ILHA DAS FLORES (EURELECTRIC, 2012).	41
FIGURA 6.1-1 VARIABILIDADE INTRA-ANUAL ENTRE ANEMÓMETROS DO PARQUE EÓLICO E AEROPORTO A 10 M AST (COM A VELOCIDADE MEDIDA NOS ANEMÓMETROS DO PARQUE EÓLICO EXTRAPOLADA DE 40 M PARA 10 M AST).	45
FIGURA 6.1-2 CICLO DIURNO DA VELOCIDADE DO VENTO NO PARQUE EÓLICO E NO AEROPORTO NO ANO DE 2011 (H = 10 M AST).	45
FIGURA 6.1-3 CICLO DIURNO DA VELOCIDADE DO VENTO NO PARQUE EÓLICO E NO AEROPORTO EM JULHO DE 2011 (H = 10 M AST).	46
FIGURA 6.1-4 DIREÇÃO DO VENTO OBSERVADA NO AEROGERADOR 1 (BIN DE 1 DIA) E AEROPORTO (BIN 1 HORA) EM JANEIRO 2011 (H=10 M AST).	46
FIGURA 6.1-5 VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NO AEROGERADOR 1 E AEROPORTO EM JANEIRO DE 2011 (BIN DE 1 HORA E H = 10M AST).	47
FIGURA 6.1-6 DIREÇÃO DO VENTO OBSERVADA NO AEROGERADOR 1 (BIN 1 DIA) E AEROPORTO (BIN DE 1 HORA) EM JULHO DE 2011 (H= 10 M AST).	47
FIGURA 6.1-7 VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NO AEROGERADOR 1 E AEROPORTO EM JULHO DE 2011 (BIN DE 1 HORA E H = 10M AST).	47
FIGURA 6.1-8 DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NO ANEMÓMETRO DO AEROPORTO (PERÍODOS DE 1 H) NO ANO DE 2011.	48
FIGURA 6.1-9 DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NO ANEMÓMETRO 1 DO PARQUE EÓLICO (PERÍODOS DE 1 H) ANO DE 2011.	48
FIGURA 6.1-10 VARIABILIDADE INTRA-ANUAL OBSERVADA NO AEROPORTO E SIMULADO PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) A 10 M AST PARA O PERÍODO DE 9 ANOS. (01/01/2003 A 31/12/2011). O DESVIO REPRESENTA A DIFERENÇA RELATIVA DO PONTO FACE ÀS OBSERVAÇÕES NO AEROPORTO.	50
FIGURA 6.1-11 CICLO DIURNO DA VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NO AEROPORTO E SIMULADO PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) A 10 M AST PARA O PERÍODO DE 9 ANOS. (01/01/2003 A 31/12/2011). O DESVIO REPRESENTA A DIFERENÇA RELATIVA DO PONTO FACE ÀS OBSERVAÇÕES NO AEROPORTO.	50
FIGURA 6.1-12 DIREÇÃO DO VENTO OBSERVADO NO AEROPORTO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) (PERÍODO DE 1 HORA) EM JANEIRO DE 2011 (H = 10 M AST).	51
FIGURA 6.1-13 VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADO NO AEROPORTO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) (BIN DE 1 HORA) EM JANEIRO DE 2011 (H = 10 M AST).	51
FIGURA 6.1-14 DIREÇÃO DO VENTO OBSERVADA NO AEROPORTO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) (PERÍODO DE 1 HORA) EM JULHO DE 2011 (H = 10 M AST).	52
FIGURA 6.1-15 VELOCIDADE DO VENTO OBSERVADA NO AEROPORTO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) (PERÍODO DE 1 HORA) EM JULHO DE 2011 (H = 10 M AST).	52
FIGURA 6.1-16 ROSA DE VENTOS OBSERVADA NO AEROPORTO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO D E PONTO MAR) A 10 M AST PARA O PERÍODO DE 9 ANOS CONSECUTIVOS (01/01/2003 A 31/12/2011).	53
FIGURA 6.1-17 CORRELAÇÃO E DECLIVES DAS RETAS DE AJUSTE ENTRE OS PONTOS B E D DA MALHA DO MODELO WRF E AS OBSERVAÇÕES DO ANEMÓMETRO 1 DO PARQUE EÓLICO A 40 M AST NO ANO DE 2011 (PERÍODOS DE 1 HORA).	55
FIGURA 6.1-18 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL PARA O AEROGERADOR 1 DO PARQUE EÓLICO (À ESQUERDA) E PONTO B DO MODELO WRF (À DIREITA) A 40 M AST NO ANO DE 2011 (PERÍODO DE 1 HORA).	56
FIGURA 6.1-19 ROSA DE VENTOS OBSERVADA NO AEROGERADOR 1 DO PARQUE EÓLICO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO B E D) A 40 M AST PARA O ANO COMPLETO DE 2011.	56
FIGURA 6.1-20 RELAÇÃO ENTRE A DIREÇÃO MÉDIA DIÁRIA OBSERVADA NO PARQUE EÓLICO (AEROGERADOR 1) E MODELO WRF (PONTO B) POR CLASSE DE VELOCIDADE DO VENTO.	57
FIGURA 6.1-21 DIREÇÃO MÉDIA DIÁRIA DO VENTO OBSERVADA NO PARQUE EÓLICO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO B E D) EM JANEIRO DE 2011 (H = 40 M AST).	57

FIGURA 6.1-22 VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA DO VENTO OBSERVADO NO PARQUE EÓLICO E SIMULADO PELO MODELO WRF (PONTO B E D) EM JANEIRO DE 2011 (H = 40 M AST). .....	58
FIGURA 6.1-23 DIREÇÃO MÉDIA DIÁRIA DO VENTO OBSERVADA NO PARQUE EÓLICO E SIMULADA PELO MODELO WRF (PONTO B E D) EM JULHO DE 2011 (H = 40 M AST). .....	58
FIGURA 6.1-24 VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA DO VENTO OBSERVADA NO PARQUE EÓLICO E SIMULADO PELO MODELO WRF (PONTO B E D) EM JULHO DE 2011 (H = 40 M AST). .....	58
FIGURA 6.2-1 PRECIPITAÇÃO MENSAL OBSERVADA (MM) NO AEROPORTO E MODELADA PELO WRF NO PERÍODO DE 2003 A 2011. ....	63
FIGURA 6.2-2 HISTOGRAMA DE PRECIPITAÇÕES NO INTERVALO DE 1-50MM COM BINS DE 1MM (ESCALA LOGARITMICA). .....	66
FIGURA 6.2-3 QUANTIS DE PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA OBSERVADA E PREVISTA PELO MODELO WRF NO PERÍODO 2003-2011. ..	66

## Lista de siglas e abreviaturas

AA	Anticiclone dos Açores
AMIC	Assessing the Mid-Century Climate Transition
ANMM	Altitude acima do nível médio do mar
ARW	Advanced Research WRF
AST	Altitude acima da superfície do terreno
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLS	Camada Limite de Superfície
EDA	Electricidade dos Açores
ERA-Interim	ECMWF Re-Analysis Interim
GFS	Global Forecast System Model
IDL	Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
MMM	Mesoscale and Microscale Meteorology
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
PA	Proporção de acertos
POD	Probabilidade de deteção
RAF	Razão de falso alarme
REN	Redes Energéticas Nacionais
WRF	Weather Research and Forecasting Model
SREA	Serviço Regional de Estatística dos Açores
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecast
PEBV	Parque eólico da Boca da Vereda
CTAF	Central Termoelétrica de Além Fazenda
CHAF	Central hídrica de Além Fazenda
MAE	Mean Absolute Error

## **Agradecimentos**

Os meus agradecimentos ao orientador Professor Pedro Miranda pelo seu apoio, disponibilidade e por me ter ajudado nos momentos mais complicados.

Agradeço ao Professor Pedro Soares pela sua disponibilidade, e pelas suas explicações práticas e pertinentes.

Um agradecimento especial ao Doutor Ricardo Tomé por me disponibilizar os dados das simulações do modelo WRF e por me ter ajudado com os seus vastos conhecimentos na área.

Agradeço a todos os meus amigos mais próximos, que foram muito importantes no decorrer da minha dissertação pelos excelentes momentos descontraídos e boa disposição.

Finalmente agradeço o apoio incondicional dos meus pais e irmã sempre presentes ao longo de todo o meu percurso académico.

## Resumo

A ilha das Flores apresenta-se como um excelente caso de estudo para a introdução de um cenário de elevado ou total consumo de energia elétrica assegurado por fontes renováveis. Embora ainda longe desse cenário, o seu elevado potencial hídrico e eólico, tem vindo a ser parcialmente aproveitado, sendo que na maior parte dos anos da última década contribuíram com cerca de 50 % do consumo de energia elétrica da ilha. No entanto, existem diversas limitações que impedem um maior aproveitamento renovável na ilha, as quais estão relacionadas com, a sua variabilidade, ausência de garantia de potência, fraca capacidade de regulação para ajustar, em cada instante no tempo, a produção ao consumo e, ausência de armazenamento de energia para períodos de excedente ou fraca produção.

Um modo para minimizar essas limitações e simultaneamente permitir o aumento da penetração renovável, é o uso de ferramentas habilitadas a uma boa previsão meteorológica, neste caso, da precipitação e do vento. Essas ferramentas designam-se por modelos numéricos de previsão atmosférica, entre os quais o presente modelo em estudo, o Weather Research and Forecasting (WRF).

O estudo de validação deste modelo face às observações na estação do aeroporto entre 2003 a 2011, revelou uma tendência de subavaliação da precipitação no Verão e Outono, e sobreavaliação nas outras estações do ano. No caso de eventos de precipitação extrema, tende a sobreavaliar tanto o número de eventos, como as precipitações dos quartis mais elevados. No que respeita ao vento, verifica-se que a capacidade de previsão do modelo é variável ao longo do ano, com melhores previsões no Inverno e muito fracas no Verão, sendo que a sua principal condicionante limitativa de melhores resultados pode estar na fraca representação do terreno.

Palavras chave: modelo WRF, previsão da precipitação, previsão do vento, renováveis na ilha das Flores.

## **Abstract**

As a scenario of high energy consumption from renewable energy sources, Flores Island is an excellent case study. Although still far from this ideal scenario, their potential has been partially explored, and in the last decade the renewable energy production takes 50% of the total electric energy demand. However, there are several limitations that reduce the use of these energy sources in the island, which are related to, variability, power output guaranty, weak capacity to adjust the production and consumption, lack of energy storage for periods of low or excess energy production.

A way to reduce the limitations listed above and simultaneously allow the increase of renewable energy sources, is the use of tools for a correct weather forecast, in this specific case, wind and rainfall. These tools are known as numerical model to atmospheric forecast, including the present model, Weather Research and Forecasting (WRF).

The validation study for WRF compared with the observations taken in airport weather station between 2003 and 2011, proved this tends to underestimation of precipitation in summer and autumn and overestimate to the other seasons. In extreme rainfall events, the model overestimates the number of occurrences and the highest rainfall quartiles. For the wind, the prediction model, WRF, varies during the year, presenting more accurate values for the winter and less accurate to the summer, result of the unrepresentative terrain details.

Key words: WRF model, rain forecast, wind forecast, renewables in Flores Island.

## 1 Introdução

### 1.1 Enquadramento da dissertação

Com a crescente preocupação com a redução da dependência dos combustíveis fósseis, devido às suas reservas finitas e principalmente pela urgência de produção de energia cada vez mais limpa, torna-se natural a importância que a integração das energias renováveis representa na alteração do paradigma energético. Nesse contexto, Portugal tem sido um dos países que mais tem feito para alterar o panorama da produção de energia, diminuindo a produção de energia convencional e aumentando a produção renovável.

A ilha das Flores, a ilha mais Ocidental do arquipélago dos Açores, apresenta um potencial elevado em termos de aproveitamento eólico e hídrico, tendo já tido períodos de horas consecutivas com produção de energia (elétrica) 100% renovável. Para aumentar a fração renovável na produção total de energia, em 2014 espera-se ter construída a nova central hídrica da Fajã Grande, a qual permitirá, a partir de 2014 ter 80% de energia elétrica através de fontes renováveis (Azores, 2014).

Situada numa zona do Atlântico Norte, onde evoluem com regularidade massas de ar instáveis, a ilha das Flores apresenta uma precipitação anual elevada, mesmo ao nível do mar, com 1700 mm de precipitação média anual no período 1970-1990 na estação do aeroporto da ilha das Flores. A ilha apresenta altitudes elevadas no centro da ilha que, associadas a declives muito acentuados ou mesmo escarpados, induz através de efeitos orográficos, a precipitações muito abundantes na zona central da ilha. Trata-se de uma ilha com elevada disponibilidade hídrica, onde se encontram grandes reservas hídricas superficiais caracterizadas por lagoas em zonas de cotas elevadas, as quais intervêm no equilíbrio hídrico da ilha (Azevedo, 1995).

Para além da ilha se localizar numa zona com chuvas abundantes e regulares, apresenta também ventos muito intensos, em especial nos meses de Inverno, sendo que nos meses de Verão se tornam bastante mais fracos. Por essa razão, está um parque eólico instalado na ilha a mais de 600 m de altitude, o qual usufrui de um elevado potencial eólico, principalmente nos meses de Inverno.

É no período de Verão entre Junho e Agosto que a ilha apresenta menor quantidade de precipitação e intensidade do vento, o que em termos do objetivo de aproveitamento renovável como principal fonte de produção de energia elétrica, se torna uma dificuldade acrescida, problema que vai ser analisado neste trabalho.

Com a integração de renováveis, principalmente energia eólica, um dos problemas para a gestão do sistema electroprodutor é o facto de estas não oferecerem garantia de produção e de potência, necessitando de outras fontes de energia que o garantam ou sistemas de armazenamento de energia. A variabilidade na produção de energia destas fontes, especialmente eólica, dificulta a gestão eficiente do ajuste do sistema electroprodutor, isto é, o ajuste permanente da produção ao consumo de energia. Nesse sentido, os modelos de previsão atmosférica têm uma importância relevante, pois permitem prever produção de energia para curto e médio prazos.

Relativamente à previsão de curto prazo, estas indicam as condições de vento e precipitação nas horas e/ou dias seguintes, para que o gestor do sistema possa tomar as decisões que conduzam à mais eficiente adequação da produção às necessidades de energia. As estimativas de médio prazo são úteis no gerenciamento dos recursos de energia, visando antever os défices que irão surgir na produção renovável, ou seja, estudar a tendência de possíveis dias de baixa ou excessiva produção renovável.

O modelo de mesoscala Weather Research and Forecasting (WRF) com altas resoluções, consegue identificar efeitos locais de forma satisfatória, como o efeito da orografia na precipitação e as brisas térmicas. O modelo WRF utilizado neste trabalho pertence à última geração de modelo numérico de previsão do tempo, que não só é utilizado para as previsões do tempo de mesoscala como também para a investigação de fenómenos atmosféricos de mesoscala.

A confirmação de que um certo modelo de mesoscala se adequa à área de estudo, isto é, a sua validação, será de fundamental importância, não só para a previsão e gestão do recurso renovável como também para estudar e prevenir a população de eventuais catástrofes naturais, por exemplo. Este trabalho pretende estudar e avaliar as previsões do modelo WRF face às condições atmosféricas que realmente se observaram, nomeadamente o vento e a precipitação.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

Este trabalho tem como objetivo fundamental avaliar a capacidade de previsão do modelo numérico WRF para as variáveis meteorológicas, vento e precipitação na ilha das Flores, com recurso à observação das mesmas. Esta validação terá como finalidade habilitar o uso do modelo WRF como uma ferramenta de apoio a uma gestão mais eficiente da produção renovável através de uma previsão segura dos recursos eólico e hídrico e, por outro lado, permitir também a possibilidade de aumento da integração de energia renovável no sistema electroprodutor.

Por esses motivos surgem também os seguintes objetivos complementares: caracterização do sistema electroprodutor da ilha desde o consumo à produção de energia e, análise do aproveitamento que tem sido dado à energia eólica na produção de energia elétrica.

## **1.3 Organização da dissertação**

No segundo capítulo é apresentada uma breve descrição do escoamento atmosférico, com especial enfoque para o caso de estudo da ilha das Flores, remetendo para os efeitos locais no comportamento deste.

No terceiro capítulo encontra-se uma breve descrição de como são caracterizados os modelos de previsão atmosférica e como podem ser validados para que se possam tornar numa ferramenta poderosa na previsão meteorológica. Segue também a descrição do modelo WRF e os métodos de validação utilizados. No quarto capítulo é apresentada uma caracterização da ilha das Flores respeitante ao interesse deste trabalho, isto é, desde a sua geomorfologia e clima por exemplo, até ao seu sistema electroprodutor.

No quinto capítulo é realizada uma caracterização à forma como o recurso eólico tem sido aproveitado, bem como o seu impacto no sistema electroprodutor e futuros planos de melhoria do seu aproveitamento.

No sexto capítulo surgem os resultados fundamentais relativamente à validade do modelo WRF para as variáveis meteorológicas em estudo, precipitação e vento, na região da ilha das Flores. Aqui são apresentadas as comparações entre as observações dessas variáveis e as previsões do modelo atmosférico.

O sétimo capítulo resume as conclusões obtidas e as propostas para trabalhos futuros daí decorrentes.

## 2 O escoamento atmosférico

As condições meteorológicas num certo local são afetadas por sistemas de larga escala, influenciando extensas áreas e apresentando um longo tempo de vida. Estes sistemas são as depressões, superfícies frontais e anticiclones por exemplo. Em menores escalas, existem os sistemas de mesoescala e microescala, com tempos de vida menores, sendo fortemente afetados pela sua interação com as características do solo. No caso dos sistemas de microescala, o seu tempo de vida pode ser de apenas alguns instantes e influenciando poucas dezenas/centenas de metros como é o caso dos tornados.

De seguida apresenta-se uma breve descrição dos sistemas de larga escala e circulações regionais mais relevantes, como são o caso das brisas.

### 2.1 Depressões e Anticiclones

O efeito do atrito faz-se sentir fundamentalmente na baixa Troposfera e implica que junto à superfície se verifiquem a convergência horizontal de ar e movimento ascendente nas Depressões, e a divergência horizontal de ar e movimento descendente nos anticiclones. Este movimento vertical na atmosfera é, em média, muito menos intenso que o movimento horizontal (na razão aproximada de 1/100). Estes fenómenos meteorológicos explicam as condições frequentes de céu limpo ou pouco nublado nos anticiclones e nebulosidade ou precipitação nas depressões.

O anticiclone que apresenta maior influência nas condições meteorológicas em Portugal é o anticiclone dos Açores (AA), sendo a principal razão para os períodos secos em Portugal Continental, e das fortes nortadas no Verão devido ao seu posicionamento a Oeste/Noroeste do continente. Como o seu nome indica, representa extrema influencia nas condições meteorológicas do arquipélago dos Açores, pelo seu posicionamento mais para a Norte (tempo mais seco no arquipélago) ou mais para a Sul (o arquipélago passa a sofrer maior influência das fortes depressões localizadas no Atlântico Norte).

### 2.2 Circulações locais e regionais

O clima local e regional para além de sofrer a influência de sistemas sinóticos, como as depressões e anticiclones, também é afetado por sistemas de menor escala, como são os sistemas de mesoescala e microescala. Estes sistemas de escalas espaciais mais reduzidas e tempo de vida menores fazem-se sentir junto da superfície terrestre, sendo fortemente afetados pela sua interação com o solo. Essa interação faz-se sentir sob diversas formas e envolve, em particular, a resposta a variações da temperatura da superfície, efeitos do atrito e topografia do terreno.

Em algumas regiões, induzidas por diferenças de temperatura entre superfícies próximas, originam uma circulação organizada, capaz de afetar o clima local ou mesmo regional, designadas por brisas.

#### 2.2.1 Brisa marítima e brisa terrestre

Um dos exemplos mais conhecidos de brisa é a brisa marítima, a qual é origem da radiação solar que aquece a camada superficial do solo. A mesma radiação solar incide no oceano, mas devido à grande capacidade calorífica da água, a sua superfície aquece muito lentamente, impedindo a ocorrência de grandes oscilações térmicas.

Desta forma se o gradiente de temperaturas for significativo, é desencadeada uma circulação direta: o ar quente continental, menos denso, sobe e o ar mais fresco do oceano circula de forma a substituí-lo. Esta circulação é fechada porque implica uma corrente ascendente sobre o continente e uma corrente descendente sobre o oceano. Este tipo de circulação chama-se brisa marítima e leva a rápidos arrefecimentos da temperatura do ar das regiões costeiras quando é desencadeada esta corrente. O fenómeno de brisas normalmente é local, ou regional afetando apenas algumas dezenas de km da região costeira, levando a grandes diferenças da temperatura do ar nas regiões costeiras quando comparadas com as regiões mais afastadas da costa em dias quentes anticiclónicos.

À noite o solo arrefece rapidamente, tornando-se por vezes, bastante mais frio que a superfície do oceano, onde a sua temperatura praticamente se mantém inalterada. Atingindo um suficiente gradiente de temperaturas, é desencadeado o mecanismo de brisa terrestre, que funciona em sentido inverso à brisa marítima.

### **2.2.2 Brisa de vale e brisa de montanha**

A topografia também é responsável por criar um aquecimento diferencial da superfície e dar origem a circulações locais com inversão do sentido da circulação entre a situação diurna e noturna.

Tal como no caso da brisa marítima/terrestre, a superfície do solo funciona como fonte de aquecimento durante o dia e como fonte de arrefecimento durante a noite. A diferença é que agora o diferencial de temperaturas que desbloqueia a brisa acontece entre a superfície do solo e a atmosfera circundante, ao contrário da brisa marítima/terrestre onde acontece a superfície do solo e a superfície do mar.

A um dado nível, a atmosfera sobre o vale encontra-se longe do solo, sendo pouco afetada pelo ciclo diurno. Enquanto isso, na zona montanhosa, a esse mesmo nível a atmosfera está em contacto direto com a superfície, trocando calor. Assim durante o dia, a montanha funciona como fonte de calor, dando origem a uma circulação de ar mais fresco vinda do vale, a brisa de vale. Durante a noite, a montanha funciona como fonte de arrefecimento. Esse gradiente de temperaturas, pode induzir a uma corrente de ar frio da montanha para o vale, ao longo da encosta, a brisa de montanha.

O vento junto da superfície na circulação de brisa de montanha é designado por vento catabático, podendo atingir velocidades muito elevadas. O vento de superfície associado à brisa de vale é designado por vento anabático (Miranda, 2009).

## **2.3 Camada Limite Atmosférica**

O atrito existente entre a superfície terrestre e o ar em movimento origina um efeito de retardamento ao escoamento. Dado que a força de atrito decresce com a distância ao solo, esta é máxima junto à superfície e torna-se desprezável para alturas suficientemente elevadas. Esta zona onde se verifica uma variação da velocidade do vento em altura designa-se como camada limite atmosférica (CLA), sendo a sua espessura normalmente representada por  $\delta$ . Acima da CLA diz-se, normalmente, que a atmosfera é livre, não sendo afetada pela superfície do solo. A espessura da CLA situa-se geralmente próxima de 1 km, mas pode variar entre algumas dezenas de metros e poucas centenas de kms, dependendo da rugosidade da superfície (e.g. mar, terreno rural ou urbano) e da estabilidade atmosférica ou estratificação térmica da atmosfera.

### 2.3.1 Divisão vertical da CLA

A CLA pode ser dividida verticalmente em três partes distintas: camada viscosa ou laminar, camada de Prandtl ou camada limite de superfície (CLS) e camada de Ekman, representadas na figura 2.3-1.

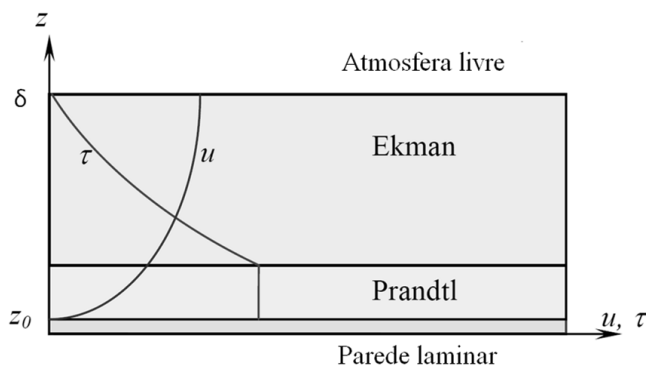


Figura 2.3-1 - Subdivisão da Camada Limite Atmosférica. Ilustração conceptual da distribuição vertical da velocidade horizontal e tensão de corte na camada limite (adaptado de Zhang, 2009).

### 2.3.2 Perfil logarítmico

Na camada limite de superfície e na condição de atmosfera neutra, o perfil da velocidade do vento pode ser descrito pelo perfil logarítmico da velocidade do vento:

$$u = \frac{u_{*0}}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.1)$$

Onde  $u$  é a velocidade média do vento à altura  $z$ ,  $u_{*0}$  é a velocidade de atrito superficial,  $k$  é a constante de von Karman ( $\approx 0,4$ ) e  $z_0$  é o comprimento de rugosidade da superfície.

A velocidade de atrito depende da intensidade do vento na atmosfera livre e da estabilidade atmosférica. O comprimento de rugosidade depende da natureza da superfície, sendo muito pequeno em superfícies livres (mínimo para água calma) e elevado em Florestas abertas ou em cidades (Tabela 2.3-1).

Tabela 2.3-1 - Classificação de rugosidades proposta Davenport e atualizada por Wieringa (1992)

Tipo de superfície	$z_0$ [cm]
Superfície do mar*	0,02
Deserto plano; cimento	0,02 - 0,05
Campo de neve plano	0,01 - 0,07
Erva cortada	0,1 - 1
Erva, estepe	1 - 4
Campo arado	2 - 3
Erva alta	4 - 10
Campo de cereal	10 - 30
Campo de arbustos	35 - 45
Pinhal	80 - 160
Floresta tropical	170 - 230
Casas dispersas	20 - 40
Subúrbios densos mas "baixos"	80 - 120
Cidade	70 - 120
Centro de cidade (edifícios altos)	200 - 300

\*Depende da forma e dimensão das ondas

### 2.3.3 Lei de Potências

É também possível aproximar empiricamente o perfil de velocidades do vento na CLA pela lei de potências (eq. 2.2), a qual é frequentemente utilizada como ajuste ao perfil vertical da velocidade horizontal para toda a altura da CLA uma vez que a lei logarítmica apenas é válida na CLS:

$$\frac{U(z)}{U_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

Onde  $U_{ref}$  é a velocidade de referência a uma altura de referência  $z_{ref}$ ,  $U(z)$  é a velocidade correspondente à nova altura  $z$  e  $\alpha$  um expoente que depende da rugosidade do terreno.

Para obter  $\alpha$  como função do comprimento de rugosidade da superfície pode recorrer-se à seguinte equação (Manwell *et al.*, 2002):

$$\alpha = 0,096 \log_{10} z_0 + 0,016 (\log_{10} z_0)^2 + 0,24 \quad (2.3)$$

para  $0,001 < z_0 < 10$  m.

A utilização da lei de potências tem-se justificado pelo ajuste adequado a inúmeros perfis verticais da velocidade horizontal, quer resultem de observações do vento sob condições de atmosfera instável, neutra ou estável.

Tanto a lei de potência como a lei logarítmica são boas aproximações ao perfil vertical do vento horizontal em terrenos planos e homogêneos, embora sujeitas à incerteza da natureza complexa dos escoamentos turbulentos e pela dificuldade em caracterizar a superfície (Manwell *et al.*, 2002).

### 2.3.4 Caracterização da energia do vento

A expressão que determina a potência disponível do vento por unidade de área e de tempo, deriva da equação da energia cinética e resulta em: (Manwell *et al.*, 2002):

$$P = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (2.4)$$

Onde  $U$  é a velocidade instantânea do vento e  $\rho$  a massa volúmica do ar.

No entanto, para que se possa determinar a energia disponível num determinado período de tempo (e.g. 1 ano), recorre-se a uma função de distribuição do vento, particularmente uma das que melhor se ajusta à frequência de ocorrência das classes de velocidade do vento, a lei de distribuição de Weibull, expressa matematicamente por (Manwell *et al.*, 2002):

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{A} \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right) \quad (2.5)$$

Onde,  $f(\bar{u})$  representa a probabilidade de ocorrência da velocidade média do vento  $\bar{u}$ ,  $A$  e  $k$  os parâmetros de escala (m/s) e de forma (adimensional), respetivamente.

No caso da distribuição de Weibull, a velocidade média do vento vem dada como:

$$\bar{u} = \int_0^{+\infty} p(u) du = A \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2.6)$$

Onde,  $\Gamma$  é a função Gama definida como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad \text{com } x > 0 \quad (2.7)$$

O fluxo de potência incidente é então definido como:

$$E_p = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.8)$$

Com recurso à função de distribuição de Weibull (eq. 2.12) resultante de observações do vento num dado local e, à curva de potência do aerogerador selecionada  $P_{aer}(u)$  pode determinar-se a energia produzida  $E_{aer}$  num dado período de tempo integrando nesse intervalo de tempo essas funções:

$$E_{aer} = \int_0^{\infty} f(\bar{u}) P_{aer}(u) du dt \quad (2.9)$$

Por fim, para que seja possível uma interpretação qualitativa e comparativa da quantidade de energia produzida num dado período do ano, utilizam-se indicadores de produção energética como fator de capacidade, o qual para 1 ano é definido como:

$$FC = \frac{E_{aer}}{P_n \times h_{ano}} \quad (2.10)$$

Onde,  $P_n$  é a potência nominal do aerogerador e  $h_{ano}$  o número de horas do ano (8760).

### **3 Modelos de previsão**

No presente capítulo, faz-se uma breve descrição dos modelos numéricos globais e regionais. Neste trabalho o Weather Research and Forecasting Model (WRF) foi utilizado para fazer a regionalização das simulações globais, sendo descrito e posteriormente definidas as condições impostas ao modelo WRF no caso de estudo.

#### **3.1 Os modelos numéricos**

A previsão numérica do tempo é baseada na integração numérica das equações fundamentais da Física que regem o sistema climático, e partem de condições iniciais e condições de fronteira especificadas. As condições iniciais são o estado, num dado instante, das variáveis meteorológicas fundamentais: pressão, temperatura, humidade e velocidade e direção do vento à superfície e em altitude numa situação inicial de referência. As condições de fronteira derivam do conhecimento da superfície (humidade do solo e a sua ocupação) e da radiação incidente no topo da atmosfera.

As equações da física são não lineares e impossíveis de resolver de forma exata. Como consequência os métodos numéricos obtêm soluções aproximadas e apresentam simplificações por forma a tornarem-se utilizáveis. Pequenos erros nas condições iniciais são amplificados à medida que a simulação avança no tempo, o que conduz ao aumento do erro do modelo em relação às condições reais da atmosfera ao longo da previsão.

Os modelos de previsão numérica das condições meteorológicas podem ser classificadas segundo a sua resolução em modelos globais, modelos regionais ou de mesoscala.

##### **3.1.1 Modelos globais**

No modelo global, o domínio horizontal cobre toda a Terra permitindo identificar fenómenos meteorológicos de larga escala ou sinópticos, no entanto actualmente os modelos globais com maiores resoluções também permitem uma razoável representação de efeitos locais. Os modelos globais utilizam frequentemente os métodos espectrais para as dimensões horizontais e o método das diferenças finitas para a dimensão vertical. Um dos modelos globais mais aceites na previsão meteorológica é o Global Forecast System (GFS), onde a sua resolução horizontal máxima é de 28 km, permitindo para além de identificar fenómenos meteorológicos de larga escala ou sinópticos, identificar alguns fenómenos locais (NOAA, 2014).

##### **3.1.2 Modelos regionais ou de mesoscala**

Para identificar fenómenos regionais devem-se utilizar modelos regionais com uma resolução superior. Estes são os modelos de mesoscala, os quais permitem representar de forma mais eficaz os fenómenos meteorológicos com escalas espaciais e temporais menores.

Os modelos de mesoscala estão talhados para a previsão meteorológica de pequenas escalas, sendo já capazes de produzir resultados para resoluções inferiores a 1km, tipicamente necessárias no estudo do regime local de ventos no contexto da implementação de parques eólicos. Mas, a estas pequenas escalas, este tipo de modelos demonstra algumas limitações e não são capazes de realizar uma discretização suficientemente detalhada para a caracterização do regime local de ventos numa dada zona, sendo que as suas simulações para pequenas escalas devem ser encaradas, não como um produto final, mas como uma importante base de partida para o arranque de um projeto eólico.

Os modelos regionais usam o método das diferenças finitas para as três dimensões e podem usar grelhas mais finas aninhadas na grelha original, permitindo analisar mais detalhadamente uma região de interesse inserida na área original.

Estes modelos de mesoscala utilizam os resultados de um modelo global para obter as condições iniciais e de fronteira do domínio regional sobre o qual incide a sua previsão, eventualmente complementada por observações de natureza local.

É muito importante que as previsões dos modelos regionais tenham o máximo rigor e fiabilidade, para que se tornem numa ferramenta indispensável à gestão eficiente dos recursos renováveis explorados numa região, neste caso de estudo em particular, o vento e a precipitação.

Uma das mais importantes e difíceis tarefas na modelação numérica é a validação dos resultados do modelo. A validação procura aumentar a credibilidade do modelo, produzindo um resultado que represente o mais próximo possível, o comportamento do sistema real.

A validação pode ser vista segundo várias perspetivas que muitas vezes se complementam, como por exemplo:

- 1- Comparação com resultados de outros modelos numéricos;
- 2- Comparação dos resultados de formulações alternativas dentro do mesmo modelo;
- 3- Comparação das previsões do modelo com as observações;

### **3.1.3 Modelo WRF**

O modelo de mesoscala Weather Research and Forecasting (WRF) pertence à última geração de modelo numérico de previsão do tempo que serve não só para as previsões do tempo em mesoscala como para a investigação de fenómenos atmosféricos de mesoscala. Este modelo de Mesoscala é atualmente utilizado por inúmeras instituições por todo o mundo, e a sua versatilidade permite a personalização para uma vasta gama de estudos. Oferece uma diversidade de opções físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados.

O modelo é útil tanto para situações atmosféricas idealizadas como para situações reais, em escalas horizontais que podem ir desde alguns metros (microescala) até milhares de quilómetros (macroescala).

Os esforços no sentido de desenvolver o WRF foram uma colaboração entre as seguintes entidades: a Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM), National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL), pertencentes à National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a Air Force Weather Agency (AFWA), e o Naval Research Laboratory(NRL), tutelados pelo US Departement of Defense, o Center of Analysis and Prediction of Storms (CAPS), sediado na Universidade de Oklahoma, e a Federal Aviation Administration (FAA) (Skamarock *et al.*, 2008).

As componentes principais do WRF são representadas na figura 3.1-1.

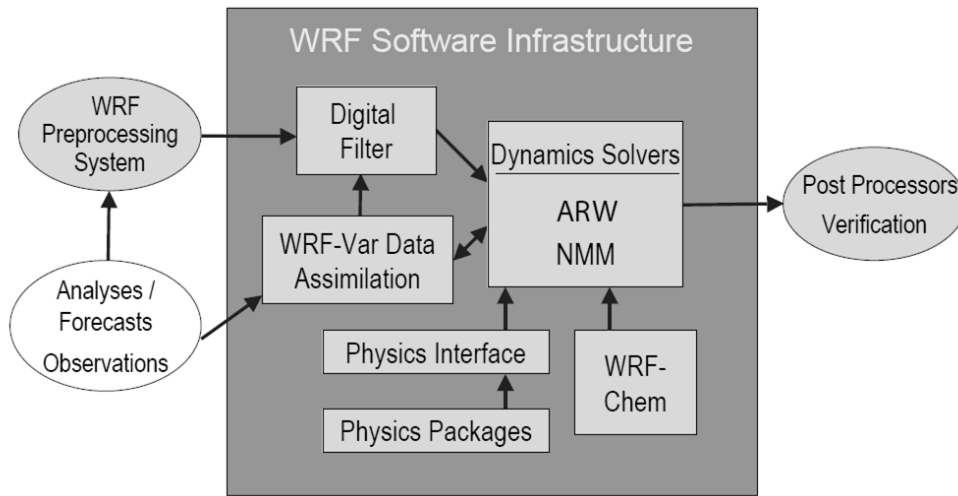


Figura 3.1-1 - Componentes do sistema WRF (Shamarock, 2008).

O cerne (core) de qualquer modelo numérico de simulação hidrodinâmico consiste na formulação das equações dinâmicas apropriadas juntamente com as técnicas empregues na resolução das mesmas. O WRF possui dois núcleos dinâmicos de processamento: ARW (Advanced Research WRF) e NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). O NMM foi desenvolvido pelo NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA, o ARW foi desenvolvido a partir do MM5 e é mantido pelo NCAR.

O domínio de simulação do WRF é o espaço físico representado no espaço de cálculo por uma malha de cálculo tridimensional. No WRF, a discretização espacial é feita recorrendo a malhas desfasadas no espaço do tipo Arakawa C, cujas componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  do vento são resolvidas nos pontos conforme indicados na figura 3.1-2.

As variáveis termodinâmicas são definidas no centro da malha, enquanto as componentes do vento são definidas nos limites da malha.

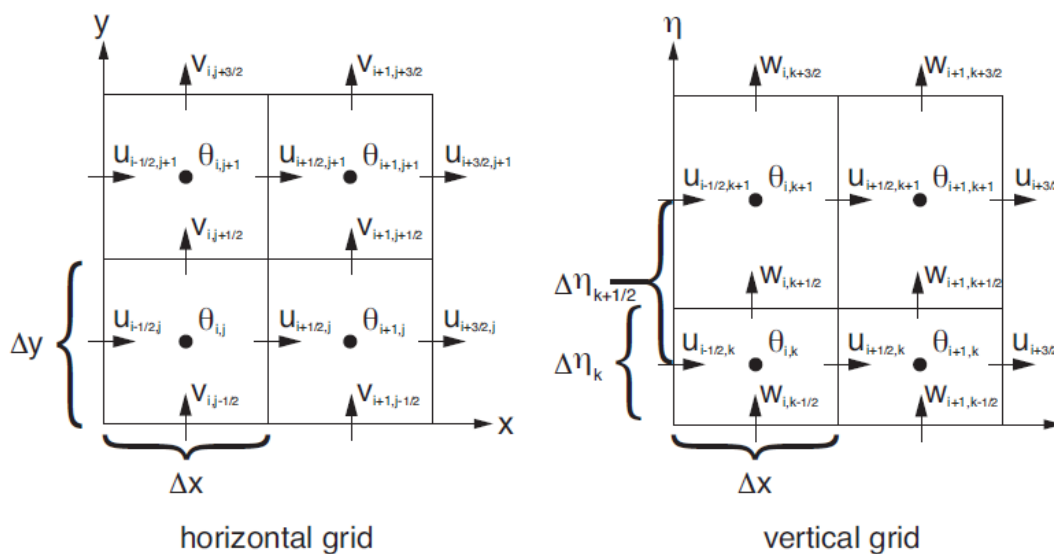


Figura 3.1-2 - Grade alternada do tipo C de Arakawa, horizontal (a) e vertical (b) (Skamarock *et al.*, 2008).

O modelo WRF utiliza como coordenadas verticais as coordenadas  $\eta$ . As coordenadas  $\eta$  permitem que a camada inferior da atmosfera do modelo seja representada, para cada ponto da malha, por um degrau horizontal. Estas coordenadas são definidas pela expressão:

$$\eta = \frac{(ph - pht)}{phs - pht} \quad (3.1)$$

Onde  $ph$  é a componente hidrostática da pressão,  $phs$  refere-se a valores ao longo da superfície e  $pht$  a valores no topo da atmosfera do modelo. A fronteira superior é uma superfície de pressão constante.

O WRF, necessita de condições de fronteira laterais que representem, dentro do possível, o estado real da atmosfera vizinha ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Essas condições são fornecidas por um modelo de previsão numérica do tempo em escala global, que considera toda o Globo. A qualidade de previsão do WRF pode ser melhorada por um sistema de assimilação de dados observados que permite otimizar o cálculo do estado inicial. A escolha da resolução espacial mais adequada para a representação dos fenómenos meteorológicos depende essencialmente da capacidade computacional disponível e da escala que se deseja simular. Quando se quer analisar mais detalhadamente uma região de interesse que está inserida na grade original utilizada, comumente conotada como domínio pai (parent domain), é possível fazer um aninhamento de outro(s) domínio(s) dentro dele. A vantagem em utilizar domínios aninhados é possibilitar a integração em uma área com alta resolução espacial.

## 3.2 Simulações e métodos de validação

As simulações utilizadas neste trabalho tiveram como recurso o modelo WRF e foram disponibilizadas pelo doutor Ricardo Tomé, o qual na sua dissertação para o grau de doutoramento utilizou uma determinada metodologia para a regionalização de campos globais para resoluções suficientemente finas, que permitissem representar em parte os efeitos locais das ilhas da Madeira e Açores, bem como a sua complexidade topográfica (Tomé, 2013). O trabalho referido integra-se no projecto Assessing the Mid-Century Climate Transition (AMIC), que tem como objectivo contribuir para o quinto relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) com um conjunto significativo de resultados, que se esperam melhores comparando com os atuais, porque irão integrar resoluções melhores que no relatório anterior do IPCC.

A regionalização do clima para a ilha das Flores, inclui uma simulação de controlo que utiliza condições de fronteira da ERA-Interim para o período entre 1989 a 2011. A ERA-Interim representa a última geração de reanálise global atmosférica, que foi desenvolvida para substituir a reanálise ERA-40 do European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF). Os dados de entrada na reanálise são discutidos em Dee *et al.*, (2011).

### 3.2.1 Definição das condições impostas ao modelo WRF

Na regionalização das simulações climáticas foi utilizado o modelo WRF (versão 3.2.1). No presente estudo, o modelo foi configurado com duas malhas aninhadas, uma com 24 km e a segunda com 6 km de resolução horizontal.

De forma a mitigar a dificuldade dos modelos regionais em representar as características de larga escala que são forçadas nas suas fronteiras (Jones *et al.*, 1995), foi aplicado *nudging* (Staufe e Seaman, 1990) no domínio exterior. O *nudging* é aplicado uma vez por dia acima do topo da camada limite planetária. Todos os domínios utilizam 50 níveis verticais que estão aproximadamente espaçados em 20 metros no interior da cada camada limite planetária, sendo o topo desta no modelo localizada aos 5 hPa.

As parametrizações físicas no modelo seguem as utilizadas no estudo efetuado para Portugal Continental por Soares *et al.* (2012). A microfísica é representada pelo esquema WSM6 (Hong e Lim, 2006), a camada limite planetária utiliza o esquema de Mellor-Yamada-Janjic (Janjic, 2001) e a convecção segue o esquema de Betts-Miller-Janjic (Betts, 1986; Betts e Miller, 1986; Janjic, 1990, 1994, 2000). O solo é representado pelo Unified Noah land-surface model (Chen e Dudhia, 2001). A radiação de grande e pequeno comprimento de onda segue o esquema CAM (Collins *et al.*, 2004; Tomé, 2013).

O método de validação do modelo WRF no caso de estudo baseou-se na comparação entre dados observados e modelados no ponto mais próximo da grelha, relativamente às variáveis meteorológicas, vento e precipitação. A resolução espacial e temporal para o caso de estudo da ilha foi de 6 km e horária, respectivamente.

### 3.2.2 Métodos de validação e índices estatísticos utilizados

O mecanismo utilizado neste trabalho para avaliar o desempenho do modelo WRF é a comparação das estimativas do mesmo com os dados observados utilizando-se alguns índices estatísticos, seguidamente descritos:

✓ *Bias Error* (BE) ou Viés (eq. 3.2) é definido como a média das diferenças entre as previsões do modelo e as observações. Averigua o enviesamento dos dados, ou seja, se for positivo indica que os valores simulados se encontram sobrestimados face aos observados e se for negativo encontram-se subestimados. O Viés representa o desvio das simulações em termos médios, mas não é um bom indicador para verificar o acerto dos valores simulados em relação aos observados. Um valor baixo de viés não significa acerto do modelo, por exemplo, se existir equilíbrio entre os casos em que o modelo sobrestima os valores, em relação aos valores subestimados. Nesse caso ameniza-se o erro das diferenças, mas não se conclui sobre a assertividade do modelo.

$$BE(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o) \quad (3.2)$$

Onde  $N$  é o número total de observações da variável  $x$ . Os índices  $o$  e  $p$  representam a variável  $i$  observada e prevista pelo modelo, respetivamente.

✓ *Mean absolute error* (MAE), ou erro médio absoluto (eq. 3.3), é definido como a média das diferenças absolutas entre as previsões e as observações. Quanto menor o MAE, maior a semelhança entre as séries observadas e modeladas.

Se o Viés for igual ao MAE, significa que o modelo quando erra, é sempre no mesmo sentido, sobrestimando (ou subestimando) sempre os valores.

$$MAE(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i^p - x_i^o| \quad (3.3)$$

✓ *Rot mean square error* (RMSE) ou a raiz do erro médio quadrático (eq. 3.4) define-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre as previsões e as observações. Esta é muito sensível aos grandes erros e quanto mais próximo de 0 melhor são os resultados do modelo. Valores elevados de RMSE indicam que há grandes discrepâncias entre os valores previstos e os valores observados. Se o viés for baixo, o RMSE indica a dispersão dos resultados do modelo em relação às previsões.

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o)^2} \quad (3.4)$$

O coeficiente de correlação de *Pearson* identificado como  $r$  (eq. 3.5) mede o grau de correlação entre os valores observados e os valores previstos. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1, sendo que  $r = 1$  significa uma correlação perfeita e positiva entre duas variáveis, e se  $r = -1$  significa uma correlação negativa e perfeita entre as duas variáveis, ou seja, quando uma aumenta, a outra diminuirá. No caso de  $r = 0$ , não há dependência linear entre as duas variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.5)$$

Onde:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i$  e  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N y_i$ .

✓ O método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajustamento para um conjunto de dados, tentando minimizar a soma dos quadrados dos desvios (ou erros) entre os verdadeiros valores de  $y$  e os obtidos a partir da reta que se pretende ajustar. Um caso particular do método dos mínimos quadrados é a regressão linear (eq. 3.6 e 3.7) que corresponde à otimização de uma função linear.

Para estes casos tem-se as seguintes expressões:

$$y = b + mx \quad (3.6)$$

Onde:  $m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - n \bar{x}^2}$  e  $b = \bar{y} - m \bar{x}$

Ou na forma:

$$y = mx, (b = 0) \quad (3.7)$$

Onde:  $m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}$

✓ Método de análise de contingência, apenas utilizada para a validação no caso da precipitação, realizada através de categorias, baseando-se apenas na ocorrência ou não de um determinado evento num determinado período de tempo. Foram definidas as seguintes categorias segundo os dados de entrada da tabela 3.2-1 (Wilks, 2006):

- O modelo previu chuva e esta ocorreu na área de verificação (a);
- O modelo previu chuva na área e esta não ocorreu (b);
- O modelo não previu chuva na área e esta ocorreu (c);
- O modelo não previu chuva na área e esta não ocorreu (d).

**Tabela 3.2-1** Tabela de Contingência 2 x 2 para verificação da ocorrência ou não da previsão de chuva.

Previsão	Observação		Total
	Choveu	Não Choveu	
Chover	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>
Não Chover	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c + d</i>
Total	<i>a + c</i>	<i>b + d</i>	<i>t</i>

As avaliações objetivas de previsão do modelo referente aos meses dos períodos chuvoso e menos chuvoso foram realizadas utilizando medidas de precisão e de tendência do modelo.

Como medidas de precisão tem-se:

**Proporção de acertos (PA)** – Proporção de previsões corretas independentemente que seja ocorrência ou não do evento.

$$PA = \frac{a + d}{N} \quad (3.8)$$

**Probabilidade de Detecção (POD)** – Probabilidade de ocorrência do evento supostamente previsto.

$$POD = \frac{a + c}{N} \quad (3.9)$$

**Razão de falso alarme (RAF)** – É a proporção dos eventos previstos que não ocorreram.

$$RAF = \frac{b}{a + b} \quad (3.10)$$

Para observações perfeitas os índices PA e POD assumem o valor de 1. O índice RAF, quanto mais próximo de 0 melhor.

Como índice de tendência de sobreavaliação ou subavaliação das classes de precipitação tem-se:

**BIAS** - Representa a razão entre o total de previsões do evento e o número total de ocorrências do mesmo. O Bias não é uma medida de precisão, apenas mostra a tendência ou vício do sistema de previsão e seu valor ideal é 1. Considera-se que o sistema sobreavalia a previsão de ocorrência do evento quando seu valor é maior que 1 e subavalia quando o seu valor é menor que 1.

$$Bias = \frac{a + b}{a + c} \quad (3.11)$$

## 4 Caracterização da ilha das Flores

### 4.1 Localização e geografia

A Ilha das Flores é a ilha mais ocidental do Arquipélago dos Açores e da Europa. Tem uma área de 143 km<sup>2</sup>, com o comprimento de 17 km e 12,5 km de largura máxima. Está situada a 21º 59' de longitude oeste e a 39º 25' de latitude norte.

A ilha das Flores localiza-se no Oceano Atlântico Norte e pertence ao Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores, tendo como ilha mais próxima a ilha do Corvo (fig. 4.1-1).



Figura 4.1-1 - Mapa de localização do Arquipélago dos Açores. Ilha das Flores no grupo Ocidental.

De acordo com o CVARG (2010), a ilha das Flores compreende as seguintes unidades geomorfológicas: Maciço central e orla periférica.

O **Maciço Central** é uma extensa área que ocupa a zona central da ilha, a qual é definida, grosseiramente, pela curva de nível dos 500 m de altitude. A sua plataforma central, que se desenvolve entre os 500 e os 600 metros de altitude, tem no Alto do Morro com 914 metros a maior elevação.

A **Orla Periférica**, como o nome indica, desenvolve-se na periferia da ilha apresentando escarpas com grandes declives e arribas que chegam a ultrapassar os 500 m de altura.

A distribuição altimétrica e a distribuição dos declives da ilha é apresentada na tabela 4.1-1 e 4.1-2, respetivamente. Pode observar-se ainda a carta hipsométrica (fig. 4.1-2), e as cartas de declives e de exposição da ilha das Flores (fig. 4.1-3) que ilustram a orientação do relevo.

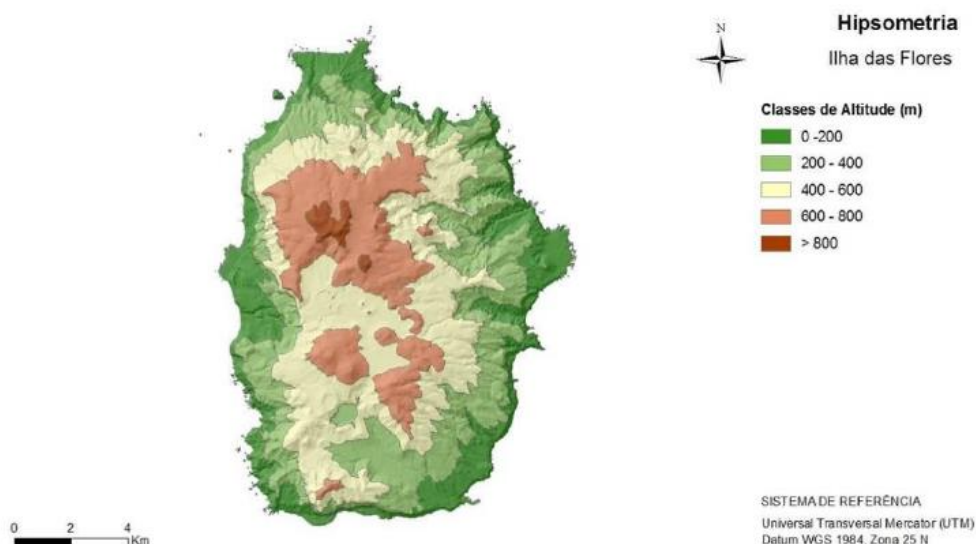


Figura 4.1-2 - Carta hipsométrica da ilha das Flores

Tabela 4.1-1 - Distribuição altimétrica da ilha das Flores (Adaptado de PGRH)

Classes de altitude [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Fração da ilha [%]
>0	141,6	100
>100	129,4	91,4
>200	112,4	79,4
>300	92,6	65,4
>400	73,1	51,6
>500	53,9	38,1
>600	27,6	19,5
>700	10,9	7,7
>800	1,8	1,3
>900	0,1	0,1

Tabela 4.1-2 - Distribuição dos declives da ilha das Flores (Adaptado de PGRH)

Classe [%]	Classificação	Área [km <sup>2</sup> ]	Fração da ilha
0-3	Plano	12,2	8,6
3-8	Suave	6	4,3
8-13	Moderado	10,6	7,5
13-20	Acentuado	17,1	12,2
20-45	Muito acentuado	51,7	36,6
>45	Escarpado	43,8	31,1
<b>Total:</b>		<b>141,4</b>	<b>67,7</b>

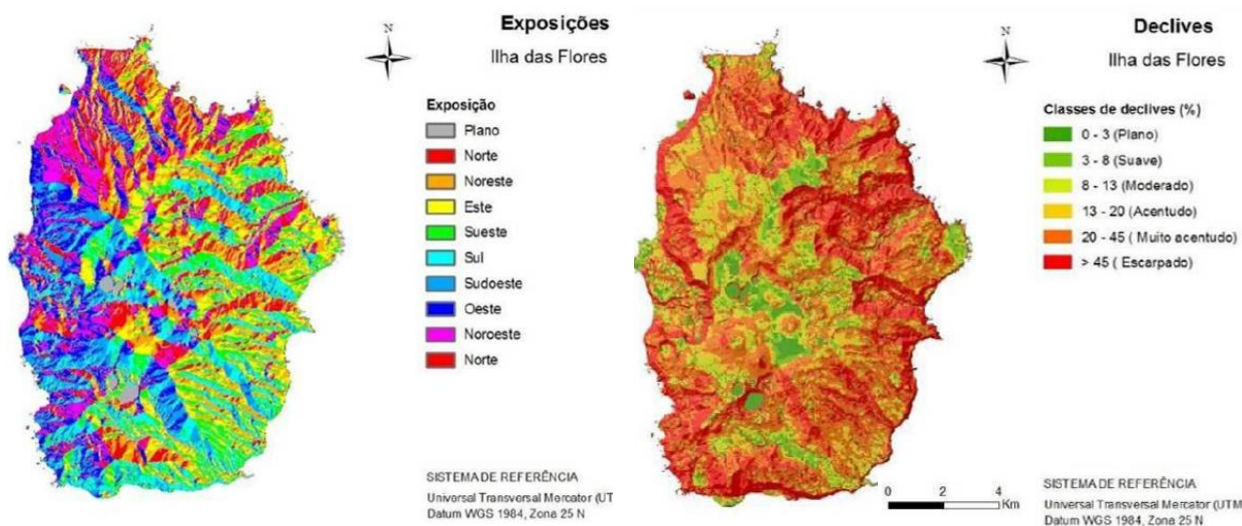


Figura 4.1-3 – Mapa de exposições (à esquerda) e mapa de declives (à direita) da ilha das Flores (PGRH).

A altimetria varia muito da periferia para o interior da ilha (fig. 4.1-2), tendo valores inferiores a 100 metros em apenas 8,6% da área da ilha (Tabela 4.1-1) e superiores a 400 m em mais de metade (52 %) da área da ilha. Quanto à declividade (Tabela 4.1-2) nota-se que apenas 8,6 % da ilha apresenta uma superfície plana e 4,3% um declive suave. Em contraste, 68% do território apresenta declives muito acentuados e escarpados, caracterizando o terreno da ilha pela dominância de relevo extremamente acidentado. Observa-se (fig. 4.1-3) que mesmo junto ao mar se verificam escarpas em praticamente todo o perímetro da ilha.

A carta de exposição (fig. 4.1-3) da ilha das Flores evidencia uma clara orientação a Oeste e a Leste das encostas que rodeiam o planalto central. Tal facto, juntamente com os grandes declives e altitudes elevadas no centro da ilha, conduzem a grandes discrepâncias na precipitação da periferia para o centro da ilha, como se poderá constatar no subcapítulo seguinte.

## **4.2 Clima da ilha das Flores**

Localizado em plena bacia do Atlântico Norte, a norte da influência predominante dos ventos Alísios e em pleno cinturão subtropical de células de altas pressões, o arquipélago dos Açores situa-se numa zona de transição e de confrontação de massas de ar de proveniência tropical com massas de ar mais frio de origem polar.

O posicionamento do AA (Anticiclone dos Açores) e o seu deslocamento influenciam grandemente a dinâmica do clima na ilha das Flores. A norte deste sistema prevalece uma circulação de Oeste, zona na qual ocorre a transição para a frente polar com significativos gradientes térmicos, gradientes estes que levam à formação de depressões associadas a chuvas e ventos fortes, principalmente no Inverno.

No inverno, a tendência de posicionamento do AA a sul do arquipélago dos Açores, permite uma descida da Frente Polar que se aproxima do arquipélago e se torna a principal causa dos ventos fortes que assolam a ilha das Flores. Nos meses de Verão o deslocamento do AA para Norte conduz ao afastamento da frente Polar e das perturbações que lhe estão associadas para latitudes mais elevadas, levando a condições de tempo soalheiro e ventos muito menos intensos. No entanto, são raros os dias de céu completamente limpo.

A precipitação na ilha ocorre durante todo o ano, mesmo nos meses de Verão, embora nestes com muito menor expressão. A precipitação de origem frontal é significativamente reforçada pela precipitação de origem orográfica no interior da ilha. Os períodos tempestuosos, sendo mais frequentes de inverno, podem no entanto ocorrer em finais do Verão e no Outono por efeito de tempestades tropicais em evolução próximas do arquipélago.

### **4.2.1 Climatologia da ilha das Flores (Aeroporto)**

A climatologia de uma qualquer região pode definir-se pela caracterização das principais variáveis meteorológicas, precipitação, vento e temperatura, durante um longo período de tempo, geralmente aceite de 30 anos. No entanto e para as variáveis mencionadas, apenas estão disponibilizados registos de 20 anos compreendendo o período de 1970 a 1990.

Na figura 4.2-1 são apresentadas as normais climatológicas da precipitação observadas na estação meteorológica do aeroporto das Flores (IPMA) para o período referido. Para a variável do vento, são apresentadas as rosas de vento e de velocidade média para o período de 1970-1990 na figura 4.2-3 e também para os meses de Janeiro e Julho do mesmo período nas figuras 4.2-5 e 4.2-6 respectivamente. As médias mensais da velocidade do vento de longo termo (1970-1990) são apresentadas na figura 4.2-4.

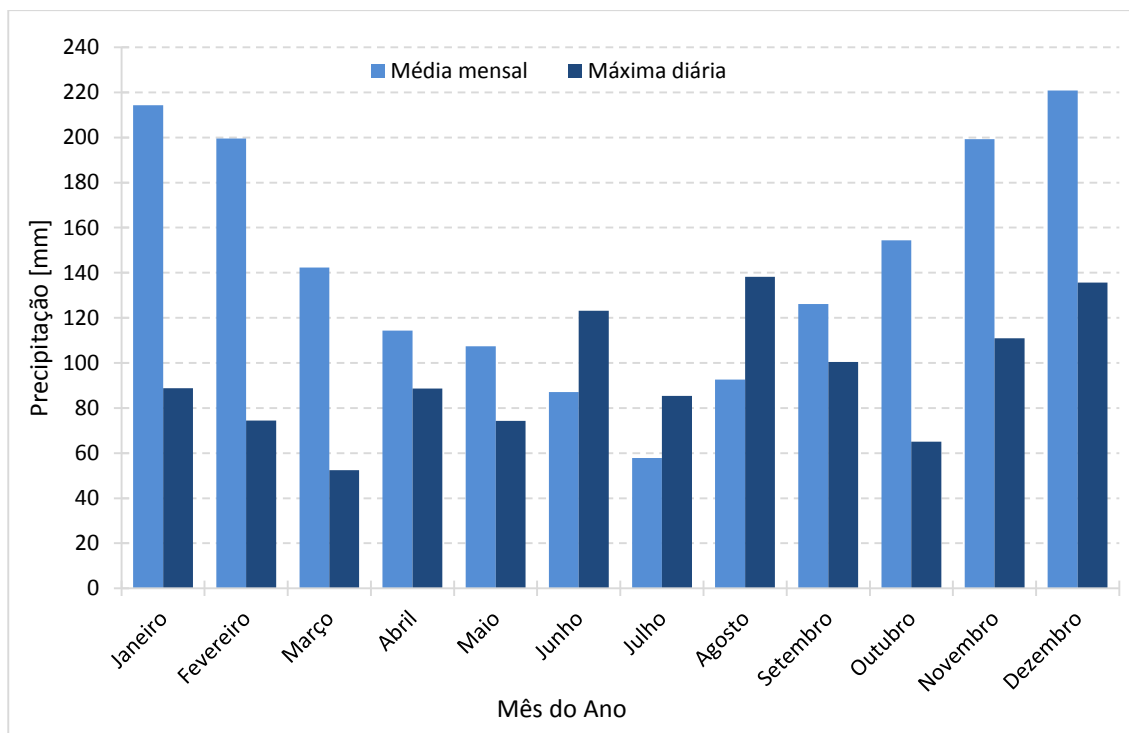


Figura 4.2-1 – Precipitação, normais climatológicas (1970-1990). Estação meteorológica do IPMA, aeroporto das Flores (h = 32m).

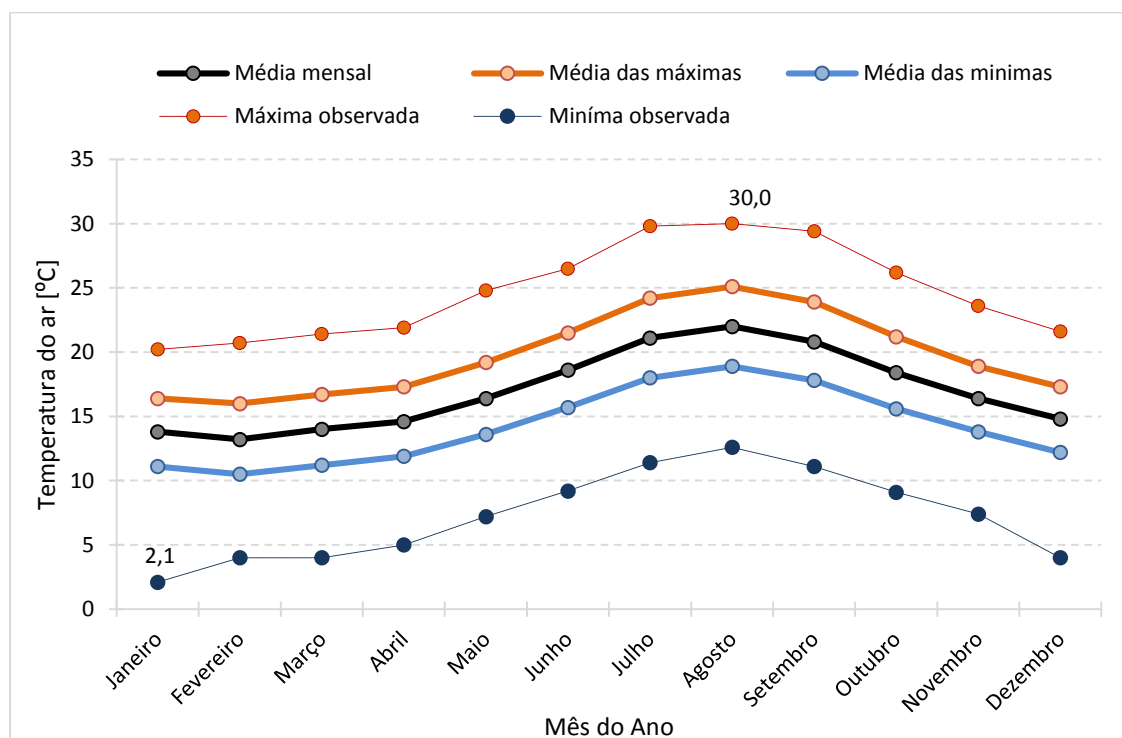
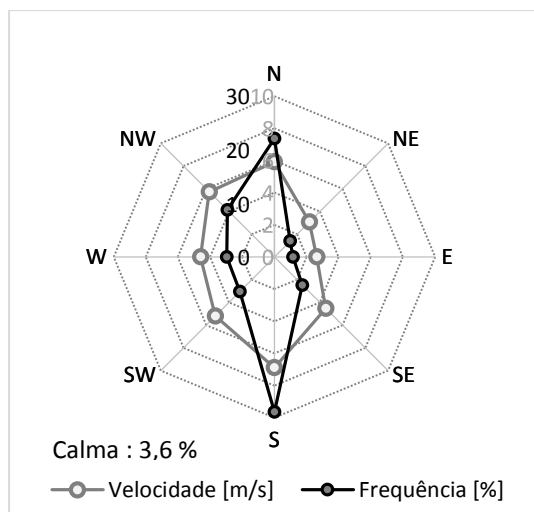
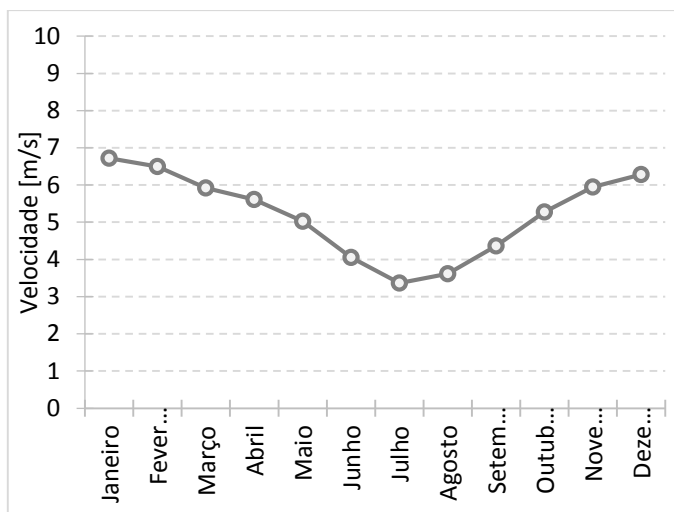


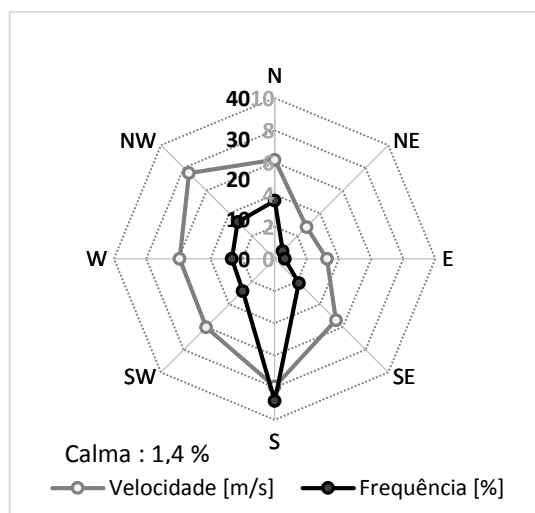
Figura 4.2-2 - Temperatura, normais climatológicas (1970-1990). Estação meteorológica do IPMA, aeroporto das Flores (h = 32 m)



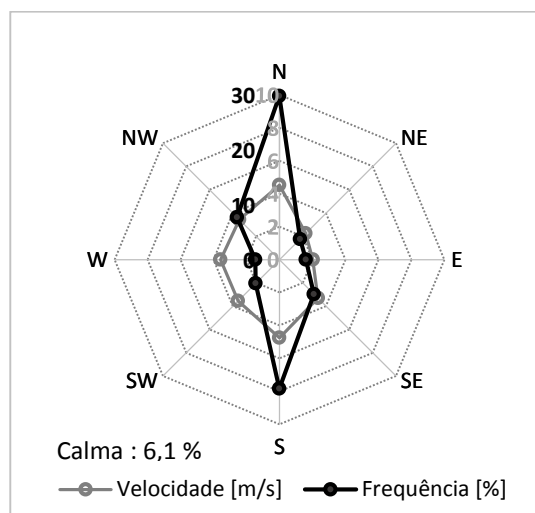
**Figura 4.2-3** - Rosa de Ventos média de 1970-1990 (10 m AST) observada na estação do IPMA (aeroporto).



**Figura 4.2-4** - Velocidade média mensal (1970-1990) do vento observada (10 m AST) na estação do IPMA (aeroporto).



**Figura 4.2-5** - Rosa de Ventos média (1970-199) para o mês de Janeiro.



**Figura 4.2-6** – Rosa de Ventos média (1970-199) para o mês de Julho.

Na estação meteorológica do aeroporto a temperatura média anual é de 17°C (1970-1990) sendo o mês de Fevereiro com a média mensal mais baixa e Agosto o mês com temperatura média mais elevada, com 13,2°C e 22°C respectivamente. Nesta estação no período 1970-1990 a temperatura mínima e máxima registadas foram de 2°C e 30°C respectivamente, o que denota bem a amenidade térmica da ilha. A humidade relativa do ar da ilha das Flores apresenta-se elevada todo o ano, com valores médios mensais próximos de 80%. A insolação apresenta valores reduzidos, sendo que o mês com insolação máxima é Agosto, apresentando no entanto apenas 50%.

Ao longo do ano o vento sopra de forma irregular, sendo moderado nos meses de Verão, e mais intenso nos meses de Inverno. No entanto, importa realçar que a estação do aeroporto por se localizar num local abrigado de oeste, com escharpa a sul e a baixa altitude (32 m ANMM), não representa o excelente potencial eólico que a ilha oferece noutras regiões mais elevadas, facto que será discutido mais adiante. A rosa de ventos média de longo termo e média de Janeiro e Julho do mesmo período, denota a variação da intensidade e rumo do vento dos meses de Inverno para os meses de Verão devido ao deslocamento do AA mais para Norte no Verão.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da ilha das Flores está abrangido pela categoria dos climas temperados quentes (grupo C), caracterizado por apresentar estações de Verão e Inverno e com a temperatura média mensal mais baixa sendo inferior a 18°C mas superior a -3°C. Pelo facto de apresentar um clima chuvoso temperado e húmido em todas as estações está incluído no subgrupo Cf. Também devido à temperatura média do mês mais quente não ultrapassar em média os 22°C, o clima na ilha pode ser designado como Cfb, representando o clima de um local húmido com temperaturas amenas todo o ano.

#### 4.2.2 Avaliação do efeito orográfico na precipitação da ilha das Flores

Uma massa de ar húmido quando levada por ventos contra uma barreira montanhosa é forçada a subir, arrefecendo e atingindo o ponto de condensação, o que conduz à formação de nuvens e à ocorrência de precipitação. Quanto maior humidade a massa de ar apresenta, maiores os efeitos orográficos e maior a variação espacial da precipitação.

A ilha das Flores, como visto no subcapítulo 4.1, apresenta 52 % da sua área acima dos 400 metros com predominância de declives muito acentuados ou mesmo escarpados em 68% da área da ilha. Em situações na presença de condições atmosféricas de massas de ar húmidas, tem-se portanto reunidas todas as condições para a ocorrência de precipitação orográfica conduzindo a gradientes de precipitação na ilha bastante significativos.

A grande influência da orografia na pluviosidade é verificada com base nos valores registados de precipitação em locais com cotas bastante diferentes, traduzidas pela estação climatológica de Flores/Aeroporto e pelo posto udométrico de Fajã Grande, ambos localizados a baixa altitude, e os postos udométricos do Pico da Casinha e Fonte dos Frades na zona central da ilha a elevada altitude. A precipitação média mensal no período 1958-1988 encontra-se na figura 4.2-7.

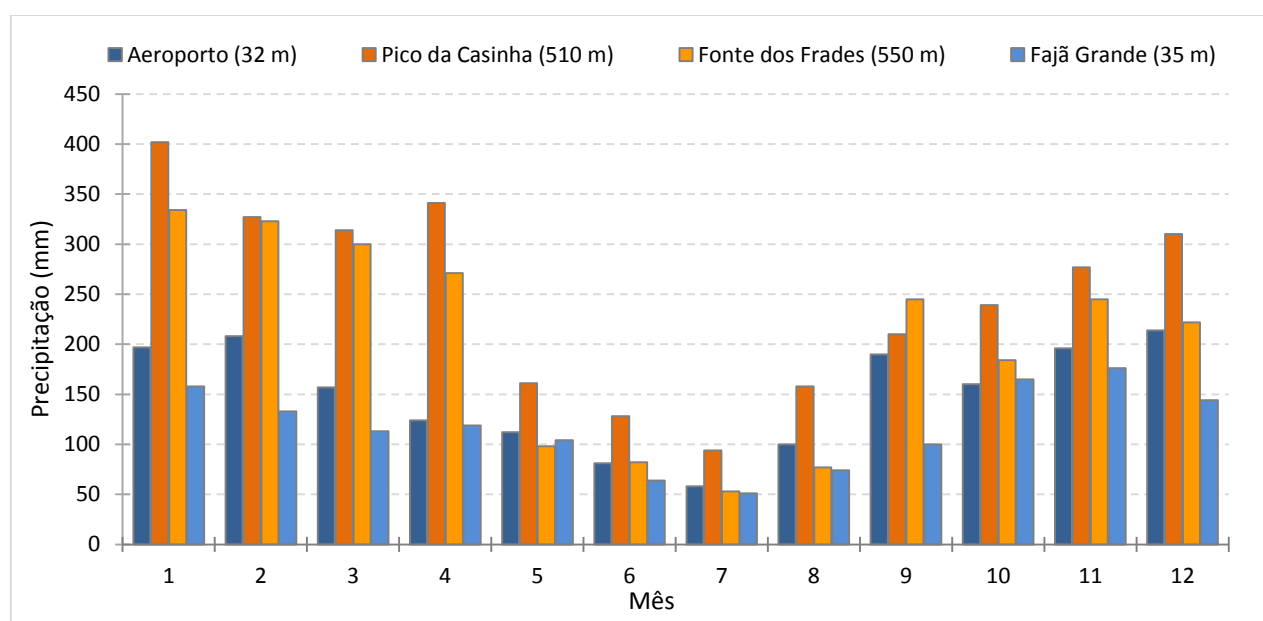


Figura 4.2-7 Precipitação média mensal de longo termo (1958-1988) para 4 postos udométricos da ilha das Flores (PGRH).

Verificam-se precipitações mensais elevadas em praticamente todo o ano, principalmente nas estações localizadas a maior altitude. No período entre Janeiro e Março, observam-se precipitações médias mensais superiores a 300 mm nos dois postos udométricos situados acima dos 500 m, e apenas no período de Maio a Agosto as médias mensais descem para valores inferiores a 200 mm. No mês de Janeiro, a estação do Pico da Casinha apresenta no período analisado o valor médio de precipitação acumulada de 400 mm. As precipitações médias mensais no período 1958-1988 nunca são inferiores a 50 mm nos 4 postos udométricos, o que significa que a ilha das Flores não apresenta meses secos.

Comparando os registos do posto udométrico do Pico da Casinha com a estação do aeroporto, locais muito próximos, verifica-se que a precipitação média mensal e anual difere largamente para valores superiores no Pico da Casinha. O acréscimo da quantidade de precipitação devido à orografia tem maior evidência no Inverno e nos meses de Março e Abril. A estação de Fonte dos Frades, a uma altitude de 550 m, apresenta precipitações muito superiores no período de Janeiro a Abril comparativamente às duas estações que se situam a uma altitude inferior a 50 m, enquanto no Verão e Outono a precipitação média entre as estações a diferentes altitudes é mais próxima.

Precipitações médias elevadas nos locais de elevada altitude na ilha conduzem a graves problemas no que diz respeito à erosão e aos fenómenos de deslizamento de terras, tornando-se numa situação perigosa para as populações que habitam nesses ou próximo desses locais.

Neste último contexto, isto é, não apenas para aproveitamentos hídricos, o acerto dos modelos numéricos na previsão da precipitação são de crucial importância, pois permitem que as autoridades emitam alertas com antecedência suficiente para minimizar o risco para as populações.

## **4.3 Caracterização do sistema electroprodutor da ilha das Flores**

### **4.3.1 O consumo energia elétrica**

Em qualquer sistema electroprodutor é necessário manter-se o equilíbrio constante entre a produção e o consumo de energia, sendo portanto fundamental caracterizar-se o tipo de consumo e a forma como este vem evoluindo ao longo dos anos, para que se torne possível antecipar novos projetos de alteração do sistema electroprodutor, como por exemplo, a rede de distribuição de energia e/ou as centrais produtoras de energia.

Na figura 4.3-1 e 4.3-2 são apresentados, respetivamente, os consumos de energia elétrica por setor de atividade na ilha das Flores e a fração do consumo de energia que cada um representa para o consumo total, ao longo do período de 1995 a 2012.

Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável

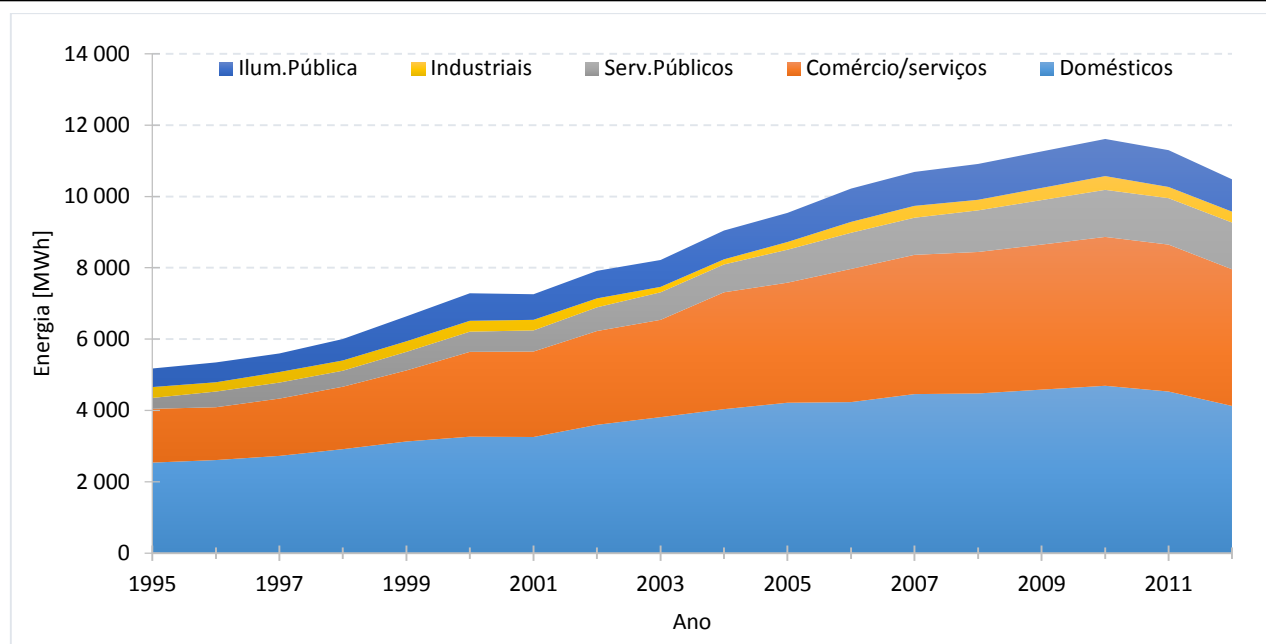


Figura 4.3-1 - Evolução anual do consumo de energia elétrica repartida pelos setores de atividade no período de 1995 a 2012.

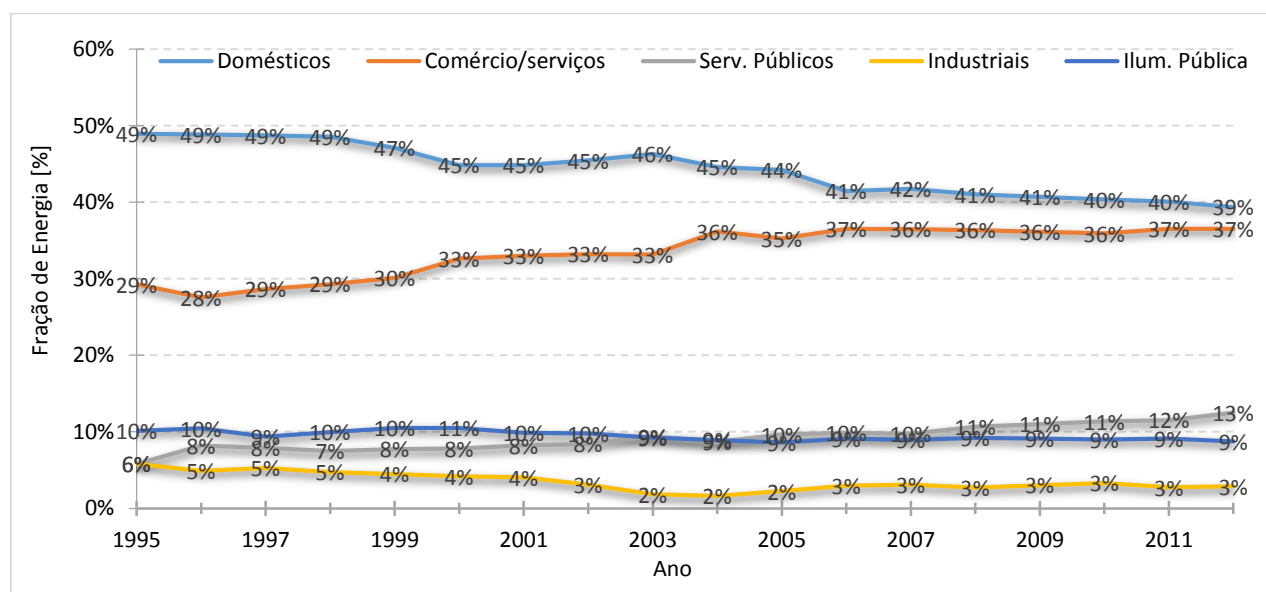


Figura 4.3-2 - Representação de cada setor de atividade face ao consumo total de energia desde 1995 a 2012.

De acordo com a figura 4.3-1 o consumo de energia elétrica na ilha das Flores cresceu de 1995 até 2010 a uma taxa média de 5 % ao ano, aumentando de 5,2 Gwh em 1995 para 11,6 GWh em 2010. No entanto, desde este último ano até 2012 tem sofrido um decréscimo médio anual de 5 %, tendo regressado a valores na ordem de 10,5 GWh, semelhantes ao consumo de energia elétrica em 2006/2007. Quase todos os setores de atividade apresentam um crescimento anual no consumo de energia desde 1995 a 2010, sendo o setor de comércio/serviços juntamente com o setor dos serviços públicos aqueles que mais cresceram. Por outro lado, o setor industrial é o único que não apresenta qualquer crescimento no consumo de energia desde 1995 a 2012, embora apresente ligeiras flutuações anuais, terminando o ano de 2012 com um valor na ordem de 0,3 GWh tal como em 1995.

Em resumo, a ilha das Flores apresenta um consumo de energia essencialmente ligado ao setor doméstico e ao setor do comércio/serviços, representando um total de cerca de 90 % (incluindo os serviços públicos) do consumo total de energia elétrica da ilha.

#### 4.3.2 O sistema de produção de energia

A elevada distância ao continente torna impossível a ligação elétrica por cabo entre as ilhas dos Açores e o continente, e a morfologia do mar dos Açores também não permite a transferência de energia entre ilhas. Isso leva a que a ilha das Flores tenha de ter um sistema de produção de energia elétrica independente.

Esse sistema de produção de energia elétrica responsável por suprir o consumo da ilha é em 2012 constituído por dois sistemas electroprodutores:

- 1) Central Termoelétrica/Hídrica de Além Fazenda (CTAF/CHAF ou CTHAF)
- 2) Parque Eólico de Boca da Vereda (PEBV)

Porém, nem sempre essas centrais e/ou a potência que possuem fizeram parte do sistema electroprodutor da ilha, pois o consumo tem vindo a crescer, à exceção dos últimos 2 anos, tendo de ser acompanhado por um aumento de potência instalada de modo a manter a segurança do abastecimento de energia, a qual é desde 1995 até 2012 apresentada na figura 4.3-3. Os dados das figuras seguintes foram obtidos através dos relatórios de contas do Grupo EDA-Eletricidade dos Açores e do Serviço Regional de Estatística dos Açores (SREA, 1995-2005; EDA, 2009, 2010, 2011, 2012).

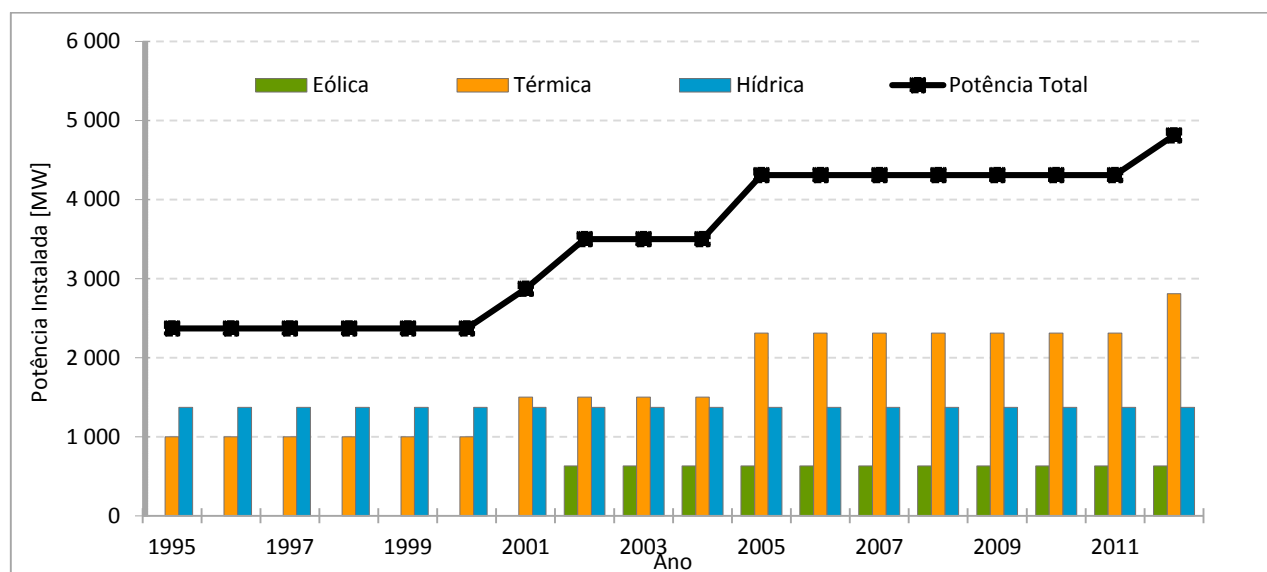


Figura 4.3-3 - Evolução da potência das centrais elétricas instalada na ilha das Flores, desde 1995 a 2012

No final de 2012, a ilha das Flores apresentava 4.810 kW de potência total instalada (fig. 5.9) sendo que aproximadamente 42 % da mesma corresponde a fontes renováveis, nomeadamente hídrica (28 % com 1.400 kW de potência distribuídos por 4 grupos geradores) e eólica (13 % com 600 kW de potência dividida por 2 aerogeradores). Por outro lado, a central termoelétrica com 2.810 kW de potência distribuída por 5 grupos geradores diesel, representa cerca de 58 % da potência instalada, sendo esta fundamental para a segurança do sistema electroprodutor, pois é a única que apresenta garantia de potência. Além disso, apresenta também uma elevada capacidade de resposta às flutuações do consumo e da própria produção eólica, embora essa função conduza a elevados aumentos no consumo de combustível.

A central hídrica de Além Fazenda apresenta fraca capacidade de armazenamento, não permitindo armazenar água caída nos meses mais chuvosos para ser utilizada nos meses mais secos, nem tão pouco por apenas alguns dias. No entanto esta permite armazenar durante algumas horas, permitindo acompanhar o perfil diário de consumo, isto é, fornecer menor potência nas horas de vazio e maior nas horas de ponta e cheia, tendo também capacidade de responder rapidamente às flutuações do consumo.

No caso da energia eólica, devido à sua característica intermitente não garante potência, mas é possível regular a potência fornecida no sentido de a reduzir, eventualmente como forma de minimizar o desequilíbrio que esta causa no sistema electroprodutor. O inverso também poderá ser possível, caso a central eólica esteja a fornecer potência significativamente abaixo da sua capacidade face ao vento atual, embora isso dependa de ferramentas capazes de prever com elevada fiabilidade a velocidade do vento no período que se segue e desperdiçando elevada quantidade da energia disponível.

A parte essencial de um sistema de gestão de energia é a adaptação da produção de eletricidade às necessidades do consumo em cada instante do tempo. Num sistema que integre energias renováveis como acontece neste caso, às flutuações na procura de energia acresce a intermitência das fontes renováveis, o que torna mais complicado a gestão da energia do sistema, e será tanto mais complicado, quanto maior a fração de energia renovável inserida na rede.

### 4.3.3 A produção de energia elétrica

Na figura 4.3-4 são apresentadas as produções anuais de energia elétrica fornecida por cada uma dessas centrais de energia elétrica, bem como as perdas percentuais de energia ocorridas no sistema electroprodutor ao longo do período de 1995 a 2012.

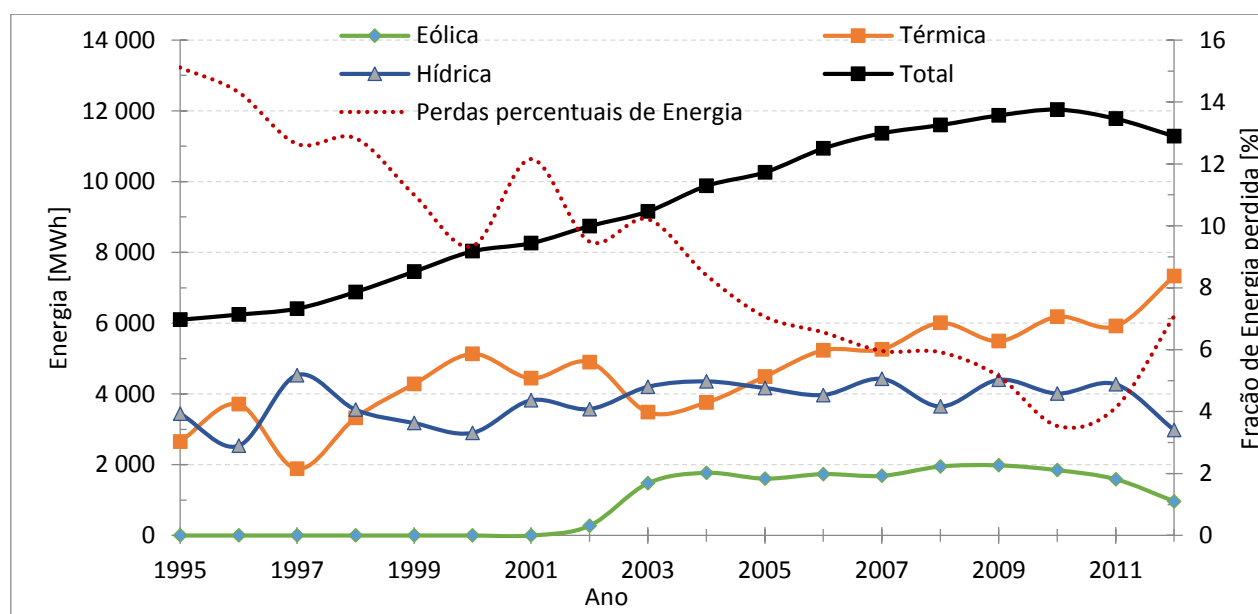


Figura 4.3-4 - Evolução energia elétrica fornecida por cada central produtora e perdas no sistema electroprodutor de 1995 a 2012.

De acordo com a figura 4.3-4, a central diesel é a principal responsável pelo abastecimento de energia elétrica da ilha, a qual sofreu um decréscimo em 2003 ficando ligeiramente abaixo da central hídrica, devido à entrada em funcionamento do parque eólico em 2002. No entanto, a partir do ano seguinte, a central térmica volta a tornar-se preponderante no abastecimento de energia elétrica devido ao contínuo crescimento do consumo na ilha nesses anos. A produção renovável, hídrica e eólica, desde 2003 a 2011

manteve-se aproximadamente constante, sendo que no ano seguinte (2012) se verifica um decréscimo da produção hídrica devido à desativação da central para obras de remodelação e automatização, antes do final desse ano.

É de referir também a existência de uma pequena fração de potência instalada ao abrigo da mini/microgeração, nomeadamente de origem renovável (fotovoltaica) representando apenas 0,1 % da produção de eletricidade, cerca de 8 MWh em 2012.

Com a finalidade de aumentar a penetração da energia eólica e atenuar as solicitações dos grupos diesel na resposta às rápidas variações de potência na rede elétrica, foi instalado em 2005 um volante de inércia (Flywheel). O sistema consegue absorver ou debitar 350 kW de potência durante um período máximo de 30 segundos, apresentando uma elevada capacidade de resposta, apenas alguns milissegundos para evoluir de 0 kW a +/- 350 kW de potência (Hamsic *et al.*, 2007; Eurelectric, 2012).

Importa ainda salientar na figura 4.3-4, à parte das oscilações anuais, o decréscimo bastante significativo nas perdas de energia elétrica que, em 1995 representava 15 % da produção de eletricidade tendo descido progressivamente até ao valor mais baixo em 2010 com cerca de 4 %, embora tenha voltado a subir nos últimos 2 anos.

Com os registos anuais de produção das centrais da ilha, pode-se determinar a sua contribuição anual para o consumo total de energia (incluindo as perdas na rede elétrica) com o objetivo de avaliar a sua evolução, a qual é apresentada na figura 4.3-5.

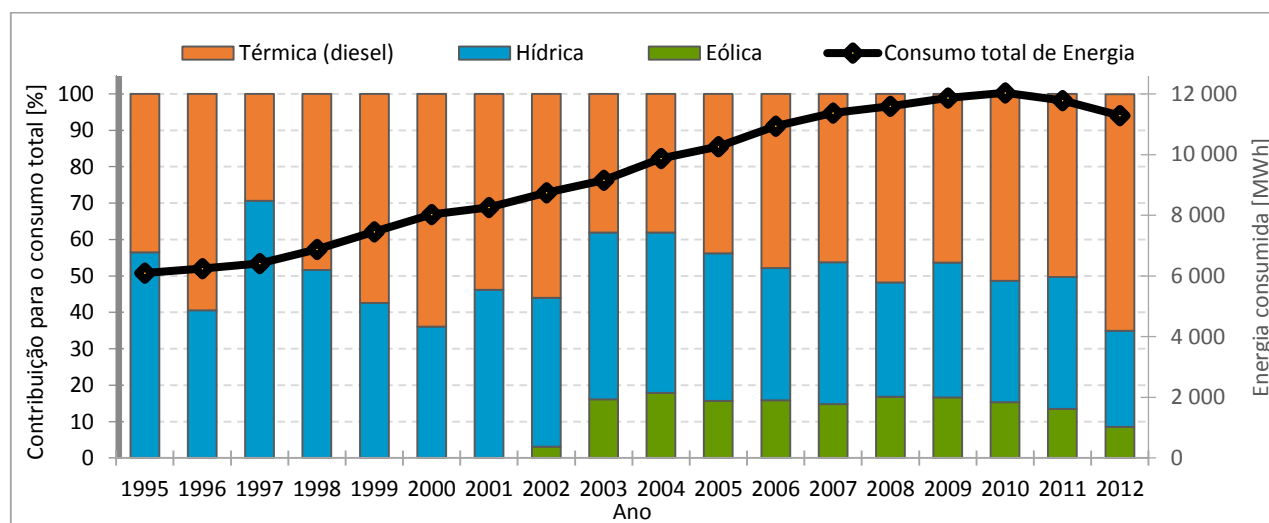
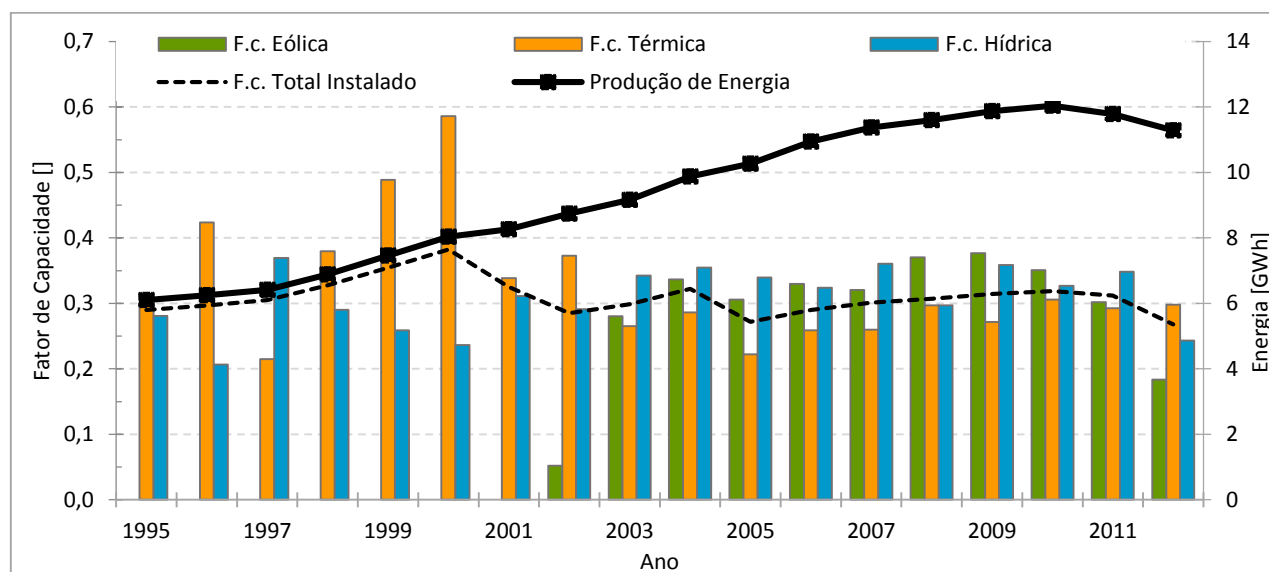


Figura 4.3-5 - Contribuição anual das fontes de energia para o consumo total da ilha das Flores desde 1995 a 2012.

Na figura 4.3-5 observa-se que até 2002 a contribuição hídrica, à parte das oscilações anuais resultantes da variação da pluviosidade, sofre um decréscimo devido ao contínuo aumento do consumo de energia. A contribuição renovável sofre um aumento acentuado em 2003 com a entrada da energia eólica, ultrapassando os 60 % nesse ano e no seguinte. No entanto, o consumo mantém um crescimento contínuo até 2010, período em que devido à inexistência de reforço de potência renovável, a contribuição das fontes renováveis sofreu um decréscimo.

Para se conhecer em que proporção tem vindo a ser utilizada a potência instalada em que cada uma dessas centrais é necessário determinar o seu fator de capacidade ou também denominado de fator de utilização, isto é, a fração de tempo do ano em que as centrais funcionariam permanentemente à potência nominal. A figura 4.3-6 apresenta a evolução do fator de capacidade de cada uma das centrais, bem como o fator de

capacidade global correspondente a toda a potência instalada, permitindo observar a sua evolução e comportamento através da comparação com outras regiões, nomeadamente Portugal Continental.



**Figura 4.3-6** - Evolução do fator de capacidade das centrais de produção de energia elétrica entre o período de 1995 e 2012.

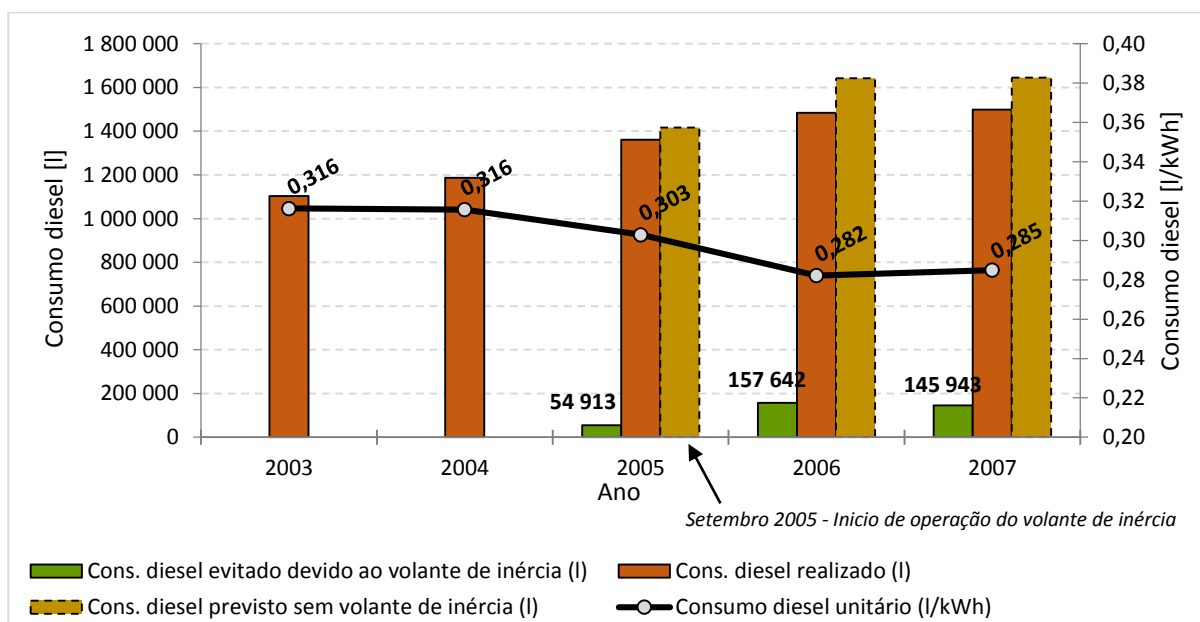
Pela figura 4.3-6, o fator de capacidade global acompanhou a subida do consumo até ao ano 2000, sofrendo depois uma quebra devido ao reforço de potência da central térmica, bem como a instalação do parque eólico. Verifica-se a partir da data deste último, uma estabilização do fator de utilização da potência total instalada bem como de cada central, inclusivamente apresentando valores semelhantes, em parte como resposta à execução dos planos de reforço gradual de potência no sistema electroprodutor.

O período de 8 anos consecutivos (2003 a 2011) pode indicar que estas centrais renováveis, em termos anuais, conseguem garantir uma quantidade de energia aproximadamente constante, sendo um indicador da reduzida variabilidade inter-anual das fontes renováveis da ilha. Este fato promove um aumento de potência renovável em detrimento da potência diesel, pois com uma contínua e elevada utilização do investimento renovável consegue-se um custo de produção competitivo. Porém e para aumentar o máximo possível a penetração renovável, será necessário uma forma de armazenamento de energia por longos períodos de tempo, nomeadamente semanas ou meses, de modo a compensar a variabilidade intra-anual das fontes eólica e hídrica, mantendo assim a segurança do abastecimento. No entanto, será sempre necessário uma central diesel ou similar que garanta potência para eventuais falhas e longos períodos de fraca disponibilidade hídrica e/ou eólica.

Comparando os fatores de utilização, no caso da energia eólica a ilha das Flores apresentou um valor médio próximo de 32 % (2003 a 2011), enquanto em Portugal continental a média apresentou 28 % em 2012 (ano médio em eolicidade) (IEA Wind, 2013). Por seu lado, a energia hídrica apresenta na ilha um fator de utilização médio de 32 % (1995 a 2011).

Importa referir ainda que, não é claro que a instalação do volante de inércia em 2005 tenha proporcionado um aumento do fator de utilização da central eólica. Em 2004, quando ainda não existia o volante de inércia, o fator de capacidade tinha sido de 32,1 %, superior aos valores de 2006 e 2007 (31,4 % e 30,5 %) quando este já se encontrava em plena operação, apesar de nos 3 anos seguintes ter tido valores superiores com cerca 35 %. Tendo em conta que a potência disponível do vento não sofreu variações significativas nestes anos, então pode pressupor-se que o volante de inércia não trouxe o aumento do aproveitamento do recurso eólico.

Contudo, é necessário analisar o impacto em todo o sistema electroprodutor que a capacidade de atenuação dos picos de potência do volante de inércia permite realizar, isto é, se este equipamento conseguiu melhorar a gestão do sistema e reduzir o consumo de diesel da central térmica bem como o seu desgaste, causados pelas rápidas subidas/descidas de potência. Dessa forma analisou-se os dados de consumo de diesel face à produção de energia de origem térmica nesses anos mais próximos (2003 a 2007), os quais são apresentados das figuras 4.3-7.



**Figura 4.3-7** – Consumo anual de combustível diesel (unitário e quantidade total) realizado na ilha das Flores, consumo de diesel previsto se não tivesse sido instalado o volante de inércia e poupança diesel devido à instalação do volante de inércia. A estimativa de poupança obtida e consumo diesel previsto foram calculadas com base no consumo médio unitário verificado em 2003 e 2004.

Analisando a figura 4.3-7 observa-se claramente o impacto do volante de inércia na redução do consumo de combustível diesel, com uma média de cerca de 150 mil litros anuais correspondendo a uma poupança média anual de cerca de 10 % no consumo de combustível, face aquele que se verificou em 2006 e 2007. Esta redução de consumos deriva da atenuação das rápidas flutuações de potência solicitadas à central diesel, traduzindo-se também numa redução no desgaste dos equipamentos.

Conclui-se que apesar de o volante de inércia não ter aumentado o aproveitamento do recurso eólico, permitiu reduzir consideravelmente o consumo de combustível na ilha. Assim, seria importante avaliar-se a relação custo/benefício proporcionada pelo volante de inércia considerando o valor do seu investimento e o valor do custo de combustível evitado, bem como o seu impacto na gestão do próprio sistema electroprodutor. Por outro lado, seria também importante analisar-se, possivelmente junto dos operadores do sistema, por que motivo não foi o volante de inércia eficiente no aproveitamento eólico dos aerogeradores.

#### 4.3.4 Caracterização do sistema electroprodutor em 2011

O sistema electroprodutor para o ano de 2011 é seguidamente caracterizado com maior detalhe. Os dados foram obtidos através dos relatórios de contas do Grupo EDA-Eletricidade dos Açores e do Serviço Regional de Estatística dos Açores (SREA, 1995-2005; EDA, 2009, 2010, 2011, 2012).

Este ano de 2011 representa bem a média dos últimos 4 anos (2008 a 2011) quer para o consumo de energia elétrica, quer para a utilização de cada central produtora de energia. A caracterização deste ano tem como objetivo avaliar o comportamento do consumo e produção de energia observados, por forma a

permitir a comparação com modelos de previsão atmosférica e sua validação ou não, com o intuito de melhorar a gestão do sistema electroprodutor através da previsibilidade dos recursos hídrico e eólico.

A figura 4.3-8 apresenta a evolução do consumo de energia na ilha das Flores ao longo do ano, bem como o abastecimento fornecido pelas diferentes centrais produtoras, tendo em vista a avaliação das necessidades de energia elétrica e a origem do seu abastecimento. Na figura 4.3-9 são apresentados os valores máximos e mínimos de potência (ponta máxima e vazio) verificados mensalmente, com a finalidade de avaliar a potência máxima que as centrais deverão disponibilizar ao longo do ano.

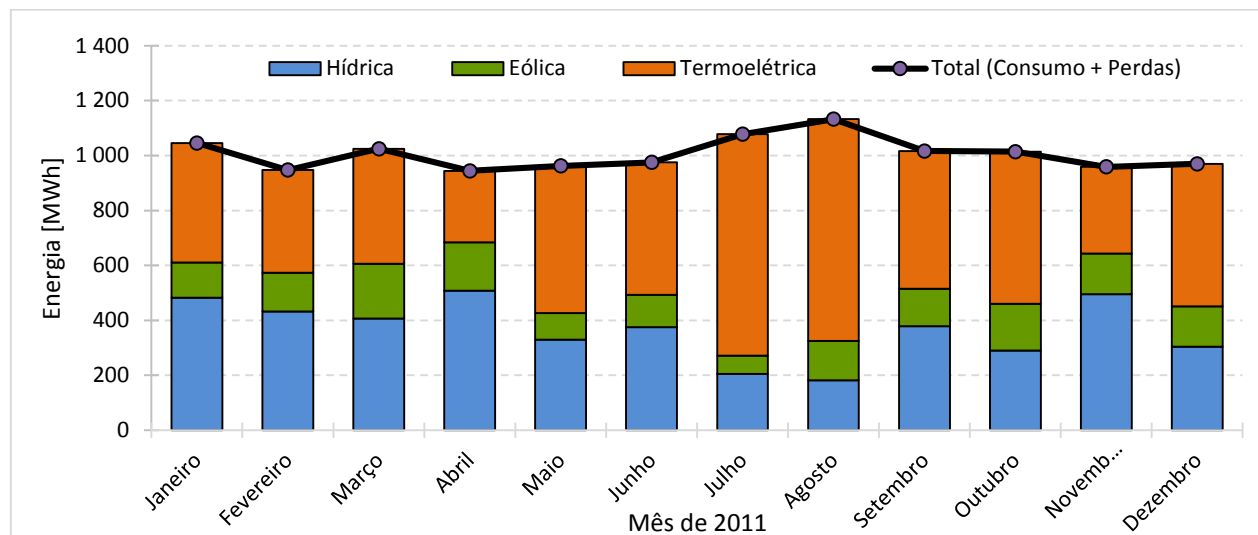


Figura 4.3-8 - Caracterização da produção de energia elétrica mensal fornecida por cada central produtora em 2011.

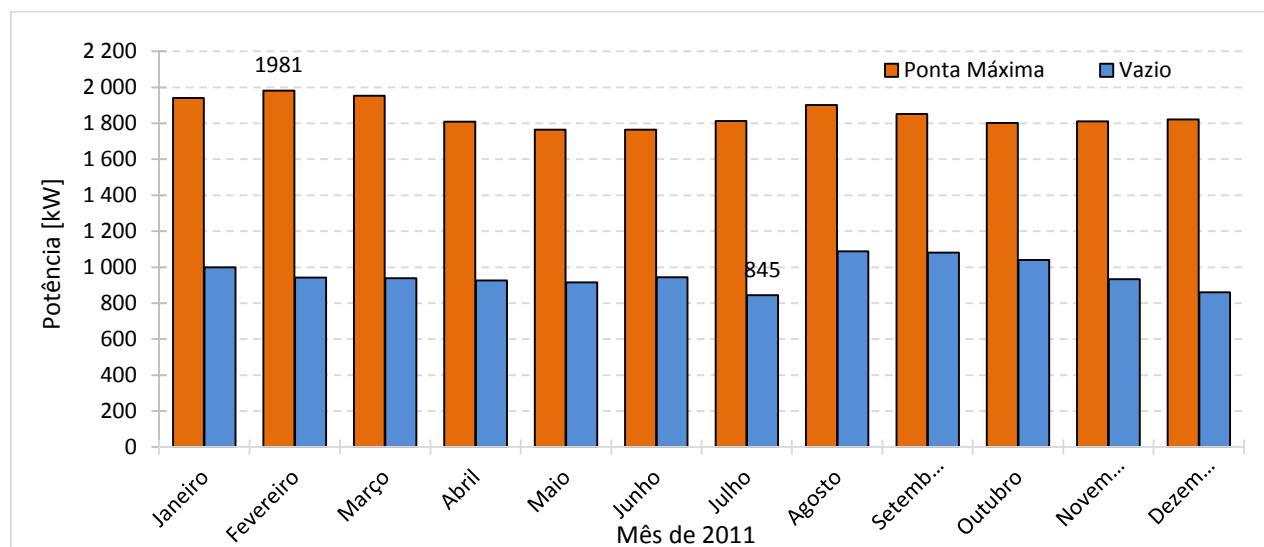


Figura 4.3-9 - Ponta máxima e vazio verificados mensalmente no sistema electroprodutor das Flores no ano 2011.

Analisando a figura 4.3-8 observa-se que o consumo de energia elétrica na ilha atinge os valores máximos nos meses de verão (Julho e Agosto) correspondendo ao período mais desfavorável no que respeita à disponibilidade dos recursos eólico e hídrico. No entanto, na figura 4.3-9 observa-se que em termos da potência máxima requisitada, esses mesmos meses encontram-se nos valores médios anuais, sendo nos meses de inverno (Janeiro a Março) onde ocorrem as pontas máximas mais elevadas, atingido o valor máximo de 1981 kW em Fevereiro.

De modo a caracterizar a capacidade de produção de energia elétrica intra-anual, são apresentados na figura 4.3-10 os fatores de capacidade das 3 centrais em 2011.

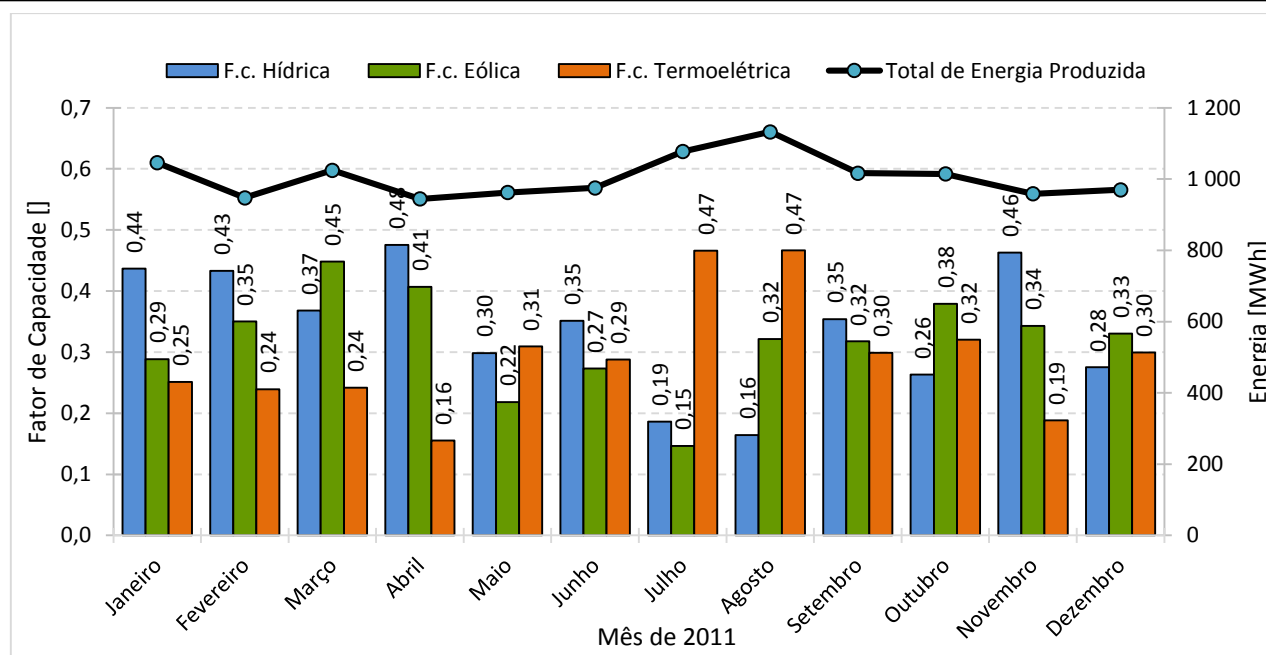


Figura 4.3-10 - Fator de capacidade mensal das centrais produtoras de energia elétrica em 2011.

Da observação da figura 4.3-10, decorre que o fator de utilização da central térmica é consequência da disponibilidade dos recursos renováveis, eólico e hídrico, exigindo uma utilização da central térmica próxima de 50 % nos meses de Verão. Observa-se também que existe uma grande variabilidade intra-anual na disponibilidade dos recursos renováveis, verificando-se fatores de capacidade mais altos no Inverno e mais baixo no Verão, a oscilar entre 16 % a 48 % para o recurso hídrico e entre 15 % a 45 % para o recurso eólico.

A gestão do sistema electroprodutor é monitorizada a todo o instante de modo a manter a estabilidade do sistema, sendo por isso necessário conhecer com maior detalhe o comportamento variável do consumo de energia e a disponibilidade de potência das centrais renováveis nos minutos ou horas seguintes de modo a evitar falhas no abastecimento de energia e/ou danos na qualidade da mesma (e.g. cavas de tensão, variação da frequência, tremulação). As figuras seguintes apresentam o comportamento, em médias de 30 minutos ao longo do mês, do consumo de energia e respetivo abastecimento fornecido pelas 3 centrais nos 4 meses típicos do ano de 2011.

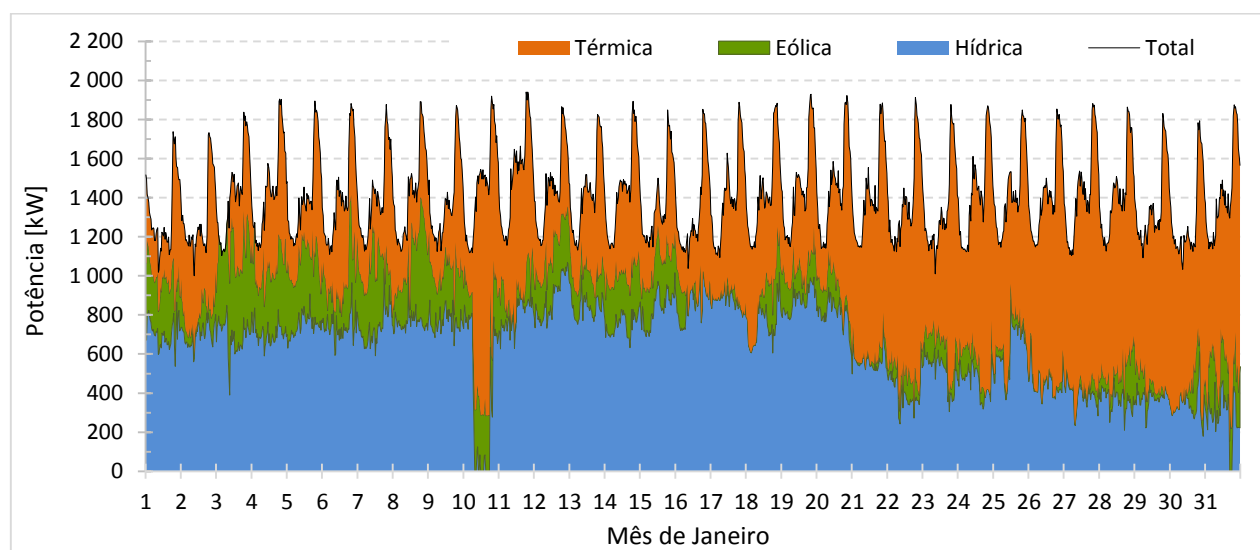


Figura 4.3-11 - Consumo e produção de energia por central ao longo do mês de Janeiro de 2011 (médias de 30 min).

Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável

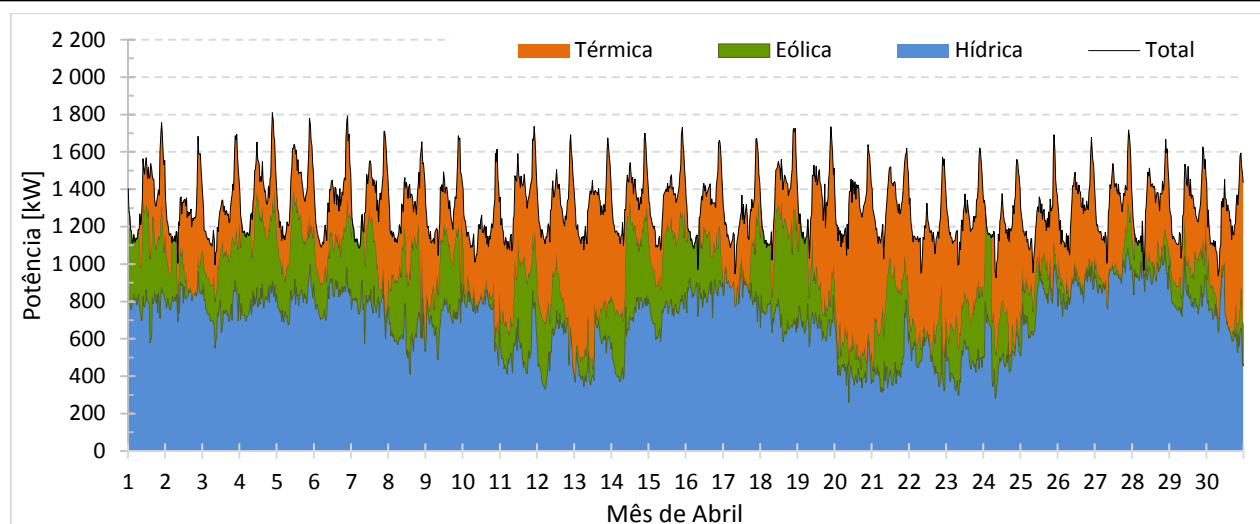


Figura 4.3-12 - Consumo e produção de energia por central ao longo do mês de Abril de 2011 (médias de 30 min).

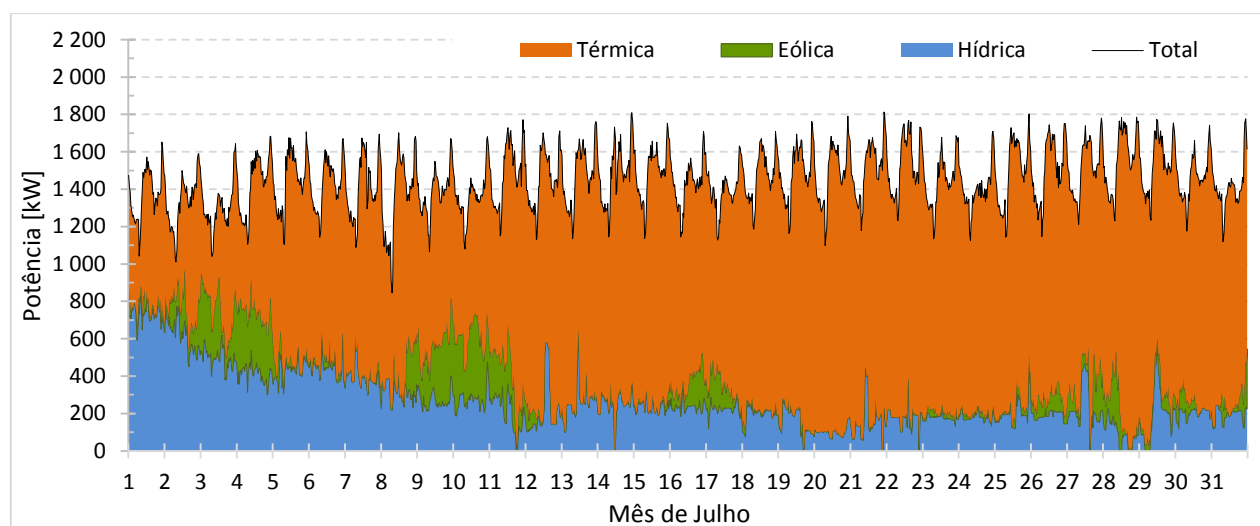


Figura 4.3-13 - Consumo e produção de energia por central ao longo do mês de Julho de 2011 (médias de 30 min).

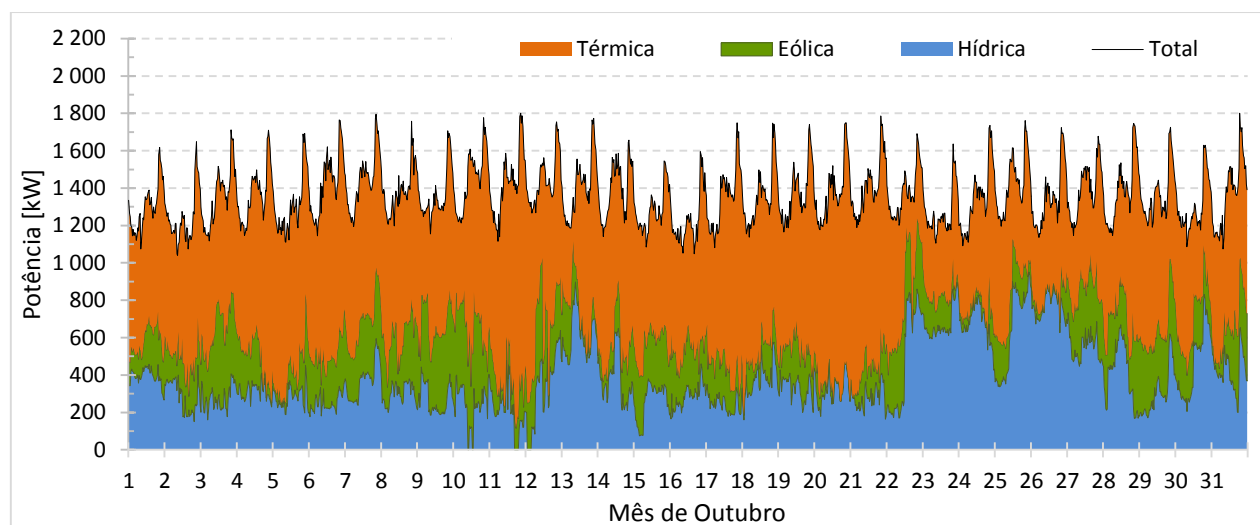
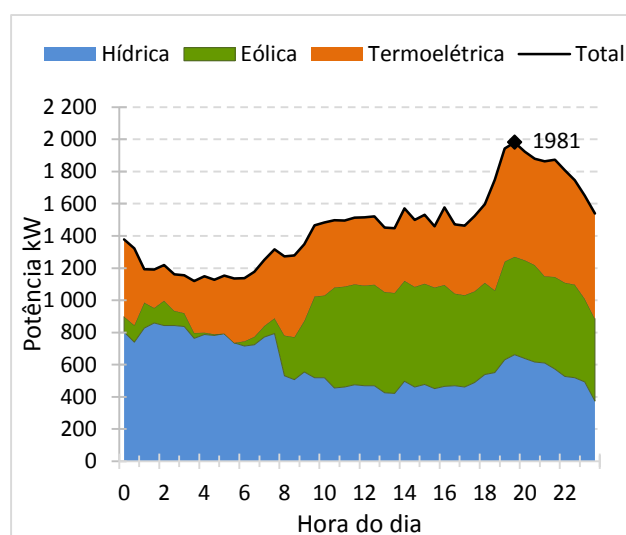


Figura 4.3-14 - Consumo e produção de energia por central ao longo do mês de Outubro de 2011 (médias de 30 min).

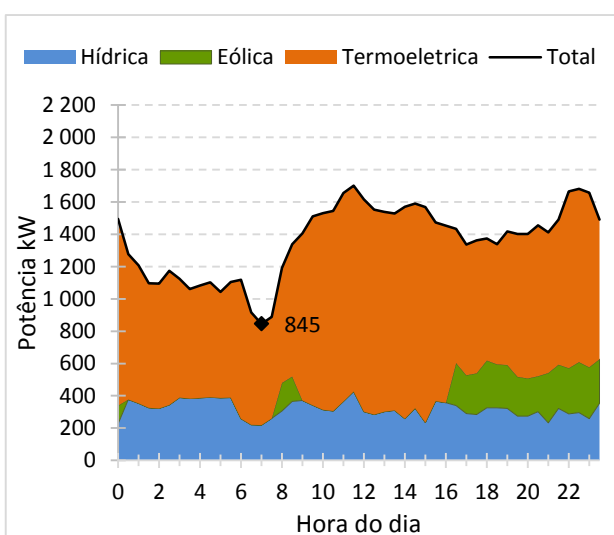
A observação dos diagramas de carga apresentados nas figuras 4.3-11 a 4.3-14 permite identificar o perfil de consumo e respetivo abastecimento de energia facultado por cada central ao longo de um mês, para os 4 meses representativos das 4 estações do ano. Analisando em primeiro lugar os perfis de consumo de energia, observa-se que é ao longo do mês de Janeiro e ao início da noite que se observam consecutivamente as pontas máximas de consumo mais altas do ano, devido às necessidades de aquecimento do consumo doméstico. Por esse motivo, é nesse mês que se observa também a maior diferença de potência requisitada entre o período das horas de vazio e das horas de ponta, variando em média entre 1100 kW e 1850 kW, respetivamente. Apesar disso, o perfil diário de consumo apresenta sempre o mesmo comportamento todos os dias de todos os meses apresentados, caracterizado pelo período de vazio durante a noite/madrugada, o período de cheia durante o dia e as horas de ponta ao início da manhã e início da noite sendo neste último onde ocorrem sempre as pontas máximas de consumo.

Relativamente ao abastecimento de energia, observa-se que, com exceção para o mês de Julho representativo da estação quente, a central hídrica mesmo sendo do tipo de fio de água participa frequentemente na resposta ao aumento de consumo de energia nas horas de ponta e cheia. No caso da energia eólica, não é evidente essa resposta ao consumo uma vez que não permite armazenar qualquer energia, embora se observe nos meses de janeiro e abril alguns dias de acompanhamento do perfil diário de consumo. À parte do perfil médio diário da velocidade do vento na ilha que será posteriormente analisado, este fato pode evidenciar desaproveitamento do recurso eólico. Por esse motivo, este aspeto será analisado mais adiante neste trabalho. Da análise dos diagramas de carga pode observar-se que a central térmica (diesel) tem um papel primordial no sistema electroprodutor, quer pelo ajuste da potência debitada pelas centrais à potência requisitada pelas cargas, quer pela garantia de potência aquando da ausência de potência hídrica e eólica, os quais podem ser observados com maior intensidade nos dias 20 e 28 de julho, respetivamente.

As figuras 4.3-15 e 4.3-16 apresentam o comportamento das cargas (médias de 30 min) e o fornecimento de energia pelas centrais produtoras para os dias de ponta máxima e vazio anual.



**Figura 4.3-15** - Diagrama de carga para o dia de ponta máxima anual (09 de Fevereiro de 2011, Quarta-feira)



**Figura 4.3-16** - Diagrama de carga para o dia de vazio anual (08 de Julho de 2011, Sexta-feira)

O dia de ponta máxima anual ocorre às 19:30 h do dia 9 de fevereiro (fig. 4.3-15) com 1981 kW, onde 41 % da energia desse dia é fornecido pela central hídrica, 32 % pela térmica e 27 % pela eólica, sendo que àquela hora o fornecimento de energia é partilhado quase equitativamente pelas 3 centrais. Pode notar-se que as

centrais térmica e hídrica são ambas responsáveis pelo ajuste constante à potência requisitada pelo consumo.

Por outro lado, o dia de maior vazio ocorre às 7 h da manhã do dia 8 de julho com 845 kW após uma acentuada descida do consumo durante a hora anterior e precedente a uma acentuada subida na hora seguinte. No entanto, observando o mês de julho na figura 4.3-16, verifica-se que o período de vazio deste dia foi excepcionalmente maior que o normal não se verificando nenhum outro com valores próximos. A potência de vazio nesse mês costuma rondar os 1100 kW tal como nos restantes meses do ano como se pode observar nas figuras 4.3-11 a 4.3-14. Contudo o acentuado pico de vazio (descida acentuada precedida de subida acentuada de potência requisitada) observado na madrugada desse dia ocorre com intensidade semelhante e frequentemente ao longo do mês de Julho e segunda quinzena de Abril.

## 5 Aproveitamento do potencial eólico

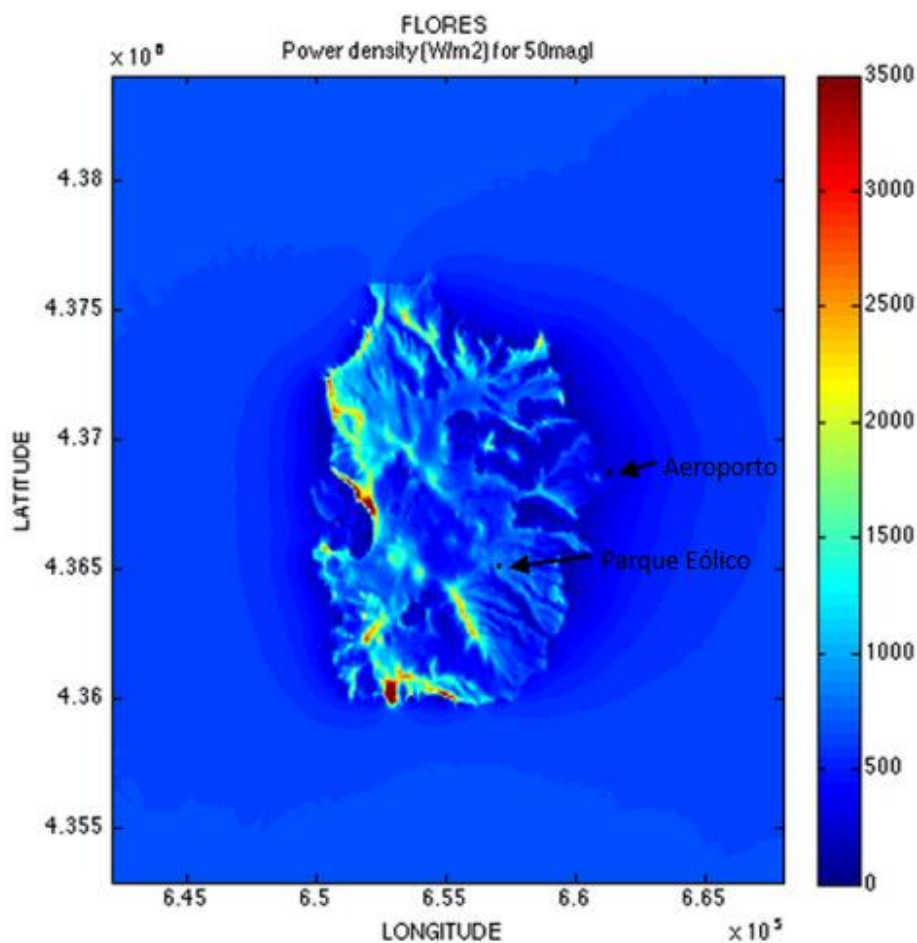
Neste capítulo pretende-se, não só apresentar o potencial eólico da ilha das Flores, mas principalmente caracterizar o seu aproveitamento no contexto do sistema electroprodutor, pois um baixo aproveitamento do recurso eólico pode colocar em risco o seu investimento inicial. Por outro lado, uma elevada penetração de energia eólica na presença de uma rede elétrica de pequena dimensão, torna-se a principal causa de instabilidade do sistema elétrico devido às flutuações de potência causadas pelas variações da velocidade do vento.

Em redes de pequena dimensão como o da ilha das Flores, o sistema elétrico não consegue absorver as flutuações de potência eólica, sendo os grupos hídrico e diesel aqueles que assumem o papel de suavização e adequação da potência total debitada ao consumo requisitado. Porém, exigir variações de potência nos grupos diesel com arranques e desligar sucessivos provoca não só danos nestes grupos, como também ineficiências do sistema que levam ao aumento do consumo de combustível. Assim de modo a minimizar esse problema, ajustar a produção ao consumo em cada instante e manter a qualidade da energia (evitar variações elevadas na frequência e tensão da rede) é absolutamente necessário manter controladas as flutuações de potência, a qual na ilha das Flores é frequentemente realizada à custa de elevados níveis de energia eólica rejeitada (Hamsic *et al.*, 2007).

Para avaliar o desempenho da central eólica no sistema electroprodutor é fundamental quantificar a energia rejeitada de modo a avaliar-se o impacto desse desperdício no custo desta fonte de energia, bem como na procura de soluções viáveis que minimizem o problema. Na prática trata-se de minimizar o custo de produção de energia eólica procurando o equilíbrio entre o custo da energia rejeitada e o custo de sistemas capazes de a aproveitar, tais como os volantes de inércia (para pequenos instantes de tempo) e a bombagem e/ou baterias (horas ou dias). Outro aspeto muito importante na diminuição da energia rejeitada é a previsão da produção eólica a muito curto prazo (horas ou menos) para a qual se recorre a modelos de previsão atmosférica, que se esperam ser de muita fiabilidade.

### 5.1 O recurso eólico disponível

O vento na ilha das Flores tal como nas restantes ilhas açoreanas apresenta uma elevada intensidade, fruto de um fluxo de larga escala de Oeste conduzido por um sistema de altas pressões. No entanto, as condições locais de cada ilha como a sua topografia interagem com o vento, quer acelerando ou diminuindo a sua velocidade, quer criando correntes locais como resultado da convecção ou diferenças de temperatura. A figura 5.1-1 apresenta uma estimativa da densidade de potência a 50 m AST sobre a ilha e suas proximidades, evidenciando maioritariamente o efeito da topografia na intensidade do vento.

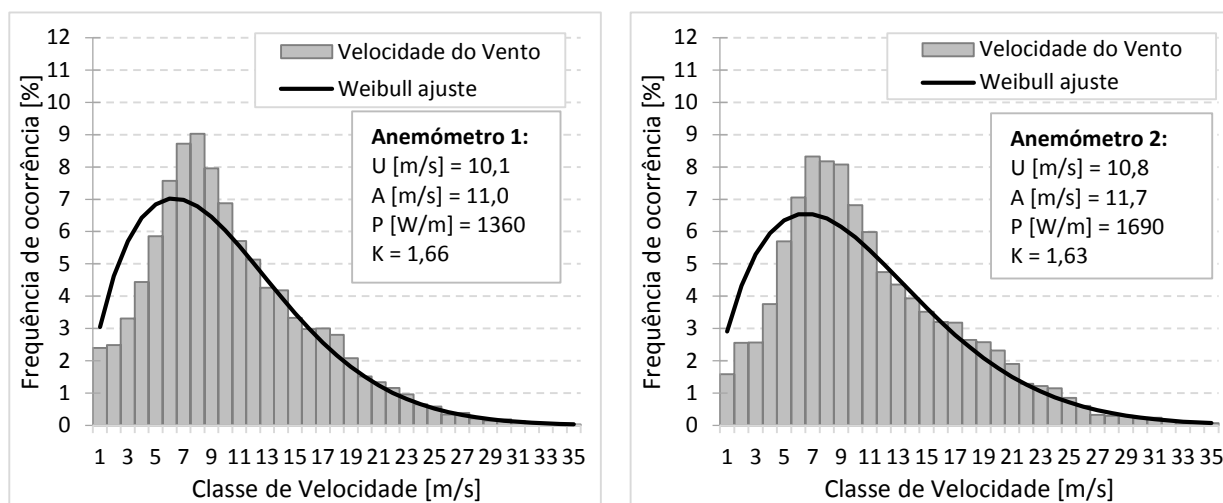


**Figura 5.1-1** - Mapa do potencial eólico da ilha das Flores: densidade de potência (50 m AST) com a localização dos pontos de observação do vento na ilha (Green Islands, 2014).

Da observação da figura 5.1-1 verifica-se que como resultado do intenso vento dominante do quadrante SW a NW a potência do vento é bastante superior do lado oeste da ilha, especialmente nas zonas de maior altitude e com orografia favorável à aceleração do vento. Observa-se também que apesar da rugosidade da superfície da ilha ( $z_0 \approx 0,03$  m) ser de dimensão muito superior à do mar ( $z_0 \approx 0,0002$  m), a sua altitude torna o potencial eólico *onshore* superior ao potencial *offshore* da região.

Relativamente à localização do parque eólico, o mapa (fig. 5.1-1) indica que este não se encontra nas zonas de maior potencial eólico, mas ainda assim o local onde se encontra tem um potencial eólico considerado muito elevado apresentando uma média na ordem de 1200/1300 W/m<sup>2</sup>, o que representa uma velocidade média anual em torno de 9,5 m/s, dependendo da distribuição do vento. Por outro lado, o local onde se encontra a estação do aeroporto é bastante protegido dos ventos intensos de oeste, apresentando naturalmente fraca densidade de potência. Por esse motivo, as observações do vento nesse local não são adequadas à caracterização do vento na ilha, especialmente como avaliação do recurso eólico.

A avaliação do potencial eólico requer observações locais que permitam verificar os resultados dos modelos de previsão atmosférica como apresentado anteriormente, sendo portanto utilizados os registos disponíveis dos anemómetros dos aerogeradores do parque eólico para comparação com o mapa apresentado. A figura 5.1-2 apresenta a distribuição do vento observado nos anemómetros do parque eólico bem como o ajuste pela distribuição de Weibull e os parâmetros estatísticos mais relevantes para comparação com outros locais.

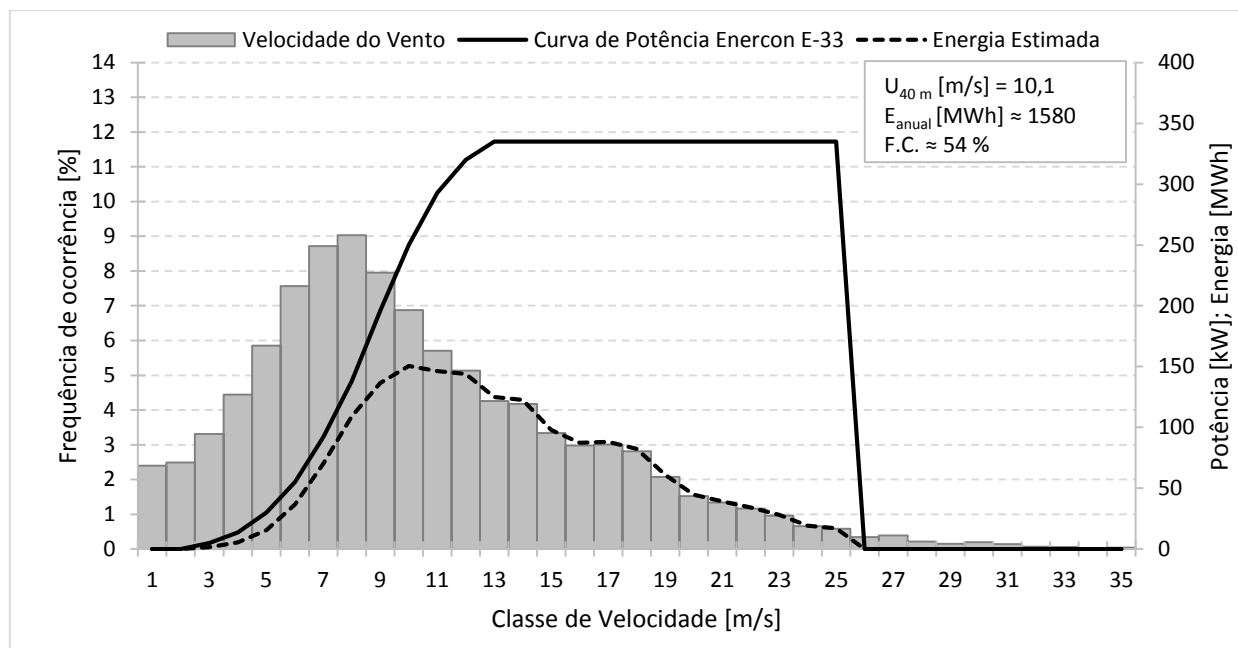


**Figura 5.1-2** - Distribuição da velocidade do vento observada na ilha das Flores no aerogerador 1 (à esquerda) e aerogerador 2 do parque eólico (à direita) a 40 m (AST) para o ano completo de 2011 e respetivo ajuste pela distribuição de Weibull.

A figura 5.1-2 mostra que potência média anual registada pelos dois anemómetros, apesar de a 40 m AST, é superior à estimativa apresentada no mapa (fig. 5.1-1), sendo que o anemómetro 2 registou um velocidade média de 0,7 m/s superior ao anemómetro 1. Esta diferença de velocidades, apesar da proximidade de apenas 250 m entre os aerogeradores, deve advir da orografia do local, que proporciona a aceleração e/ou desaceleração local do vento.

Comparativamente, em Portugal Continental, a velocidade média anual do vento a 60 m AST para os locais com potencial eólico viável varia entre 6 a 8 m/s, sendo portanto, bastante inferior à velocidade média de 10 a 11 m/s indicada pelas observações do parque eólico da ilha das Flores. Regiões com elevado potencial eólico, mas que requerem avultados investimentos como no caso do Mar do Norte, têm ainda assim um potencial eólico inferior, na ordem de 8 a 10 m/s a 50 m sobre a superfície do mar. Significa que um bom aproveitamento do potencial eólico da ilha das Flores permite alcançar custos de produção de energia muito baixos face ao alcançado na Europa, o que deixa uma margem para o investimento em sistemas que armazenem e melhorem a qualidade da energia eólica.

Com os registos da velocidade do vento observado no parque eólico em 2011 pode-se estimar a energia e o fator de capacidade do local utilizando um aerogerador adequado às condições do vento e dimensão da rede elétrica. É também por esses motivos que se encontra na ilha o aerogerador Enercon E-33 (330 kW), o qual foi também selecionado para esta estimativa (Enercon, 2010). O cálculo da estimativa energética foi efetuado para a distribuição do vento observada no anemómetro 1, onde se registou a menor velocidade média do vento. Nesta estimativa assumiu-se uma disponibilidade típica de operação do aerogerador de 95 %, isto é, os restantes 5% do tempo serão reservados a avarias e/ou manutenções da máquina. A figura 5.1-3 apresenta a distribuição do vento bem como a estimativa de energia produzida e a curva de potência do aerogerador.



**Figura 5.1-3** - Estimativa da energia produzida pelo aerogerador instalado na ilha das Flores, Enercon E-33 com 330 kW de potência nominal, para a distribuição do vento registada no anemómetro 1 no ano completo de 2011.

A estimativa da figura 5.1-3 indica que mais de metade da energia é produzida à potência nominal e durante cerca de 30 % do tempo ao longo do ano de 2011, ou seja, numa gama de velocidades onde a potência se mantém constante, o que em teoria deveria ser positivo para a gestão do sistema electroprodutor, dada a ausência de grandes flutuações na potência debitada. Quanto à estimativa da quantidade de energia produzida, o valor de 54% do fator de capacidade é considerado elevadíssimo, muito acima da média verificada em Portugal Continental por exemplo, a qual em 2012 foi de 28 % (IEA Wind, 2013).

## 5.2 Análise do recurso eólico explorado

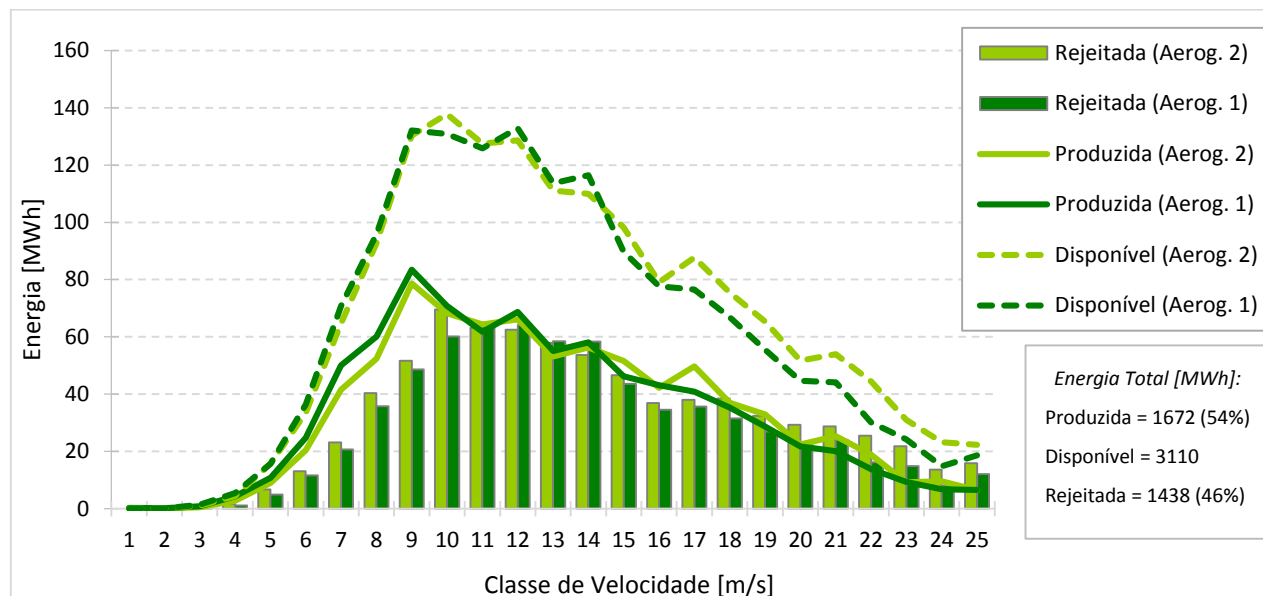
O aproveitamento do recurso eólico na ilha das Flores em 2011 foi caracterizado por um fator de capacidade de 30,2% (figura 4.3-6), sendo próximo do valor médio (32 %) desde a instalação do parque eólico em 2002, no entanto representa pouco mais de metade daquele que se poderia alcançar, cerca de 54 %, face ao recurso disponível nesse ano (fig. 5.1-3), o que significa mais de 40% de energia desperdiçada.

Apesar das dificuldades de integração de energia eólica em redes elétricas de pequena dimensão, o caso da ilha Terceira (embora seja uma rede de dimensão bastante maior) mostra que é possível aproveitar um recurso eólico semelhante alcançando um fator de capacidade bem mais elevado, o qual em 2010 apresentou o valor mais alto do mundo no segmento E-44 (900 kW) com os seus 48,7 % verificados no parque eólico (5 aerogeradores) da Serra do Cume (Açoriano Oriental, 2011).

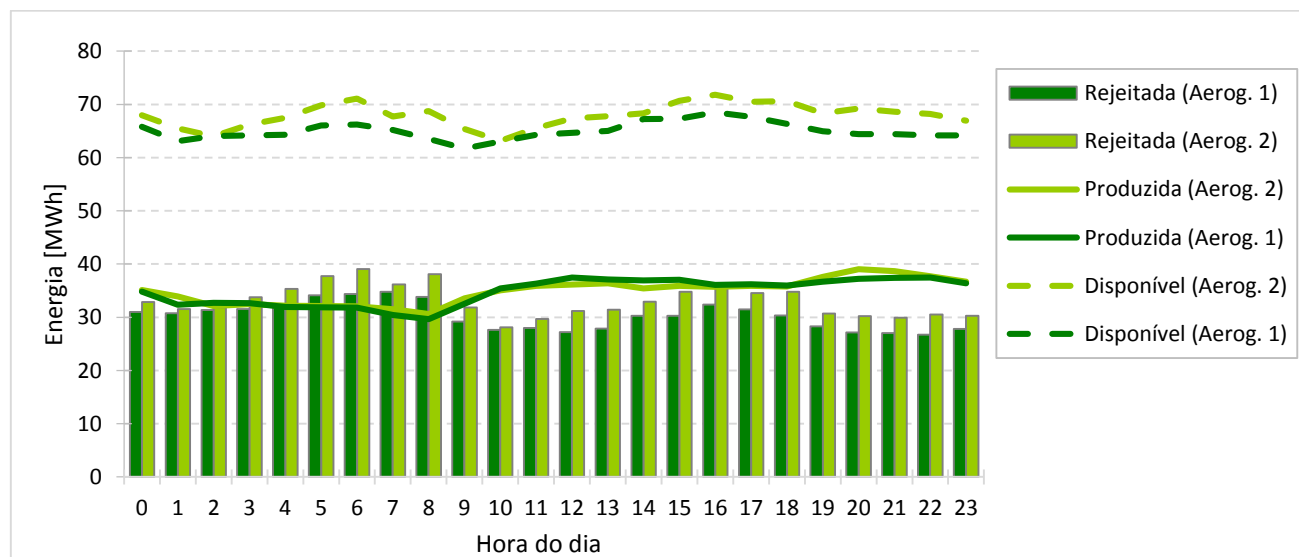
Utilizando-se os registos de produção de energia elétrica e velocidade do vento no parque eólico, disponibilizados pela EDA para o ano de 2011, pode quantificar-se a energia eólica disponível, produzida e rejeitada, bem como caracterizar a forma como essas proporções variaram nesse ano.

A figura 5.2-1 apresenta a variação da produção, rejeição e disponibilidade de energia eólica observadas em 2011 por classe de velocidade, sendo os valores da energia apresentada por cada classe, o resultado número de ocorrências pelo valor da energia verificada em cada ocorrência (períodos de 30 min).

O cálculo da energia disponível resulta do produto do período de tempo pela potência dada pelo fabricante do aerogerador para cada velocidade do vento (médias de 30 min). Posteriormente, a essa energia disponível por classe de velocidade foram descontados 5 % de energia devido à disponibilidade de operação do aerogerador que tipicamente ronda os 95 %. Com o mesmo procedimento, mas descrita em função da hora do dia, são apresentada na figura 5.2-2 as proporções de energia eólica produzida, rejeitada e disponível. Esta análise tem a finalidade de avaliar se existe regulação de potência eólica, no sentido de acompanhar o perfil diário de consumo.



**Figura 5.2-1** - Comparação por classe de vento, entre a energia produzida pelos aerogeradores do parque eólico e a energia disponível pelos mesmos para a frequência de ocorrência do vento observado (períodos de 30 min) na ilha em 2011. O cálculo da energia disponível considera uma disponibilidade de operação dos aerogeradores de 95 %.



**Figura 5.2-2** - Comparação horária, entre a energia produzida pelos aerogeradores do parque eólico e a energia disponível pelos mesmos para a frequência de ocorrência do vento observado (períodos de 30 min) na ilha em 2011. O cálculo da energia disponível considera uma disponibilidade de operação dos aerogeradores de 95 %.

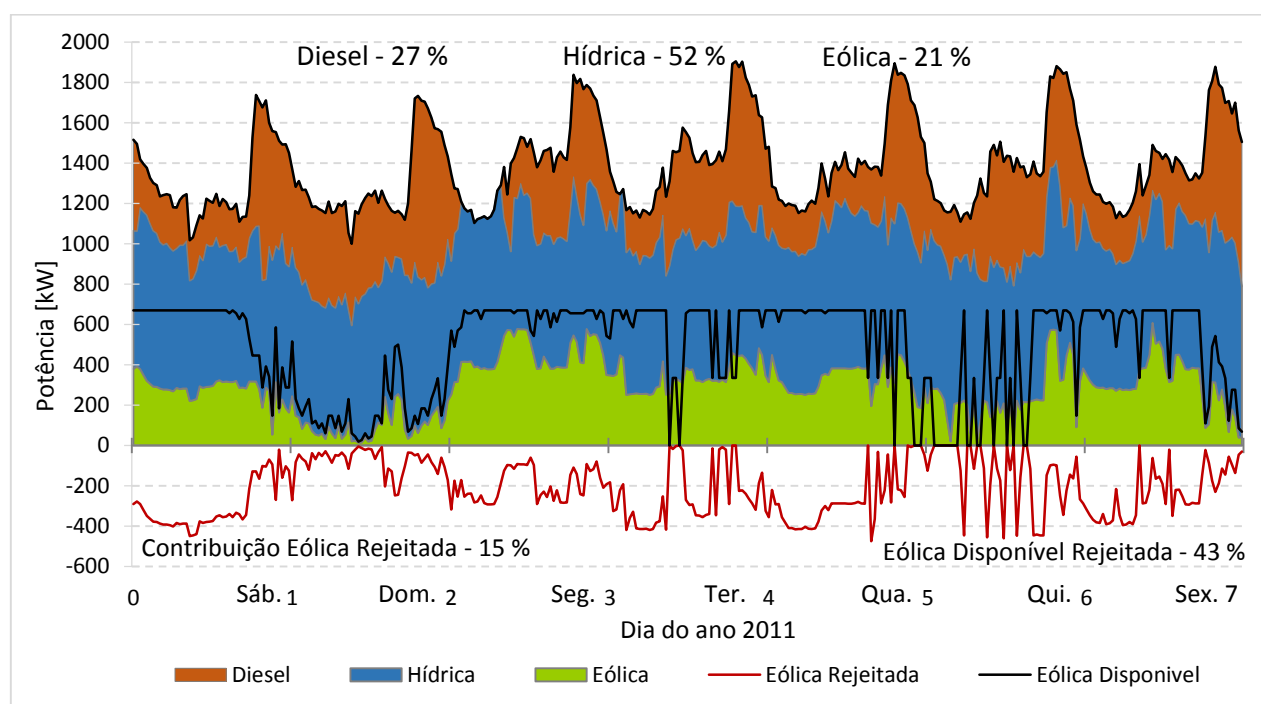
Observa-se na figura 5.2-1 que a energia rejeitada ( $\approx 46\%$ ) tem uma distribuição semelhante à energia aproveitada ( $\approx 54\%$ ) representando quase metade da energia total disponível (3110 MWh). Mesmo para as velocidades do vento no intervalo de 13 a 25 m/s, onde em teoria o aerogerador deitaria uma potência

aproximadamente constante e as variações da velocidade do vento não provocariam grandes flutuações na potência debitada, continua a ser rejeitada tanta energia quanto aquela que é aproveitada.

No caso da análise diária (fig. 5.2-2) observa-se produção superior de energia nas horas de cheia e ponta, e conseqüentemente menor rejeição nesse período, dado que a energia eólica disponível em média varia pouco ao longo do dia. Observa-se que a curva média anual de produção eólica acompanha o perfil diário de consumo, mantendo a sua contribuição para as necessidades de energia elétrica da ilha, aproximadamente constante ao longo do dia com cerca de 14 %.

Esta enorme quantidade de energia rejeitada implica que o custo de produção de energia eólica, maioritariamente definido pelo seu investimento inicial, tem quase o dobro do valor daquele que se pode alcançar com um sistema capaz de absorver toda a energia eólica disponível. Assim, torna-se fundamental estimar se o custo de sistemas capazes de aproveitar essa energia rejeitada conseguem alcançar valores inferiores à redução que estes proporcionarão no custo de produção, tendo também em consideração a redução no consumo de combustíveis fósseis.

Para analisar a forma como é gerida a produção eólica no sistema electroprodutor na ilha, selecionou-se o diagrama de cargas de uma semana com elevada penetração renovável, simultaneamente com elevada disponibilidade eólica e elevadas variações e pontas máximas no consumo, uma vez que representam um maior desafio à gestão do sistema. A figura 6.6 apresenta, para os primeiros 7 dias de 2011, o diagrama de cargas, e ainda a disponibilidade e rejeição de energia eólica verificadas (períodos de 30 min).



**Figura 5.2-3** - Diagrama de carga e contribuição de cada fonte de energia para o consumo total nos primeiros dias do ano de 2011. Contribuição eólica rejeitada face ao consumo total e à energia eólica disponível. Registos médios de períodos de 30 min.

Analisando a figura 5.2-3 observa-se que é raro o momento em que a energia eólica disponível é aproveitada na sua totalidade independentemente de existir ou não excesso de produção renovável face ao consumo, sendo que a maior fração aproveitada de energia eólica disponível ocorre na madrugada do dia 3, quando a penetração renovável atinge os 100 % durante algumas horas. A incerteza na previsão da produção eólica juntamente com as flutuações do consumo limitam a sua utilização à potência máxima disponível porque é necessário deixar uma margem de regulação de potência por forma a suavizar as variações da velocidade do vento e sempre que possível acompanhar também o consumo, por forma a

evitar que os grupos diesel tenham de arrancar e/ou subir muito rapidamente de potência, o que levaria a aumentos brutais no consumo de combustível e maior desgaste dos equipamentos. Para além disso, é ainda necessário evitar o funcionamento dos grupos diesel à potência mínima e aproveitar, sempre que disponível, a potência mais estável fornecida pelos grupos hídricos uma vez que não existe albufeira para armazenar energia, conduzindo novamente à rejeição de energia eólica.

Observe-se também na figura 5.2-3 o período de tempo entre o dia 4 e 6 e veja-se as mudanças bruscas de potência eólica disponível que passa de 0 kW a 660 kW ou a 330 kW, isto é, a potência máxima do grupo de aerogeradores ou de um deles. Isso acontece porque o aerogerador está a operar próximo da sua velocidade limite de vento (25 m/s), sendo que nestas situações deixa de existir margem para a regulação de potência à custa da rejeição de energia, pois facilmente o vento pode ultrapassar a velocidade limite de operação levando à paragem do aerogerador. Estas situações aumentam o risco de cortes no fornecimento de energia e afetam a sua qualidade, o que força novamente o recurso a um arranque e/ou aumento rápido de potência nos grupos diesel e hídrico, também auxiliados pelo volante de inércia.

Por outro lado, a regulação de potência eólica à custa da rejeição de energia também colabora, quando possível, no ajuste da produção ao consumo de energia, a qual pode ser observada na figura 5.2-3 pelas subidas e descidas de potência aquando da transição dos períodos de vazio para ponta e cheia e vice-versa.

Nota: Na figura 5.2-3 observam-se alguns períodos onde se verifica produção de energia eólica quando supostamente não estaria disponível devido à velocidade excessiva do vento, no entanto isso acontece porque como os registos são de médias de 30 minutos, nesse intervalo de tempo ocorreram períodos de tempo com a velocidade do vento inferior ao limite de operação do aerogerador (25 m/s) permitindo a produção de energia.

Para demonstrar que é possível alcançar o desafio do consumo de energia 100 % renovável é apresentada na figura 5.2-4 o dia 20 de Dezembro de 2010 onde se verificou um período contínuo de várias horas nessas condições.

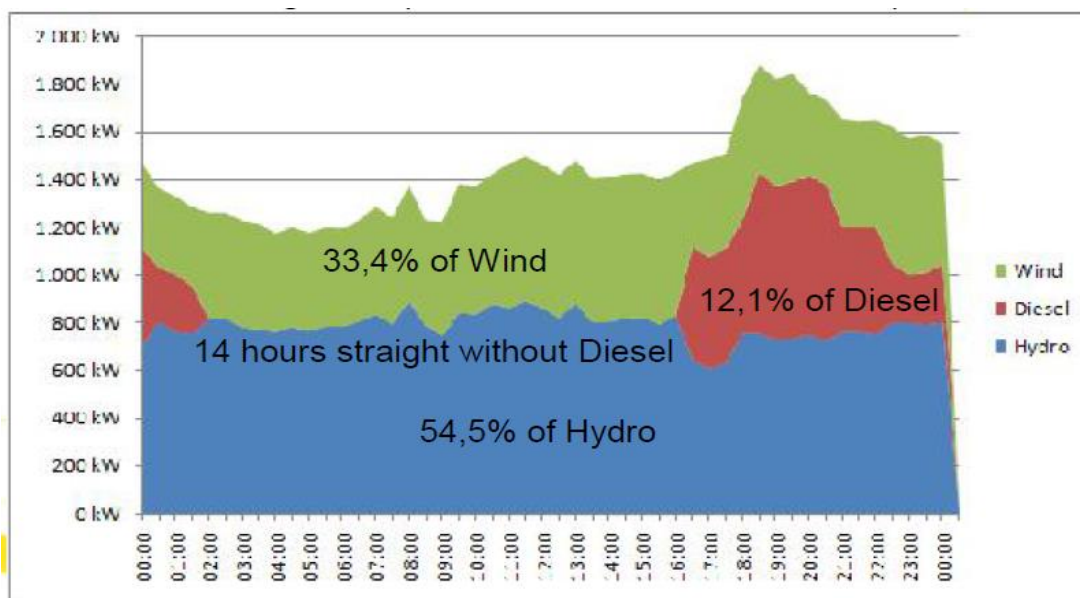


Figura 5.2-4 - Diagrama de carga verificado no dia 20 de Dezembro de 2010 na ilha das Flores (Eurelectric, 2012)..

De acordo com os registos apresentados na figura 5.2-4 foram conseguidas 14 horas contínuas de abastecimento do consumo com 100 % de energia renovável sendo que nesse dia a penetração renovável

ficou próxima de 88 % dos quais 54,5 % foram hídrica e 33,4 % foram de eólica. O diagrama mostra também a capacidade de combinação hídrica/eólica em ajustar-se às subidas e descidas na potência requerida.

A análise dos diagramas de carga anteriores e do sistema electroprodutor da ilha, permite concluir que o aumento da fração de energia renovável no consumo poderá ser conseguido com recurso a uma central hídrica com albufeira, cuja capacidade seja suficiente para armazenar energia por alguns dias, garantindo potência a curto prazo e capacidade de resposta às flutuações horárias da energia eólica e do consumo. Para colaborar nessa tarefa contribuindo para uma gestão eficiente do sistema, é também fundamental a capacidade de previsão dos recursos hídrico e em especial do recurso eólico, por parte do modelo atmosférico utilizado, o qual permitiria reduzir a rejeição de energia eólica.

No entanto, as flutuações instantâneas da potência eólica provocam oscilações na tensão e na frequência que têm de ser suavizadas, sendo o volante de inércia o responsável por essa função, absorvendo energia eólica nos seus picos e injetando-a na rede elétrica aquando das suas quebras, sendo que podia ser considerada a hipótese de reforço de potência do volante de inércia.

Contudo, será sempre indispensável a central diesel para os períodos de fraco recurso eólico e hídrico, nomeadamente nos meses de Verão e dias ou horas de fraco recurso eólico, onde a potência hídrica será insuficiente para suprir o consumo.

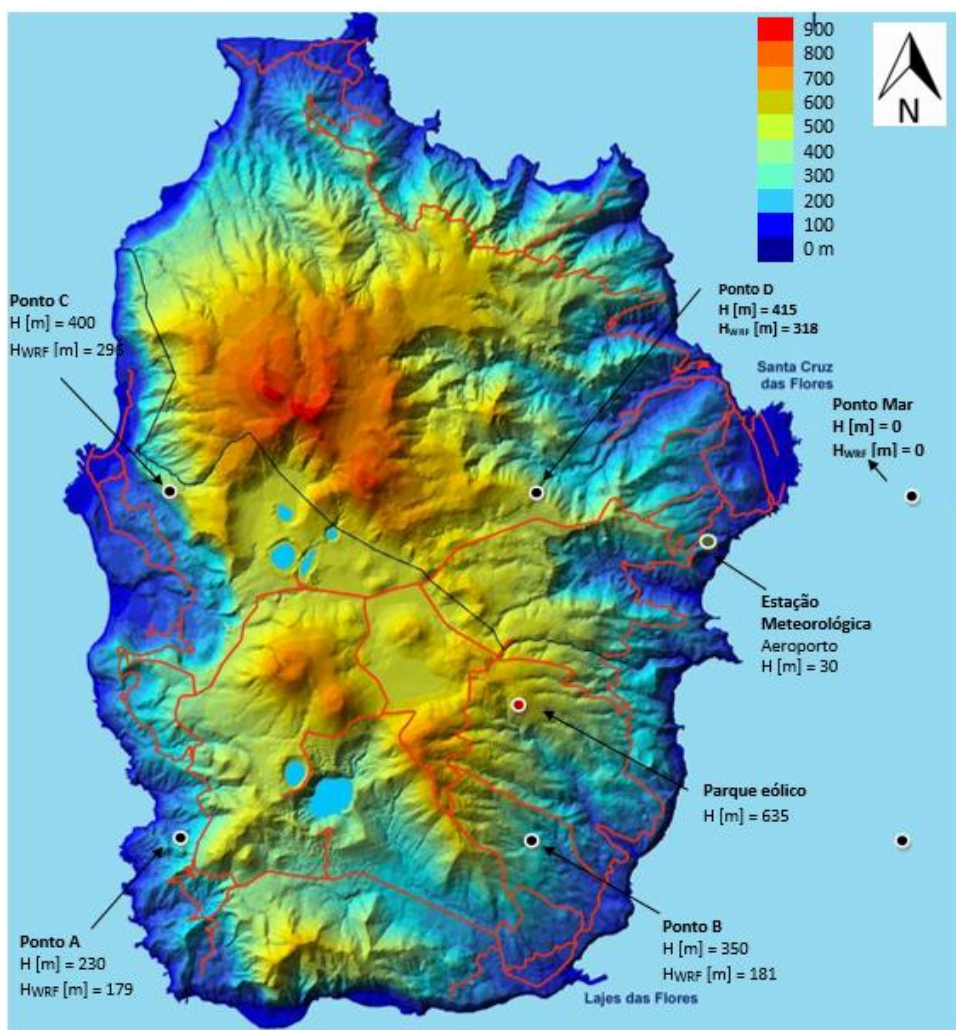
Não obstante, pretende-se o menor custo de produção de energia combinada com a maior integração possível de energia renovável, o que na ilha das Flores é alcançável devido ao seu altíssimo potencial eólico e hídrico. Para que isso se torne possível é necessário criar cenários com diferentes sistemas de produção de energia e estimar os custos de produção inerentes à obtenção da segurança e qualidade da energia entregue à rede elétrica com o apoio de simulações dinâmicas computacionais que avaliem o seu desempenho. Porém, no que respeita ao recurso eólico, não foram encontrados projetos que incluam planos para instalar mais potência desta fonte renovável na ilha das Flores.

## 6 Validação do modelo WRF

Na ilha das Flores, com elevado potencial hídrico e eólico, uma das etapas essenciais para um melhor aproveitamento renovável consiste na eficácia de previsão do modelo numérico utilizado. Se em relação à produção hídrica, consegue-se alguma previsibilidade da disponibilidade hídrica para as horas seguintes devido ao pequeno armazenamento que a central hídrica apresenta e também ao desfasamento entre precipitação e a afluência das águas, no caso da energia eólica tal não acontece, pois o aproveitamento deste recurso tem carácter instantâneo sendo portanto a fiabilidade do modelo de previsão atmosférica a ferramenta primordial para a maximização desse aproveitamento. No entanto, no caso da energia hídrica a previsão da precipitação a alguns dias é fundamental para uma gestão eficiente do sistema electroprodutor nas próximas 24 horas ou nos poucos dias precedentes.

Neste trabalho o método de validação do modelo WRF baseia-se na comparação entre dados observados e modelados das variáveis meteorológicas, vento e precipitação, para a qual se seleccionou o ponto do modelo (em terra) mais próximo.

A posição dos pontos da malha (geográfica e altitudes) com uma resolução de 6 km e os dois locais de observação do vento e precipitação encontram-se apresentados no mapa 1.



**Mapa 1** – Mapa altimétrico da ilha das Flores e localização dos pontos do modelo bem como dos pontos de observação, estação meteorológica do aeroporto e parque eólico. **H** corresponde à altitude real dos pontos e **H<sub>WRF</sub>** corresponde à altitude virtual do modelo WRF.

## 6.1 Variável meteorológica: Vento

Com o objetivo de validar o modelo atmosférico WRF são utilizadas as observações do parque eólico e aeroporto, para as quais estão disponíveis os registos (períodos de 30 min) para o ano completo de 2011 e para o período de 1999 a 2011 (períodos horários), respetivamente. Contudo, as observações do vento na estação do aeroporto apresentam períodos de falhas consideráveis podendo distorcer a realidade. Por esse motivo, consideraram-se elegíveis aqueles anos onde todos os períodos anuais e mensais que apresentaram uma disponibilidade de registos superior a 85 %, resultando em 9 anos consecutivos de elegibilidade, correspondente ao período de 1 de Janeiro de 2003 a 31 de Dezembro de 2011.

### 6.1.1 Comparação entre observações

A comparação entre duas estações de observação do vento na ilha torna-se fundamental para evidenciar a variação espacial do vento, especialmente devido à diferença de cotas onde se encontram, embora a estação do aeroporto seja fortemente afetada pela orografia acidentada e proximidade das habitações.

O vento na ilha das Flores tem sido registado pela estação meteorológica a 32 m acima do nível médio do mar (ANMM) do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) situada no aeroporto da ilha, registando a velocidade e direção do vento 10 m acima da superfície do terreno (AST). O outro local de registo do vento provém dos anemómetros dos 2 aerogeradores do parque eólico da ilha, sendo disponibilizado pela EDA com registos da velocidade a cada 30 min e rumo do vento diários, os quais estão localizados ligeiramente a sudeste da ilha a 635 m ANMM e a 40 m AST.

A tabela 6-1-1 apresenta a variabilidade inter e intra-anual do vento observado na estação do aeroporto e respetivos desvios mensais no ano de 2011 (único ano disponível no parque eólico para posterior comparação) face ao período de longo termo (01/01/2003 a 31/12/2011).

**Tabela 6.1-1** Variabilidade Inter e Intra-Anual observada (10 m AST) na estação do aeroporto (registos de 1h).

Mês\Ano	Velocidade (2011) [m/s]	Velocidade (2003-2011) [m/s]	Desvio [m/s]	Desvio [%]
Janeiro	5,1	5,4	-0,3	-5,3
Fevereiro	5,8	5,4	0,4	7,7
Março	4,8	5,1	-0,3	-6,6
Abril	5,0	4,6	0,3	7,5
Maio	3,1	3,9	-0,7	-18,5
Junho	4,1	3,8	0,3	8,7
Julho	2,6	3,0	-0,4	-13,3
Agosto	3,4	3,2	0,2	5,4
Setembro	3,9	3,7	0,2	5,1
Outubro	4,5	4,4	0,1	2,5
Novembro	6,3	5,0	1,4	27,4
Dezembro	4,2	5,1	-1,0	-18,7
<b>Anual</b>	<b>4,4</b>	<b>4,4</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,2</b>

Observa-se pela tabela 6.1-1 que o ano de 2011 se caracteriza por um ano médio de vento face ao período de 2003-2011, tal como a maior parte dos meses desse ano.

Na figura 6.1-1 é apresentada a variabilidade intra-anual observada (10 m AST) em 2011 pelos anemómetros do parque eólico (635 m ANMM) e aeroporto (32 m ANMM), bem como os desvios mensais da velocidade do vento no parque eólico face ao aeroporto. Devido à diferença de alturas de observação em relação à superfície do terreno (AST), os registos no parque eólico foram extrapolados de 40 m para 10 m com recurso à lei de potências (Eq. 2.9), cujo seu expoente  $\alpha$  de 0,13 resultou da Eq. (2.2), onde foi imposta a rugosidade do terreno de 0,03 m representativa da região circundante ao parque eólico.

A figura 6.1-2 apresenta o ciclo diurno médio do vento em 2011 e a figura 6.1-3 o ciclo diurno médio do vento no mês de Julho desse ano, mês com maior evidência do ciclo diurno do vento na estação do aeroporto.

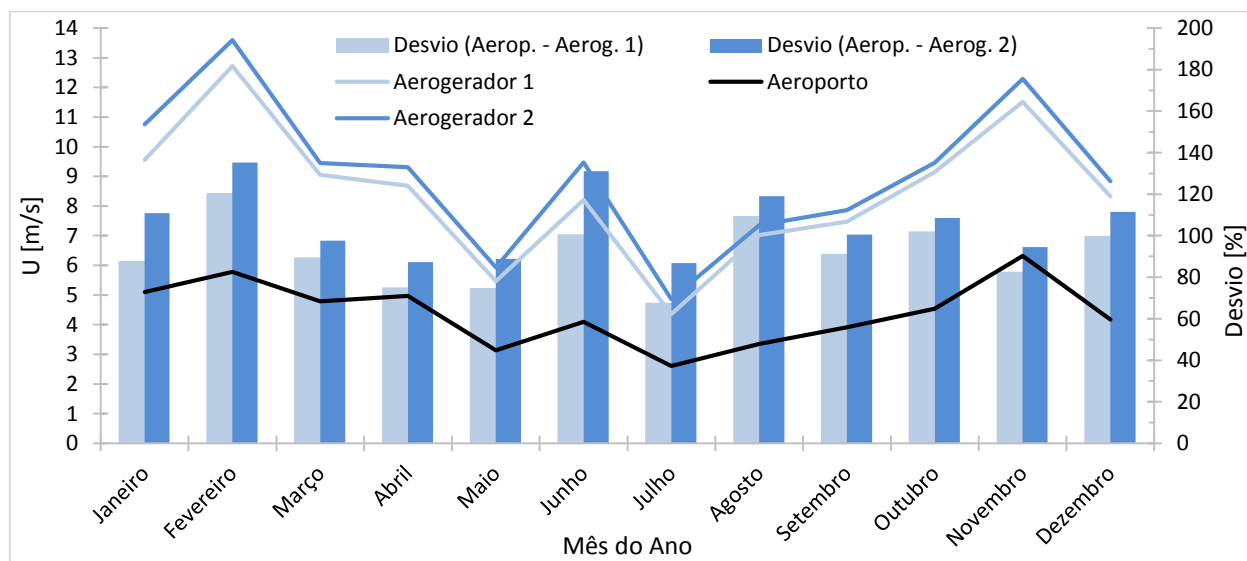


Figura 6.1-1 Variabilidade intra-anual entre anemómetros do parque eólico e aeroporto a 10 m AST (com a velocidade medida nos anemómetros do parque eólico extrapolada de 40 m para 10 m AST).

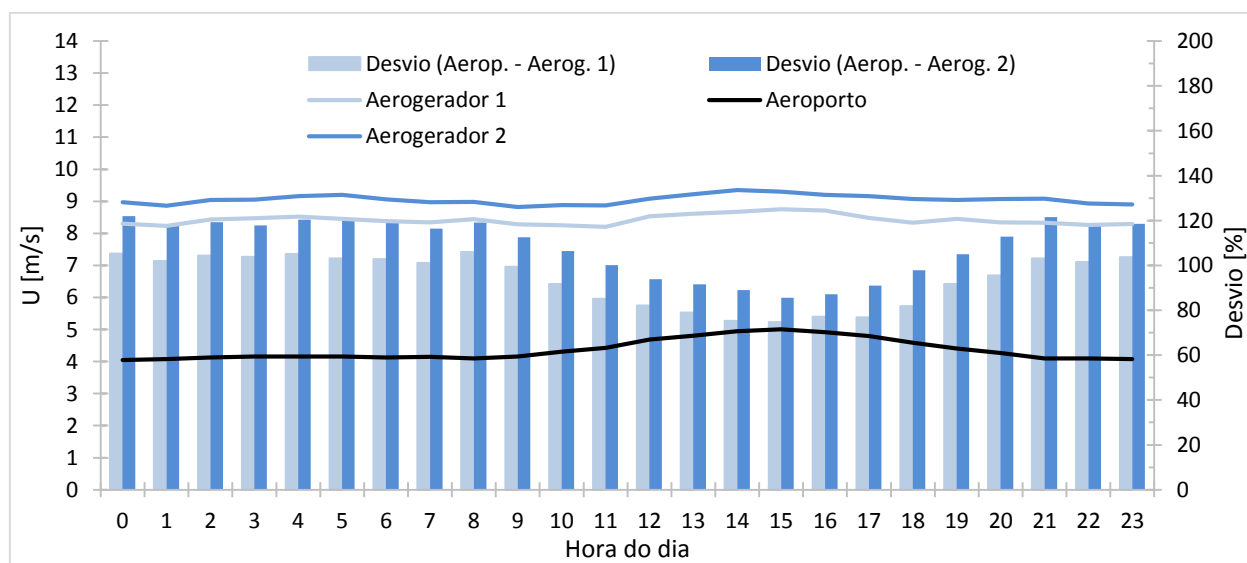


Figura 6.1-2 Ciclo diurno da velocidade do vento no parque eólico e no Aeroporto no ano de 2011 (h = 10 m AST).

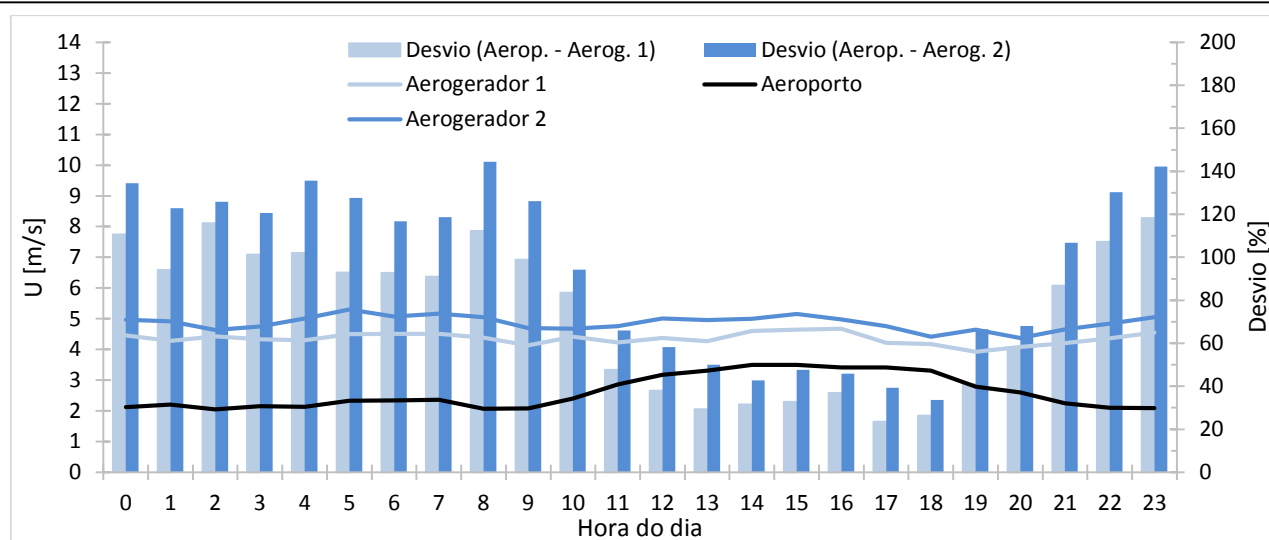


Figura 6.1-3 Ciclo diurno da velocidade do vento no parque eólico e no Aeroporto em Julho de 2011 (h = 10 m AST).

No caso da direção do vento, a comparação entre os dois locais de observação foi realizada selecionando-se os meses que melhor poderiam representar o comportamento do vento ao longo do ano. Deste modo os meses de Janeiro e Julho foram selecionados para representar a estação com intensidades do vento maiores e menores, respetivamente.

As figuras seguintes (figs. 6.1-4 a 6.1-7) apresentam o comportamento da intensidade e rumo do vento ao longo do mês, observadas na estação do aeroporto e anemómetro do primeiro aerogerador. Devido à proximidade dos dois anemómetros do parque eólico (aproximadamente 250 m), e pelo facto do anemómetro 1 sofrer de menor efeito orográfico favorável a um aumento da velocidade do vento, apenas se selecionou o primeiro anemómetro para comparação com os valores observados no aeroporto.

O rumo do vento no parque eólico foi disponibilizado em médias diárias e no aeroporto em médias horárias. Para comparar a direção, atribuiu-se a cada registo horário da velocidade do vento no parque eólico para cada, o valor médio diário da direção do vento. Esta assunção pode ser razoavelmente admitida porque as variações do rumo do vento no parque eólico devem-se principalmente aos sistemas de escala sinóptica, onde o rumo do vento geralmente não se altera tão bruscamente como acontece na presença de brisas locais.

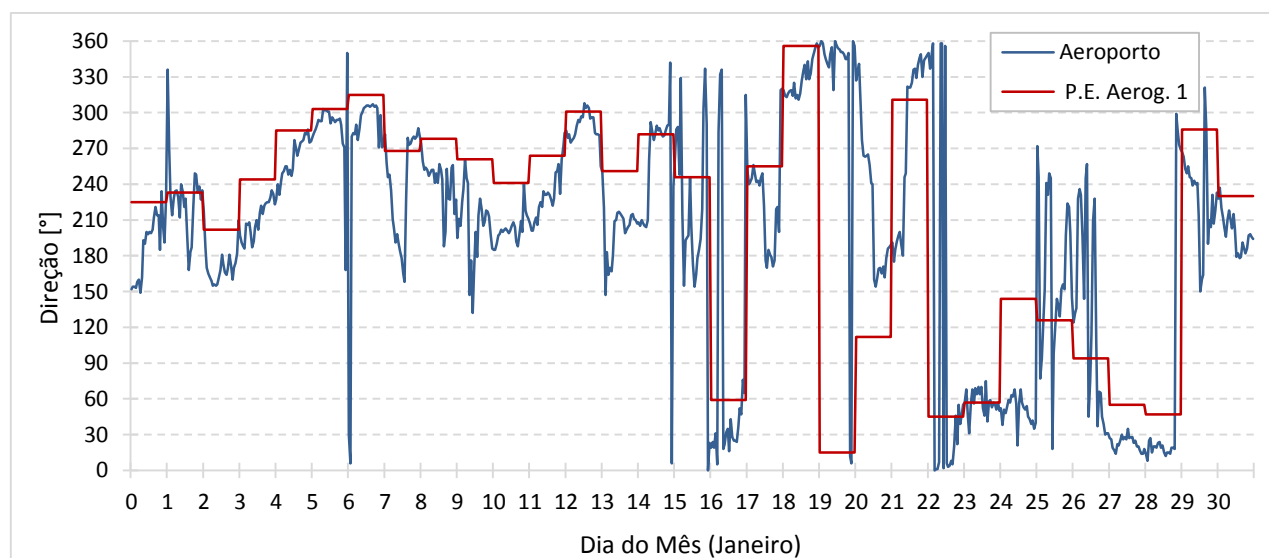


Figura 6.1-4 Direção do vento observada no Aerogerador 1 (bin de 1 dia) e Aeroporto (bin 1 hora) em Janeiro 2011 (h=10 m AST).

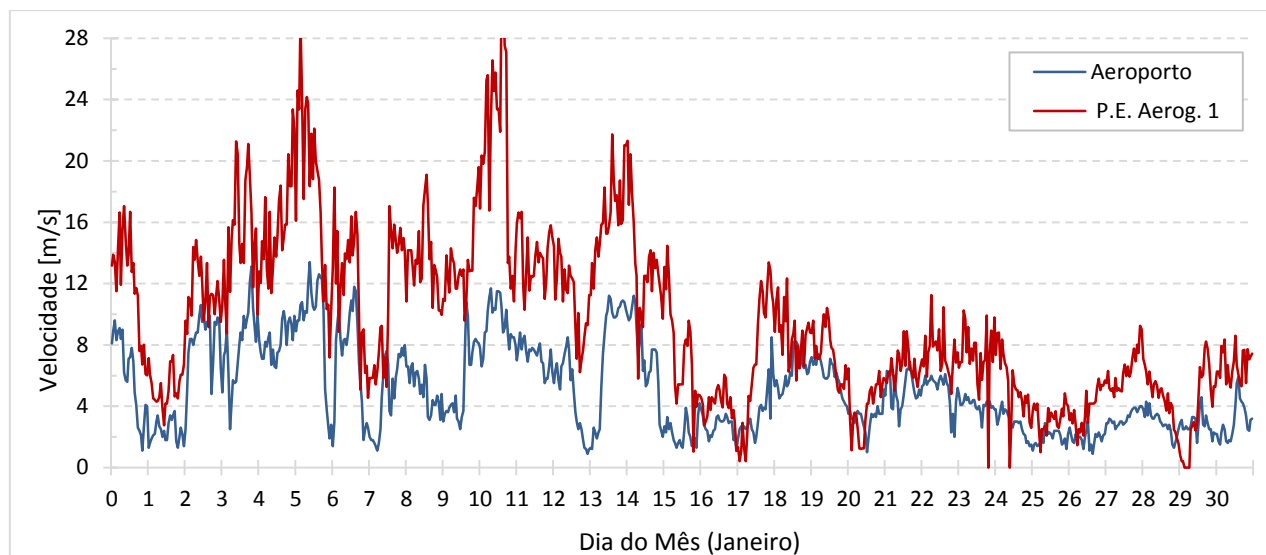


Figura 6.1-5 Velocidade do vento observada no Aerogerador 1 e Aeroporto em Janeiro de 2011 (bin de 1 hora e h = 10m AST).

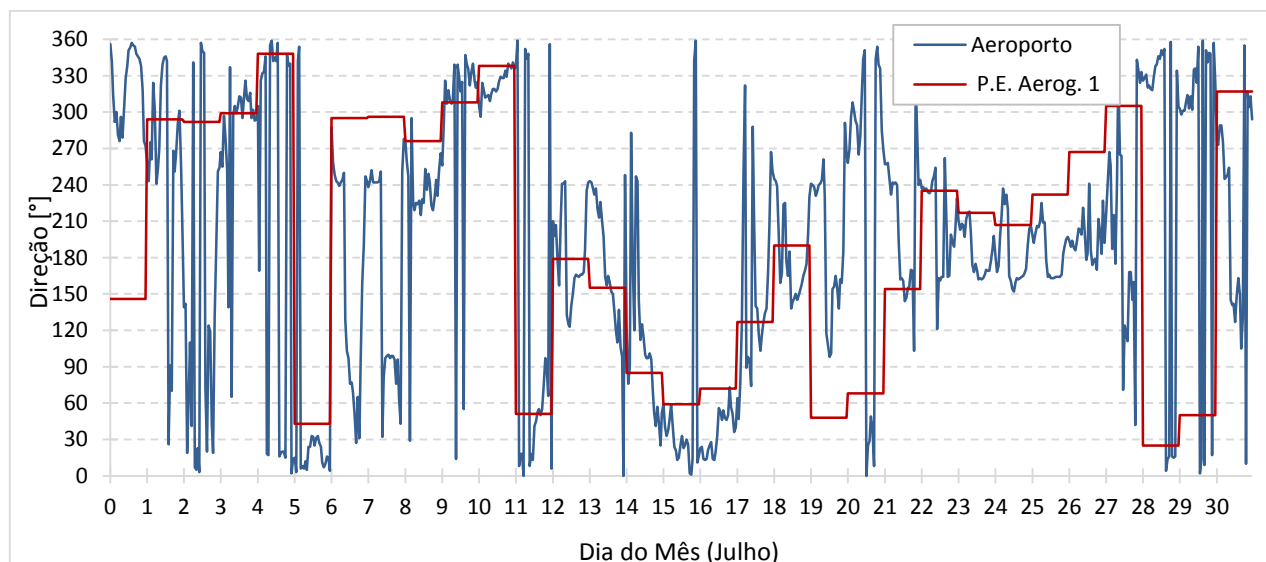


Figura 6.1-6 Direção do vento observada no Aerogerador 1 (bin 1 dia) e Aeroporto (bin de 1 hora) em Julho de 2011 (h= 10 m AST).

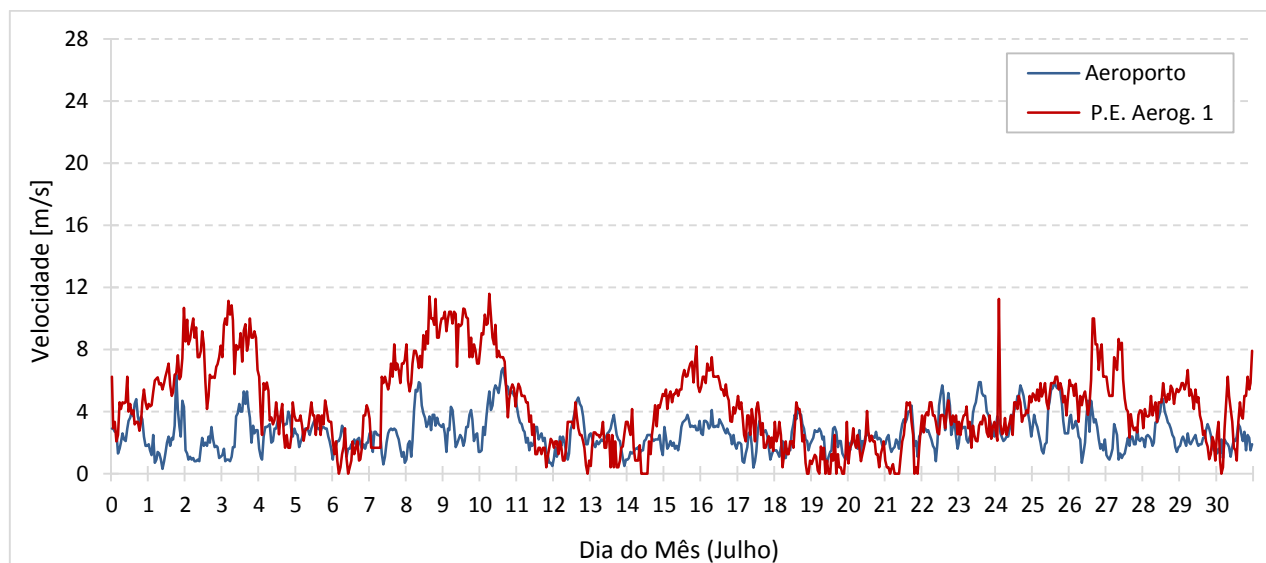


Figura 6.1-7 Velocidade do vento observada no Aerogerador 1 e Aeroporto em Julho de 2011 (bin de 1 hora e h = 10m AST).

Para o histograma de distribuição das velocidades do vento observadas no aerogerador 1 (40 m AST) do parque eólico e aeroporto (10 m AST) apresentados nas figuras 6.1-8 e 6.1-9, fez-se também a extrapolação dos registos do aerogerador 1 de 40 m para 10 m de altura recorrendo-se novamente à lei de potência. As distribuições de velocidades apresentadas correspondem ao ano de 2011 para os registos de médias horárias com 97,4 % de disponibilidade dos dados.

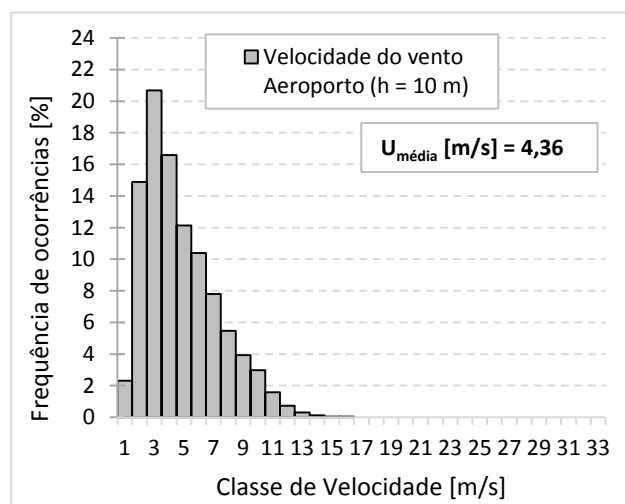


Figura 6.1-8 Distribuição da velocidade do vento observada no anemómetro do Aeroporto (períodos de 1 h) no ano de 2011.

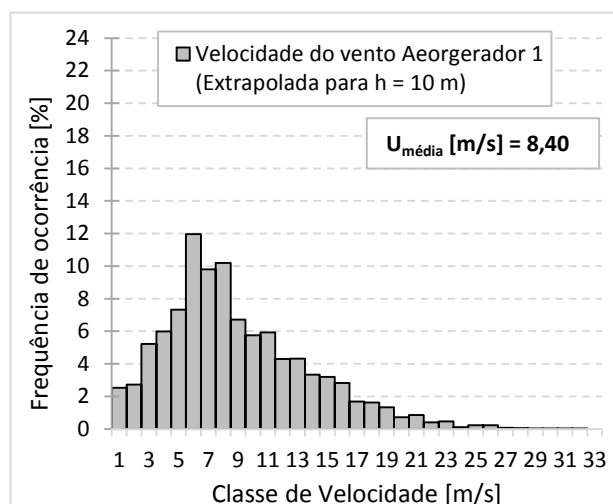


Figura 6.1-9 Distribuição da velocidade do vento observada no anemómetro 1 do Parque Eólico (períodos de 1 h) ano de 2011.

Verifica-se que o parque eólico situado na zona alta da ilha regista velocidades do vento de grandeza muito superior, aproximadamente o dobro, às velocidades registadas na estação do aeroporto. Tal acontece não apenas devido à altitude muito superior da localização do parque eólico, mas também pelo facto da estação do aeroporto se encontrar num local bastante perturbado e protegido do vento (e.g. escarpa a sul, montanha a oeste).

Verifica-se que o vento médio mensal é muito superior nos dois anemómetros do parque eólico, apresentando as diferenças máximas nos meses de Fevereiro e de Novembro.

O ciclo diurno médio da velocidade do vento (fig. 6.1-2) é praticamente inexistente no parque eólico, enquanto no aeroporto se identifica um pouco do efeito de brisa, com vento mais intenso no período entre as 13h-17h, tornando-se aí menores as diferenças entre a velocidade do vento no parque eólico e no aeroporto. No mês de Julho a brisa torna-se ainda mais evidente na estação do aeroporto, enquanto no parque eólico a velocidade do vento pouco aumenta nessas horas (13h-17h), atenuando as grandes diferenças de velocidade do vento entre os dois locais.

Na análise do comportamento do vento ao longo dos dois meses representativos das estações, Inverno e Verão (figs. 6.1-4 a 6.1-7), denotam-se grandes diferenças. Em Janeiro (fig. 6.1-4) denota-se uma certa concordância entre as curvas da direção do vento no aeroporto (período horário) e parque eólico (período diário), sendo que a direção do vento no parque eólico apresenta frequentemente um desvio no sentido horário em relação ao aeroporto. Este facto é verificado principalmente na primeira quinzena do mês, período onde ocorrem as maiores intensidades do vento.

Relativamente à velocidade do vento entre ambas as observações, esta apresenta uma elevada diferença de intensidade, sendo ainda mais intensa sob a ocorrência dos picos de velocidade. No entanto as

oscilações da velocidade do vento apresentam um comportamento semelhante devido à presença de sistemas frontais que impõem a sua influência, sobrepondo-se a eventuais brisas que possam ocorrer.

No mês de Julho nota-se um comportamento completamente distinto em relação à velocidade e rumo do vento nos dois locais. Não existe relação entre as duas curvas de velocidade, tendo um comportamento completamente distinto, que indica não existir qualquer relação entre o vento observado nos dois locais. Verifica-se nesse mês, que na zona do aeroporto o vento está calmo ou fraco a maior parte do tempo com direção variável devido à sobreposição do efeito de brisas sobre o vento sinóptico.

Em síntese, devido à diferença de altitudes e orografia na área dos dois locais de observação do vento, verificam-se grandes disparidades nas variações do comportamento do vento, sendo a sua diferença menor nos meses de Inverno e maior nos meses de Verão.

A grande diferença nas altas intensidades do vento é mostrada pelo histograma de velocidades (figs. 6.1-8 e 6.1-9), observando-se no parque eólico um grande número de registos horários do vento superiores a 17 m/s, enquanto no aeroporto não se observa nenhuma hora com vento superior a 17 m/s, e poucas são as horas com vento superior a 13 m/s.

Os meses de Verão na ilha, meses tipicamente com influência anticiclónica devido à maior influência do AA (Anticiclone dos Açores) no estado do tempo, conduzem a uma maior influência local no comportamento do vento durante estes meses, tendo maior variação espacial e sendo mais difícil a sua previsão pelos modelos atmosféricos.

O interesse da comparação entre os dois pontos de observação do vento baseia-se como informação de apoio para a validação feita no capítulo seguinte, onde se procura comparar as observações dos dois locais com as previsões do modelo WRF, sendo fundamental conhecer-se a variação espacial do vento na ilha.

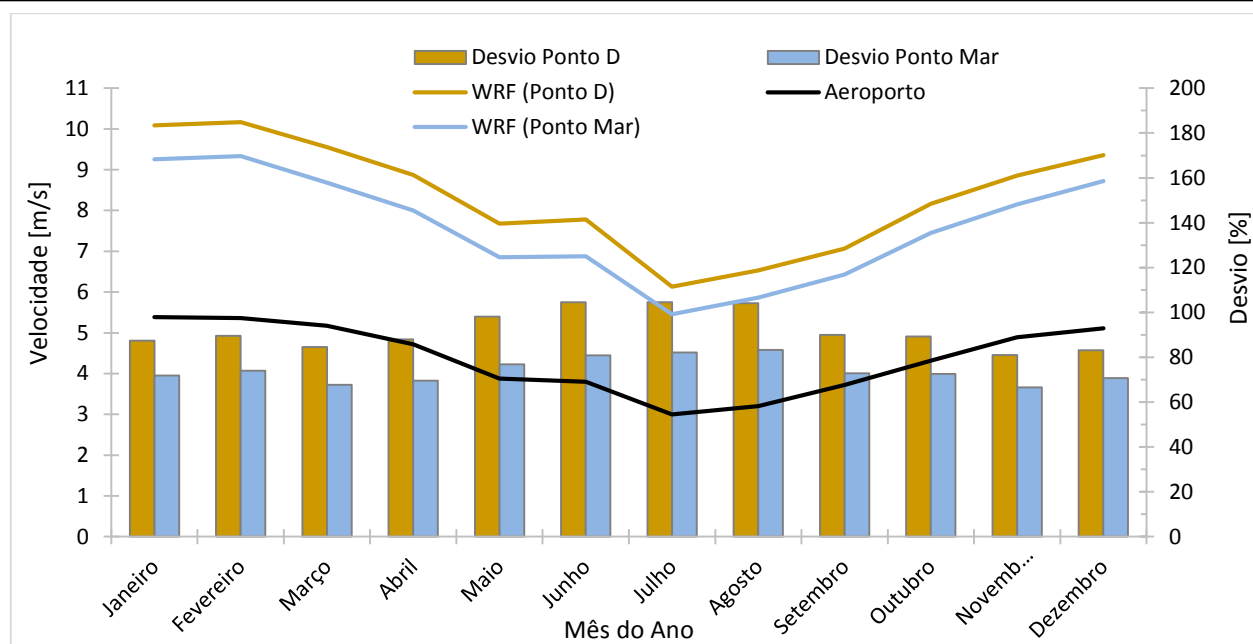
### **6.1.2 Validação do modelo WRF com as observações no aeroporto**

De forma a validar as previsões do modelo atmosférico WRF com as observações do vento no aeroporto, (ambas a 10 m AST), são comparadas a velocidade e rumo do vento utilizando o período de 9 anos de observação referido anteriormente (01/01/2003 a 31/12/2011). Os pontos da malha do modelo que foram selecionados seguem o critério de maior proximidade, sendo por isso usado o ponto D situado sobre terra distando cerca de 4 kms para WNW. Pelo facto do ponto D se encontrar a uma altitude muito superior, comparou-se também com o ponto Mar situado sobre o mar distando cerca de 2 kms para ENE.

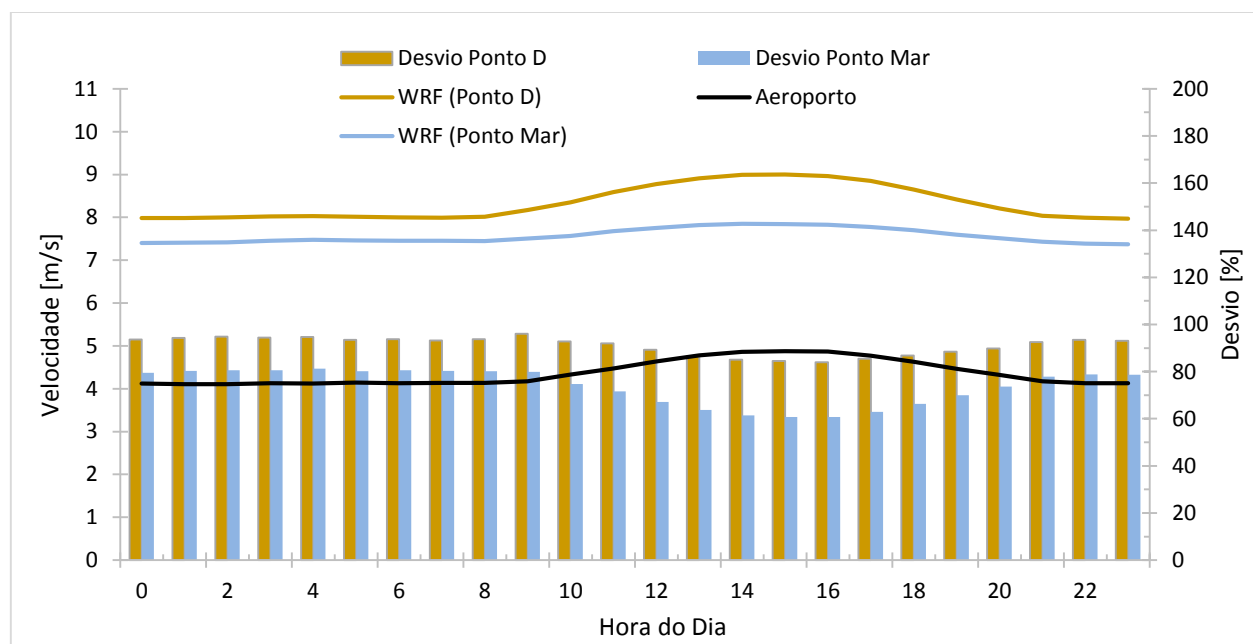
As observações no aeroporto encontram-se a 32 m ANMM, enquanto o ponto D do modelo WRF se encontra a 318 m ANMM. Também a comparação com o ponto Mar do modelo WRF apresenta uma limitação traduzida pela elevada diferença na rugosidade da superfície, sendo no mar (ponto Mar) na ordem de 0,0002 m e em terra (aeroporto) na ordem de 0,03 m.

Devido a essa limitação e com o intuito de equacionar se será aceitável efetuar uma correlação e obter-se os parâmetros estatísticos desses dados, são primeiramente comparados os desvios da velocidade do vento apresentados pelo modelo WRF face às observações no aeroporto. A figura 6.1-10 e 6.1-11 apresentam respetivamente, a variabilidade anual e o ciclo diurno da velocidade do vento observada e simulada para o período referido de 9 anos.

Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável



**Figura 6.1-10** Variabilidade intra-anual observada no Aeroporto e simulado pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) a 10 m AST para o período de 9 anos. (01/01/2003 a 31/12/2011). O desvio representa a diferença relativa do ponto face às observações no aeroporto.



**Figura 6.1-11** Ciclo diurno da velocidade do vento observada no Aeroporto e simulado pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) a 10 m AST para o período de 9 anos. (01/01/2003 a 31/12/2011). O desvio representa a diferença relativa do ponto face às observações no aeroporto.

No caso da direção do vento, a análise comparativa entre as observações no aeroporto e as simulações do modelo WRF, pode ser realizada com recurso à visualização do seu comportamento (intensidade e direção em médias de 1h) ao longo de um dado período representativo de uma série de dados, o qual é neste caso de 1 mês, para os meses de Janeiro e Julho, apresentados nas figuras 6.1-12 a 6.1-15.

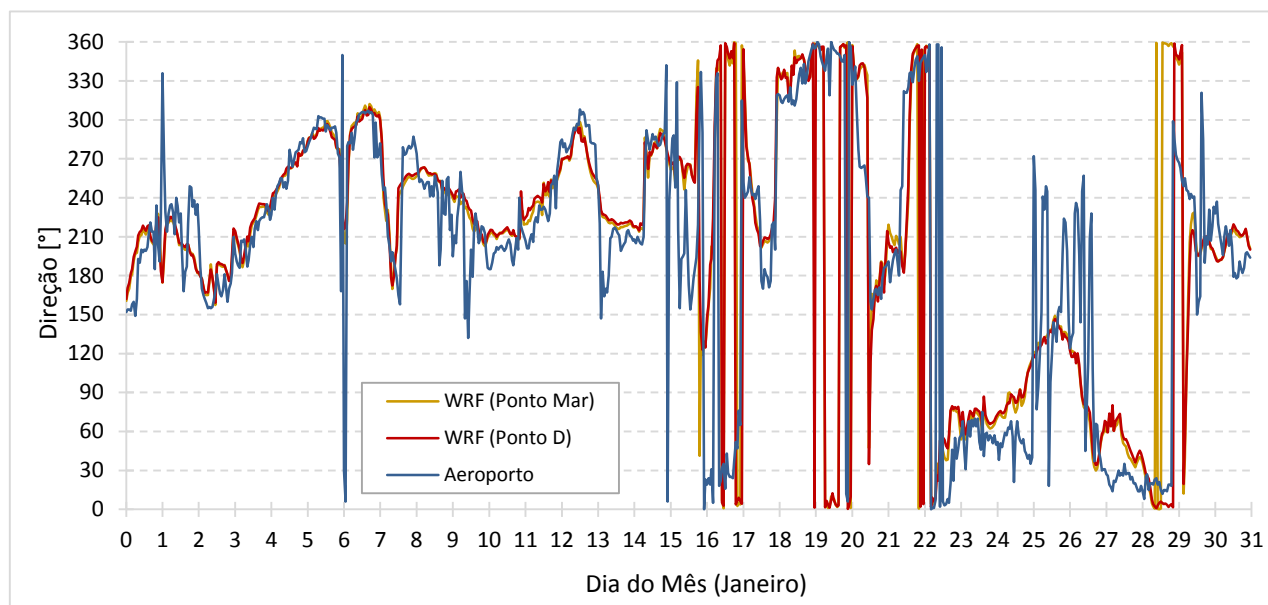


Figura 6.1-12 Direção do vento observado no Aeroporto e simulada pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) (período de 1 hora) em Janeiro de 2011 (h = 10 m AST).

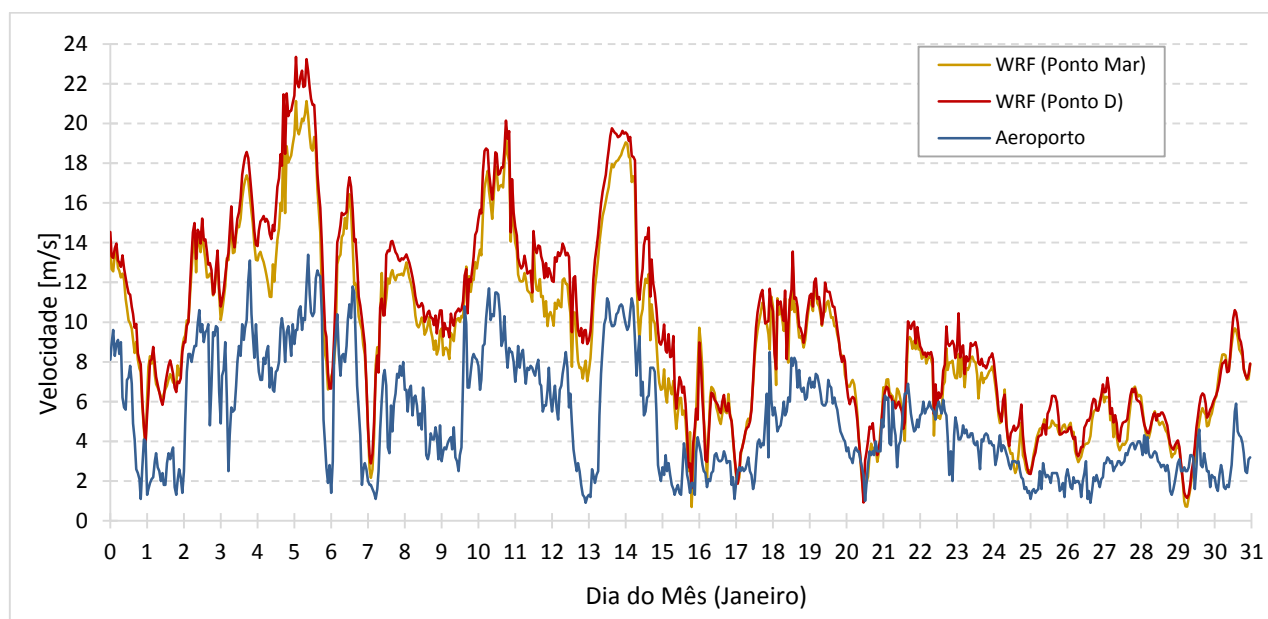


Figura 6.1-13 Velocidade do vento observado no Aeroporto e simulada pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) (bin de 1 hora) em Janeiro de 2011 (h = 10 m AST).

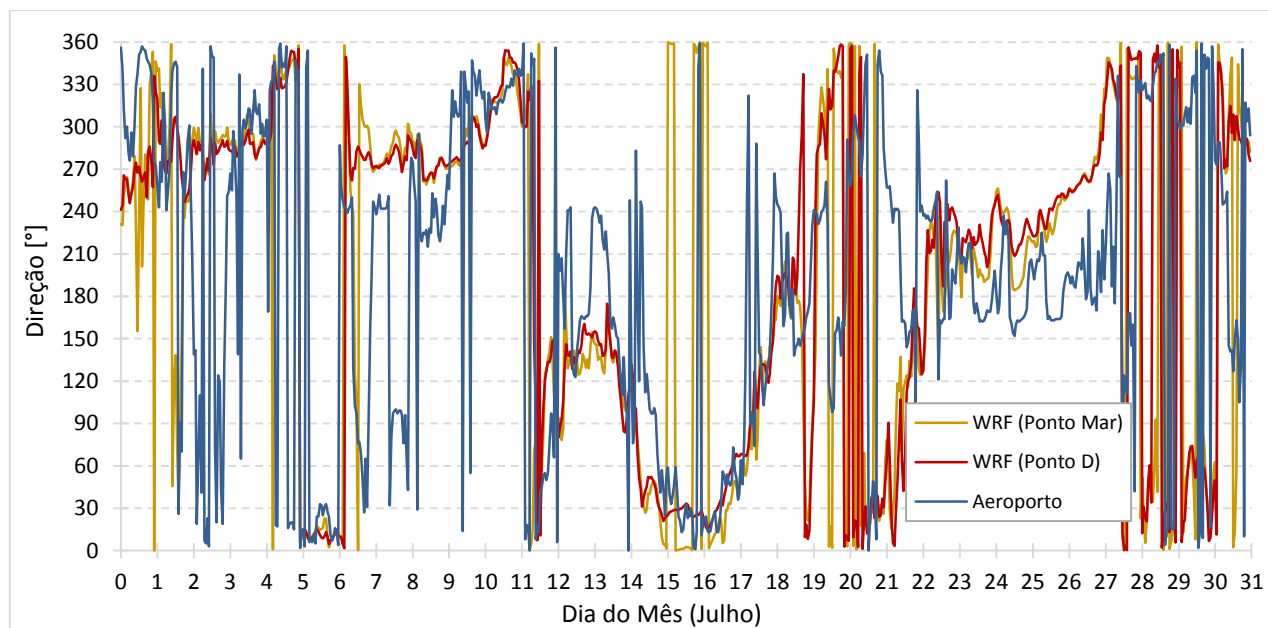


Figura 6.1-14 Direção do vento observada no Aeroporto e simulada pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) (período de 1 hora) em Julho de 2011 (h = 10 m AST).

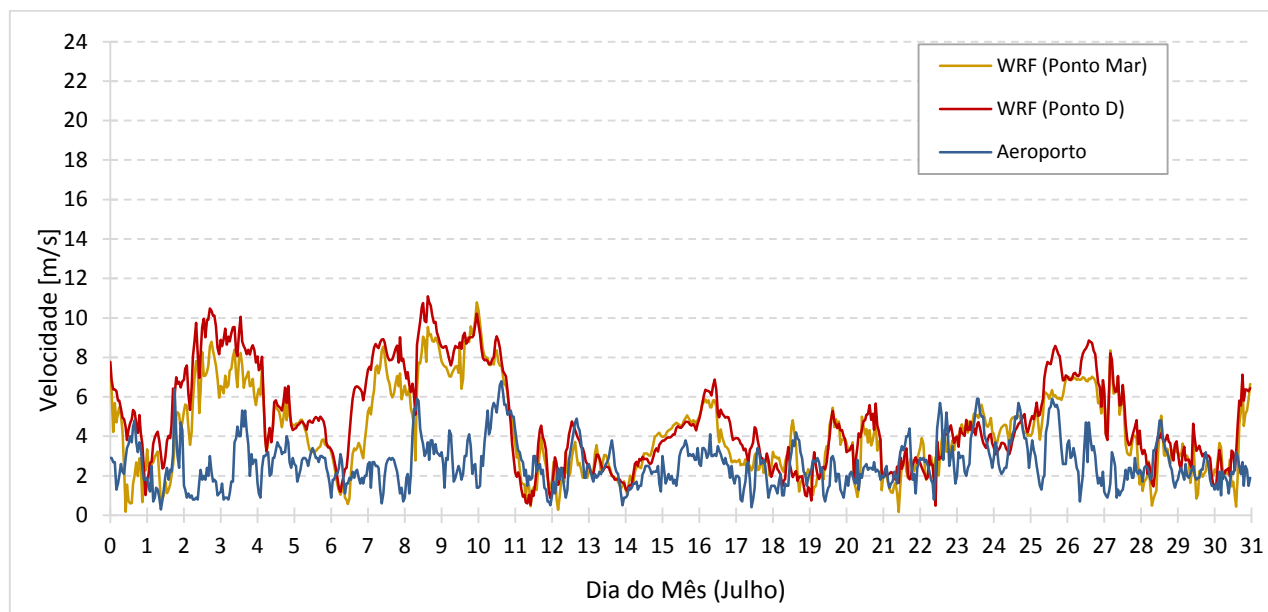
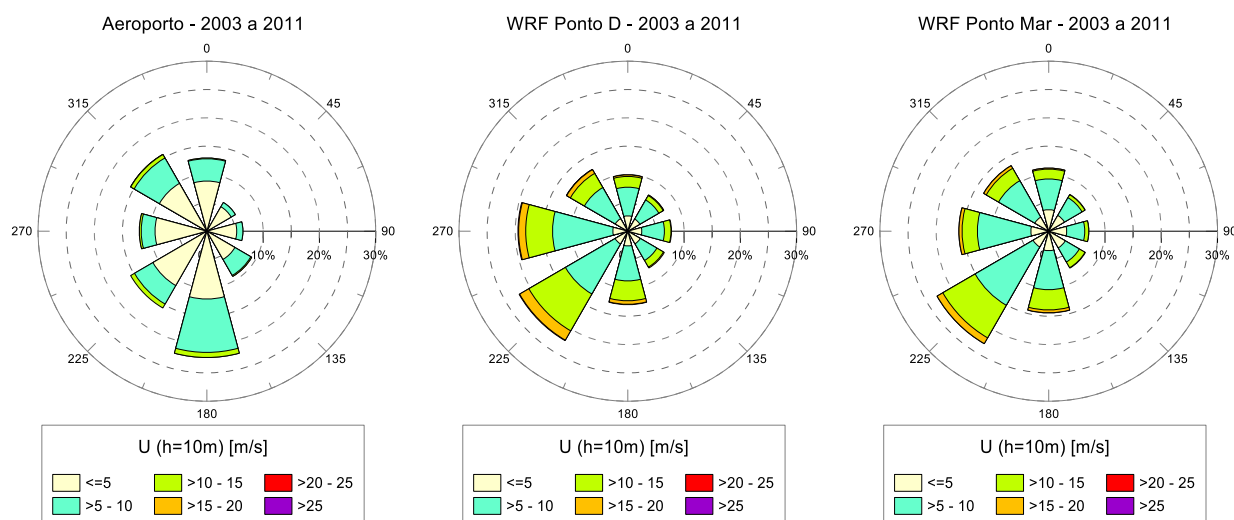


Figura 6.1-15 Velocidade do vento observada no Aeroporto e simulada pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) (período de 1 hora) em Julho de 2011 (h = 10 m AST).

As rosas de ventos relativas às observações do vento no aeroporto e simulações do modelo WRF no ponto D e ponto Mar, são apresentadas na Figura 6.1-16, as quais representam a distribuição do vento por setor e classe de velocidades correspondente ao período de 9 anos de dados, de 2003 a 2011, com uma disponibilidade total de dados de 98 %.



**Figura 6.1-16** Rosa de ventos observada no Aeroporto e simulada pelo modelo WRF (Ponto D e Ponto Mar) a 10 m AST para o período de 9 anos consecutivos (01/01/2003 a 31/12/2011).

As médias mensais da velocidade do vento do modelo são bastante superiores relativamente às observações na estação do aeroporto, em torno de 80 % superior, sendo em termos percentuais maiores nos meses de Verão (Junho, Julho e Agosto). Essa diferença de velocidade ao longo dos meses é significativamente maior face ao ponto de terra (ponto D), devido à cota elevada que este se encontra face ao ponto de mar.

A variação da intensidade do vento no ciclo diurno médio consegue ser bem representada pelo ponto de terra do modelo (ponto D), isto é, o aumento de intensidade durante o dia, mantendo-se no entanto a elevada diferença na intensidade do vento.

Durante o mês de Janeiro, representativo do Inverno, observa-se nas Figura 6.1-12 e 6.1-13 que as curvas dos pontos do modelo acompanham bem a curva da estação do aeroporto tanto na intensidade como no rumo do vento, apesar da diferença bem distinta nas velocidades do vento. Realce para o rumo do vento (média horária) que ao longo do mês de Janeiro é muito bem modelado, especialmente em horas onde a velocidade do vento é mais elevada, sendo que nos períodos de vento fraco tenda a falhar como acontece nos dias 25 a 27 de Janeiro (fig. 6.1-13). A principal razão é devido à predominância sinóptica do vento, onde para fortes intensidades, o rumo deste em toda a ilha deverá ser praticamente idêntico e, por isso o modelo WRF consegue representar corretamente a direção do vento junto à superfície, enquanto sob ventos fracos ou calmos os efeitos locais junto ao solo tornam-se preponderantes e o modelo não consegue realizar uma previsão aceitável.

Pelo contrário, no mês de Julho, observa-se nas figuras 6.1-14 e 6.1-15 que as curvas dos pontos do modelo WRF não conseguem acompanhar aceitavelmente as variações da velocidade e rumo do vento, devido à predominância de brisas locais sob fracas velocidades do vento junto à superfície (estação do aeroporto). A rosa de ventos prevista pelo modelo e observada no aeroporto (fig. 6.1-16) permitem observar que as direções predominantes e intensidade do vento previstas e observadas em cada quadrante são bastante distintas, onde no modelo a predominância do vento ocorre no setor de Sudoeste ao passo que no aeroporto ocorre no setor de Sul.

Para além das limitações que a localização da estação coloca, também a localização dos pontos do modelo não se adequa à localização da estação do aeroporto, pois um ponto encontra-se sobre o mar e o outro a uma cota bastante elevada (318 m ANMM na máscara do modelo WRF) face ao aeroporto (32 m ANMM).

Pontos de observação do vento junto à superfície (10 m AST) em zonas protegidas e perturbadas pela envolvente morfológica do terreno e/ou construções, tornam-se muito complicadas de ser bem representadas e modeladas por modelos de mesoscala, mesmo na presença de uma boa resolução da grelha destes modelos.

Deste modo a assertividade do modelo WRF para a resolução definida de 6 km, necessita de comparação com observações de um local livre de obstruções ao escoamento do vento, capaz de representar uma grande superfície da ilha. Nesse sentido, os registos do vento no parque eólico apresentam-se como aqueles que, até ao momento, podem ter condições aceitáveis a uma adequada comparação com as previsões do modelo WRF.

### 6.1.3 Validação do modelo WRF com as observações no parque eólico

Foram utilizados os registos da intensidade do vento (médias horárias) do parque eólico da Boca da Vereda durante o ano de 2011 para validar as previsões horárias do modelo WRF, com uma altitude das observações e pontos do modelo de 40 m AST. A malha utilizada apresenta também uma resolução de 6 km tal como no subcapítulo anterior.

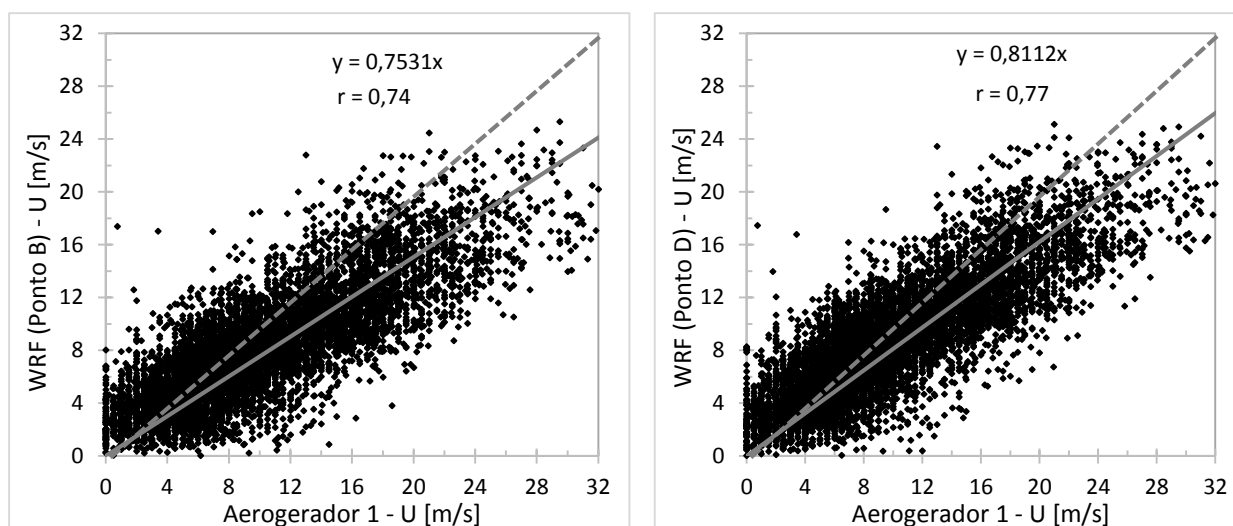
A verificação do modelo WRF com as observações do parque eólico é apenas efetuada com o anemómetro do aerogerador 1 do parque eólico (40 m AST e 635 m ANMM) por estar situado numa região com efeitos orográficos menos relevantes que o aerogerador 2. No entanto, relativamente aos pontos da malha do modelo foram selecionados dois pontos, o mais próximo definido pelo ponto B (2,4 kms a Sul do aerogerador 1 e a 188 m ANMM) e o mais alto dos mais próximos, definido pelo ponto D (3,6 kms a Norte do aerogerador 1 a 318 m ANMM).

Apesar da regra aceite de seleção do ponto da malha mais próximo do local de observação que conduziu à seleção do ponto B, a grande diferença de altitudes entre esse ponto e o parque eólico, levou à seleção do ponto D também para análise, porque apesar de este último apresentar uma distância ao parque eólico ligeiramente superior, tem como fator favorável, uma altitude significativamente superior face ao ponto B do modelo (Mapa1).

Primeiramente comparou-se os valores observados com os valores modelados nos dois pontos do modelo para o ano completo de 2011, com recurso à análise dos seguintes parâmetros estatísticos:

- ✓ Histograma de velocidades, como forma de identificar as principais diferenças relativamente à frequência de ocorrências para cada registo (média horária) da velocidade do vento;
- ✓ A correlação e declive das retas de ajuste ( $y = mx$ ) para os dois pontos do modelo para a intensidade do vento.
- ✓ Razão entre o Bias e o vento observado médio (Bias%), razão entre o MAE e o vento observado médio (MAPE), e o erro médio quadrático (RMSE), como parâmetros estatísticos de avaliação da qualidade das previsões

As correlações e retas de ajuste dessas previsões e observações são apresentadas na Figura 6.1-17 para os registos horários disponíveis, os quais representam o ano completo de 2011, assim como a distribuição mensal dos restantes parâmetros estatísticos apresentados na tabela 6.1-2.

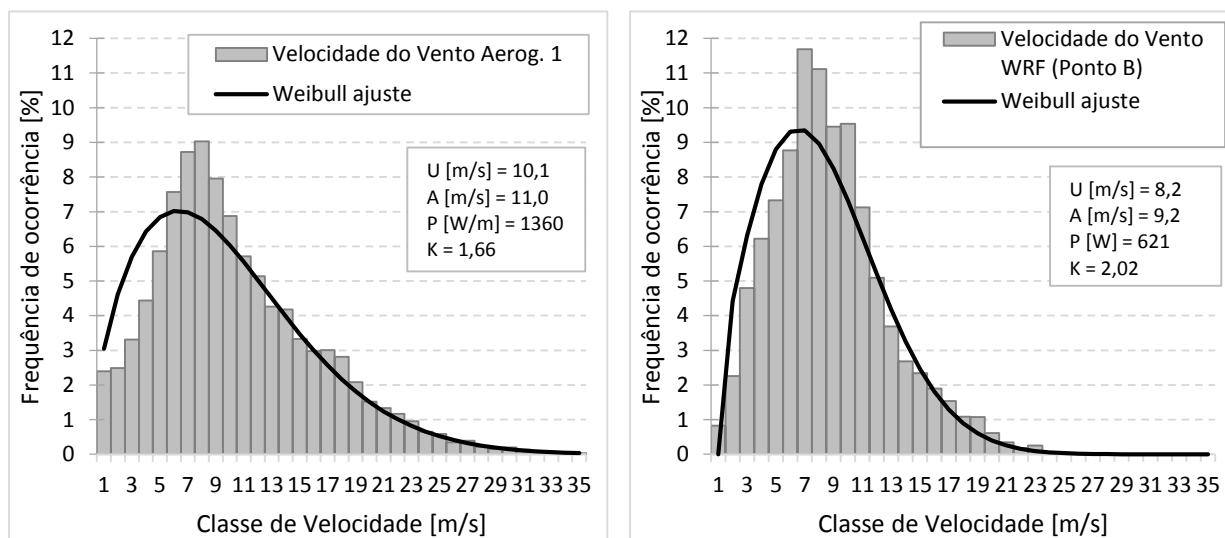


**Figura 6.1-17** Correlação e declives das retas de ajuste entre os pontos B e D da malha do modelo WRF e as observações do anemómetro 1 do parque eólico a 40 m AST no ano de 2011 (períodos de 1 hora).

**Tabela 6.1-2** Parâmetros estatísticos da velocidade do vento entre as observações no aerogerador 1 e as simulações do modelo WRF (ponto B e D) para os meses do ano de 2011

Mês	Vel. Média [m/s]			BIAS [%]		MAPE [%]		RMSE [m/s]		Correlação	
	A. 1	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
1	11.5	10.0	10.6	-13	-7	23	21	3.66	3.28	0.82	0.84
2	15.3	11.7	12.6	-23	-18	28	23	5.38	4.71	0.79	0.8
3	10.9	8.8	9.3	-19	-14	28	25	4.09	3.64	0.6	0.67
4	10.4	9.1	9.8	-12	-6	28	25	3.78	3.34	0.53	0.57
5	6.6	6.2	6.5	-5	-1	27	27	2.29	2.27	0.59	0.63
6	9.8	7.4	8.2	-25	-17	33	27	4.24	3.51	0.12	0.47
7	5.2	4.9	5.0	-6	-5	33	33	2.25	2.21	0.57	0.63
8	8.4	7.0	7.6	-17	-10	32	30	3.60	3.23	0.38	0.49
9	9.0	7.3	7.9	-19	-12	33	32	3.78	3.59	0.32	0.29
10	11.0	8.1	8.7	-26	-21	31	28	4.30	3.94	0.65	0.67
11	13.8	11.0	11.9	-20	-14	27	24	4.85	4.35	0.73	0.72
12	10.0	7.6	8.7	-23	-13	32	27	4.23	3.51	0.77	0.79
<b>Ano</b>	<b>10.1</b>	<b>8.2</b>	<b>8.9</b>	<b>-30</b>	<b>-27</b>	<b>30</b>	<b>27</b>	<b>3.95</b>	<b>3.52</b>	<b>0.74</b>	<b>0.77</b>

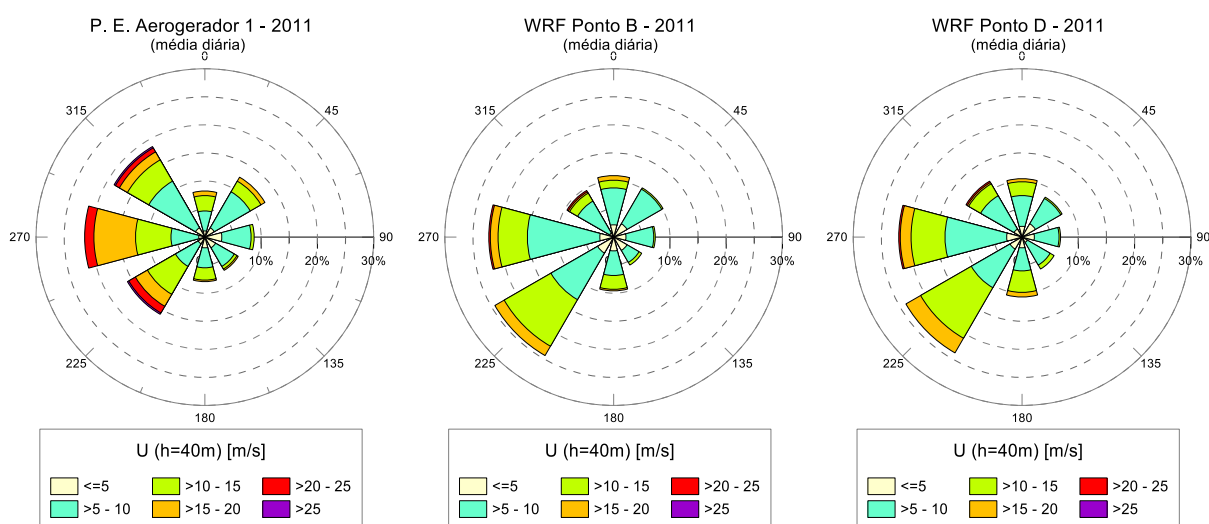
As distribuições de Weibull para os registos horários observados no aerogerador 1 e previsões horárias resultantes do modelo WRF no ponto mais próximo (ponto B), são apresentadas na figura 6.1-18 para o ano de 2011 com uma disponibilidade de dados observados de 100 %.



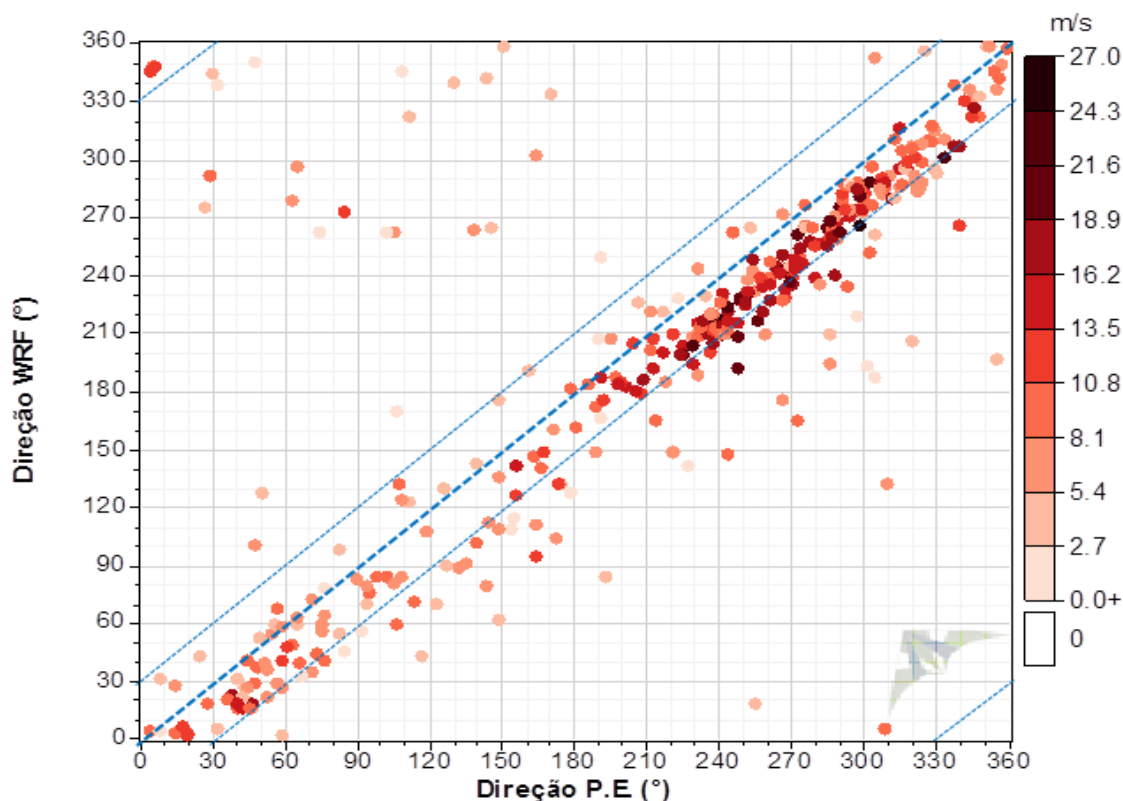
**Figura 6.1-18** Distribuição de Weibull para o aerogerador 1 do parque eólico (à esquerda) e ponto B do modelo WRF (à direita) a 40 m AST no ano de 2011 (período de 1 hora).

Para além dos parâmetros estatísticos anteriormente apresentados e por forma a avaliar também a direção do vento apresentam-se as rosas de ventos e o gráfico que relaciona as direções observadas e previstas por classe de velocidade do vento.

Para a verificação da direção do vento, apenas estão disponíveis observações de valores médios diários, pelo que as previsões horárias do modelo WRF foram também convertidas em médias diárias, com recurso à média diária das componentes U e V da velocidade do vento simulada. Deste modo são apresentadas em médias diárias as rosas de ventos das observações e do modelo WRF na figura 6.1-19, bem como o gráfico que relaciona a direção média diária de ambas por classe de velocidade do vento apresentado na figura 6.1-20.

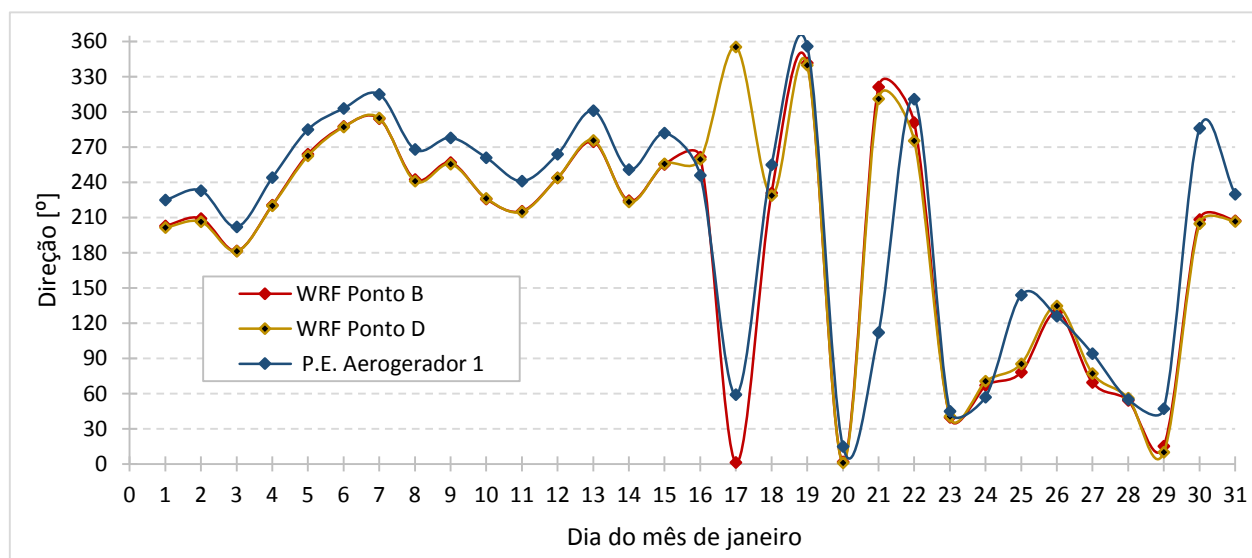


**Figura 6.1-19** Rosa de ventos observada no Aerogerador 1 do parque eólico e simulada pelo modelo WRF (Ponto B e D) a 40 m AST para o ano completo de 2011.



**Figura 6.1-20** Relação entre a direção média diária observada no parque eólico (aerogerador 1) e modelo WRF (ponto B) por classe de velocidade do vento.

Por forma a analisar a capacidade do modelo em prever as variações típicas das diferentes especificidades do clima na ilha das Flores, tais como os ventos vigorosos no Inverno associados a depressões que assolam o arquipélago, ou os ventos mais calmos e tempo geralmente mais soalheiro no Verão aquando da presença do AA sobre ou ligeiramente a Norte do arquipélago, são apresentadas nas figuras 6.1-21 a 6.1-24 as curvas comparativas (observações com pontos B e D do modelo) da intensidade e rumo do vento ao longo dos meses de Janeiro e Julho, respetivamente.



**Figura 6.1-21** Direção média diária do vento observada no parque eólico e simulada pelo modelo WRF (Ponto B e D) em janeiro de 2011 (h = 40 m AST).

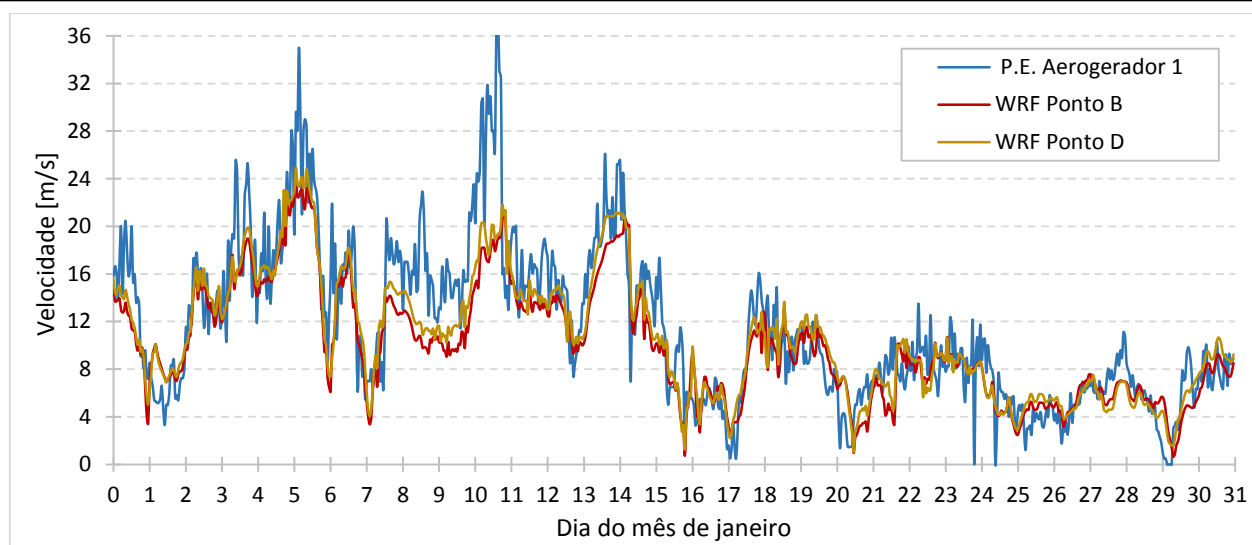


Figura 6.1-22 Velocidade média horária do vento observado no parque eólico e simulado pelo modelo WRF (Ponto B e D) em janeiro de 2011 (h = 40 m AST).

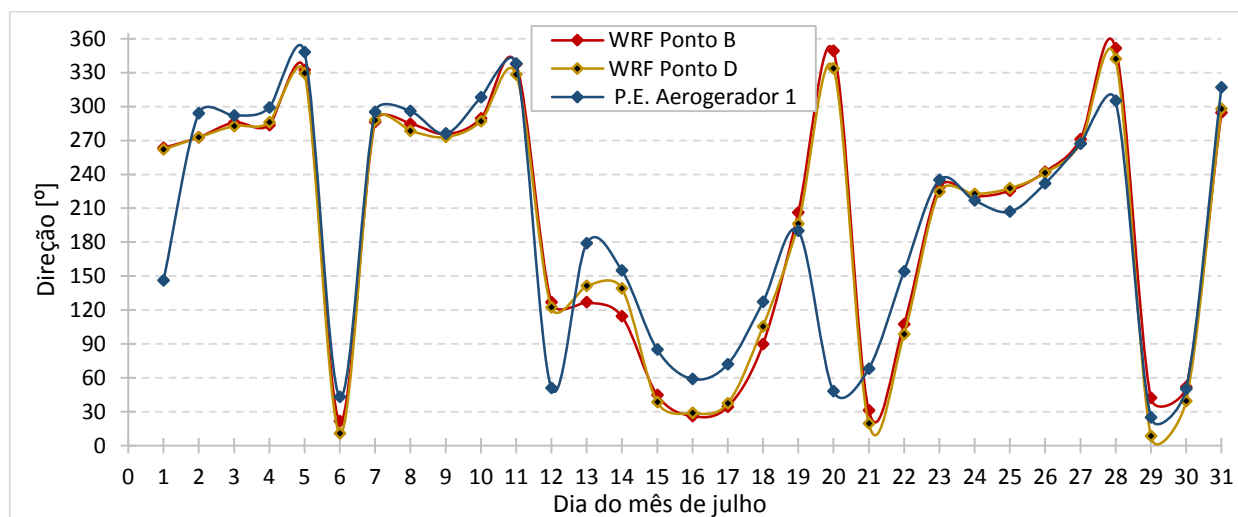


Figura 6.1-23 Direção média diária do vento observada no parque eólico e simulada pelo modelo WRF (Ponto B e D) em julho de 2011 (h = 40 m AST).

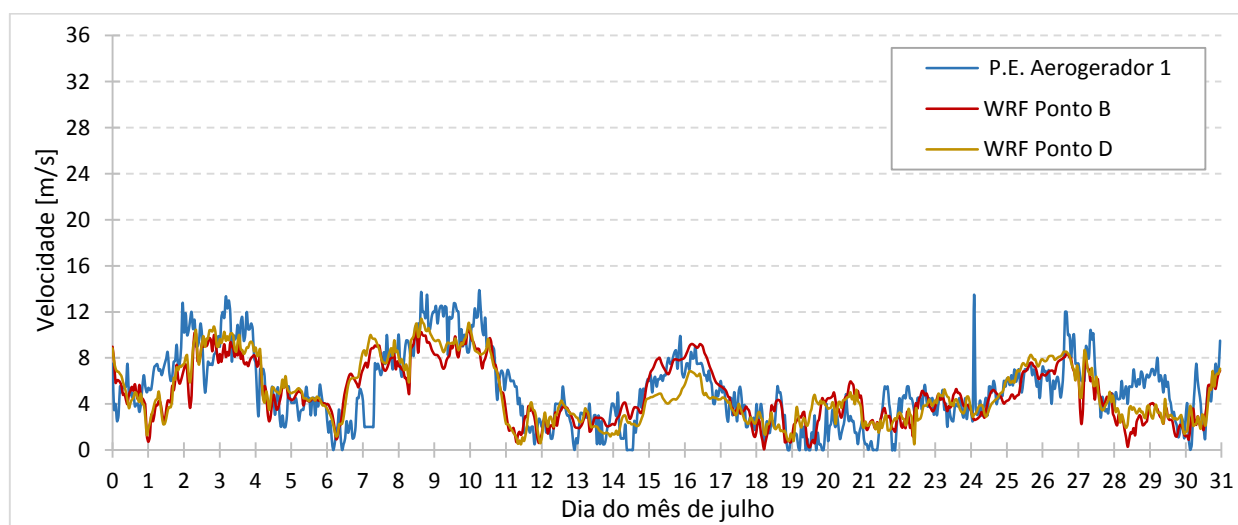


Figura 6.1-24 Velocidade média horária do vento observada no parque eólico e simulado pelo modelo WRF (Ponto B e D) em julho de 2011 (h = 40 m AST).

Na figura 6.1-17, observa-se que o comportamento da intensidade do vento é similar nos dois pontos do modelo, mas significativamente diferente das observações. Os pontos acima da reta azul ( $x = y$ ) significa que nesse período horário o modelo prevê mais vento que aquele realmente observado, e abaixo significa que o modelo falha por defeito. Verifica-se que até intensidades de vento observadas no parque eólico de 8 m/s, o modelo falha nos dois sentidos, ou seja nesses períodos, tanto sobreavalia como subavalia a intensidade do vento, não tendo um padrão semelhante de erro. Com intensidades do vento cada vez maiores no parque eólico, começa a observar-se um desvio do modelo no sentido de subavaliar a velocidade do vento, embora permaneça um elevado número de registos em que o modelo ainda sobreavalia a velocidade. Verifica-se que nas mais altas velocidades do vento ( $> 22$  m/s) observadas no parque eólico, o modelo subestima sempre a intensidade do vento, tornando maior o desvio absoluto da velocidade do vento face às observações.

Na análise mensal, verifica-se que os valores negativos de Viés (BIAS) para todos os meses do ano indicam que o modelo tende em média a subavaliar a intensidade do vento. Os meses de Maio e Julho, meses de menor recurso eólico, apresentam-se como os meses de menor subavaliação do vento por parte do modelo WRF, com os menores valores de Bias normalizado (Bias%).

Verifica-se que o mês de Janeiro, tipicamente com influência sinóptica nas intensidades de vento, apresenta os seus melhores resultados de MAPE e correlação. Nos meses de Junho, Agosto e Setembro o modelo tem maior dificuldade na previsão do vento, apresentando nesses meses os piores índices de correlação e MAPE.

Os meses com melhor correlação entre os dados observados e o modelo (ponto B) são os meses de Inverno, com correlações consideradas elevadas de  $r = 0,77$ ,  $r = 0,79$  e  $r = 0,82$  para os meses de Dezembro, Fevereiro e Janeiro, respetivamente. O ponto D do modelo apresenta nesses meses melhores correlações comparativamente ao ponto B atingindo uma correlação de  $r = 0,84$  no mês de Janeiro.

O mês de Janeiro apresenta-se como o mês que nos dois pontos do modelo, as previsões melhor se relacionam com as observações, no entanto ainda com erros relativamente elevados de RMSE, com 3,66 m/s e 3,28 m/s para o ponto B e D, respetivamente.

Nos meses com menor influência local do vento, a curva de intensidade do vento do modelo segue de forma satisfatória a curva de intensidade do vento das observações no parque eólico, embora com erros significativos de subavaliação. Para intensidades do vento mais elevadas, o modelo apesar de acompanhar bem a curva das observações, fica bastante aquém dos “picos” de velocidade do vento que se observa no parque eólico, explicando os elevados valores de RMSE nos meses de maiores velocidades de vento. O mês de Fevereiro com as médias mensais mais elevadas de intensidade do vento, apresenta valores de RMSE muito elevados.

Esta falha do modelo descrita pela subavaliação das velocidades do vento em períodos com vento mais intenso, leva a que o modelo apresente melhores resultados de RMSE nos meses de Maio e Julho.

Os valores de Bias normalizado praticamente nulos nestes dois meses significam que o modelo apesar de apresentar valores consideráveis de erro em Maio e Julho, os erros são repartidos, sendo nuns períodos de sobreavaliação e noutros de subavaliação da intensidade do vento. A correlação nestes dois meses de menor intensidade do vento ainda é considerada razoável, com  $r = 0,63$  para o ponto do modelo com maior altitude (ponto D).

Relativamente à direcção do vento, na figura 6.1-20, para médias diárias, nota-se que para ventos mais intensos, o modelo apresenta para quase todos os registos a direcção no sentido anti-horário relativamente à direcção no parque eólico.

Para ventos de fraca intensidade, o modelo apresenta falhas maiores na direcção do vento, as quais poderiam ser ainda maiores caso não estivessem atenuadas pelas médias diárias. Assim, considera-se que para ventos fracos, o modelo apresenta alguma dificuldade na representação da direcção do vento.

Na comparação com os registos no parque eólico, o modelo apresenta razoáveis/bons resultados de correlação (excepto nos meses de Verão e ainda Setembro), sendo a principal falha a significativa subavaliação na intensidade do vento.

Pela comparação do parque eólico com os pontos B e D, conclui-se que a principal causa da elevada magnitude desses erros está na baixa altitude desses pontos do modelo face às observações, uma vez que o ponto mais alto obteve melhores resultados mesmo ficando situado a maior distância (Mapa 1).

Uma resolução da malha mais refinada permitiria diminuir a suavização do terreno, o que conduziria a um aumento de altitudes dos pontos do modelo localizados nos pontos mais altos da ilha, diminuindo a diferença de altitudes entre estação e modelo e conseqüentemente os erros significativos de subavaliação do vento. No que se refere à direcção do vento o modelo apresenta um bom comportamento em dias de vento forte, sendo que em dias de vento fraco, onde a direcção do vento é mais difícil de prever, o modelo não se apresenta fiável.

## 6.2 Variável meteorológica: Precipitação

Os processos envolvidos na previsão da precipitação são considerados um dos maiores desafios dos modelos numéricos de previsão, pois mesmo com os grandes avanços da última década no que respeita à previsão do estado do tempo para os dias seguintes, a precipitação continua a ser um dos parâmetros meteorológicos onde se verificam as maiores falhas na previsão, quer ao nível da intensidade da precipitação, quer ao nível da distribuição espacial e temporal da mesma.

A complexidade da previsão de precipitação torna-se ainda mais evidente em locais com declives acentuados e orografia complexa, pois estão associados “forçamentos” sobre a precipitação, os quais conduzem a grandes disparidades face à precipitação observada em locais próximos. A ilha das Flores é um desses casos complexos que apresentam dificuldades na previsão de precipitação, pois os acentuados declives conduzem a gradientes significativos de precipitação do interior para os locais periféricos da ilha, como verificado no subcapítulo 4.2.2.

Nesta situação as baixas resoluções das grelhas dos modelos atmosféricos não conseguem representar estes gradientes, nem tão pouco os fenómenos extremos, como precipitações intensas num curto espaço de tempo e muito localizadas. Embora mesmo com altas resoluções os modelos ainda não tenham capacidade de obter resultados completamente satisfatórios tem-se verificado uma melhoria significativa nos resultados obtidos com essas resoluções.

## 6.2.1 Validação do modelo WRF com as observações no aeroporto

### 6.2.1.1 Performance global do modelo WRF

Os registos de precipitação foram disponibilizados pelo IPMA com uma resolução temporal de 1 hora e no período de 1 de Janeiro de 2003 a 31 de Dezembro de 2011, e comparou-se os dados de precipitação verificados nesse período com as previsões do modelo WRF seleccionando o ponto mais próximo do modelo para comparação, neste caso, o ponto D do modelo (mapa1).

Apesar da ilha das Flores, como visto no subcapítulo 4.2.2, apresentar algum forçamento orográfico, que leva a disparidades na precipitação da periferia para o centro da ilha, na validação do modelo WRF vão ser comparados os resultados do modelo com a precipitação na estação do aeroporto, esta que pouco beneficia do incremento na precipitação devido à orografia. Pelo facto de só se comparar os resultados do modelo com uma estação de observação, e essa ficar praticamente ao nível do mar, não permitirá verificar a capacidade do modelo na identificação da precipitação orográfica.

Apesar da diferença de altitudes de aproximadamente 300 m, entre o ponto do modelo e a observação de precipitação, não foram aplicadas correcções do terreno devido à forte dependência da complexidade topográfica, humidade e outras variáveis locais, e informação insuficiente para uma correcção adequada.

Os modelos numéricos não apresentam capacidade para realizar uma simulação com precisão horária, apresentando muito fracas correlações entre séries horárias observadas e modeladas, principalmente devido à diferença de fase temporal e falhas na distribuição espacial de precipitação. Por esse motivo procedeu-se ao método de períodos de acumulação em diferentes intervalos de tempo: acumulados diários, a 3, a 5, a 15 dias e mensalmente. O período de acumulação diária de precipitação compreende o período de 24 horas entre as 00h e as 23h.

De entre os vários intervalos de acumulação, os resultados para os acumulados diários são ainda penalizados devido a erros de fase, mas no caso de altas resoluções da grade, este problema tende a ser minimizado. Com longos períodos de acumulação, os erros de fase tendem a ser minimizados e os resultados são relevantes pela finalidade de se verificar as tendências do modelo sob vários períodos.

Devido às falhas existentes nos registos da precipitação horária acumulada na estação do aeroporto, admitiu-se uma percentagem máxima de falhas de 10% para cada período de acumulação, onde a esses períodos com falha inferior a 10% (independentemente do tipo de falha/erro registado) atribuiu-se o valor de 0 mm ao(s) período(s) horário(s) em falha. Por outro lado, a precipitação modelada pelo WRF nas mesmas horas de falha no posto de observação foram contabilizadas.

A comparação entre os vários períodos de acumulação é feita com recurso aos seguintes índices estatísticos: Bias, Bias% (razão entre o Bias e a precipitação observada média), MAE, MAPE (razão entre o MAE e precipitação observada média), e correlação entre acumulações observadas e modeladas, as quais são apresentadas na tabela 6.2-1.

Posteriormente foi realizada a análise das séries diárias de precipitação por forma a observar o comportamento do modelo na previsão de precipitação diária, bem como as suas variações intra-anuais, as quais se apresentam na tabela 6.2-2. Neste estudo, procedeu-se à análise mensal em detrimento da análise trimestral, por se ter verificado um comportamento intra-trimestre do modelo bastante distinto, nomeadamente no Verão (J/J/A) e Outono (S/O/N). A mesma análise apresenta uma representatividade diária para todos os meses relativos ao período 2003-2011 superior a 92%.

Como referido, foi também realizada a comparação dos acumulados mensais de precipitação na estação do aeroporto da ilha das Flores com os acumulados mensais de precipitação previstos pelo modelo WRF, mantendo-se da mesma forma o critério máximo de 10 % de falhas aceites (fig. 6.2-1)

**Tabela 6.2-1** Parâmetros estatísticos da precipitação média acumulada nos períodos apresentados.

Período	Observada (mm)	Correlação	BIAS	BIAS (%)	MAE (mm)	MAPE
<b>Diário</b>	4.5	0.57	0.11	2,4 %	4.08	91%
<b>3 dias</b>	13.6	0.63	0.28	2,1 %	9.66	71%
<b>5 dias</b>	22.8	0.65	0.70	3,1 %	14.30	63%
<b>15 dias</b>	68.0	0.73	2.30	3,4 %	28.30	42%
<b>Mensal</b>	138.0	0.77	4.94	3,6 %	44.90	33%

**Tabela 6.2-2** Parametros estatísticos da precipitação média acumulada diária por cada mês do ano.

Meses	Observada (mm/dia)	WRF (mm/dia)	Correlação	MAE	MAPE	Bias	Bias(%)
1	5.74	7.01	0.68	4.90	85%	1.28	22%
2	6.72	6.02	0.60	4.99	74%	-0.69	-10%
3	5.49	6.71	0.53	5.45	99%	1.22	22%
4	4.00	5.82	0.55	4.05	101%	1.81	45%
5	3.55	3.30	0.74	2.81	79%	-0.28	-8%
6	3.00	3.77	0.73	2.75	92%	0.78	26%
7	1.84	1.45	0.48	1.94	105%	-0.39	-21%
8	2.23	1.43	0.33	2.50	111%	-0.79	-36%
9	3.52	3.66	0.30	4.32	123%	0.13	4%
10	6.23	4.45	0.51	5.39	87%	-1.78	-29%
11	5.94	5.38	0.63	4.76	80%	-0.56	-9%
12	6.13	6.73	0.63	5.37	88%	0.59	10%

Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável

Mês	Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Jan	WRF		258	209	239	147	66	184	245	198
	Obs.		451	233	215	250	85	225	331	163
Fev	WRF			108	227	221	145	126	370	171
	Obs.			101	194	270	111	113	228	163
Mar	WRF	172		377	294	90	81	104	163	142
	Obs.	257		373	187	79	67	334	351	151
Abr	WRF	105	82	188	83	210	120	43	155	106
	Obs.	217	168	265	72	279	180	135	192	97
Mai	WRF	65	97	151	116	27	87	103	301	54
	Obs.	34	57	161	105	26	84	92	354	54
Jun	WRF	51	141	202	45	86	101	57	41	80
	Obs.	65	174	235	48	106	106	106	26	149
Jul	WRF	68	32	22	70	149	66	68	38	8
	Obs.	40	111	19	29	78	31	75	18	4
Ago	WRF	101	43	32	69	51	27	57		111
	Obs.	95	11	19	12	24	16	40		108
Set	WRF	114	107	50	112		63	137	52	204
	Obs.	114	67	120	69		85	186	117	61
Out	WRF	38	435	298	181		143	230	116	71
	Obs.	20	204	252	122		90	151	180	95
Nov	WRF	155	225	33	170	261	152	227	153	234
	Obs.	182	110	50	153	168	141	166	220	295
Dez	WRF	141	147	90	151	205	229	322	400	67
	Obs.	137	153	161	148	189	202	314	482	84

Figura 6.2-1 Precipitação mensal observada (mm) no aeroporto e modelada pelo WRF no período de 2003 a 2011.

Quanto menor o MAPE (0% como valor teórico ideal), e maior a correlação (Quanto mais próximo de 1, melhor), melhores os resultados. O índice Bias não representa a fiabilidade do modelo, mas a tendência do modelo subavaliar (Bias negativo) ou sobreavaliar (Bias positivo) a precipitação.

Os valores MAPE, como seria de esperar, decrescem significativamente com o aumento do período de acumulação, tendo um valor elevado de 91% para períodos diários e um valor aceitável de 33% para períodos de acumulação mensais.

A correlação para séries diárias de precipitação com  $r = 0.57$  é aceitável considerando a dificuldade de previsão da precipitação diária nos diferentes parâmetros: intensidade, acerto espacial e temporal. A correlação de  $r = 0.63$  para os períodos de acumulação de 5 dias, indica uma razoável representação da variabilidade sinóptica.

Para este caso de estudo, o modelo WRF, pela avaliação dos parâmetros de correlação e MAPE nos períodos de 15 dias e mensais, denota bons resultados, principalmente nas séries mensais, onde alcança uma boa capacidade de identificação das variações mensais da precipitação.

Para além do bom resultado de correlação para as séries mensais, os acumulados mensais da estação do aeroporto (Figura 6.2-1) apresentam para praticamente todos os meses valores próximos aos acumulados do ponto do modelo mais próximo. No Outono (S/O/N) as principais falhas mensais referem-se a subavaliação nos acumulados, destacando-se o mês de Setembro de 2011 com acumulados observados e modelados de 204mm e 61mm respectivamente. Nos meses mais secos, Julho e Agosto, as principais falhas correspondem também a subavaliação por parte do modelo.

Na Primavera e no Inverno para praticamente todos os meses analisados, apresentam-se bons resultados na comparação entre acumulados do WRF e observação, com pequenas excepções, sendo a maior parte destas de sobreavaliação na precipitação.

Na análise do Bias para os vários períodos de acumulação, verifica-se uma tendência de sobreavaliação da precipitação por parte do modelo WRF, no entanto esta sobreavaliação é pouco significativa. De realçar que o valor de Bias normalizado (Bias%) teria que ser obrigatoriamente igual para os vários períodos de acumulação (1, 3, 5 e 15 dias, mensal). A pequena variação do Bias normalizado (Bias%) entre os períodos de acumulação estudados deve-se à imposição de um limite de horas com falhas aceites (10%) em cada período de acumulação, levando a que períodos de acumulação sucessivos deixem de ser obrigatoriamente somatórios dos anteriores.

Apesar do índice Bias se apresentar praticamente nulo, o índice MAPE elevado demonstra que existem falhas importantes na quantidade de precipitação prevista. No entanto essas falhas, umas vezes são de sobreavaliação e outras de subavaliação, atenuando assim o erro das diferenças, como se pode verificar na tabela 6.1-2 pela análise do Bias normalizado (Bias%) relativo às precipitações médias diárias dos 12 meses do ano.

Analisando-se a tabela 6.2-2, observa-se para as médias diárias uma subavaliação da quantidade de precipitação para o período de Julho a Novembro, onde apenas o mês de Setembro desse período não apresentou um Bias normalizado negativo. Nos meses mais secos, Julho e Agosto, observa-se que o modelo subavalia a precipitação de forma significativa, com Bias% de -21% e -36%, respectivamente. Esta falha é ainda mais significativa ao ter-se em consideração que o ponto do modelo para comparação, tem uma altitude muito superior à estação do aeroporto, e mesmo assim o modelo subavalia a precipitação nos meses mais secos.

No Inverno, Primavera e ainda o 1º mês de Verão (Junho) apenas Fevereiro e Maio apresentam em média uma ligeira subavaliação por parte do modelo WRF, sendo que em todos os outros meses se verifica uma sobreavaliação na quantidade de precipitação. Importa realçar a elevada sobreavaliação no mês de Abril, o qual apresenta um Bias normalizado de 45%.

Relativamente à fiabilidade do modelo, com correlações muito fracas nos meses de Agosto e Setembro e simultaneamente os mais fracos valores de MAPE, é neste período que o modelo apresenta a sua pior capacidade de previsão da precipitação diária.

#### **6.2.1.2 Acerto nos dias de precipitação**

Um dos aspectos relevantes na análise da performance dos modelos relativamente à precipitação refere-se à capacidade do modelo na identificação de dias com precipitação. Os dias de precipitação podem ser definidos como os dias acima do limite de 0,1 mm (inclui precipitação residual podendo ser apenas devido a nevoeiros ou orvalho), ou acima de 1 mm. Comparou-se o número de ocorrências observadas e modeladas, pela análise do BIAS, e ainda a capacidade do modelo na sua identificação analisando os índices explicados no subcapítulo 3.2.2: Proporção de acertos (PA), Probabilidade de deteção (POD) e Razão de falso alarme (RAF).

**Tabela 6.2-3** Tabela de contingência para precipitação > 1 mm

Precipitação > 1 mm		Observada		
		Sim	Não	Total
Prevista WRF	Sim	29%	11%	40%
	Não	15%	45%	60%
	Total	44%	56%	100%

**Tabela 6.2-4** Tabela de contingência para precipitação > 0.1 mm

Precipitação > 0.1 mm		Observada		
		Sim	Não	Total
Prevista WRF	Sim	46%	13%	59%
	Não	13%	28%	41%
	Total	58%	42%	100%

**Tabela 6.2-5** Parâmetros estatísticos para as duas classes de precipitação

	>1MM	>0.1MM
<b>PROPORÇÃO DE ACERTOS</b>	0.74	0.74
<b>PROBABILIDADE DE DETEÇÃO</b>	0.67	0.79
<b>RAZÃO DE FALSO ALARME</b>	0.27	0.22
<b>BIAS</b>	0.92	1.01

Denota-se um elevado número de dias com  $prec > 0,1\text{mm}$  e com  $prec > 1\text{mm}$ , com uma frequência de 58% e 44% do total de dias analisado no período 2003-2011, respectivamente.

No caso dos dias com  $prec. > 1\text{ mm}$ , o valor de BIAS de 0,92 denota uma subavaliação do número de dias de precipitação por parte do modelo WRF, o que significa que, do número total de dias analisado verificaram-se 8% de dias excedentes de precipitação observada.

No caso dos dias de  $prec. > 1\text{ mm}$ , tem-se um valor de  $POD = 0,67$ , o que significa que dos eventos ocorridos com precipitação, em 33% das ocorrências o modelo não os identificou. O índice  $RAF = 0,27$  significa que dos dias em que o modelo previu precipitação, em 27% dos casos essa previsão não se confirmou. Assim, pode-se concluir que apesar de no período 2003-2011 o modelo WRF subestimar o número de dias em que ocorre precipitação ( $> 1\text{ mm}$ ), se verificaram bastantes dias em que o modelo previu precipitação que não se confirmou.

O Índice PA com um resultado de 0.74, significa que o modelo acertou em 74% das ocorrências, quer sejam de ocorrência ou não de precipitação.

No caso de dias de ocorrência de precipitação incluindo a precipitação residual ( $[0.1\text{mm}, 1\text{mm}]$ ) o modelo apresenta melhores resultados, principalmente no índice BIAS com valor de 1.01, o que significa que o modelo no período analisado representa de forma eficaz o número de dias com precipitação acima de 0,1 mm.

## 6.2.2 Histograma e extremos

A análise dos eventos de precipitação é efetuada com recurso ao histograma apresentado na figura 6.6-2 e quantis de precipitação diária para os 9 anos de comparação entre as observações e o ponto da grelha do modelo mais próximo, a qual é apresentada na figura 6.2-2 e figura 6.2-3.

Determinou-se as frequências de eventos (em relação ao número total de eventos) com precipitação diária acima de 1 mm no intervalo de 0 a 50 mm com 1 mm de incremento sucessivo. O intervalo de percentis analisado foi o seguinte: 2.5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 97.5, 99 e 99.9. Os percentis foram determinados considerando apenas os dias com precipitação acima de 0,1 mm.

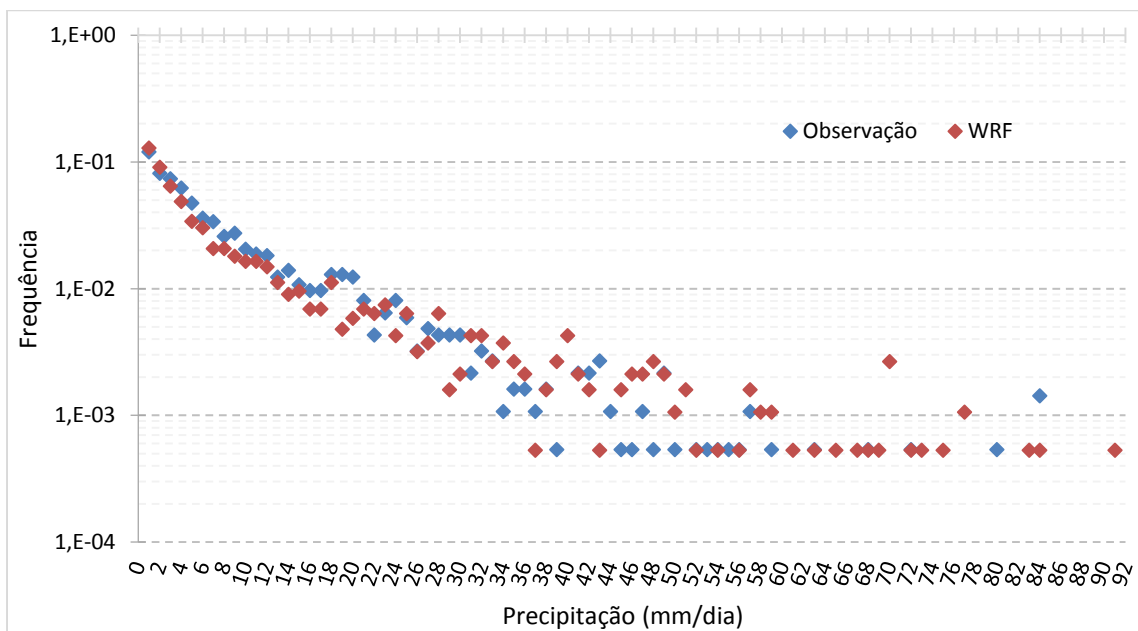


Figura 6.2-2 Histograma de precipitações no intervalo de 1-50mm com bins de 1mm (escala logaritmica).

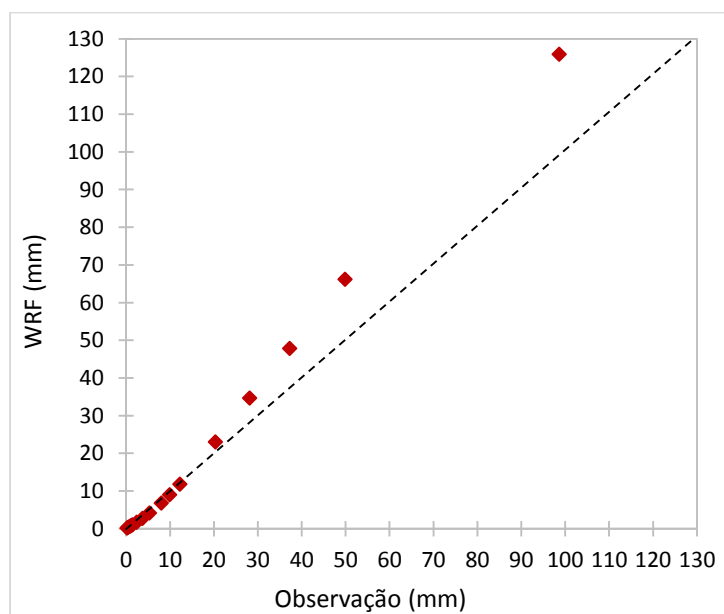


Figura 6.2-3 Quantis de precipitação diária acumulada observada e prevista pelo modelo WRF no período 2003-2011.

Verifica-se pelo histograma de precipitações que o modelo sobreavalia ligeiramente os eventos de dias com precipitação muito fraca, ou seja os dias com precipitação compreendida entre 1 e 3 mm, porém subavalia o número de dias com precipitação fraca/moderada compreendida nos intervalos entre 3 mm e 22 mm. Daí em diante verifica-se uma subavaliação por parte do modelo na maior parte dos intervalos. Na

figura 6.2-3 verifica-se que o modelo representa bem os quartis que representam baixas precipitações, mas sobreavalia os percentis que correspondem aos dias de fortes precipitações, principalmente nos eventos extremos, isto é, nos percentis 99 e 99,9.

O percentil 99 na série de precipitação da estação do aeroporto corresponde a 49 mm. Analisando-se todos os dias acima deste percentil verifica-se uma sobreavaliação do número de dias por parte do modelo, verificando-se 18 dias de precipitação acima deste limiar na estação do aeroporto e 36 dias previstos pelo modelo no período 2003-2011.

Denota-se assim que o modelo apresenta alguma dificuldade na identificação de fenómenos extremos de precipitação, sobreavaliando o número de eventos e a precipitação nos quartis mais elevados. No entanto há que referir que fazendo a comparação do resultado do modelo com apenas uma estação de observação, se apresenta como uma limitação na verificação da capacidade do modelo, porque muitas vezes a precipitação nestes eventos extremos, é localizada, podendo na estação do aeroporto ter caído pouca precipitação, e num local próximo ter-se registada precipitação próxima à modelada ou até superior. A confirmação do acerto ou falha do modelo nesses casos só será possível com um maior número de estações utilizadas na comparação com a precipitação modelada.

Também é importante realçar que tendo o ponto da grade do modelo mais próxima uma maior altitude que a estação de observação, numa diferença próxima dos 300 metros, o modelo tende a aumentar a precipitação devido aos efeitos orográficos, podendo esta ser uma das razões para a sobreavaliação na precipitação para os quartis mais elevados.

Por outro lado o modelo WRF com uma resolução de 6km apresenta uma boa capacidade na identificação dos dias com precipitação, e das variações inter-anuais na precipitação, com acumulados mensais próximos dos observados e correlação mensal elevada. Na análise dos acumulados diários de precipitação, o modelo apresenta as suas maiores limitações no período entre Julho e Setembro.

Como explicado na secção 4.2.2, a ilha apresenta forçamentos orográficos que levam a elevados gradientes na precipitação da periferia para o interior da ilha, sendo a estação do aeroporto um dos locais menos favorecidos pela precipitação orográfica, apresentando precipitações muito inferiores aos postos udométricos acima dos 500 m. A comparação dos dados observados no aeroporto foi realizada com o ponto mais próximo, sendo este, dos 4 pontos da grade localizados na ilha o ponto com uma altitude mais elevada. Apesar da diferença de altitudes entre modelo e observações, verifica-se que o modelo sobreavalia apenas ligeiramente as precipitações mensais da estação do aeroporto.

Este facto leva a supor que o modelo na representação da precipitação dos locais mais elevados poderá ter dificuldades na representação dos efeitos orográficos, podendo subavaliar precipitações nos meses de Inverno de forma significativa.

Por essa razão seria interessante verificar o comportamento do modelo comparando com um maior número de estações meteorológicas, e fazer a comparação com dados observados para postos udométricos acima dos 500 m de forma a verificar de que forma a resolução de 6 km se demonstra adequada para a distribuição espacial da precipitação na ilha das Flores ou se será essencial aumentar a resolução da malha.

## 7 Conclusões e trabalhos futuros

Verificou-se que o sistema eletroprodutor da ilha das Flores, ao nível do consumo de energia, é dominado pelo consumo do tipo doméstico e de serviços, representando quase 80% do consumo total da ilha. Este tipo de consumo é traduzido por um diagrama de cargas diário com as horas de cheia durante o dia, as de ponta ao anoitecer/noite e de vazio durante a noite/madrugada sendo que anualmente se verificam maiores consumos nos meses de Julho e Agosto, seguidos dos meses de Inverno. Porém, os valores mais altos de potência requisitada ocorrem durante o Inverno (ponta máxima registada de 1981 kW em Janeiro), juntamente com a maior assimetria entre as horas de cheia e ponta.

A produção de energia é assegurada pelas fontes renováveis, hídrica de fio de água e eólica, as quais asseguram em média cerca de 50 % do consumo da ilha e, a fonte convencional térmica a diesel. No caso das fontes renováveis, a sua disponibilidade depende da disponibilidade do recurso, sendo portanto variável no tempo e com pouca capacidade de regulação. No entanto, em média, a disponibilidade de ambas é constante ao longo do dia, sendo que anualmente se apresentam bastante mais fracas nos meses de Verão.

Tendo em vista a maior contribuição renovável possível, o perfil de consumo da ilha não é o mais favorável ao aproveitamento dessas fontes, principalmente devido ao contraste, nos meses de Julho e Agosto, entre a fraca produção destas e o elevado consumo. A um nível temporal mais curto, um ou poucos dias, o fraco armazenamento (poucas horas) da central hídrica da Além Fazenda também não é suficiente para armazenar excedentes de precipitação e/ou reservar energia para dias de precipitação ausente ou maiores necessidades de energia.

No caso da energia eólica, a dificuldade de aproveitamento do recurso é ainda acrescida pela sua elevadíssima variabilidade, pois devido à reduzida dimensão da rede elétrica da ilha das Flores, necessita de outra fonte de energia capaz de colmatar o impacto das suas oscilações permanentes. Neste caso, é a central diesel e parcialmente a central hídrica que fazem esse papel, porém têm sido insuficientes para que seja possível aproveitar todo o recurso eólico, uma vez que isso implicaria ainda maior desgaste dos equipamentos e melhor capacidade de previsão deste recurso. Assim, e em parte por esses motivos, perto de metade da energia eólica disponível tem sido desperdiçada ao longo dos anos, mesmo após a instalação do volante de inércia, o que neste último caso não seria expectável. No entanto, a instalação deste último permitiu reduzir o desgaste dos equipamentos da central térmica e o consumo de combustível em cerca de 10 %, representando cerca de menos 150 mil litros de consumo anual de diesel.

Com a instalação da nova central hidroelétrica na ilha das Flores para 2014, estima-se que as renováveis representem anualmente cerca de 80% da produção eléctrica, sendo que o principal problema continuará a ser os meses de Verão, devido ao fraco recurso eólico e hídrico nessa época do ano. Uma das hipóteses analisadas para resolver o problema do muito menor recurso hídrico nos meses de Verão, seria aumentar a capacidade de armazenamento da central hídrica de Além Fazenda. No entanto, no estudo analisado em 2001 pela EDA, verificou-se que a criação de albufeiras ou de reservatórios artificiais não permitiria sequer a regularização mensal, não resolvendo o problema do défice hídrico no Verão (EDA,2001).

Na ilha das Flores com a intenção de apresentar cada vez maior penetração renovável, para garantir o maior aproveitamento possível dos recursos e respectiva gestão do sistema electroprodutor, será crucial que o modelo numérico utilizado consiga apresentar elevada fiabilidade na previsão do vento e da precipitação, em especial no caso do vento.

A ilha das Flores apresenta gradientes relevantes da periferia para o interior da ilha, relativamente ao vento e à precipitação. Tal como descrito na comparação do vento na estação do aeroporto e parque eólico, o comportamento é bastante distinto, principalmente no Verão. Da mesma forma verificou-se que a poucos

quilómetros de distância, o aeroporto apresenta um ciclo diurno do vento descrito por um aumento evidente da sua intensidade à tarde, sendo que no parque eólico não se observa qualquer variação média ao longo do dia, permanecendo em média aproximadamente constante. No que diz respeito à precipitação observada, pela comparação das precipitações médias mensais no período entre 1958-1988 dos 4 postos udométricos, verificou-se que a ilha apresenta um incremento relevante na precipitação com a altitude devido a efeitos orográficos.

Numa ilha de pequena dimensão horizontal e relevantes gradientes climáticos, o acerto dos modelos numéricos na previsão é de extrema dificuldade, e é nesse sentido que a validação no presente caso de estudo tomou especial interesse, embora sejam de salientar fortes limitações essencialmente devido à distância, quer vertical quer horizontal, entre os pontos da grade do modelo e os pontos de observação.

Na validação do vento apresentam-se algumas limitações, nas quais é importante referir:

- 1- Das duas estações de observação de vento, a estação do aeroporto encontra-se num local protegido e perturbado pela envolvente orográfica, sendo ainda que, devido ao critério escolhido de seleção do ponto do modelo WRF mais próximo, a diferença de altitudes é superior a 300 metros.
- 2- A direção do vento no parque eólico encontra-se disponível apenas em médias diárias, ao contrário da direção do vento observada no aeroporto que foi disponibilizada em médias horárias.

As limitações apresentadas para a estação do aeroporto, tornaram muito condicionada a comparação com as previsões do modelo WRF. No entanto, verifica-se que para períodos de velocidades elevadas do vento, normalmente influência do vento sinóptico na ilha, a curva de direção do vento do modelo segue bastante bem a curva observada no aeroporto, sendo que nessas situações a direção mantém-se semelhante por toda a ilha. Por esse facto pode dizer-se que a direção do vento para intensidades mais elevadas é bem modelada, o que não acontece de igual forma para ventos de fraca intensidade. Outro aspeto relevante é a variação do ciclo diurno na estação do aeroporto que é muito bem representado pelo modelo.

Comparativamente aos dados observados no parque eólico, verificou-se que o modelo apresenta boas correlações em meses de forte intensidade do vento, porém no Verão, sob ventos em geral fracos, apresenta os seus piores resultados. Devido à elevada suavização do terreno que a resolução da malha de 6 km impõe, a região do parque eólico apresenta uma altitude muito mais elevada que a altitude dos pontos da grade, sendo, em princípio, o principal motivo da subavaliação da intensidade do vento por parte do modelo. A comparação com o segundo ponto mais próximo do modelo, apresentou como vantagem face ao primeiro, uma menor diferença de altitudes entre ponto de modelação e observação. Neste caso, verificou-se uma melhoria significativa dos resultados de correlação, MAPE e Bias%, o que reforça a suposição de que a diferença de altitudes está na origem da subavaliação da intensidade do vento.

Relativamente à precipitação, o modelo WRF no período 2003-2011 sobreavaliou a quantidade de precipitação no período Dezembro a Abril e subavaliou nos meses mais secos, tendo apresentado a sua pior capacidade de previsão da precipitação nos meses de Julho, Agosto e Setembro, com os menores valores de correlação e maiores valores de MAPE.

Verifica-se que o modelo representa bem os quartis de fracas/normais precipitações, mas sobreavalia os quartis mais elevados, principalmente os extremos. No entanto, nos eventos extremos, muitas vezes de carácter convectivo, a precipitação pode ser localizada, e para comprovar a validade do modelo é importante comparar-se com o máximo de estações possível, e não apenas uma estação, como neste caso.

Deste modo, propõe-se como trabalhos futuros, a simulação atmosférica com modelo WRF utilizando-se uma malha com maior refinamento na região da ilha, o suficiente para captar razoavelmente a orografia

do terreno, diminuindo a suavização deste. Por outro lado, os dados disponíveis foram insuficientes para se obter conclusões realmente fiáveis, do lado do vento pela ausência da direcção média pelo menos horária do parque eólico e, do lado da precipitação pela ausência de registos dos postos udométricos a diferentes altitudes no período correspondente às simulações do modelo. Assim, a obtenção dos mesmos seria uma excelente ferramenta para uma melhor interpretação dos resultados do modelo WRF e validação ou não do mesmo. Relativamente ao aproveitamento renovável, propõe-se estudos aprofundados ao funcionamento do sistema volante de inércia-parque eólico, pois apesar de ter reduzido o consumo diesel, não permitiu o aumento do aproveitamento eólico.

Para o aumento da produção renovável devem também ser analisados diferentes sistemas de produção de energia entregue à rede elétrica, nomeadamente com recurso a simulações dinâmicas computacionais, por forma a encontrar o menor custo de produção de energia combinada com a maior integração de energia renovável possível.

## Referências

- Açoriano Oriental (2014). Website: <http://www.acorianooriental.pt/noticias/view/213689>.
- Ahrens, C. (2007). *Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the environment*.
- Azevedo, José. Ferreira, Martim R. Portugal (1995). Condições de ocorrência e funções hidrogeológicas das lagoas em pequenas ilhas vulcânicas: O exemplo da ilha das Flores, Açores
- Azores, (2014). Websites: [www.azores.gov.pt](http://www.azores.gov.pt).
- Betts A.K., e Miller, M.J. (1986). A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Betts, A.K. (1986). A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Chen, F., e Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*.
- Collins, W.D., *et al.* (2004). Description of the NCAR community atmospheric model (CAM 3.0).
- Costa, P. (2004) Avaliação do Potencial Eólico para Portugal Continental. Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Dee, D.P., *et al.* (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.
- EDA (2001). Extensão do reforço do aproveitamento de Além Fazenda, Estudos de 1ª Fase.
- EDA (2009). Relatório de Contas de 2009. Grupo EDA.
- EDA (2010). Relatório de Contas de 2010. Grupo EDA.
- EDA (2011). Relatório de Contas de 2011. Grupo EDA.
- EDA (2012). Relatório de Contas de 2012. Grupo EDA.
- EEA (2009). Europe's onshore and offshore wind energy potential. An assessment of environmental and economic constraints. European Environment Agency, Technical report.
- Enercon (2010). Curva de Potência do aerogerador Enercon E33. Website: [http://www.enercon.de/p/downloads/EN\\_Productoverview\\_0710.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Productoverview_0710.pdf).
- Eurelectric (2012). Eletricidade dos Açores, Website: <http://www.eurelectric.org/media/50444/andre.pdf>
- Green Islands, Azores (2014). Wind Characterization. Website: <http://www.green-islands-azores.uac.pt/>
- Hamsic, H., (2007). Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System. POWERENG, Portugal.
- Hong, S-Y., e Lim, J-O.J. (2006): The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(2), 129–151.
- IEA Wind, (2013). 2012 Annual Report. International Agency Energy, Colorado, United States.

- Janjic, Z.I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*.
- Janjic, Z.I. (2000). Comments on “development and evaluation of a convection scheme for use in climate models”. *Journal of Atmospheric Sciences*.
- Janjic, Z.I. (2001). Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model.
- Jones R.G., *et al.* (1995). Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. (2002). *Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons, LTD.
- Miranda, P. (2009). *Meteorologia e Ambiente, Fundamentos de Meteorologia, Clima e Ambiente*. 2ª Edição, Universidade Aberta.
- NOAA, (2014). Website: <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
- NREL, (2010). Website: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52920.p>
- PGRH. Plano de gestão de recursos hídricos da ilha das Flores. Caracterização e diagnóstico da situação de referência. Volume 8
- Simiu, Emil and Scanlan, Robert. H. (1996). *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*. Wiley-Interscience, 3 edition.
- Skamarock, W.C., *et al.* (2008). A description of the advanced research WRF Version 3.
- SREA (1999-2005). Serviço Regional de Estatística dos Açores. Séries Estatísticas.
- Stauffer D.R., e Seaman N.L. (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited area mesoscale model. Part I: experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118(6), 1250–1277.
- Tomé, Ricardo (2003). *Mudanças climáticas nas regiões insulares*. Doutoramento em física. Angra do Heroísmo
- W Janjic, Z.I. (1990). The step-mountain coordinate: physical package. *Monthly Weather Review*.
- Wieringa, J., (1992). Updating the Davenport roughness classification. *J. Wind, Eng. Ind. Aerodyn.*
- Wilks, Daniel (2006). *Statistical Methods in the atmospheric sciences*. Second Edition.
- Windatlas, (2014). Website: <http://www.windatlas.dk/europe/oceanmap.html>
- Zhang, X. (2009). CFD simulation of neutral ABL flows. Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark



