



**Universidade de
Aveiro**

Departamento de Física

2009

**David João da Silva
Carvalho**

**Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto
de previsão e produção de energia eólica**



**Universidade de
Aveiro**

Departamento Física

2009

**David João da Silva
Carvalho**

**Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no
contexto de previsão e produção de energia eólica**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Alfredo Rocha, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Eng. Miguel Marques do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

o júri

Presidente

Prof. Dr. Paulo Silva

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Alfredo Rocha

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. João Santos

Professor Associado da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Eng. Miguel Marques

Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI)

agradecimentos

Ao longo da execução deste trabalho, foram muitos os contributos que tornaram possível a conclusão do mesmo. Assim, primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, Doutor Alfredo Rocha pela sua disponibilidade, conhecimentos transmitidos e valiosas sugestões durante a execução deste trabalho. Estendo este agradecimento também ao meu co-orientador, Engenheiro Miguel Marques (INEGI).

A ajuda dos elementos do Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos (CEESA) foi fundamental e gostaria de agradecer a sua ajuda contínua ao longo da execução deste trabalho, em particular ao Mestre Carlos Rodrigues e ao Doutor Carlos Silva Santos.

Agradeço ainda a ajuda prestada pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro, e, neste aspecto, a Ana Cristina Carvalho, o Luís Carvalheiro e o Juan Ferreira revelaram-se uma ajuda indispensável, para além da simpatia, boa disposição e disponibilidade sempre presentes.

palavras-chave

Meteorologia, simulação numérica do tempo, energia eólica, simulação do vento, previsão do vento.

resumo

O presente trabalho propõe-se avaliar e testar a qualidade das simulações da intensidade e rumo do vento próximo da superfície utilizando o modelo numérico de simulação atmosférica WRF-ARW, versão 3.0.1, otimizando-o de modo a ser avaliada a sua possível utilização em outras áreas de investigação e aplicação prática, nomeadamente no planeamento de parques eólicos e estimativas de produção de energia eólica. O livro é composto por uma apresentação do modelo em causa e por uma análise de sensibilidade das suas opções de corrida (físicas e numéricas). São ainda afloradas algumas técnicas de melhoramento dos resultados, nomeadamente aumentando a resolução do domínio e recorrendo ao uso de modelos de microscala.

keywords

Meteorology, numerical weather modelling, wind energy, wind simulation, wind prediction

abstract

This work aims to evaluate and test the quality of the wind speed and direction near the surface simulations using the atmospheric simulation numerical model WRF-ARW, version 3.0.1, and optimizing it in a way that its possible use in several research and practical areas can be evaluated, such as planning wind farms and wind energy yields estimates. This book is composed by a presentation of the model and by a sensibility analysis regarding its running options (physical and numerical). Some techniques to improve the results are tested, namely increasing the domain resolution and using microscale models.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Enquadramento e Objectivos	1
Capítulo 2 – Estado da arte	4
Capítulo 3 – Métodos e dados.....	6
3.1 - Modelo de mesoscala WRF-ARW	6
3.1.1 – Descrição do modelo	7
3.1.2 – Malha de simulação, inicialização e condições de fronteira	9
3.1.3 – Aninhamento	10
3.1.4 – Assimilação de dados a quatro dimensões (four dimensional data analysis – FDDA)	11
3.1.5 – Processos físicos de escala reduzida - Parametrizações.....	13
3.2 – Modelo de microscala WAsP	18
3.3 – Validação de um modelo numérico	19
3.2.1 – Medidas de Erro	20
3.3 – Metodologia	22
3.3.1 – Domínios espaciais de simulação.....	23
3.3.2 – Estações meteorológicas de referência	24
3.3.3 – Testes de sensibilidade e configurações do modelo	24
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	31
4.1 – Bloco A	31
4.2 – Bloco B	32
4.3 – Bloco C	34
4.4 – Bloco D	37
4.5 – Bloco E	38
4.6 – Bloco F.....	43
Conclusões.....	45
Referências.....	47

CAPÍTULO 1 - ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

1.1 - ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

O planeamento e projecto de um parque eólico assentam num conhecimento aprofundado do regime e padrão de vento presente numa determinada área, e a caracterização inicial de possíveis áreas de implementação de um projecto eólico é um desafio árduo devido à falta de dados e informação de qualidade no que respeita ao regime de ventos. As abordagens meteorológicas clássicas de grande escala (modelos sinópticos e globais) apresentam grandes limitações em representar devidamente os efeitos locais, impossibilitando um completo conhecimento do clima regional. Os modelos de mesoscala estão talhados para a previsão meteorológica de escalas médias (centenas ou dezenas de quilómetros de resolução) mas também são capazes de produzir resultados para altas resoluções (inferiores a 5 km), 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 projecto eólico.

Tipicamente, o planeamento de um parque eólico envolve várias fases com o objectivo final de determinar, com o máximo de detalhe e precisão possível, qual o regime local de ventos e consequente recurso eólico disponível. Para atingir este objectivo, usam-se dados observados do regime local de ventos que são obtidos através de campanhas de medição com lugar na área de projecto, levadas a cabo pela entidade promotora do projecto eólico. Estas campanhas de medição têm normalmente uma duração mínima recomendada de 2 anos, sendo que quantos mais anos de dados estiverem disponíveis, melhor e mais precisa será a caracterização do regime local de vento e, conseqüentemente, mais fiáveis serão as estimativas de produção. A utilização de dados medidos irá permitir uma maximização das estimativas de produção energética, a minimização de riscos operacionais e a construção de uma base sólida para análises de cariz económico e de financiamento do projecto por parte de bancos, entidades de investimento, etc. Depois de finalizadas as campanhas de medição, os dados recolhidos serão alvo de um tratamento adequado com vista à caracterização do regime local do vento, sendo usados modelos de microscala (refere-se como exemplos os seguintes softwares actualmente disponíveis no mercado: WAsPTM, produzido nos Laboratórios Risø, na Dinamarca; VentosTM, desenvolvido pelo Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos, CEESA, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Depois de concluído o processo de caracterização do regime local de vento e estimativas preliminares de produção, inicia-se o arranque da construção do parque eólico se o projecto se revelar vantajoso do ponto de vista financeiro. A vantagem de utilizar modelos de mesoscala na avaliação de possíveis áreas de interesse eólico torna-se então clara, e a sua contribuição pode-se revelar decisiva quando usado como uma ferramenta de pré-avaliação de áreas candidatas à implementação de parques eólicos, ou mesmo como fonte de dados meteorológicos quando não existem outros recursos. As campanhas de medição representam um pesado investimento inicial, já que é necessário instalar uma (por vezes duas, três ou mais, dependendo da área em questão) torre meteorológica completa com dois níveis de medição (no topo e a uma altura intermédia, tipicamente aos 60 e 30 m), sendo que por vezes três níveis de medição são aconselhados. Em cada nível de medição é instalado um anemómetro e um

cata-vento, sendo que a maioria das estações meteorológicas possuem também sensores de medição de temperatura, humidade relativa e pressão atmosférica. É necessário também construir acessibilidades à estação, bem como assegurar a sua devida manutenção durante a campanha de medição, manutenção essa que também se torna onerosa devido à fragilidade dos equipamentos que na maioria das vezes se encontram colocados em zonas inhóspitas e sujeitos a condições climáticas extremas. À parte todo o custo envolvido nas campanhas de medição, existe sempre o risco associado de que a zona poderá não revelar um bom recurso eólico, o que levará ao abandono do projecto e tornará impossível a recuperação do investimento entretanto já feito. Ou seja, são óbvias as vantagens em possuir uma ferramenta de pré-análise que permita aferir se uma determinada área possui, à partida, um recurso eólico apreciável para então iniciar o investimento nas campanhas de medição. Uma vez que o recurso a medições do rumo e intensidade do vento na área em estudo é indispensável, é nesta fase de pré-projecto que a ajuda de modelos de mesoscala pode ser preciosa, uma vez que eles poderão revelar se uma área possui, numa primeira análise, um potencial eólico apreciável. Modelos numéricos de mesoscala de previsão do tempo podem, então, ser usados para simular o campo horizontal do vento numa área extensa e assim observar quais são as zonas com maior recurso eólico (os chamados “hot spots”), permitindo o início das campanhas de medição já com um significativo grau de conhecimento do regime de vento da zona, eliminando à partida as áreas que revelem pior potencial eólico e evitando investimentos sem retorno.

Existe também a possibilidade de usar os resultados saídos das simulações dos modelos de mesoscala directamente nos modelos de microscala (cálculos do regime local de ventos e estimativas de produção), ou seja, “substituir” as medições provenientes das campanhas de medição pelas simulações do modelo de mesoscala. Esta possibilidade só é aconselhável em último recurso, já que, por muito bem que se comporte o modelo, nunca irá possuir um detalhe e precisão tal que descreva rigorosamente o estado real da atmosfera (descrito pelas observações e medições), rigor esse que é vital para um bom planeamento de um parque eólico, porque uma pequena diferença nos campos do vento implica uma grande diferença nas estimativas de produção. Esta opção poderá ser tomada quando o recurso a campanhas de medição não é possível, quer devido a razões de ordem logística ou de limitação do tempo disponível para a construção do parque. Neste trabalho irá ser feita uma abordagem inicial a este tipo de procedimento. Convém ressaltar que esta opção deve ser encarada com alguma reserva, e que só com um bom conhecimento de práticas de modelação e do comportamento do modelo se deve considerá-la, já que os seus resultados não podem ser encarados de uma forma directa e devem ser alvo de técnicas de pós-processamento adequadas. Este tipo de modelos de mesoscala deve ser encarado como um acréscimo valioso de informação na elaboração de um projecto de um parque eólico, e como uma ferramenta de pré-avaliação do projecto. É, no entanto, de esperar que no futuro próximo a investigação e inovação científica tornem estes modelos cada vez mais fiáveis e capazes, podendo mesmo um dia virem a substituir as campanhas de medição.

1.2 - OBJECTIVOS

O objectivo principal deste trabalho é avaliar e testar as simulações da intensidade e rumo do vento próximo da superfície utilizando o modelo numérico de simulação atmosférica Weather Research and Forecast (WRF-ARW, versão 3.0.1), optimizando-o de modo a ser avaliada a sua possível utilização em outras áreas de investigação e aplicação prática, nomeadamente no planeamento de parques eólicos e estimativas de produção de energia eólica. Tal utilização está, obviamente, dependente da avaliação e validação do modelo no que toca à sua capacidade de simulação do regime local de ventos numa determinada área. Este trabalho irá focar-se na exploração e análise da resposta do modelo neste campo, comparando a sua performance com dados observados e ainda fazendo uma análise quanto às suas opções de configuração, de maneira a que o WRF seja capaz de fornecer um produto fiável e

coerente à indústria eólica. Serão ainda exploradas técnicas e procedimentos que possam otimizar o modelo. Assim, se o modelo conseguir reproduzir fielmente o regime de ventos predominante num dado local, terá que ser levado em conta como uma ferramenta poderosa no planeamento inicial de futuros parques eólicos. Actualmente, e devido ao já considerável historial deste modelo que vem sendo desenvolvido continuamente há já vários anos, os trabalhos de validação deste modelo centram-se em experimentar o vasto leque de opções nele incluídas, nomeadamente, diferentes escolhas no que toca à sua formulação dinâmica e processos físicos. Dos resultados dados pelo modelo, saídos das respectivas simulações, retiraram-se séries temporais de direcção e intensidade do vento num ponto específico, que posteriormente foram comparados com dados observados provenientes de uma estação meteorológica localizada no mesmo ponto de simulação. Os períodos temporais simulados referem-se a Janeiro e Junho de 2008. A escolha destes meses prendeu-se com o objectivo de fazer uma análise sazonal ao comportamento do modelo, e também com razões relativas à disponibilidade e qualidade de dados observados disponíveis.

Este trabalho compreende três objectivos principais: primeiramente, é analisada a influência do uso de diferentes metodologias de âmbito computacional e numérico no comportamento do modelo. Uma primeira, e mais simples, metodologia consiste em fazer uma simulação contínua, ou seja, deixar o modelo simular ininterruptamente o período de simulação. Neste tipo de simulação, as condições iniciais e de fronteira lateral consistem em análises finais do modelo GFS correspondentes a todo o período de simulação. Ainda dentro desta primeira metodologia, testou-se uma opção de configuração do WRF, que consiste na assimilação de dados a quatro dimensões (four dimensional data analysis - FDDA), onde uma simulação em cuja configuração está accionada esta opção é testada contra uma configuração do modelo onde esta opção está desactivada. A segunda metodologia testada consistiu em efectuar simulações independentes, com FDDA activada, de dois dias cada uma, que no total perfazem o mês completo de simulação. Em ambos os casos considerou-se um período de *spin up* de 12 horas. Com este teste pretende-se avaliar a capacidade do modelo em não divergir quando se efectuam simulações relativamente longas.

O segundo objectivo consiste numa avaliação da sensibilidade do modelo relativamente à variação de alguns esquemas de parametrizações físicas. Neste estudo de sensibilidade, todas as atenções estiveram focadas nos esquemas que parametrizam os processos físicos e dinâmicos que ocorrem na camada limite. Esta linha de orientação parte do pressuposto de que, uma vez que o objecto de estudo está centrado na análise dos campos horizontais de vento relativamente perto do solo, são as parametrizações dos processos de sub-grelha que assumem especial relevo junto ao solo. Este estudo implicou três configurações diferentes do modelo, consoante as parametrizações físicas escolhidas para a camada limite planetária, camada limite superficial e modelo do solo de superfície, e fixando todas as outras opções físicas (microfísica, radiação de onda curta e *cumulus*) e computacionais (FFDA activa nas três configurações).

O terceiro objectivo prende-se com a tentativa de analisar quais as principais fontes de erro do modelo, bem como procurar técnicas e procedimentos de optimização do mesmo, de maneira a que o modelo consiga reproduzir o mais fielmente possível a realidade. Aqui, será também explorada a capacidade de o modelo de microscala WAsP oferecer algum contributo para o melhoramento dos resultados do WRF.

O erro médio quadrático (RMSE), o viés, o desvio padrão (STDE), o coeficiente de correlação (R^2), tanto o global como os R^2 por sector da rosa-dos-ventos (aqui foram considerados 16 sectores) e ainda a comparação de rosas-dos-ventos de ocorrências e energia, bem como histogramas de velocidade, foram os parâmetros de avaliação do comportamento do modelo.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

As simulações operacionais com o WRF realizadas sobre o continente Americano em 2004, secundadas por simulações realizadas sobre a Europa e Atlântico Norte, realizadas por Hutchinson (**Hutchinson et al, 2005**) constituem uma clara afirmação das potencialidades práticas do modelo. Apesar do modelo WRF ser relativamente recente, já foram levados a cabo vários estudos investigando a performance do modelo na simulação de condições climáticas em diferentes regiões geográficas, quando sujeito a diferentes opções de parametrizações físicas (e.g. **Jankov et al. 2005; Gallus and Bresch 2006; Jankov et al. 2007**). Vários estudos deste tipo foram efectuados com modelo WRF versão 2.2, sendo relativamente consensual que o conjunto de parametrizações que apresenta um melhor resultado para a simulação dos campos horizontais do vento é: Modelo de superfície de solo (MSS) = NOAH; Camada de superfície (CS) = Monin-Obukhov MM5; Camada limite planetária (CLP) = YSU (**Ferreira A.P., 2007; Challa et al, 2007; Steeneveld et al, 2008**).

Na versão aqui utilizada, a 3.0.1, é apresentada uma nova opção de esquema de parametrização para cada uma das camadas consideradas: CLP = Pleim-Xiu; CS = Pleim-Xiu e MSS = ACM2. De acordo com **Xiu and Pleim, 2001**, estas três opções têm que ser usadas em conjunto, daí resultando um novo conjunto de parametrizações disponíveis na versão 3.0.1 do WRF usada neste trabalho. Este novo conjunto de opções físicas já foi usado no modelo MM5 (**Grell et al., 1995**) por muitos utilizadores, tal como os investigadores que usam o modelo de qualidade do ar CMAQ (*Community Multiscale Air Quality; Byun and Schere, 2006*). Outros modeladores que usaram o modelo WRF e CMAQ preferem o esquema de CLP ACM2, já que permite uma melhor e mais consistente mistura turbulenta nos modelos meteorológicos (WRF) e de qualidade do ar (CMAQ). Adicionalmente, a capacidade de nudging da humidade do solo do modelo MSS PX (**Pleim and Xiu, 2003**), em conjunto com a FDDA (**Stauffer and Seaman 1990, 1994; Stauffer et al. 1991**) dá origem a campos meteorológicos de alta qualidade (**Gilliam et al., 2006**). Esta implementação de novas opções físicas visa satisfazer a necessidade de desenvolver opções adicionais de esquemas de CLP e MSS, expressa no *WRF User's Workshop* realizado em Junho de 2006. A comparação entre as várias configurações referidas anteriormente já foi estudada e não se chegou ainda a um consenso acerca de qual configuração será mais eficiente na simulação dos parâmetros climatológicos. O resultado final irá sempre depender da área geográfica em estudo e de outros factores, se bem que são de referir os seguintes estudos:

- **Gilliam et al (2007)** efectuaram uma comparação entre as combinações YSU-MM5-NOAH e PX-PX-ACM2 na simulação da temperatura a 2 m, direcção e intensidade do vento a 10 m e da razão de mistura aos 2 m. Concluíram que a combinação PX+PX+ACM2 apresenta um melhor comportamento (menor erro e viés) na determinação da velocidade e direcção do vento e na razão de mistura, enquanto no cálculo da temperatura os melhores resultados foram produzidos pela combinação YSU-MM5-Noah. No caso da simulação da velocidade e direcção do vento considerando a combinação YSU-MM5-NOAH, os valores do RMSE e viés obtidos foram, respectivamente, 1.49 e -0.48 m/s (velocidade); 45 e 4 ° (direcção). Para a combinação PX-PX-ACM2, os valores obtidos foram 1.42 e -0.35 m/s para a velocidade; 45 e 3° para a direcção.
- **Gilliam and Pleim (2008)** realizaram uma avaliação da implementação do esquema PX (MSS e CS), aplicados em conjunto com o esquema CLP ACM2. Neste trabalho foram testadas várias configurações do modelo WRF (em termos das suas opções de parametrizações físicas) na simulação da precipitação, temperatura e humidade. Deste trabalho conclui-se que o esquema PX+ACM2 se comporta de uma maneira razoável, especialmente nas estações quentes. Nas épocas frias, este esquema tende a desenvolver uma cobertura nebulosa excessiva no topo da

CLP que diminui a temperatura máxima diurna em algumas áreas. Neste trabalho não foi abordada a simulação do vento.

- **Krieger et al. (2009)** testaram a sensibilidade do modelo WRF no que se refere às parametrizações físicas, comparando várias configurações e concluíram que o esquema PX+PX+ACM2 produziu melhores resultados para a simulação dos ventos de superfície. Considerando a combinação YSU-MM5-NOAH, os valores do RMSE e viés obtidos foram, respectivamente, 2.72 e -0.55 m/s (velocidade); 60 e 0.57 ° (direcção). Para a combinação PX-PX-ACM2, os valores obtidos foram 2.63 e -0.25 m/s para a velocidade; 54.5 e 0.57° para a direcção.
- **Chigullapalli and Mölders (2008)** efectuaram uma análise de sensibilidade ao WRF usando várias configurações físicas na simulação de diversos parâmetros meteorológicos (radiação, velocidade do vento, temperatura do ar e do ponto de orvalho, humidade relativa e precipitação). De entre os inúmeros testes realizados, importa realçar a comparação entre as configurações MYJ-ETA-NOAH e PX-PX-ACM2 na simulação da velocidade do vento, onde concluíram que a combinação MYJ-ETA-NOAH é a que oferece melhores resultados na simulação da velocidade do vento. Os valores de viés não foram apresentados explicitamente para todos os casos, mas os seus valores andaram à volta dos 2-3 m/s.

Considerando estes estudos, parece haver uma opinião favorável quanto às vantagens de usar o esquema PX+PX+ACM2 como opções físicas do WRF, mas o resultado final irá sempre depender da área em estudo, tempo de simulação e de outros factores, como quais as variáveis a simular. No entanto, actualmente ainda decorrem várias investigações e são esperados melhoramentos nestes esquemas, de entre os quais um modelo de neve que melhore a temperatura e consequentes propriedades da camada CLP em condições de cobertura de neve. Além disso, é evidente que durante o Inverno o esquema PX+PX+ACM2 origina uma cobertura nebulosa excessiva no topo da CLP, que terá um impacto significativo na temperatura máxima diurna em algumas áreas. Esta temática nebulosa terá que ser melhor aprofundada no futuro.

No que diz respeito a trabalhos que incidiram sobre o uso de modelos numéricos de simulação atmosférica no contexto de previsão de potencial eólico, existem alguns estudos realizados mas cuja metodologia diverge significativamente da filosofia proposta para este trabalho. De entre as opções que se aproximam do que aqui será feito, referenciam-se os seguintes trabalhos:

- **Miranda et al. (2003)** realizaram um estudo do potencial eólico da zona do Paúl da Serra, na Ilha da Madeira, usando séries de observações do vento no planalto do Paul da Serra para testar a qualidade da simulação do campo de vento com dois modelos meteorológicos de mesoscala, não hidrostáticos (MM5 e NH3D). Os resultados mostram que a metodologia desenvolvida para a previsão do tempo recorrendo a modelos de mesoscala pode ser aplicada com sucesso no mapeamento e previsão do recurso eólico, realçando o contributo que os modelos de mesoscala podem oferecer na previsão do recurso eólico.
- **Byrkjedal and Berge (2008)** procederam ao mapeamento de recurso eólico na Noruega recorrendo aos modelos WRF e WAsP. Os resultados das simulações do WRF foram comparados com observações, obtendo-se coeficientes de correlação (R^2) elevados (entre 0,8 e 0,9) bem como desvios das simulações relativamente às observações entre -3 a 25%, variando muito de local para local e concluíram que em terrenos de topografia complexa (montanhas) o WRF tem tendência para subestimar a velocidade do vento. Depois, usaram-se os resultados do WRF como dados de entrada para o WAsP, verificando-se uma redução dos desvios entre a velocidade simulada e observada.

- **Mortensen et al (2005)** efectuaram um trabalho de 8 anos no Egito com o objectivo de obter um atlas do vento do território egípcio para aplicação em energia eólica. Usaram o modelo numérico de mesoscala KAMM para obter atlas do vento simulados (juntamente com dados de reanálise do NCEP-NCAR) para comparar com atlas do vento baseados em dados observados e calculados pelo WAsP. Desta comparação resultaram erros médios absolutos da ordem dos 10% em zonas onde foram usados domínios de simulação com resolução mais baixa (zonas muito extensas) e de 5% em zonas mais restritas onde se usaram domínios de simulação de maior resolução.
- **Horváth and Horváth (2006)** usaram o modelo acoplado ALADIN (mesoscala) e WAsP (microscala) para prever o regime local de ventos num local de terreno complexo na Croácia, comparando os resultados de simulação com dados observados. Verificaram que as simulações subestimaram a velocidade do vento e fluxos de potência, com erros da ordem dos 30%.

CAPÍTULO 3 – MÉTODOS E DADOS

3.1 - MODELO DE MESOSCALA WRF-ARW

No âmbito da realização dos objectivos propostos neste trabalho, torna-se indispensável uma descrição do modelo usado, neste caso, o modelo numérico WRF-ARW, versão 3.0.1, destacando a sua aplicação à atmosfera real. A versatilidade do modelo no que diz respeito às parametrizações de processos físicos constitui o ponto de partida para os testes de sensibilidade a seguir apresentados. O WRF é um sistema de modelação numérica aplicado à atmosfera, concebido para a previsão operacional do tempo e também para a investigação de fenómenos atmosféricos de mesoscala. O WRF é fruto do esforço e colaboração de uma plataforma de agências e institutos, cujo objectivo é construir um modelo de mesoscala de previsão do tempo e acelerar a transferência de avanços científicos para fins operacionais. Esta plataforma de colaboração, interacção e partilha de “*know how*” é constituída por diversos centros e investigação e agências governamentais dos Estados Unidos da América (além da participação de inúmeros cientistas de variadas Universidades).

O WRF foi desenhado para ser uma ferramenta de topo na área da simulação atmosférica, flexível e eficiente em variadas plataformas computacionais (desde grandes *clusters* a computadores portáteis), sendo de domínio público e de distribuição gratuita. A sua extensa panóplia de opções de parametrizações físicas e dinâmicas reflectem a experiência e a contribuição de uma vasta comunidade científica. O WRF pode ser aplicado tanto a situações idealizadas como à atmosfera real, em escalas horizontais que podem ir desde algumas centenas de metros até milhares de quilómetros. Essas aplicações incluem a previsão numérica do tempo em tempo real, desenvolvimento de técnicas de assimilação de dados e pesquisa, investigação da validade de parametrizações físicas, simulação de climas regionais, modelação da qualidade do ar, acoplamento atmosfera-oceano, simulações idealizadas de fenómenos (ondas gravíticas, ondas baroclínicas, fenómenos de convecção, entre outros).

A validação de um modelo atmosférico numérico pode ser vista segundo vários ângulos (**Pielke, Sr., 2002**), que se complementam:

- 1) Comparação de resultados do modelo com soluções conhecidas de um modelo analítico análogo;
- 2) Verificação dos balanços que exprimem a conservação de massa e de energia;
- 3) Comparação com resultados de modelos numéricos diferentes na concepção;
- 4) Comparação entre resultados de formulações alternativas do mesmo modelo;
- 5) Comparação das previsões do modelo com as observações.

Neste contexto, os testes de sensibilidade referem-se ao 4º item, ou ao 4º combinado com o 5º. O princípio é o de comparar entre si, ou testar um a um contra as observações, os resultados dum modelo quando se faz variar uma parte do mesmo: um algoritmo numérico, uma equação, uma constante de uma parametrização, ou mesmo a troca de um esquema de parametrização por outro. Obter resultados (quase) iguais com diferentes formulações do modelo não garante a sua validade no sentido da capacidade de realizar previsões acertadas; se, pelo contrário, forem grandes as diferenças entre os resultados, não poderão estar todos certos por igual. A avaliação da prestação frente às observações é a etapa decisiva de validação.

As parametrizações são modelos específicos semi-empíricos que relacionam os processos de sub-grelha com as variáveis de prognóstico que entram nas equações dinâmicas. O seu acoplamento ao modelo dinâmico traduz-se em esquemas de cálculo que estimam o efeito dum certo processo de sub-grelha sobre as variáveis resolvidas em primeira instância pelas equações dinâmicas. Embora um modelo numérico atmosférico se alicerce no seu *core* dinâmico, as parametrizações estão na linha da frente quando se trata de simular os fenómenos do tempo com realismo. Os testes de sensibilidade desenvolvidos neste trabalho consistiram em variar certas opções dos esquemas físicos da versão do WRF utilizada neste estudo, comparando as simulações resultantes com um conjunto de observações locais de determinadas variáveis atmosféricas (neste caso, a direcção e intensidade do vento a 60 metros acima do nível do solo).

3.1.1 - DESCRIÇÃO DO MODELO

O núcleo (*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 sistema de modelação WRF comporta dois *cores* dinâmicos: ARW (Advanced Research WRF) e NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). O NMM é um modelo não hidrostático desenvolvido pelo NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA; o ARW, à semelhança do MM5, tira partido do esquema de divisão do incremento de integração para as ondas acústicas e gravíticas oriundo do modelo de nuvens de Klemp-Willhelmson. Os dois *cores* diferem quanto à formulação das equações dinâmicas, às variáveis de prognóstico usadas, ao modo como são dispostas as variáveis na malha (*grid staggering*), e quanto ao método de integração temporal (**Skamarock, 2005**).

A versão do WRF aqui utilizada, 3.0.1, foi lançada a 22 de Agosto de 2008. Para uma descrição detalhada consultar o “ARW User’s Guide” e a “NCAR Technical Note: A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, disponíveis a partir da página Web <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>. O sistema de equações do *core* ARW é baseado nas soluções Eulerianas para equações compressíveis e não-hidrostáticas (mas possui uma opção para a realização de simulações hidrostáticas). É conservativa para variáveis escalares e as suas coordenadas verticais de pressão hidrostática seguem o terreno, onde

o topo do modelo é representado por uma superfície de pressão constante. As variáveis de prognóstico são a massa da coluna de ar seco, velocidades (U, V e W), temperatura potencial e altura do geopotencial. As variáveis não conservativas, tais como a temperatura, pressão e densidade, são diagnosticadas a partir das variáveis de prognóstico (conservativas). A sua grelha horizontal é do tipo Arakawa-C (figura 2) e o esquema de integração temporal do modelo usa um esquema de Runge-Kutta de terceira ordem, acoplado com um esquema de integração semi-implícito de 2ª ordem no tempo para as ondas gravíticas e acústicas. A discretização horizontal recorre a esquemas de segunda a sexta ordem.

O modelo suporta simulações idealizadas e reais, com diversas opções de condições de fronteira laterais. Suporta também opções de aninhamento unidireccional, bidireccional ou em movimento (útil para estudar fenómenos em movimento, como tempestades ou furacões). O modelo está preparado para correr em processadores singulares ou em paralelo (vários processadores). Nas aplicações reais, importa que as condições da fronteira do domínio de simulação representem, o melhor possível, o estado da atmosfera vizinha ao longo do tempo de integração. Essas condições são avançadas a partir de previsões/análises/reanálises de um modelo de previsão numérica do tempo que considera todo o Globo, como por exemplo o Global Forecast System – GFS.

O estado inicial é definido a partir dos valores de previsões/análises/reanálises (dependendo do objectivo da simulação) nos vértices da malha global. A realização de simulações retrospectivas permite fazer uso do acervo de dados saídos de modelos globais com as condições do tempo passado; as previsões globais possibilitam o avanço de previsões operadas pelo modelo de área limitada. Ainda que a informação meteorológica seja apenas a que vem do modelo global, a descrição em pormenor da interacção entre a superfície e a atmosfera e a formulação não hidrostática das equações dinâmicas, tirando proveito da economia de cálculo implicada pelo número reduzido de nós, são tidos como os aspectos chave para o sucesso dos modelos de grelha fina (distância horizontal entre nós da malha desde quilómetros até poucas dezenas de quilómetros). A figura I (ver em Anexo) ilustra a arquitectura do sistema WRF ARW, com os seus programas constituintes (**Wang et al, 2008**).

A função do WRF Pre-processing System (WPS) é de definir a localização e resolução do domínio a usar na simulação, interpolar e gerar mapas de dados estáticos, como a topografia e tipos de solo, e ainda interpolar as condições de fronteira (oriundas de modelos globais como o GFS) para todos os pontos da malha, segundo a resolução escolhida. Estes processos são realizados recorrendo a três executáveis incluídos no WPS: `geogrid.exe`, `ungrib.exe` e `metgrid.exe`. Os campos de dados estáticos (dados de topografia e rugosidade) têm habitualmente 10', 2' ou 30" de resolução, e são interpolados para a resolução da malha através do `geogrid.exe`. No caso do domínio escolhido possuir uma baixa resolução (por exemplo, de 12 km), não existem vantagens em usar dados com 30" de resolução, já que o seu maior detalhe relativamente aos dados de 10' e 2' será diluído na interpolação. Mas, se o domínio tiver uma resolução elevada já será útil a utilização dos dados de 30". Os dados meteorológicos a partir dos quais se irão construir as condições iniciais e de fronteira lateral usados pelos programas `ungrib.exe`, `metgrid.exe` e `real.exe` (programa de inicialização para casos reais) possuem uma grande variedade no que toca à sua resolução e disponibilidade temporal. Este estudo usa como condições de fronteira análises finais provenientes do modelo numérico global GFS com uma resolução de 1º (aproximadamente 90 km para a latitude local), disponíveis de 6 em 6 horas. O WPS é essencialmente responsável pela preparação dos dados de entrada para o programa `real.exe`. Este programa interpola verticalmente os campos meteorológicos produzidos pelo programa `metgrid.exe` do WPS para os níveis η definidos no WRF, e cria as condições iniciais e de fronteira necessários pelo WRF. Depois de todos os dados estáticos e de entrada serem processados pelo WPS, entra em execução o ARW. Os ficheiros de saída do WPS e WRF estão no formato NetCDF, e podem ser visualizados usando algumas ferramentas gráficas, tais como NCAR Graphics NCL, GrADS ou VAPOR.

3.1.2 – MALHA DE SIMULAÇÃO, INICIALIZAÇÃO E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

3.1.2.1 – Domínio e malha de simulação

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. As variáveis de massa são definidas no centro da malha, enquanto que as componentes do vento são definidas nos limites da malha. Para o cálculo das velocidades do vento nos pontos centrais da malha (onde estão definidas as variáveis relativas ao vento aos 10 m e a temperatura aos 2 m), as variáveis U e V são interpoladas para o centro da malha. A malha vertical também usa malhas desfasadas.

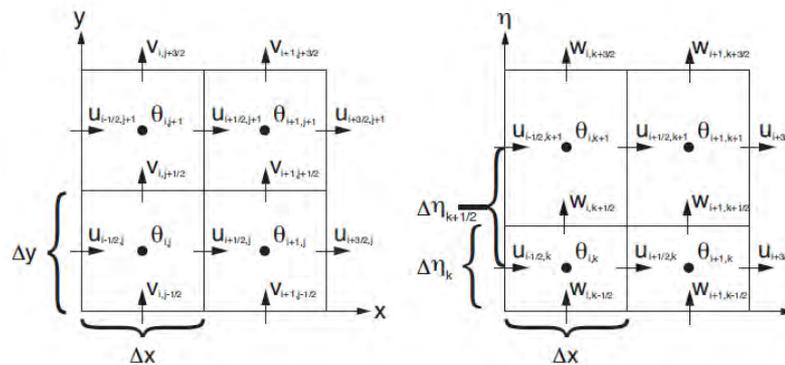


Figura 1 – Malha de cálculo

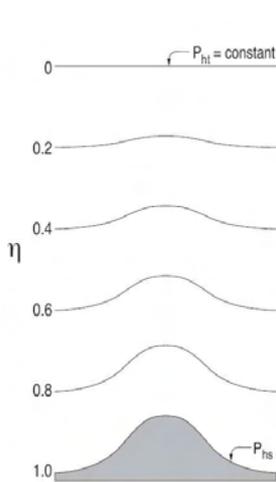


Figura 2 – Níveis verticais

Os níveis verticais da malha de cálculo são valores da coordenada η (*eta*) definida em relação à componente hidrostática de pressão. Junto ao solo, as superfícies coordenadas seguem o declive do terreno. As coordenadas são definidas como:

$$\eta = \frac{(P_h - P_{ht})}{\mu}$$

onde $\eta = (P_{hs} - P_{ht})$ e P_{hs} representa a pressão hidrostática à superfície e P_{ht} é a pressão hidrostática no topo do domínio do modelo.

Cada superfície de igual η é retalhada numa rede rectangular de localizações horizontais, definida no plano de uma projecção cartográfica particular. O WRF suporta três projecções, cuja escolha depende das latitudes em consideração: Mercator; Cónica Conforme de Lambert; Polar Estereográfica.

O espaçamento da malha (que no modelo é igual nas duas direcções, $\Delta x = \Delta y$) e o número de nós determinam as suas dimensões. A posição da malha no globo terrestre pode ser definida pelas coordenadas de longitude e latitude correspondentes ao centro geométrico ou a outro ponto à escolha. Qualquer uma das três projecções acima referidas pode ser afinada para a região varrida pela malha, mediante a atribuição das latitudes dos paralelos isométricos, de modo a minimizar a variação latitudinal do módulo de deformação linear da projecção. A topografia, o tipo e utilização do solo, o recorte da linha costeira, e os outros parâmetros fisiográficos que caracterizam a superfície (albedo, cobertura vegetal, cobertura de neve, cobertura de gelo no mar, representados por médias climatológicas do mês em que se inclui o período de integração) são ingeridos durante o estágio de pré-processamento que antecede a integração das equações dinâmicas, realizado pelo WPS.

3.1.2.2 - Inicialização e condições de fronteira

Nas aplicações a casos reais, quer seja na previsão do tempo ou na simulação de tempo passado, o WRF, como modelo de escala limitada, necessita de condições de fronteira laterais que representem, dentro do possível, o estado real da atmosfera vizinha ao domínio de simulação ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Essas condições de fronteira são obtidas através de um modelo de simulação atmosférica de escala global, por exemplo, o Global Forecast System (GFS). O estado inicial é obtido por interpolação espacial dos dados de análise do modelo global: primeiramente, usa-se o pacote WPS que realiza uma interpolação horizontal das variáveis meteorológicas (altura do geopotencial, vento, temperatura, razão de mistura) em cada nível isobárico, e das variáveis da superfície (pressão atmosférica, temperatura) e dos níveis do subsolo (temperatura e humidade do solo). Seguidamente, já no bloco de inicialização do *core* ARW, é feita uma interpolação vertical adequada à grelha de cálculo do modelo, com a coordenada η em vez da pressão. As condições de fronteira lateral são obtidas por interpolação das previsões do modelo global sobre os nós que contornam a malha e nos sucessivos incrementos de tempo de integração. A fronteira superior é uma superfície de pressão constante.

3.1.3 - Aninhamento

O WRF suporta o aninhamento (*nesting*) de um domínio mais pequeno e de malha mais fina, no interior de um domínio maior com uma malha mais larga. O domínio aninhado (*nest*) é controlado nas suas fronteiras laterais pelo domínio pai (*parent*). Desse modo é possível refinar a solução para uma área restrita sem os custos computacionais implicados no recurso a uma malha fina em todo o domínio; além disso, o aninhamento opera um *downscaling* gradual, pois uma simulação feita unicamente com um domínio de elevada resolução encostado à malha do modelo global teria uma definição espacial e temporal das suas condições de fronteira menos realista. Um domínio pode conter mais do que um domínio aninhado, na condição de que as suas áreas não se sobreponham. Um domínio aninhado pode funcionar como domínio pai em relação a um outro domínio aninhado de menores dimensões. Há dois modos de realizar uma corrida do modelo com aninhamento: 1) o domínio aninhado é integrado em simultâneo com o domínio pai, ou mais tarde, recorrendo às sucessivas saídas do domínio pai; 2) ao fim de cada incremento de tempo do domínio pai, o domínio aninhado, que executa mais passos no mesmo intervalo de tempo, transmite a informação do seu estado actual aos nós da malha maior coincidentes com os nós da malha inferior; este aninhamento bidireccional (*two-way nesting*) com retroacção (*feedback*) requer apenas que a razão entre os espaçamentos das duas malhas seja ímpar, uma vez que o mecanismo de retroacção só funciona se houver uma célula pequena centrada na célula mãe.

A especificação das condições iniciais do domínio aninhado no caso real pode ser efectuada de três formas: 1) os dados 3D atmosféricos, os dados do solo, da superfície do mar, e os dados estáticos (parâmetros fisiográficos) são interpolados a partir dos vértices do domínio pai; 2) o domínio aninhado tem uma inicialização própria para todos os campos; 3) os dados atmosféricos são interpolados a partir da grelha do domínio pai, enquanto todos os outros resultam de uma inicialização própria do domínio aninhado. A desvantagem da 1ª opção é a de não se tirar partido da resolução dos dados estáticos inerente à malha fina; a 2ª tem o inconveniente de não permitir iniciar o aninhamento numa hora posterior à hora 0 do domínio principal. A 3ª opção foi a utilizada neste trabalho.

3.1.4 – Assimilação de dados a quatro dimensões (four dimensional data analysis – FDDA)

O processo de assimilação de dados a quatro dimensões, também conhecido como “*nudging*” (que, traduzido à letra, significa “empurrar” ou “aproximar devido à acção de um mecanismo forçador”), é um método que mantém as simulações próximas das análises/observações durante o tempo de integração. Existem dois tipos de FDDA que podem ser usados, separadamente ou combinados. ***Nudging de malha*** (ou de análises) simplesmente força as simulações do modelo a aproximarem-se de uma série de análises em todos os pontos da malha. ***Nudging observacional*** (ou de estação) força localmente as simulações a aproximarem-se de um conjunto de observações, apenas nos pontos onde estão disponíveis essas mesmas observações. Estes métodos fornecem uma análise a quatro dimensões que é balanceada contínua e dinamicamente, ao mesmo tempo que permite variações locais de topografia complexa e de convecção. Estes conjuntos de dados podem cobrir grandes períodos de tempo, sendo particularmente úteis em casos de longos períodos de simulação de forma a evitar grandes desvios entre simulações e observações para os mesmos períodos em questão.

3.1.4.1 - *Nudging de malha (de análises ou previsões)*

Este foi o tipo de FDDA usado neste trabalho. *Nudging de malha* é um dos principais constituintes da FDDA (os outros constituintes são o *nudging de análises de superfície* a ser desenvolvido brevemente, e o *nudging de observações*). Este método é especificamente *nudging de análise tridimensional*, onde o modelo atmosférico é forçado a aproximar-se de uma análise interpolada no tempo e espaço, usando um termo de relaxamento ponto a ponto. ***Stauffer and Seaman (1990)*** desenvolveram originalmente esta técnica para o modelo numérico de previsão do tempo de quinta geração MM5, possuindo várias aplicações úteis:

- **Dados quadridimensionais** – O modelo é corrido com *nudging de malha* para longos períodos (meses), para fornecer um conjunto de dados meteorológicos consistentes em quatro dimensões, que também sejam coerentes com as análises que lhe servem de referência. Desta maneira, o modelo é usado como um interpolador inteligente de análises entre dois pontos temporais, com a vantagem de uma melhor inclusão de efeitos topográficos e convectivos. Como foi mencionado, o principal uso destes conjuntos de dados é no campo de análise da qualidade do ar, onde os campos de vento podem ser incluídos em modelos químicos.
- **Condição de fronteira** – Uma simulação que contenha domínios aninhados é realizada com *nudging* apenas no domínio maior, o que irá permitir um melhor detalhe temporal nas fronteiras do domínio aninhado relativamente à simples interpolação linear das análises. Esta técnica também pode ser usada em previsões, usando um domínio maior com *nudging*, onde a série de

análises são substituídas por campos de previsão globais que estejam disponíveis para instantes temporais posteriores aos da previsão regional.

- **Inicialização dinâmica** – Uma simulação anterior ao período de previsão (-6 a 0 horas) é corrida com *nudging*, usando análises (ou previsões) nos instantes temporais que já se encontrem disponíveis. É preferível o uso deste método relativamente ao arranque a frio do modelo usando apenas a análise das 0 horas, porque permite que o modelo realize o seu *spin up* (aquecimento). O modelo terá seis horas para se ajustar à topografia e produzir campos de convecção (nuvens) aquando da hora zero, enquanto que um arranque a frio implicaria um período de *spin up* durante as primeiras horas da previsão, onde são produzidas ondas e nuvens.

Este método de *nudging* de malha usa as mesmas análises/previsões de entrada utilizadas no WPS. Como funciona em vários domínios múltiplos numa configuração de domínios aninhados, são necessários múltiplos períodos temporais para cada domínio com *nudging*. Obtidas estas análises, o programa *real.exe* do WRF vai produzir outro ficheiro de entrada que é lido pelo modelo enquanto é realizado o *nudging*. Este ficheiro contém as análises 3-D da malha, e os quatro campos com *nudging*, nomeadamente, as componentes U e V do vento, temperatura e humidade específica. Este método é implementado através de um termo extra na equação da tendência da variável arbitrária Θ :

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = F(\Theta) + G_{\Theta} W_{\Theta} (\Theta_0 - \Theta)$$

onde $F(\Theta)$ representa os termos normais de tendência devido à física, advecção, etc., G_{Θ} é o coeficiente temporal de *nudging* (proporcional ao peso do *nudging* na simulação), W_{Θ} representa mais um coeficiente limitador espaço-temporal do *nudging* e Θ_0 é o valor da análise interpolada no tempo e espaço para a qual o *nudging* faz tender a simulação. Existem várias opções de controlo do *nudging*:

- **Paragem e suavização do *nudging*** – O *nudging* pode ser desligado durante a simulação, tal como na inicialização dinâmica. Mas, como uma paragem súbita do *nudging* pode levar ao aparecimento de ruído, existe a possibilidade de suavizar essa paragem (tipicamente durante 1 ou 2 horas) para reduzir o choque.
- **Peso do *nudging*** – A escala temporal do *nudging* pode ser controlada individualmente para o vento, temperatura e humidade. Tipicamente, o valor usado é de 0.0003 s^{-1} , o que corresponde a uma escala temporal de cerca de uma hora, mas este valor pode ser reduzido para a humidade quando existir uma menor confiança na análise relativamente ao modelo.
- ***Nudging* na camada limite** – Como a análise não resolve o ciclo diurno, por vezes é preferível não fazer o *nudging* na camada limite, para assim deixar ao esquema CLP (ver descrição na secção seguinte) evoluir devidamente, principalmente no que diz respeito aos campos de humidade e temperatura. É possível, então, seleccionar quais as variáveis que irão ser alvo de *nudging*, ou não, no modelo da camada limite, cuja profundidade é determinada pela física do esquema CLP.
- ***Nudging* em níveis menores** – Alternativamente, o *nudging* pode ser desactivado para uma determinada variável abaixo de um certo nível durante a simulação.

- **Nudging e aninhamento** – Cada uma destas opções é independentemente definida para cada domínio, excepto a opção de suavização do *nudging* que tem que ser definida para todos os domínios.

3.1.5 – Processos físicos de escala reduzida - Parametrizações

Os modelos de mesoscala requerem vários tipos de parametrizações para representarem os processos físicos de transferência de calor, momento e humidade entre a superfície e atmosfera. Os processos físicos com significado meteorológico incluem: as trocas radiativas (ar, nuvens e superfície terrestre); a convecção térmica e forçada pelo vento na troposfera; os mecanismos de atrito turbulento junto à superfície; as trocas turbulentas de calor sensível e latente, de vapor de água (entre a superfície e as camadas de atrito, no interior da camada limite e entre esta e a atmosfera livre); as trocas de calor por condução e as trocas de humidade no interior do solo; a evapotranspiração; a evaporação e a condensação de água associadas à formação de nevoeiro, neblina e geada; a microfísica das nuvens e a precipitação (chuva, neve e granizo). Certos mecanismos atmosféricos (como a formação de nuvens, a precipitação, as trocas radiativas), não são do âmbito da dinâmica de fluidos; outros (como as trocas turbulentas), por serem de estrutura muito fina, não podem, na prática, ser representados pelas leis hidrodinâmicas na sua forma fundamental. Tradicionalmente, os primeiros são objecto da Meteorologia Física; os segundos tendem a ser incluídos nesse ramo da Física da atmosfera, na medida em que requerem a analogia a leis que procedem da descontinuidade da matéria (vg., viscosidade). Daí vem a designação de *processos físicos*. Não podendo ser resolvidas pelas equações dum modelo numérico dinâmico, discretas nos pontos de uma grelha do espaço e do tempo, diz-se que são de *sub-grelha*. As parametrizações são funções específicas determinadas empiricamente, que relacionam os processos de sub-grelha com as variáveis de prognóstico que entram nas equações dinâmicas. O seu acoplamento ao modelo dinâmico traduz-se em esquemas de cálculo que estimam o efeito dum certo processo de sub-grelha sobre as variáveis resolvidas, em primeira instância, pelas equações dinâmicas. Embora um modelo numérico atmosférico se alicerce no seu *core* dinâmico, as parametrizações estão na linha da frente quando se trata de simular os fenómenos do tempo com realismo.

No WRF os esquemas físicos, implementados em módulos separados, são classificados de acordo com a função que desempenham:

- **Radiação de curto comprimento de onda (RCO)**
- **Radiação de longo comprimento de onda (RLO)**
- **Microfísica (MF)**
- **Parametrização de *cumulus* (PC)**
- **Camada de superfície (CS)**
- **Modelo de superfície de solo (MSS)**
- **Camada limite planetária (CLP)**

Os esquemas RLO resolvem as trocas radiativas de “onda longa” (banda infravermelha); os esquemas RCO resolvem as trocas radiativas de “onda curta” (visível e ultravioleta); os esquemas MF resolvem os processos de condensação e evaporação no ar; os esquemas CS resolvem o atrito e os fluxos de calor,

de quantidade de movimento e de vapor de água na camada de atrito, junto ao solo; os esquemas MSS resolvem as trocas de calor e de água no interior do solo; os esquemas CLP tratam as trocas turbulentas não apenas na camada limite planetária, que confina com a terra e o mar, mas ao longo de toda a coluna vertical do modelo; os esquemas PC resolvem as nuvens de origem convectiva. Dentro de cada classe, o WRF coloca à escolha do utilizador os seguintes esquemas alternativos:

Tabela 1 – Parametrizações físicas disponíveis no WRF

	Parametrizações			
Camada de Superfície (CS)	MM5,	Eta,	Pleim-Xiu,	
Camada Limite Planetária (CLP)	YSU,	MYJ,	MRF,	ACM2,
Modelo de Superfície de Solo (MSS)	5 layer thermal diffusion,		NOAH,	RUC, Pleim-Xiu,
Microfísica (MF)	Kessler,	Purdue-Lin,	Thompson,	Eta GCP, WSM3, WSM5, WSM6, Goddard, Morrison, 2-moment
Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO)	Dudhia,	Goddard,	Eta GFDL,	CAM,
Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO)	RRTM,	Eta GFDL,	CAM,	
Cumulus (PC)	Kain-Fritsh,	Betts-Miller-Jancic,	Grell-Devery Ensemble,	Grell-3 Ensemble,

A razão por que o sistema WRF inclui tantas opções físicas é que muitos esquemas são provenientes de modelos anteriores, climatológicos (vg. CAM), de previsão do tempo em grande escala (vg. Eta) ou em mesoscala (vg. MM5), além dos que foram concebidos de raiz. Relativamente à versão anterior do modelo WRF (a versão 2.2), estão disponíveis mais parametrizações para as várias classes de fenómenos físicos de pequena escala. Como este trabalho foca a análise no campo do vento aos 60 metros acima do nível do solo, as parametrizações que mais irão influenciar esta variável serão, à partida, as que estão relacionadas com a camada limite planetária (CS, CLP e MSS). Estas três classes de parametrizações estão intimamente interligadas e interagem activamente entre elas. Na versão 3.0.1 do WRF estão disponíveis novos esquemas para estas três classes. Adicionalmente às parametrizações anteriormente disponíveis, juntam-se as parametrizações Pleim-Xiu para a MSS e CS, e a ACM2 que trata a CLP. De acordo com **Xiu and Pleim (2001)**, estas três opções têm que ser usadas em conjunto, daí resultando um novo conjunto de parametrizações disponíveis na versão 3.0.1 do WRF usada neste trabalho. Este conjunto de opções físicas (PX + PX + ACM2), já disponível no modelo MM5, têm-se revelado particularmente eficiente para simulações longas (semanas, meses e mesmo anos), onde os esquemas de assimilação dos dados permitem um acompanhamento realístico das tendências de humidade e vegetação do solo.

Seguidamente, vai ser apresentada uma breve descrição qualitativa das principais características dos esquemas usados neste trabalho para cada uma destas três classes de parametrizações. Para uma descrição técnica mais aprofundada destes e de outros esquemas, ver **Wang et al, (2008)** e **Skamarock et al., (2008)**.

3.1.5.1 – Esquemas de Camada superficial

Os esquemas CS são responsáveis pelo cálculo das velocidades de atrito e coeficientes de transferência, que possibilitam o cálculo do calor sensível e fluxos de humidade pelos esquemas MSS e das tensões à superfície pelos esquemas de CLP. Na presença de superfícies de água, estes fluxos e campos de diagnóstico de superfície são calculados pelos próprios esquemas CS. Os esquemas não oferecem tendências, apenas a informação dependente da estabilidade acerca da camada de superfície que irá ser usada pelos esquemas MSS e CLP. Actualmente, cada opção para a parametrização CS está associada a uma opção específica da CLP, mas espera-se que futuramente sejam postas à disposição do

modelador mais opções de escolha de esquemas e de interligação entre os vários esquemas disponíveis. É de notar que alguns esquemas CS, como por exemplo os esquemas YSU e MRF, requerem que a espessura da camada de superfície no modelo seja representativa da camada de superfície real (50 – 100 metros).

Esquema MM5

Este esquema é baseado na teoria de similaridade (**Monin and Obukhov, 1954**) e usa funções de estabilidade de **Paulson (1970)**, **Dyer and Hicks (1970)** e **Webb (1970)**, que descrevem a influência da estabilidade atmosférica na turbulência e na relação entre fluxos e gradientes na camada limite, para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor, humidade e momento da superfície. Uma velocidade convectiva que segue **Beljaars (1994)** é usada para realçar os fluxos de superfície de calor e humidade. Nesta versão do esquema não é usada nenhuma parametrização relativa ao comprimento da rugosidade térmica. A relação entre comprimento de rugosidade e velocidade de fricção sobre a água é tratada por relação de Charnock. Existem quatro regimes de estabilidade que seguem **Zhang and Anthes (1982)**. Este esquema CS tem que ser usado em conjunto com os esquemas CLP YSU ou MRF. Nesta versão do esquema MM5, existe a opção de substituir a relação de Charnock para o comprimento de rugosidade pela relação de Donelan que possui um menor coeficiente de arrasto para velocidades de vento forçadoras de furacões, e que pode ser mais adequada para simulações deste tipo de fenómenos. No caso de estarmos perante superfícies de água, a formulação de Beljaars para velocidades convectivas é substituída por uma formulação alternativa que é proporcional apenas ao gradiente vertical térmico, para assim proporcionar melhores resultados em situações de vento fraco.

Esquema ETA

O esquema de camada de superfície ETA (**Jancic, 1996, 2002**) é também baseado na teoria de similaridade (**Monin and Obukhov, 1954**). Este esquema inclui parametrizações de uma sub-camada viscosa. Sobre superfícies de água, esta sub-camada viscosa é parametrizada explicitamente segundo **Jancic (1994)**. Sobre superfícies terrestres, os efeitos da sub-camada viscosa são incluídos através de uma altura de rugosidade variável para a temperatura e humidade, tal como proposto por **Zilitinkevich (1995)**. A correcção de **Beljaars (1994)** é aplicada para evitar singularidades no caso de estarmos perante uma camada de superfície instável e velocidade do vento nula. Os fluxos de superfície são calculados através de um método iterativo. Este esquema tem que ser usado conjuntamente com o esquema CLP MYJ e, por esta razão, é muitas vezes denominado como o esquema CS MYJ.

Esquema Pleim-Xiu (PX)

Este esquema de CS PX (**Pleim, 2006**) foi desenvolvido como parte integrante do esquema CLP PX, mas pode ser usado com qualquer outro esquema MSS ou CLP. É também baseado na teoria da similaridade e inclui parametrizações de uma sub-camada viscosa na forma de uma resistência quase laminar da camada limite no que diz respeito às diferenças na difusividade do calor, vapor de água e no rastreio de espécies químicas. As funções de similaridade da camada de superfície são estimadas através de aproximações analíticas de variáveis de estado.

3.1.5.2 – Esquemas do modelo de superfície do solo

Os MSS usam informação atmosférica dada pelos esquemas CS, forçamentos radiativos calculados pelos esquemas de radiação e forçamentos de precipitação calculados pelos esquemas de convecção (*cumulus*) e de microfísica, juntamente com informação interna das variáveis de estado terrestres e das propriedades da superfície terrestre para fornecer fluxos de calor e humidade sobre pontos da malha

sobre solo e pontos da malha sobre água do mar sob a forma de gelo. Estes fluxos proporcionam uma condição de fronteira reduzida para o transporte vertical, feito nos esquemas CLP (ou no esquema de difusão vertical quando não são usados esquemas CLP, como no caso de simulações de grandes *eddies*). Os modelos MSS possuem vários graus de sofisticação quando lidam com fluxos térmicos e de humidade em múltiplas camadas de solo, e podem também lidar com vegetação, raízes, efeitos de copa (*canopy*) e previsão de superfícies cobertas por neve. Os MSS não oferecem tendências, mas actualizam variáveis de estado que incluem a temperatura de superfície, perfil de temperatura e de mistura do solo, cobertura de neve e propriedades de *canopy*. Não existe nenhuma interacção horizontal entre pontos vizinhos no MSS, por isso pode ser visto como um modelo unidimensional de coluna para cada ponto terrestre da malha do WRF.

Esquema NOAH

Este esquema MSS é o sucessor do esquema MSS OSU descrito por **Chen and Dudhia (2001)**. Foi desenvolvido conjuntamente pelo NCAR e NCEP, e é um código unificado para fins operacionais e de investigação, sendo quase idêntico ao código usado no NAM (North American Mesoscale Model) do NCEP. Este esquema tem a vantagem de ser consistente com os campos de solo dependentes do tempo fornecidos nas bases de dados das análises. É um modelo de quatro camadas de temperatura e humidade do solo com humidade de copa (*canopy*) e prognóstico de cobertura de neve. As espessuras das camadas são de 10, 20, 30, 60 e 100 cm, do topo para baixo. Inclui zona de raiz (*root zone*), evapotranspiração, drenagem do solo e escoamento (*runoff*), considerando as categorias da vegetação, fracção de cobertura mensal de vegetação e textura do solo. O esquema NOAH fornece fluxos de calor latente e sensível para o esquema CLP. Também prevê gelo no solo, e efeitos da fracção de cobertura de neve e possui um tratamento urbano melhorado, considerando propriedades de emissividade da superfície que são uma novidade depois do esquema OSU.

Esquema Pleim-Xiu

O esquema Pleim-Xiu (**Pleim and Xiu, 1995; Xiu and Pleim, 2001**) originalmente baseado no modelo ISBA (**Noilhan and Planton, 1989**), inclui um modelo restaurador de forças de duas camadas de temperatura e humidade do solo. A camada de topo é tida como tendo 1 cm de espessura, e a camada inferior como tendo 99 cm. O esquema MSS PX considera três percursos para os fluxos de humidade: evapotranspiração, evaporação a partir do solo, e evaporação a partir de copas molhadas. A evapotranspiração é controlada por *bulk stomatal resistance* que é dependente da humidade do solo, radiação fotossintética, temperatura do ar e humidade relativa da superfície. Estão presentes dois esquemas indirectos de *nudging* que corrigem desvios na temperatura do ar a 2 metros e humidade relativa através de ajustamento dinâmico da humidade do solo (**Pleim and Xiu, 2003**) e temperatura do solo profundo (**Pleim and Gilliam, 2008**).

3.1.5.3 – Esquemas da camada limite planetária

A parametrização da CLP é responsável pelos fluxos verticais de escala sub-grelha devido a transportes turbulentos na totalidade da coluna vertical da atmosfera, e não apenas na camada limite. Quando um esquema CLP é activado, a difusão vertical explícita é desactivada partindo do pressuposto que o esquema CLP lidará com esse processo. As escolhas mais apropriadas para a difusão horizontal são aquelas que se baseiam na deformação horizontal, onde a mistura horizontal e vertical são tratadas independentemente. Os fluxos de superfície são fornecidos pelos esquemas CS e MSS. Os esquemas CLP determinam os perfis dos fluxos dentro da camada limite bem misturada e da camada limite estável, e fornecem tendências atmosféricas de temperatura, humidade (incluindo nuvens) e momento horizontal na totalidade da coluna atmosférica. A maioria dos esquemas CLP consideram mistura seca, mas

também podem incluir efeitos de saturação na estabilidade vertical que determinam a mistura. Os esquemas são uni-dimensionais, e assumem que existe uma separação nítida de escalas entre turbulência de escala sub-grelha e turbulência resolvida (de escala maior que a grelha). Esta assumption irá tornar-se menos clara em grelhas de tamanho inferior a algumas centenas de metros, onde a turbulência da camada limite pode começar a ser resolvida, e nestas situações o esquema deve ser substituído por um esquema local de turbulência sub-grelha completamente tridimensional, como são os esquemas de difusão TKE (*turbulence kinetic energy*), que consiste na energia cinética turbulenta.

Esquema Yonsei University (YSU)

O esquema CLP YSU (**Hong et al., 2006**) é uma sofisticação do modelo CLP MRF, que também usa termos de contra-gradiente, para a representação dos fluxos devido a gradientes não locais. Este esquema adiciona ao esquema MRF um tratamento explícito da camada de *entrainment* no topo da CLP. O *entrainment* é considerado proporcional ao fluxo de impulsão da superfície, em linha com os resultados de estudos com modelos de *large-eddy* (**Noh et al., 2003**). O topo da CLP é definido usando um número de Richardson crítico igual a zero (comparado com o de 0.5 considerado no esquema MRF), sendo então dependente do perfil de impulsão, no qual o topo da CLP é definido na camada de *entrainment* máxima (comparada com a camada onde a difusividade se torna nula). Neste esquema, uma mistura contra-gradiente a uma escala mais reduzida produz um perfil de camada limite bem misturada, onde existe uma estrutura estável pronunciada na parte superior da camada de mistura no caso do esquema MRF. Detalhes podem ser encontrados em **Hong et al. (2006)**, incluindo a análise da interação entre a camada limite e física da precipitação. Na versão 3, um sofisticado algoritmo de difusão da camada limite estável (**Hong, 2007**) deve ser usado, já que permite uma maior mistura em condições de vento intenso.

Esquema Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)

Esta parametrização da turbulência na CLP e na atmosfera livre (**Janjic, 1990, 1996, 2002**) representa uma implementação não singular do modelo de fecho de turbulência de Mellor-Yamada 2.5 (**Mellor and Yamada, 1982**) através de todos os regimes de turbulência atmosférica. Nesta implementação, é imposto um limite superior na escala do comprimento de mistura. Este limite superior depende da TKE, da flutuabilidade e também do efeito de corte do escoamento. Em condições de instabilidade, a forma funcional deste limite superior deriva do pressuposto de que a produção de TKE seja não singular no caso de turbulência crescente. Em condições de estabilidade, o limite superior advém da condição de que a razão entre a variância do desvio da velocidade vertical e a TKE não pode ser inferior do que a que corresponde a um regime de turbulência residual. A equação diferencial de produção/dissipação de TKE é resolvida iterativamente. As constantes empíricas foram revistas (**Janjic, 1996, 2002**).

Esquema ACM2 (Asymetrical Convective Model version 2)

Este esquema ACM2 (**Pleim, 2007**) é uma combinação do modelo ACM, que é um modelo transiente simples que, originalmente, era uma modificação do modelo convectivo de **Blackadar (1976)** e de um modelo de difusão de *eddies*. Em condições convectivas, o esquema ACM2 é capaz de simular o transporte vertical intenso em plumas flutuantes e difusão turbulenta induzida por efeito de corte local. A separação entre as componentes de transporte local e não local é derivada da fracção do fluxo de calor não local, de acordo com o modelo de **Holtslag and Boville (1993)**. O algoritmo faz uma transição suave da difusão de *eddies* em condições estáveis para o transporte local e não local combinado em condições de instabilidade. O esquema ACM2 é particularmente eficiente para o transporte consistente na CLP de qualquer variável atmosférica, tanto meteorológicas (u, v, θ, q_v) como químicas.

3.2 – MODELO DE MICROSCALA WASP

Neste trabalho também será usado, como programa auxiliar, o modelo de microscala WAsP, versão 9.1. O modelo WRF é um modelo de mesoscala, não representando os fenómenos locais de circulação com o detalhe aqui pretendido. Uma das soluções que, à partida, permitirá obter um refinamento dos resultados será usar um modelo de microscala, que está configurado para resolver fenómenos atmosféricos de escala reduzida, ao mesmo tempo que possui dados relativos ao terreno de resolução muito maior do que acontece para os modelos de mesoscala. Assim, estamos a tentar minorar as principais limitações do modelo WRF em dois aspectos distintos e muito importantes: Descrição do terreno e capacidade de resolução a pequena escala.

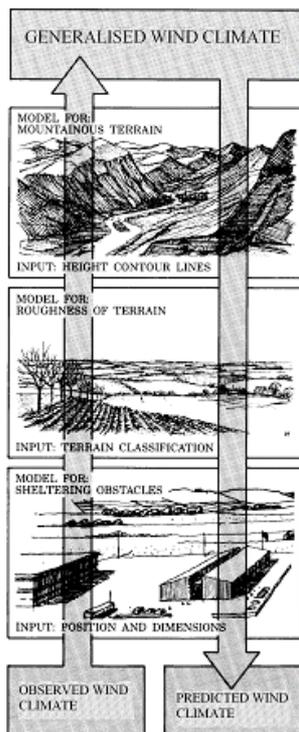
O modelo WAsP (*Mortensen et al., 2007*) é um software comercial, desenvolvido e distribuído pela divisão de Energia Eólica da Universidade Técnica Risø, na Dinamarca. Actualmente, este software é usado por cerca de 2600 utilizadores em mais de 100 países que o usam para diversos fins tais como: estimativas de produção de parques eólicos, estimativas de regimes locais de ventos, análise de dados meteorológicos, etc.

O WAsP é usado há mais de 20 anos dentro da indústria eólica e meteorológica, liderando o ranking de software preferencial no estudo de recurso eólico e planeamento de parques eólicos. As suas funcionalidades incluem: previsão de regimes locais de vento, recurso eólico e estimativas de produção de parques eólicos ou aerogeradores. Estas previsões são baseadas em medições do vento efectuadas em estações meteorológicas que estejam na proximidade da futura área de implementação de um parque eólico. O programa inclui um modelo complexo de escoamento no terreno, um modelo de rugosidade e obstáculos, entre outros.

O WAsP necessita, como qualquer modelo, de condições iniciais que são fornecidas por um modelo de escala superior (ou por observações). Neste caso, as observações e simulações saídas do WRF serão usadas como dados de entrada no modelo de microscala. Este modelo irá considerar as simulações (ou observações) num dado ponto e construir um regime regional de ventos (ou atlas de vento), que consiste nas observações/simulações (dados de entrada) limpos dos efeitos locais do terreno no ponto. Assim, este atlas do vento é independente do local, já que está “limpo” dos efeitos locais do terreno, e as distribuições do vento serão reduzidas a determinadas condições padrão.

Este atlas do vento (ou regime local do vento) consiste num regime de vento hipotético, para um terreno sem qualquer tipo de relevo e completamente plano com uma rugosidade superficial uniforme, e assume que a região em estudo possui as mesmas condições atmosféricas que o ponto associado aos dados de entrada (observações/simulações de mesoscala), e é representativo e válido para todos os pontos da área considerada no domínio do modelo WAsP.

Este conceito de atlas do vento surge numa perspectiva de construir a ponte entre dados de medição num determinado ponto e entre regime de vento previsto e recurso eólico num outro ponto de interesse, tipicamente um ponto que é candidato à instalação de um aerogerador ou até de um parque eólico. Depois de obtido o atlas do vento (regime local do vento sem os efeitos do terreno), é necessário voltar a inserir estes efeitos do terreno para a determinação do regime de ventos do ponto do domínio que nos interessa. Ou seja, aqui aplica-se o processo inverso ao usado para criar o atlas do vento. Basicamente, este processo consiste em três passos:



1 – Introdução dos dados de entrada (regime de ventos obtido a partir de observações/simulações de mesoscala) no WAsP, associados ao ponto onde são medidos/simulados;

2 – Cálculo do atlas de vento para a região envolvente ao ponto de medições/simulações, retirando os efeitos de terreno a esse regime de ventos medido/simulado;

3 – Cálculo do regime de ventos (previsto) de outro ponto dessa área, re-introduzindo os efeitos de terreno no atlas de vento.

Para a dedução deste regime de vento no novo ponto de interesse, é usado um modelo de escoamento que irá introduzir no escoamento atmosférico os efeitos do terreno (altimetria, rugosidade e possíveis obstáculos).

Figura 3 – Metodologia usada pelo WAsP

3.3 – VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO

Um modelo numérico atmosférico pode ser validado segundo diferentes metodologias (*Pielke, Sr., 2002*), as quais se complementam:

1. Comparação de resultados com soluções conhecidas dum modelo analítico análogo;
2. Verificação dos balanços que exprimem conservação de massa e energia;
3. Comparação com resultados de outros modelos numéricos, diferentes na concepção;
4. Comparação entre resultados de formulações alternativas do mesmo modelo;
5. Comparação das previsões do modelo com as observações.

No âmbito deste trabalho, os testes de sensibilidade consistem nos 4º e 5º itens. A metodologia é comparar entre si, ou testar um a um contra as observações, os resultados dum modelo quando se faz variar uma parte do mesmo (um algoritmo numérico, uma equação, uma constante de uma parametrização, ou mesmo a troca de um esquema de parametrização por outro). Obter resultados semelhantes com diferentes formulações do mesmo modelo não garante a sua validade no sentido da capacidade de realizar previsões acertadas. Se, pelo contrário, forem grandes as diferenças entre os resultados, não poderão estar todos certos por igual. Do ponto de vista da utilidade prática e operacional de um modelo, a avaliação da sua prestação frente a observações é a etapa decisiva de validação.

O modelo numérico de previsão do tempo WRF, devido ao seu historial de desenvolvimento contínuo e uso por parte de uma vasta e reconhecida comunidade científica, já percorreu algumas das etapas fundamentais de validação acima enunciadas. Contudo, prosseguem ainda os estudos de verificação do desempenho em cenários meteorológicos concretos, incluindo a comparação das opções disponíveis para os esquemas físicos.

Destes estudos espera-se o aperfeiçoamento do modelo, seja pelo melhoramento dos seus componentes intrínsecos, seja pela optimização e selecção das variantes dos mesmos com o fim de estabelecer quais são as combinações óptimas para cada tipo de fenómenos que se pretende estudar. Outro problema associado, não só à validação de um modelo numérico mas também ao seu próprio uso de um ponto de vista operacional, reside em aspectos computacionais. A velocidade de cálculo e a capacidade de armazenamento dos dados simulados constituem um factor limitativo na definição de metodologias e ambições na sua utilização, pelo que devem ser consideradas aquando da escolha dos objectivos a realizar.

Os testes de sensibilidade dos resultados de um modelo numérico da atmosfera, quanto às diferentes configurações do conjunto de parametrizações de um processo físico em particular, não são triviais. Nem sempre se podem retirar conclusões gerais sobre os efeitos que as modificações testadas induziram nos resultados finais, nem se a alteração de uma determinada parte do modelo produzirá alterações lineares nos seus resultados, ou seja, qualquer alteração na configuração do modelo que inclua a variação de outra parte constituinte pode alterar os resultados do primeiro teste. Este aspecto é uma consequência da forte interacção e interdependência entre os processos físicos, com mecanismos de re-alimentação cujos efeitos são praticamente impossíveis de controlar ou prever analiticamente. As parametrizações, sendo uma aproximação à realidade física com elementos semi-empíricos, introduzem os seus próprios mecanismos de re-alimentação.

3.2.1 – Medidas de Erro

De forma a avaliar quantitativamente o desempenho do WRF nas suas simulações irão ser considerados dois tipos de erro médio, que reflectem o afastamento entre os valores simulados e os valores observados relativamente à variável meteorológica em questão, o vento. O primeiro tipo de erro médio usado será o **valor médio quadrático do erro, RMSE**, dado pela expressão seguinte:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Theta'_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde

$$\Theta' = \Theta_s - \Theta_{obs}$$

representa o desvio entre um valor individual de simulação e o valor observado no mesmo local e no mesmo instante, e N representa o número de verificações.

O outro tipo de erro médio considerado será o **erro médio, Viés**, dado pela expressão:

$$\text{Viés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Theta'_i$$

O viés permite avaliar o enviesamento dos dados: Se for positivo, significa que os valores simulados tendem a sobrestimar os valores reais, enquanto que se for negativo significa que existe uma tendência do modelo em subestimar os mesmos valores reais.

Outro parâmetro importante na avaliação quantitativa do comportamento do modelo é o desvio padrão do erro, que serve para avaliar a medida da dispersão do erro e é dado pela seguinte expressão:

$$\text{STDE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Theta'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Theta'_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[(\text{RMSE})^2 - (\text{Bias})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Em relação ao rumo do vento (direção de onde sopra, medida em graus de arco desde o Norte geográfico, que corresponde a 0 ou 360°, no sentido dos ponteiros do relógio), convencionou-se ser a diferença Θ' positiva quando o vector da velocidade do vento simulado se desvia em sentido horário relativamente ao vector da velocidade do vento observado. Assim, nas latitudes Norte em consideração, um viés positivo (negativo) indicará que o vento previsto se coloca, em média, em viés anticiclónico (cyclónico) em relação ao vento observado. Como o desvio absoluto do rumo do vento não pode exceder 180 graus, a diferença tem que ser modificada quando o módulo ultrapassa esse valor. Neste caso, a expressão de Θ' toma a seguinte forma:

$$\Theta' = (\Theta_s - \Theta_{obs}) \left[1 - 360 / |\Theta_s - \Theta_{obs}| \right], \text{ se } |\Theta_s - \Theta_{obs}| > 180^\circ$$

Além de estas três medidas de erro apresentadas, vai ser considerado também o quadrado do **coeficiente de correlação, (R^2)**, existente entre as séries simuladas e observadas, de maneira a aferir acerca da correlação existente entre as séries. Considerando estas medidas de erro, torna-se importante hierarquizá-las de maneira a que se atinja um pressuposto geral, a partir do qual se possam tirar ilações quando se analisam as medidas de erro. Assim, pode-se afirmar que simulações mais acertadas implicam um RMSE menor em valor absoluto, e vice-versa. O viés, ou erro médio, não fornece a melhor indicação do acerto das simulações com as observações, antes representando o desvio das simulações em termos médios. Um viés menor em valor absoluto, relativamente a um mesmo conjunto de observações, não significa que as simulações sejam mais acertadas, a menos que o desvio padrão do erro, STDE, seja muito inferior ao erro médio quadrático. Assim, o pressuposto a usar será o seguinte:

- **Simulação de má qualidade:** $\text{STDE}^2 \ll \text{RMSE}^2 \Leftrightarrow \text{RMSE}^2 \sim \text{Viés}^2$
- **Simulação de boa qualidade:** $\text{STDE}^2 \sim \text{RMSE}^2 \Leftrightarrow \text{Viés}^2 \ll \text{RMSE}^2$

A relação entre o erro de viés e o maior ou menor enviesamento dos valores simulados carece de um reparo. Tomemos, como exemplo, dois conjuntos com o *mesmo erro médio (viés)* mas com *diferente dispersão do erro (STDE)*; se por “simulações enviesadas” se entender que os erros individuais estão distribuídos de forma assimétrica relativamente ao erro médio, então serão “mais enviesadas” as simulações do conjunto que apresentar a dispersão de erro mais pequena. Este pormenor na interpretação do erro de viés não se coloca na comparação entre as curvas de erro da mesma figura, as quais se reportam em cada ponto ao mesmo conjunto de observações, mas sim na evolução temporal das curvas e nas diferenças estacionárias. Assim, uma vez cumprido o pressuposto acima indicado (simulação de boa qualidade), podemos considerar que a simulação que melhor simulará a realidade será aquela que apresentar um STDE menor. Isto significa que, apesar de uma simulação poder

apresentar um RMSE e/ou um viés relativamente elevados, se este erro for constante (STDE baixo) será fácil quantificar esse erro e entendê-lo como uma espécie de *offset*, podendo assim aplicar um factor de correcção aritmético na série e aproximá-lo da realidade não interferindo na dinâmica e física da simulação (**Ferreira, A. P., 2007**).

3.3 – METODOLOGIA

Este estudo reporta-se aos meses de Janeiro e Junho de 2008, e a um domínio geográfico focado em Portugal Continental. Testar a sensibilidade a parametrizações variadas dum mesmo processo não é trivial, por nem sempre se poder tirar conclusões gerais acerca do efeito da modificação testada; qualquer nova realização do modelo que inclua ainda a variação de uma parametrização de natureza fisicamente diversa pode alterar os resultados do primeiro teste. Tal é consequência da interacção entre os processos físicos, com mecanismos de re-alimentação cujos efeitos são impossíveis de prever analiticamente. A necessidade de impor condições de fronteira lateral a partir de um modelo de escala maior, um aspecto peculiar dos modelos de área limitada, levanta o problema da sensibilidade à área do domínio e a outros aspectos do acoplamento entre modelos de diferente escala, como a resolução das respectivas malhas. No trabalho aqui documentado, avaliou-se a sensibilidade à variação dos esquemas físicos, fixando tudo o mais, no pressuposto de que os processos físicos assumem particular protagonismo junto à superfície. A escolha entre várias opções de diferentes processos dificulta a tarefa de eleger um subconjunto do universo das combinações possíveis. Em estudos dirigidos a fenómenos particulares é natural que se teste apenas um tipo de esquema físico. No caso, pretende-se avaliar o desempenho de diferentes realizações do modelo na simulação da direcção e intensidade do vento.

Todas as simulações com o WRF foram executadas em três malhas de simulação (domínios aninhados), cujas características se encontram detalhadas na secção 3.3.1. Em todas elas determinou-se como período de simulação 1 mês completo do ano de 2008. Seguidamente, as simulações foram confrontadas com dados observados registados em estações meteorológicas (vide secção 3.3.2). Todas as simulações são iniciadas 12 horas antes do período de simulação pretendido, de forma a que estas 12 horas sejam consideradas como *spin-up* e, conseqüentemente, sejam descartadas nos cálculos permitindo um “aquecimento” do modelo. O modelo necessita de condições iniciais e de fronteira apropriadas ao seu funcionamento, condições essas normalmente retiradas de modelos globais de simulação atmosférica. Neste caso, o modelo que serviu de entrada das variáveis atmosféricas e de superfície foi o GFS, operado pelo National Centre for Environmental Protection (NCEP) quatro vezes por dia em tempo quase real. Do *site* oficial do NCEP retiraram-se os ficheiros NCEP Final Operational Global Analysis, que consistem em análises das previsões do modelo GFS. Estas análises têm uma resolução em latitude e longitude de 1° e 27 níveis verticais isobáricos (dos 1000 aos 10 mb), além dos dados da superfície e da camada limite terrestre, bem como dados relativos à pressão à superfície, pressão ao nível do mar, altura do geopotencial, temperatura, temperatura da superfície do mar, cobertura de gelo, humidade relativa, vento, movimento vertical, vorticidade e ozono. Os valores estáticos da topografia, albedo, categoria do solo, coberto vegetal, etc., foram retirados das bases de dados do NCAR, com a resolução de 30” para todos os domínios.

Os testes de sensibilidade ao modelo aqui realizados foram divididos em cinco blocos principais. Em cada um dos blocos irá analisar-se o comportamento do modelo segundo um conjunto específico de opções de configuração, nomeadamente numéricos, físicos e possíveis técnicas de optimização do modelo com vista ao seu uso na área da prospecção eólica. Um aspecto transversal a todos os blocos de

testes será o seu processo de avaliar o comportamento do modelo, que consistirá em comparar as simulações com os dados observados, quer através de séries temporais da intensidade e rumo do vento, medidas de erro ou ainda analisando as simulações em softwares de previsão de produção eólica (WAsP). A descrição pormenorizada de cada um dos blocos de testes, bem como das configurações usadas em cada um dos blocos será apresentada na secção 3.3.3.

3.3.1 – Domínios espaciais de simulação

Na definição dos domínios espaciais do modelo, o método usado para a sua configuração foi o seguinte: partiu-se de um domínio principal (*pai*) cuja resolução horizontal é de 90 km e que abarca uma área extensa, incluindo toda a Península Ibérica e uma grande área marítima, para um domínio intermédio (à razão de 1/5 da resolução do domínio anterior) de resolução de 18 km. Finalmente, o domínio final, que é o que oferece maior resolução espacial, também deriva do domínio intermédio na razão de 1/5 da sua resolução, o que vai originar a obtenção de um domínio final com 3.6 km de resolução. O centro geométrico dos três domínios é o mesmo (domínios concêntricos), com coordenadas: Latitude = - 08° 32' 39,189"; Longitude = 39° 55' 27,954". O esquema de aninhamento empregue foi o aninhamento bidireccional, que permite uma troca de informação entre os vários domínios. Assim, os domínios com menor resolução beneficiam dos cálculos efectuados para os domínios de maior resolução. Os domínios considerados podem ser vistos na figura 4:

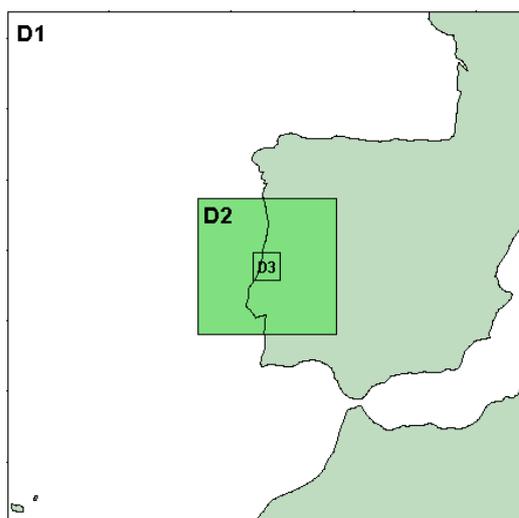


Figura 4 – Domínios configurados nas simulações do WRF

As características dos três domínios de simulação são apresentadas de seguida, em que as dimensões horizontais representam o número de células nas direcções X e Y, aproximadamente nas direcções Sul-Norte e Oeste-Este, respectivamente:

- Domínio pai – 20x20 de dimensões horizontais, com 27 níveis verticais. A sua resolução horizontal é de 90 km. Passo temporal de 300 s.
- Domínio intermédio – 26x26 de dimensões horizontais, com 27 níveis verticais. A sua resolução horizontal é de 18 km. Passo temporal de 60 s.

- Domínio final – 26x26 de dimensões horizontais, com 27 níveis verticais. A sua resolução horizontal é de 3.6 km. Passo temporal de 12 s.

Os níveis verticais (níveis η) podem ser definidos arbitrariamente no WRF, entre 0 e 1, desde que discriminem adequadamente a atmosfera na camada limite planetária relevante para este estudo. O topo vertical do modelo (nível $\eta = 1$) foi definido para a pressão de 50 mb. Em relação à estabilidade do modelo, o passo temporal foi definido para cada domínio de forma a que o passo temporal de um dado domínio seja 1/5 do passo temporal do domínio precedente ($\Delta T_{\text{pai}} / \Delta T_{\text{intermédio}} = \Delta T_{\text{intermédio}} / \Delta T_{\text{final}} = 5$), ou seja, a mesma razão do *downscaling* dos domínios ($\Delta X_{\text{pai}} / \Delta X_{\text{intermédio}} = \Delta X_{\text{intermédio}} / \Delta X_{\text{final}} = 5$). Atendendo a que a ordem adoptada para a expansão dos termos de advecção horizontal de momento é de 5ª ordem e que o esquema de integração temporal RK3 (Runge-Kutta de 3ª ordem) é o usual, este facto garante a estabilidade no que diz respeito ao Critério CFL (Courant-Friedrichs-Levy). A integração numérica procede em dois níveis: um passo maior para os movimentos meteorologicamente significativos, e dentro de cada passo elementar RK3, 4 passos mais curtos para a correcção acústica. No caso, uma hora de simulação compreende 12 passos completos para a malha principal e 300 para a malha mais fina.

3.3.2 – Estações meteorológicas de referência

A estação meteorológica (referida futuramente como estação meteorológica 1) que forneceu a série de dados usada neste trabalho é pertença do consórcio ENEOP 2 – Exploração de Parques Eólicos, S.A. e é operada pelo INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A estação situa-se na zona Centro Oeste do território português, não sendo possível pormenorizar a sua localização devido a critérios de confidencialidade exigidos pelo seu proprietário. A estação efectua medições da direcção e velocidade do vento a 60 e a 30 m acima do nível do solo e os registos de dados relativos à direcção e velocidade do vento às duas alturas de medição são efectuados de 10 em 10 minutos. Foram ainda utilizados no âmbito deste trabalho dados pertencentes a mais duas estações meteorológicas (referidas futuramente como estações meteorológicas 2 e 3), próximas da estação de referência, e cujas localizações também não serão aqui reveladas pelos mesmos motivos referidos anteriormente. Ambas as estações possuem uma configuração semelhante à estação de referência. Na figura II em anexo é mostrada a zona onde se localizam as três estações, no que respeita à sua altimetria e localização relativa. Analisando a figura, vê-se que as estações se situam em pontos de elevada altitude, logo, situadas em terreno relativamente complexo.

3.3.3 – Testes de sensibilidade e configurações do modelo

Como mencionado no início desta secção, os testes de sensibilidade que puseram à prova o modelo foram divididos em cinco blocos. Em cada um destes blocos são consideradas diferentes configurações e opções do modelo consoante os seus objectivos. A linha orientadora foi a seguinte: numa primeira fase, estudaram-se diferentes aspectos numéricos de simulação do modelo de modo a determinar qual a melhor configuração a usar nos testes seguintes. Seguidamente, determinou-se qual o conjunto de opções físicas do modelo (parametrizações) que melhor simula o vento presente no local da estação meteorológica, ao mesmo tempo que se procuraram técnicas de optimização do modelo para este mesmo fim. Depois de encontrada a melhor simulação analisou-se qual a sua validade no estudo de recurso eólico e previsão de produção de energia.

3.3.3.1 – Bloco A

Existem várias opções de simulação do modelo de cariz numérico, considerando que o período de simulação é relativamente longo (1 mês). Primeiramente, é fundamental analisar como se comporta o modelo perante longos períodos de simulação. É consensual que todos os modelos numéricos têm tendência para divergir nas suas simulações após algum tempo de integração. Quando se pretende simular longos períodos de tempo (meses, anos), uma opção consiste em dividir o tempo total de integração em segmentos de menor duração (2, 3 dias) de modo a minimizar a divergência do modelo. É, no entanto, de realçar o facto de que como este trabalho se foca na *simulação do vento* (ocorrida em tempo passado) e não na *previsão do vento*, não são de esperar grandes divergências já o modelo tem ao seu dispor condições fronteira para todo o período de simulação. Este facto, por si só, introduz alguma confiança nos resultados finais. Outra opção a ter em conta fornece a possibilidade de incluir nos seus métodos de cálculo a análise de dados a quatro dimensões (FDDA). Como explicado anteriormente, esta opção faz com que o modelo considere dados de referência (observados, análises ou reanálises), e aproxime os seus cálculos destes dados, aplicando uma correcção. Esta correcção é tanto maior quanto mais elevado é o peso dado a estes dados de referência. Selecionando esta opção, será de esperar um refinamento dos resultados, pois o modelo introduz periodicamente uma correcção nos seus cálculos. É, de facto, tentador atribuir um peso relativamente elevado a estes dados de referência porque aparentemente, e considerando que os dados de referência são fiáveis, tal facto iria produzir resultados mais correctos. Mas tal não deve acontecer, porque assim estaríamos a interferir na dinâmica do modelo, não o deixando correr “livremente”. A melhor solução é atribuir um peso intermédio aos dados de referência, de maneira a que possamos introduzir no modelo algumas correcções ao longo da sua simulação, mas sem comprometer o seu comportamento dinâmico.

Assim, neste bloco consideraram-se três simulações que diferem entre si nas opções numéricas da simulação. Todas elas se reportam ao mês de Janeiro de 2008, e o ponto de simulação coincide em termos de localização com a estação meteorológica 1. As séries temporais obtidas dizem respeito ao domínio de simulação com maior resolução (3.6 km), e foram comparadas com os dados observados provenientes da estação meteorológica 1. De modo a estudar isoladamente estes aspectos numéricos, as três simulações partilham da mesma configuração física (parametrizações) descrita na tabela 2, e na tabela 3 apresentam-se as características numéricas de cada simulação:

Tabela 2 – Parametrizações usadas nos testes numéricos

Parametrizações	
Camada de Superfície (CS)	Monin-Obukhov (MM5)
Camada Limite Planetária (CLP)	YSU
Modelo de Superfície de Solo (MSS)	Noah
Microfísica (MF)	WSM 6-class graupel
Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO)	RRTM
Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO)	Dudhia
Cumulus (PC)	Kain-Fritsh

Tabela 3 – Características numéricas das simulações

Opção numérica	A.1	A.2	A.3
Contínua	X	X	-
Segmentada	-	-	X
Opção FDDA	Desactivada	Activada	Activada

- **Simulação A.1** – Nesta configuração, o modelo correu continuamente para 1 mês de simulação, no caso, Janeiro de 2008. Opção FDDA desactivada.
- **Simulação A.2** – Similar à simulação A.1, mas com a activação da opção FDDA.
- **Simulação A.3** – Similar à simulação A2, mas aqui o modelo não correu continuamente para um mês. Foram efectuados vários segmentos de simulações de 2 dias e 12 horas cada um, sendo que as primeiras 12 horas foram consideradas como período de *spin-up* do modelo e não entraram nos cálculos. Juntando os vários segmentos de simulação obteve-se o mês completo pretendido.

3.3.3.2 – Bloco B

De seguida, testaram-se quais as parametrizações físicas que oferecem melhor resposta aos objectivos pretendidos. Foram testadas três configurações físicas distintas que diferem entre si nas parametrizações usadas relativas à camada limite (CS, CLP e MSS), mantendo todas as restantes opções físicas (microfísica, radiação de longo e curto comprimento de onda e *cumulus*) inalteradas nas três simulações. A escolha destas restantes opções físicas foi feita considerando os estudos de sensibilidade já efectuados sobre estas parametrizações, dos quais resulta a recomendação do uso destas opções aqui apresentadas (ver capítulo 2).

Os conjuntos de parametrizações escolhidos para as simulações B.1 e B.2 já estavam disponíveis na versão precedente do WRF, enquanto que o conjunto de parametrizações escolhido para a simulação B.3 é um novo conjunto de opções disponíveis na versão 3.0.1 do WRF-ARW aqui utilizada. Com o objectivo de estudar também os efeitos da sazonalidade, as três simulações (B.1, B.2 e B.3) irão ser realizadas para dois meses diferentes: Janeiro de 2008, que irá representar as estações frias, e Junho de 2008, que irá representar as estações quentes. A escolha destes meses foi feita, além do motivo óbvio de representarem a sazonalidade em questão, com base na disponibilidade de dados observados, já que por vezes nas estações meteorológicas que servem de validação ao modelo ocorrem avarias ou outros imprevistos que impossibilitam um registo de dados completo. Ambas as simulações partilham da mesma configuração numérica, neste caso, a configuração A.3 (simulação segmentada e com opção FDDA activa). As suas configurações físicas são apresentadas na tabela 4:

Tabela 4 – Esquemas de parametrizações testadas

Parametrizações	B.1	B.2	B.3
Camada de Superfície (CS)	Monin-Obukhov (MM5)	Monin-Obukhov (ETA)	Pleim - Xiu
Camada Limite Planetária (CLP)	YSU	MYJ	Pleim - Xiu
Modelo de Superfície de Solo (MSS)	NOAH	NOAH	ACM2
Microfísica (MF)		WSM 6-class graupel	
Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO)		RRTM	
Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO)		Dudhia	
Cumulus (PC)		Kain-Fritsh	

Analogamente ao que foi feito no bloco de simulações A, depois de obtidas as saídas das simulações extraíram-se séries temporais da intensidade e rumo do vento de cada simulação e usaram-se medidas de erro para aferir qual o erro associado a cada simulação. O ponto de simulação coincide com a localização da estação meteorológica 1, que forneceu os dados observados comparados com as simulações.

3.3.3.3 – Bloco C

Depois de aferir acerca de qual a configuração do modelo que oferece melhores resultados, importa agora realizar uma análise mais detalhada e aprofundada dos resultados do modelo. Usando os dados observados e as séries temporais calculadas para o bloco anterior, foram calculados os coeficientes de correlação entre as séries temporais simuladas e observadas (no que respeita à velocidade) por sector de direcção, de maneira a ver quais os sectores que o modelo melhor simula, ao mesmo tempo que se determina a importância de cada sector (número de ocorrências e contribuição energética de cada um), bem como o desvio existente entre as direcções simuladas e observadas. Será também calculado o desvio da direcção simulada relativamente à observada por sector de direcção. Com estes resultados serão construídas rosas-dos-ventos comparativas relativas às ocorrências e contribuição energética, bem como um histograma comparativo de velocidades. O objectivo será conseguir uma visualização objectiva das diferenças entre simulação e dados observados por sector de rumo do vento. O modelo poderá oferecer melhores resultados para determinados sectores de direcção e piores resultados para outros, o que implicará um coeficiente de correlação global e desvio da direcção relativamente elevado, mas o que é importante é que o modelo simule correctamente os sectores de direcção predominantes no local em questão. Se o modelo apresentar bons coeficientes de correlação nos sectores com maior número de ocorrências e contribuição energética, os sectores com menores ocorrências e contribuições energéticas poderão ser relativizados.

3.3.3.4 – Bloco D

A questão a explorar neste bloco será se a definição de um domínio de maior resolução melhorará os resultados dados pelo modelo. Todas as simulações aqui efectuadas possuem a mesma configuração numérica e física correspondente à simulação que produziu melhores resultados, decorrente dos blocos A e B. O domínio com maior resolução até aqui usado (domínio aninhado) possui uma resolução horizontal de 3.6 Km, como referido anteriormente. Foi então definido outro domínio, que por sua vez constitui um domínio aninhado sobre este último de 3.6 Km de resolução. Como não é aconselhável o uso nestes modelos de domínios com resoluções inferiores a 1 Km, este novo domínio terá uma resolução horizontal de 1.2 Km (razão de 1/3 relativamente ao domínio anterior), enquanto que o seu passo de tempo será 1/3 do passo temporal do domínio anterior (para salvaguardar a estabilidade do modelo segundo o critério de Courant-Friedrichs-Levy). A sua resolução vertical também será aumentada, passando de 27 para 50 níveis verticais, sendo que a maioria dos níveis verticais acrescentados situa-se nas camadas mais baixas da coluna vertical atmosférica, de maneira a obter-se uma melhor resolução próximo da superfície. Na figura 5 ilustra o novo domínio enquadrado com os respectivos domínios-pai.

Usou-se a configuração numérica e física idêntica à simulação B.1, já que o mês simulado nesta secção foi Janeiro de 2008. Depois de obtida os dados relativos à direcção e intensidade do vento no ponto em análise (que é o mesmo que o considerado nos blocos anteriores), comparou-se a simulação com os dados observados referentes à estação meteorológica 1.

Como deste aumento de resolução resultará uma diminuição do efeito de suavização do terreno será de esperar uma melhoria dos resultados, mas por outro lado o custo computacional desta nova simulação aumentou largamente (tempo de simulação cerca de quatro vezes superior relativamente à simulação original). Uma das questões a verificar é se esta melhoria dos resultados será suficiente para compensar o acréscimo de custo computacional.

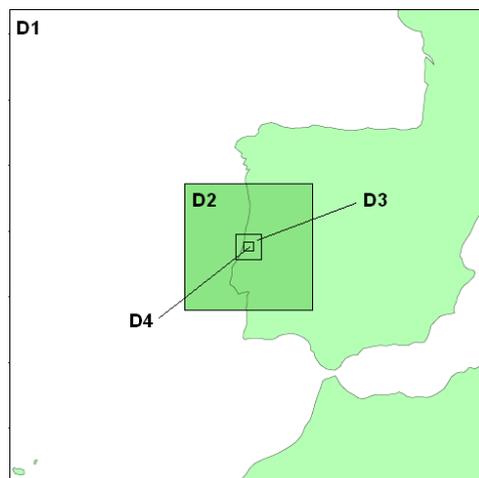


Figura 5 – Domínios configurados nas simulações do WRF com resolução horizontal de 1.2 km

3.3.3.5 – Bloco E

Importa agora analisar quais as limitações postas em evidência pelos blocos de testes anteriores e procurar formas de melhorar os resultados obtidos. Viu-se que um dos principais desvios apresentados pelo modelo consiste na subestimação da velocidade do vento, tornando-se então pertinente analisar aprofundadamente qual a razão desta subestimação, que é um factor de importância extrema na aplicação do modelo com vista à determinação do potencial eólico de uma dada zona. É comumente aceite que uma das principais limitações de modelos numéricos de previsão do tempo incide numa fraca representação do terreno, sendo que quanto menor é a resolução da malha de simulação mais suavizado será o terreno no modelo, relativamente ao terreno real. Desta suavização do terreno resulta que o modelo “torna” as montanhas mais baixas e os vales mais altos, logo, o modelo “vê” o ponto de simulação aqui considerado (coincidente com a localização da estação meteorológica 1, logo, um ponto com uma altitude relativamente elevada) com uma altitude menor relativamente à realidade. O objectivo deste bloco será analisar qual a influência da complexidade do terreno e da suavização do mesmo nos resultados.

Para a análise da influência da complexidade do terreno nos resultados, foram então considerados mais dois pontos de análise a juntar ao ponto até aqui considerado, denominados como E.2 e E.3. O ponto E.2 coincide com a estação meteorológica 2 em termos de localização, enquanto que o ponto E.3 coincide com a localização da estação meteorológica 3. Podemos então considerar que o ponto E.1 constitui um “meio-termo” em termos de complexidade de terreno e altitude relativamente a estes dois novos pontos. Nestes novos pontos encontram-se disponíveis também dados observados, e realizaram-se comparações entre eles. Na tabela 5 apresentam-se resumidamente as características dos três pontos:

Tabela 5 – Características dos pontos considerados

Ponto	Altitude		ΔZ	Distância relativamente à estação meteorológica 1
	Real	Malha		
E.1	556 m	310 m	246 m	-
E.2	620 m	336 m	285 m	13.8 Km para Es-Sudeste
E.3	489 m	347 m	143 m	15.4 Km para Sudeste

O ponto E.2 está localizado num local com terreno mais complexo e a uma altitude maior que o ponto E.1, enquanto que o ponto E.2 é está situado num terreno mais simples e mais baixo que o ponto E.1. Esta complexidade reflecte-se na altitude dos pontos, sendo que nestes três casos quanto maior a altitude dos pontos maior será a complexidade do terreno adjacente. É interessante verificar que, apesar do ponto E.3 possuir uma altitude real inferior à altitude do ponto E.1 e E.2, o modelo “vê-o” com uma altitude superior relativamente à altitude dos restantes pontos. Este facto confirma, logo à partida, a representação defeituosa do terreno real por parte do modelo.

Seguidamente, analisou-se a influência da suavização do terreno nos resultados. Para isso, localizou-se um ponto na malha (relativamente próximo do ponto de simulação E.1, coincidente com a estação meteorológica 1), denominado de E.4, que possui uma altitude próxima à altitude real do ponto de simulação E.1 e extraíram-se séries temporais de intensidade e direcção do vento neste novo ponto da malha (que possui uma altitude na malha de simulação igual à altitude real do ponto de simulação E.1), comparando estas séries temporais com os dados observados. Na tabela 6 descrevem-se as localizações e altitudes dos pontos em questão:

Tabela 6 – Localização e características dos pontos considerados

Ponto	Altitude		Distância relativamente à estação meteorológica 1
	Real	Malha	
E.1	556 m	310 m	-
E.4	-	556 m	40 Km para Nordeste

3.3.3.6 – Bloco F

Neste bloco pretendeu-se usar as simulações do WRF como dados de entrada de um modelo de microscala, WAsP, de maneira a tentar minimizar as limitações inerentes a um modelo de mesoscala no que diz respeito à definição resolutiva do terreno e verificar quais as diferenças entre estimativas de produção considerando dados observados e simulações de mesoscala.

Como o modelo aqui empregue (WRF) é um modelo de mesoscala, não estará à partida suficientemente preparado para lidar com fenómenos locais de circulação com o detalhe aqui pretendido. Logo, provavelmente não será suficiente obter dados relativos ao terreno com melhor resolução e detalhe de maneira a obter resultados de qualidade elevada. Uma das soluções que permitirá obter um refinamento dos resultados será usar um modelo de microscala, que está configurado para resolver fenómenos atmosféricos de escala reduzida, ao mesmo tempo que possui dados relativos ao terreno de resolução muito maior do que acontece para os modelos de mesoscala. Assim, estamos a “atacar” as principais limitações do modelo WRF em dois aspectos distintos e muito importantes: Descrição do terreno e capacidade de resolução de fenómenos atmosféricos de pequena escala.

O objectivo será obter estimativas de produção usando as simulações do WRF e também dados observados, comparando-as para os três pontos aqui considerados. Assim poderemos ver uma estimativa de produção “real” e outra obtida exclusivamente através de simulações, comparando-as em três locais distintos. Assim, se as estimativas de produção forem semelhantes poderemos concluir que o modelo de microscala refinou os resultados do modelo de mesoscala WRF, ou seja, através da construção do atlas do vento e posterior inserção dos dados relativos ao terreno no atlas assistiu-se a uma diminuição da subestimação da velocidade do vento. Se o modelo WAsP conseguiu aproximar as

velocidades observadas e simuladas (diminuindo a subestimação da mesma), as estimativas de produção observadas e simuladas serão semelhantes, já que a velocidade do vento e a potência do fluxo relacionam-se através da seguinte expressão: $P = 0,5 * \rho * v^3$.

Para o efeito, foi realizada uma simulação que compreende um ano completo (neste caso, 2008) e usou-se esta simulação como dados de entrada para o modelo de microscala WAsP. Simultaneamente, usou-se o mesmo ano de observações de três estações meteorológicas (as que forneceram dados observados para o ponto E.1, E.2 e E.3) e efectuou-se o mesmo exercício. É de realçar que para o caso do ponto E.1, a estação correspondente não possui dados observados para o segundo semestre de 2008 (devido a avarias no seu equipamento), logo, para este ponto esta análise não será a mais completa. Mas para os outros dois pontos obteve-se uma disponibilidade de dados observados muito próxima dos 100%.

Dado que dos blocos de testes anteriores concluiu-se uma das principais limitações do WRF é a má representação do terreno real na malha de simulação (daí resultando uma subestimação da velocidade do vento), considerou-se como mais correcto retirar uma série temporal do vento a um nível vertical que se situe fora da camada limite planetária. Assim, teremos um vento livre dos efeitos locais do terreno (defeituosamente considerados pelo WRF). A determinação deste nível vertical do qual se vai retirar a série temporal do vento exige precaução pois, se por um lado ele tem que se situar fora da camada limite para o vento estar livre dos efeitos de atrito induzidos pelo terreno, por outro lado não pode ser muito afastado da camada limite pois na atmosfera livre os padrões de circulação são muito diferentes dos verificados na camada limite e o WAsP não está configurado para lidar com este tipo de escoamentos da atmosfera livre.

Com base nestes pressupostos, importa conhecer qual a altura do topo da camada limite, de maneira a retirar a esse nível a série temporal do vento. Uma das variáveis de saída do WRF consiste na altura do topo da camada limite planetária, para cada ponto do domínio e passo temporal. Considerou-se o ponto central do domínio aninhado de maior resolução como representativo da zona onde estão inseridos os três pontos de simulação, retirando-se nesse ponto central uma série temporal da altura do topo da camada limite planetária. Na figura III em anexo é apresentada a série temporal da altura do topo da CLP, onde se pode ver que a altura da camada limite planetária possui uma variabilidade diária e sazonal muito acentuada. Irá ser considerada a média anual da altura do topo da CLP como representativa deste período temporal, que é de aproximadamente 500 m acima do nível do solo e será, portanto, a este nível que se irá retirar a série temporal do vento.

Seguidamente, para cada um dos três pontos de simulação fez-se o seguinte: retirou-se a série temporal do vento aos 500m acima do nível do solo e inseriu-se a mesma no WAsP sob a forma de um atlas do vento, já que este vento é considerado como pertencente à atmosfera livre. Depois, inseriu-se também a série do vento observado no WAsP e um aerogerador localizado no mesmo local onde se encontra o respectivo ponto de simulação (e, conseqüentemente, no mesmo ponto onde se encontra a estação meteorológica que fornece os dados observados para o ponto em questão). Finalmente, calcularam-se as estimativas de produção observada e simulada em cada um dos três pontos de simulação, considerando que o rotor do aerogerador se encontra a uma altura de 60 m acima do nível do solo (para coincidir com o nível de medição e também com a altura de onde se retiraram as séries temporais das simulações)

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados e analisados todos os resultados referentes aos diferentes blocos de testes apresentados no capítulo anterior. Para cada um destes blocos, serão apresentadas comparações entre séries temporais de intensidade e direcção do vento (relativamente aos dados observados), bem como o Erro Quadrático Médio (RMSE), viés e Desvio Padrão (STDE). Serão também apresentados coeficientes de correlação e desvios globais relativamente aos dados observados entre as várias séries. Para uma melhor e mais detalhada análise, serão ainda construídas rosas de ocorrências (que descrevem a quantidade de ocorrências, em termos percentuais, do vento por sector de direcção), rosas de energia (similares às rosas de ocorrências, mas aqui a grandeza medida não é a quantidade percentual de ocorrências, mas a quantidade percentual de energia obtida em cada sector de direcção) e ainda histogramas de velocidades.

4.1 – BLOCO A

Como detalhado no capítulo anterior, este bloco tem como objectivo determinar qual a melhor configuração numérica a usar nas simulações do WRF. Para isso foram consideradas três simulações distintas: A.1, A.2 e A.3 (ver capítulo anterior). Os resultados obtidos foram os seguintes:

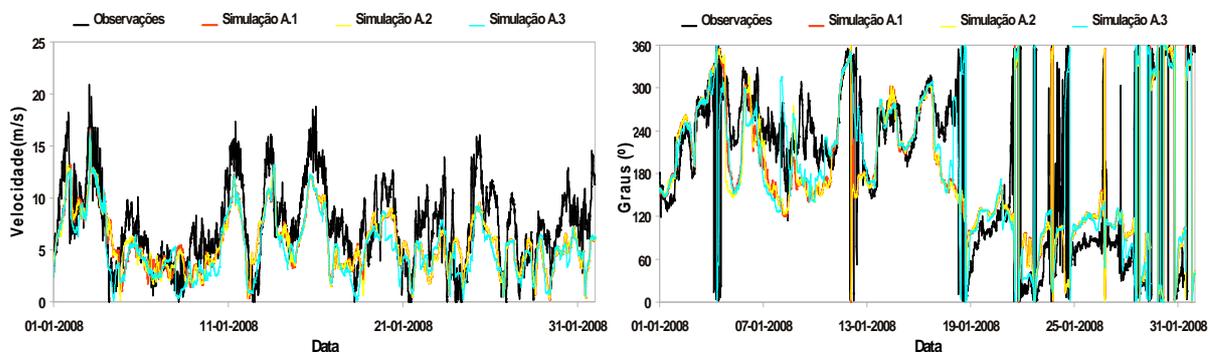


Figura 6 – Séries temporais relativas à velocidade e direcção

Analisando esta figura, nota-se imediatamente que todas as simulações conseguem reproduzir as principais características do regime local do vento, nomeadamente os padrões de velocidade e direcção do vento presentes no ponto de simulação. Todas as configurações numéricas acompanharam os dados observados, o que atesta desde logo a capacidade do modelo em simular estas variáveis. Outra característica em comum a todas as simulações é que todas elas aparentam subestimar a velocidade do vento. No que diz respeito à direcção do vento, ambas as simulações apresentam desvios relativamente à direcção observada, mas esse desvio varia consoante o rumo do vento (ciclónico para direcções entre os 200 e os 340° e anti-ciclónico para os restantes rumos). Apesar da visualização das séries temporais, por si só, não permitir uma grande diferenciação entre as diferentes simulações, observa-se um melhor comportamento global da simulação A.3 tanto na reprodução da velocidade como da direcção do vento. Calculando-se as medidas de erro, obteve-se o seguinte:

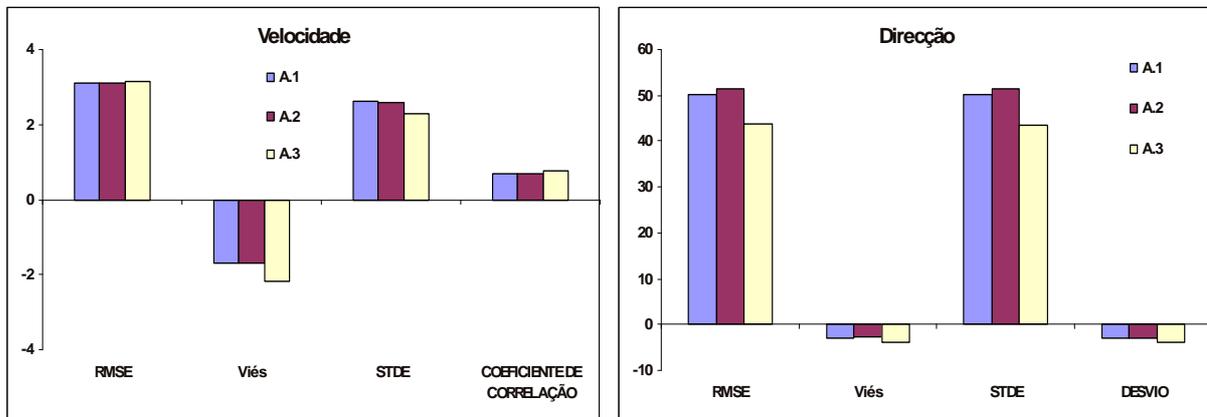


Figura 7 – Medidas de erro relativas à velocidade e direcção

Estes resultados confirmam a primeira impressão de que a simulação A.3 (segmentada e com opção FDDA activa) é aquela que oferece melhores resultados. No que diz respeito ao RMSE, todas as simulações apresentaram valores muito próximos, mas é visível que a simulação A.3 apresentou o RMSE mais elevado, o mesmo acontecendo com o viés, se bem que neste caso é claro o viés superior (em módulo) da simulação A.3. Estas medidas de erro comprovam o que foi visto na comparação entre as séries temporais de velocidade e direcção do vento, ou seja, todas as simulações apresentam um viés negativo na velocidade (subestimação da velocidade do vento). Para a direcção, o viés é também negativo, o que mostra que as simulações têm uma tendência para, globalmente, calcularem a direcção com um desvio no sentido ciclónico.

Para a direcção, não é possível determinar um coeficiente de correlação linear pois esta grandeza tem uma variação entre 0 e 360°, logo, será calculado o desvio médio entre dados observados e simulados. No que diz respeito ao coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) entre as séries de velocidade simuladas e as observadas, viu-se que todos os coeficientes de correlação obtidos situaram-se entre os 0.68 e os 0.77, enquanto que no que toca à direcção, as simulações parecem ter uma tendência de calcular a direcção do vento com um desvio ciclónico (desvio negativo), se bem que estes desvios não sejam significativos (entre os 3 e os 4 graus no sentido ciclónico). Destacam-se os bons resultados da simulação A.3 que apresentou um maior coeficiente de correlação para a velocidade (cerca de 0.75), apesar de na direcção apresentar um desvio de 4° no sentido ciclónico. Mas, este desvio não é significativo e apenas difere em 1° relativamente às restantes simulações. Destes resultados advém que a simulação A.3 é aquela que produziu melhores resultados.

4.2 – BLOCO B

Depois de aferir acerca de qual a melhor configuração numérica a usar, o próximo passo será determinar qual a melhor configuração física a utilizar nas simulações do WRF. Para isso foram consideradas três simulações distintas: B.1, B.2 e B.3 (ver capítulo anterior), efectuadas para dois meses de simulação diferentes: Janeiro e Junho de 2008. Assim, será possível analisar o comportamento das duas configurações físicas em períodos do ano distintos, um que caracteriza as estações frias (Janeiro) e outro que caracteriza as estações quentes (Junho). Obteve-se o seguinte.

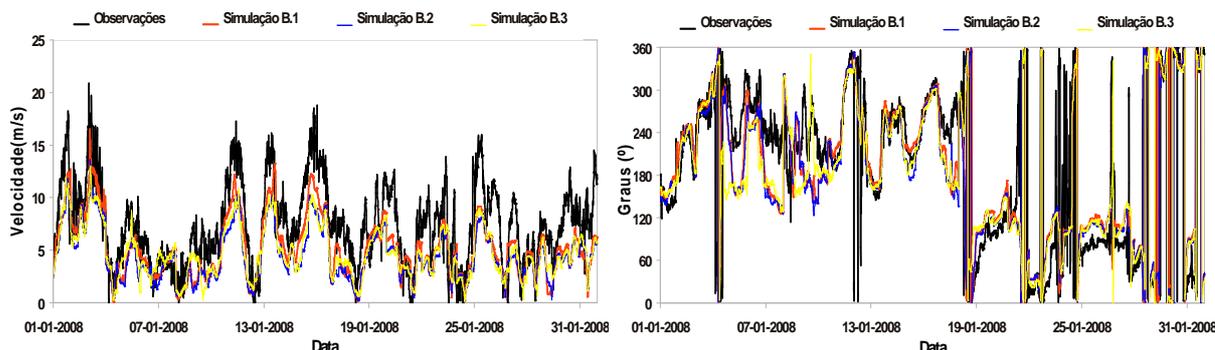


Figura 8 – Séries temporais relativas à velocidade – Janeiro de 2008

Torna-se claro que, apesar de todas as simulações conseguirem reproduzir os padrões de velocidade e direcção do vento presentes no ponto de simulação, a simulação B.1 aparenta ser aquela que oferece resultados mais concordantes com a realidade. Este facto é mais visível na comparação entre a velocidade simulada e observada, onde a simulação B.1 consegue ser mais fiel à série de velocidade observada. No que diz respeito à direcção, as três simulações apresentam um comportamento semelhante. Mais uma vez se assiste a uma subestimação da velocidade do vento por parte de todas as simulações. No que diz respeito à direcção do vento, também se assiste a um comportamento das simulações semelhante ao que foi visto no bloco A, ou seja, as simulações apresentam um desvio relativamente à direcção observada (ciclónico para direcções entre os 200 e os 340° e anti-ciclónico para os restantes rumos). Para o Verão (no caso, Junho de 2008), as séries temporais obtidas estão representadas na figura 7:

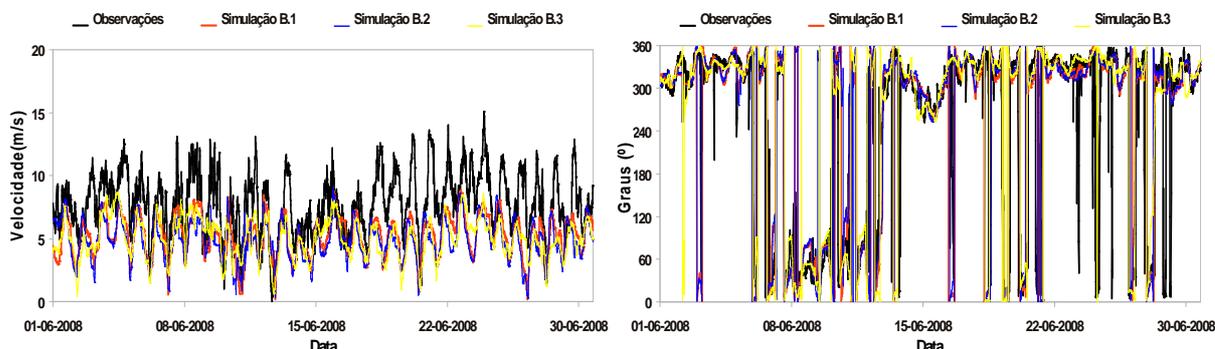


Figura 9 – Séries temporais relativas à velocidade – Junho de 2008

Fazendo agora a mesma análise mas para o mês de Junho de 2008, nota-se que todas as simulações conseguiram reproduzir os padrões de velocidade e direcção do vento presentes no ponto de simulação, mas aqui a velocidade é ainda mais subestimada pelo modelo do que no mês de Janeiro. Ainda assim, a simulação B.3 é aquela que oferece resultados mais concordantes com a realidade no que diz respeito à simulação da velocidade para o mês de Junho. No que diz respeito à direcção, todas as simulações apresentam um comportamento semelhante e não apresentam desvios significativos, reproduzindo fielmente o rumo do vento.

Tendo em conta estas séries temporais comparativas, podemos afirmar que no Inverno observa-se um melhor comportamento global da simulação B.1 tanto na simulação da velocidade como da direcção do vento. Para o Verão, a simulação B.3 é a que apresenta um melhor comportamento global, quer na

simulação da velocidade quer na simulação da direcção do vento. Analogamente ao que foi feito no bloco A, calcularam-se as medidas de erro aqui consideradas e obteve-se o seguinte:

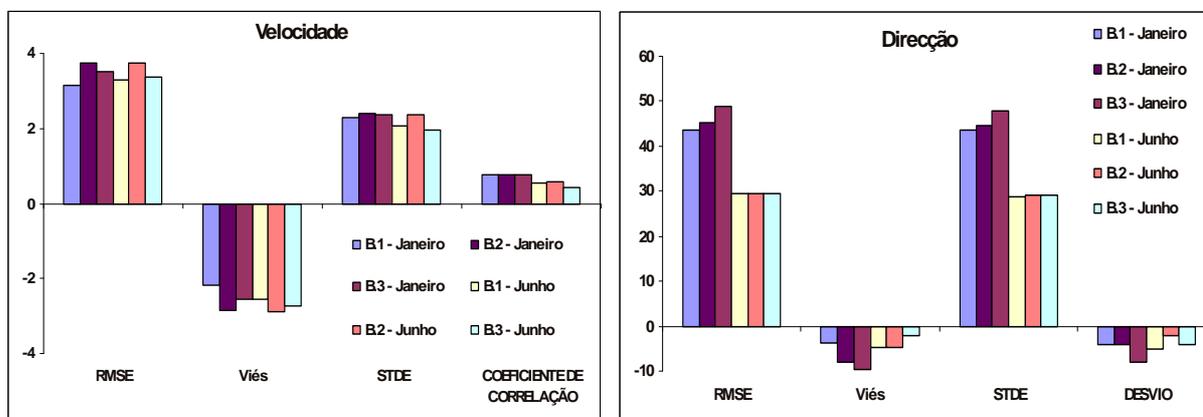


Figura 10 – Medidas de erro relativas à velocidade e direcção

Mais uma vez, as medidas de erro confirmam as primeiras impressões oferecidas pela análise das séries temporais. Ou seja, para o Inverno (representado pelo mês de Janeiro) a simulação B.1 (parametizações YSU-MM5-NOAH) é aquela que oferece melhores resultados, ou seja, apresentou menores RMSE, viés e STDE em relação às restantes simulações, tanto na velocidade como na direcção. Para o Verão (neste caso representado pelo mês de Junho), a simulação B.3 (PX-PX-ACM2) foi a que melhores resultados forneceu já que apresentou um menor STDE, apesar de o RMSE e viés serem ligeiramente superiores em relação às restantes simulações (apenas no que toca à velocidade, pois na direcção a simulação B.3 apresentou menores RMSE e viés, sendo que o STDE foi praticamente igual nas três simulações). Globalmente, continua presente um viés negativo na velocidade (subestimação da velocidade do vento) e na direcção, o que mostra que as simulações têm uma tendência para, globalmente, calcularem a direcção com um desvio no sentido ciclónico.

Os coeficientes de correlação e desvios das simulações também confirmam o que foi visto através da análise das séries temporais e medidas de erro, ou seja, para o Inverno é a simulação B.1 que apresenta melhores resultados enquanto que para o Verão é a simulação B.3 que se destaca. Apesar deste facto, é de realçar que todas as simulações apresentaram melhores resultados para o Inverno, sendo que para o Verão os resultados decaíram consideravelmente.

4.3 – BLOCO C

O próximo passo será analisar mais detalhadamente os resultados dados pelo modelo. Esta análise irá ser feita para as duas simulações “óptimas”, para o Verão (aqui representado pelo mês de Junho) e o Inverno (aqui representado pelo mês de Janeiro). Esta análise mais detalhada irá focar-se na correlação entre as séries simuladas e observadas. Até agora calcularam-se os coeficientes de correlação globais para as simulações, mas o cálculo de coeficientes de correlação entre as séries temporais simuladas e observadas (no que respeita à velocidade) por sector de direcção, e também do desvio da direcção simulada relativamente à observada por sector de direcção permitirá ver quais os sectores que o modelo melhor simula, ao mesmo tempo que se determina a importância de cada sector (número de ocorrências

e contribuição energética de cada um). Assim, para a simulação B.1 (considerando o mês de Janeiro) obteve-se o seguinte:

Tabela 7 – Coeficientes de correlação sectoriais relativas à velocidade entre as séries simuladas e observadas

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
a	0.449	0.441	0.217	0.371	0.361	0.231	0.604	0.657	0.655	0.629	0.670	0.741	0.818	0.676	0.718	0.641	0.579
b	0.632	1.017	2.888	2.667	2.558	3.523	1.083	1.444	1.431	0.866	0.587	0.171	-0.613	0.149	-0.082	-0.141	0.920
R ²	0.741	0.504	0.349	0.703	0.602	0.566	0.938	0.946	0.871	0.832	0.803	0.840	0.866	0.894	0.881	0.889	0.765
Número de registos	298	313	225	181	421	123	171	140	189	293	449	369	468	283	226	288	4437

Tabela 8 – Desvios sectoriais relativos à direcção entre as séries simuladas e observadas

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
Desvio [°]	0	15	28	24	27	20	11	12	7	-5	-28	-38	-30	-23	-18	4	-4
Número de registos	298	313	225	181	421	123	171	140	189	293	449	369	468	283	226	288	4437

Tendo em atenção a tabela 7, vemos que o coeficiente de correlação global é relativamente alto, 0.765. Analisando agora estes resultados sectorialmente, vemos que em termos do número de ocorrências os sectores Sudoeste, Oés-Sudoeste e Oeste são os que contêm maior número de ocorrências, destacando-se também o sector Este. Olhando para os coeficientes de correlação sectoriais, vemos que nestes sectores o coeficiente de correlação é maior que o global, à volta de 0.88, excepto no sector Este onde o coeficiente de correlação é relativamente baixo, cerca de 0.6. Ou seja, o modelo conseguiu simular de uma forma razoável a realidade nos sectores mais importantes, exceptuando o sector Este. Na tabela 8 vemos que o desvio global da direcção simulada relativamente à observada é relativamente baixa, cerca de 4º no sentido ciclónico. Mas, contrariamente ao que foi visto na Tabela 7, é nos sectores com maior número de ocorrências que se verificam maiores desvios da direcção. Com base nestes resultados, foram construídas rosas-dos-ventos relativas ao número de ocorrências e contribuição energética, bem como um histograma de velocidades:

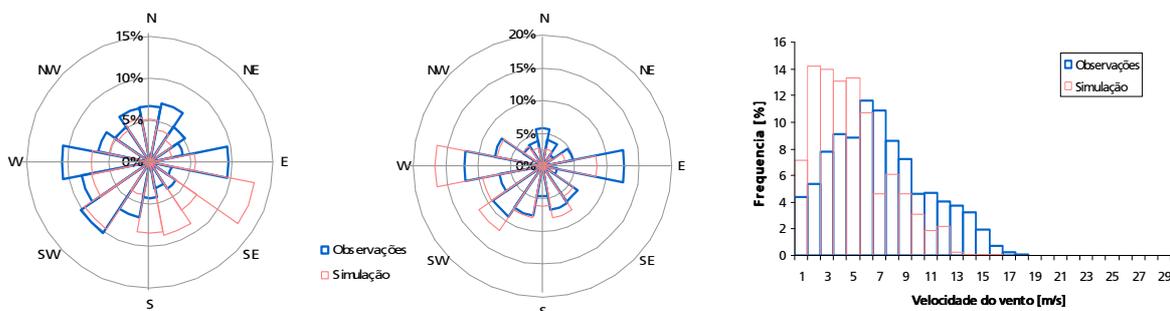


Figura 11 – Rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências e contribuição energética, respectivamente, e histograma de velocidades

Analisando a rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências, vemos que o modelo consegue simular relativamente bem o rumo do vento no local em causa, mas falha na determinação do sector dominante. Enquanto as observações indicam que os sectores dominantes são Oeste e Sudoeste (se bem que o sector Este também possui um elevado número de ocorrências), o modelo determina que o sector Es-Sudeste é o dominante. Este facto espelha bem o desvio ciclónico associado às simulações já visto nos blocos de testes anteriores. Mas, se olharmos para a rosa-dos-ventos relativa à contribuição energética, é visível que o modelo é capaz de reproduzir razoavelmente bem o peso energético de cada sector, dado

que a rosa-dos-ventos comparativa mostra-nos um perfil de direcções relativamente semelhante entre observações e simulações.

No que toca ao sector energeticamente dominante, as observações mostram que o eixo Este-Oeste é o que contém maior fluxo energético, e o modelo considera que é apenas o sector Oeste, não dando muita relevância ao sector Este. No entanto, é de realçar a boa resposta do modelo ao conseguir determinar qual o rumo do vento energeticamente dominante. Esta rosa comparativa também mostra outro aspecto importante, que é o facto de o modelo, no que toca ao número de ocorrências, considerar o sector Es-Sudeste como o que possui um maior número de ocorrências mas quando calcula a sua contribuição energética, esta não tem praticamente expressão nenhuma. Ou seja, o modelo considera que as velocidades que ocorrem neste sector são baixas e não contém expressão energética relevante. Analogamente, o sector Este é descrito pelo modelo como tendo um baixo número de ocorrências mas com velocidades elevadas, oferecendo um importante contributo energético.

O histograma de velocidades confirma o que foi visto nos blocos de testes anteriores, ou seja, o modelo subestima a velocidade do vento. O histograma mostra que velocidades na ordem dos 6 m/s são aquelas que ocorrem com mais frequência (cerca de 12%) na realidade, enquanto que o modelo considera que estas velocidades ocorrem com menor frequência, considerando velocidades da ordem dos 3 m/s como as que ocorrem mais vezes. Considerando o mês de Junho (simulação PX-PX-ACM2), obteve-se o seguinte:

Tabela 9 – Coeficientes de correlação sectoriais relativas à velocidade entre as séries simuladas e observadas

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
a	0.342	0.215	0.437	0.411	0.388	0.336	0.323	0.318	0.297	0.373	0.510	0.510	0.412	0.509	0.485	0.438	0.422
b	1.825	2.894	1.541	2.170	1.890	2.104	2.494	2.175	2.289	2.029	0.249	0.845	2.378	1.619	1.617	1.669	1.801
R ²	0.525	0.331	0.701	0.669	0.732	0.736	0.666	0.741	0.769	0.660	0.859	0.782	0.634	0.615	0.641	0.564	0.593
Número de registos	294	353	358	172	134	36	20	26	21	21	31	47	137	326	826	1517	4319

Tabela 10 – Desvios sectoriais relativos à direcção entre as séries simuladas e observadas

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
Desvio [°]	-9	-13	-6	-14	-30	-106	-107	-74	83	112	113	73	16	11	6	-4	-2
Número de registos	294	353	358	172	134	36	20	26	21	21	31	47	137	326	826	1517	4319

Na tabela 9, vemos que o coeficiente de correlação global é mais baixo relativamente ao obtido para estações frias, cifrando-se em cerca de 0.59. Sectorialmente, vemos que em termos do número de ocorrências o sector Nor-Noroeste é claramente o sector dominante. Olhando para os coeficientes de correlação sectoriais, vemos que no sector dominante o coeficiente de correlação é semelhante ao global, um pouco acima dos 0.6, logo, podemos afirmar que o modelo conseguiu simular de uma forma razoável a realidade em todos os sectores, incluindo o dominante. Na tabela 10 vemos que o desvio global da direcção simulada relativamente à observada é praticamente inexistente, cerca de 2º no sentido anticiclónico.

É nos sectores com maior número de ocorrências que se verificam menores desvios da direcção, o que revela o bom comportamento do modelo na simulação do rumo do vento. Analogamente, com base nestes resultados foram construídas rosas-dos-ventos relativas ao número de ocorrências e contribuição energética, bem como um histograma de velocidades:

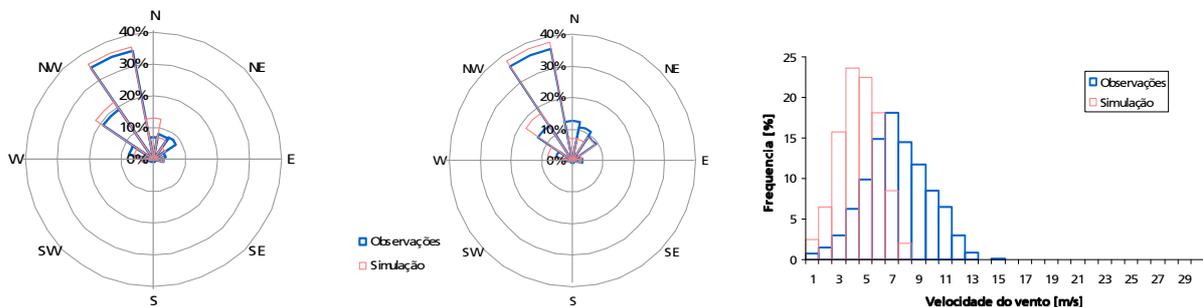


Figura 12 – Rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências e contribuição energética, respectivamente, e histograma de velocidades

Tendo em consideração a figura 12, nota-se que o modelo consegue simular bem o rumo do vento no local em causa, inclusivamente na determinação do sector dominante. Aliás, não se notam grandes diferenças entre observações e simulações. O mesmo acontece na rosa-dos-ventos relativa à contribuição energética, que é muito semelhante à rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências. O sector Noroeste é claramente o sector que apresenta maior contribuição energética, com um peso de cerca de 40% do total energético. O modelo oferece os mesmos resultados, conseguindo reproduzir de uma forma excelente a direcção do vento local. Mas, como foi visto nos blocos anteriores, nestas estações quentes o modelo subestima ainda mais a velocidade, apesar de conseguir reproduzir bem o rumo do vento.

Este facto é ainda mais visível analisando o histograma de velocidades, onde vemos que as velocidades que ocorrem mais vezes na realidade são aquelas situadas entre os 6 e 7 m/s, enquanto que o modelo atribui uma maior frequência de ocorrência a velocidades da ordem dos 3 e 4 m/s.

4.4 – BLOCO D

Como referido no capítulo anterior, neste bloco de testes pretende-se analisar se um aumento da capacidade de resolução (horizontal e vertical) do domínio de simulação conduzirá a uma melhoria dos resultados dados pelo modelo. Definindo um domínio com maior resolução (1.2 km e 50 níveis verticais), e denominando a nova simulação como D.1, obteve-se o representado nas figuras 13 e 14:

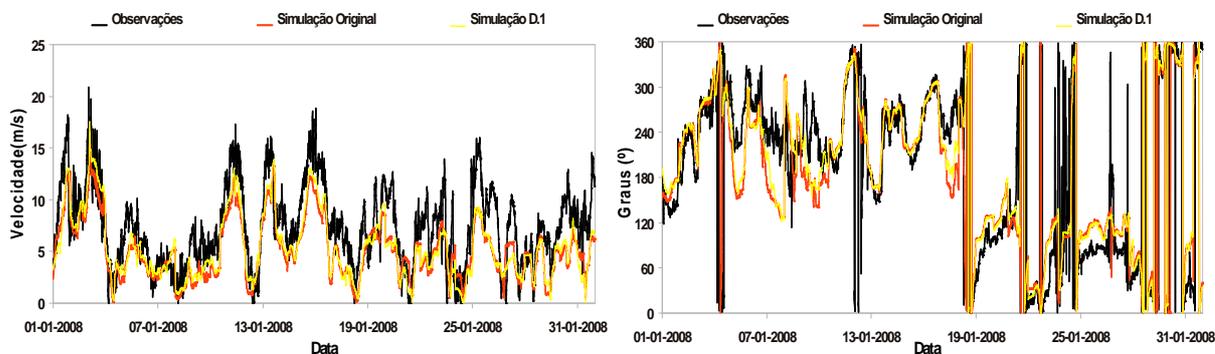


Figura 13 – Séries temporais relativas à velocidade e direcção

O padrão das simulações mantém-se, mantendo-se a subestimação da velocidade do vento e o desvio relativamente à direcção observada (ciclónico para direcções entre os 200 e os 360° e anti-ciclónico para as restantes direcções), mas é visível uma ligeira melhoria dos resultados, assistindo-se a uma menor subestimação da velocidade e uma melhor concordância entre as séries relativas à direcção.

As medidas de erro obtidas (figura 14) mostram que o aumento da resolução horizontal e vertical conseguiu diminuir o RMSE, viés e STDE, tanto para a velocidade como para a direcção. Os coeficientes de correlação mantiveram-se praticamente inalterados, assistindo-se a uma diminuição do desvio relativo à direcção.

Em termos de rosas-dos-ventos e histogramas de velocidades, os que resultam deste novo conjunto de dados saídos da simulação D.1 são em tudo idênticos aos obtidos para a simulação original. Por este facto, optou-se por não os apresentar.

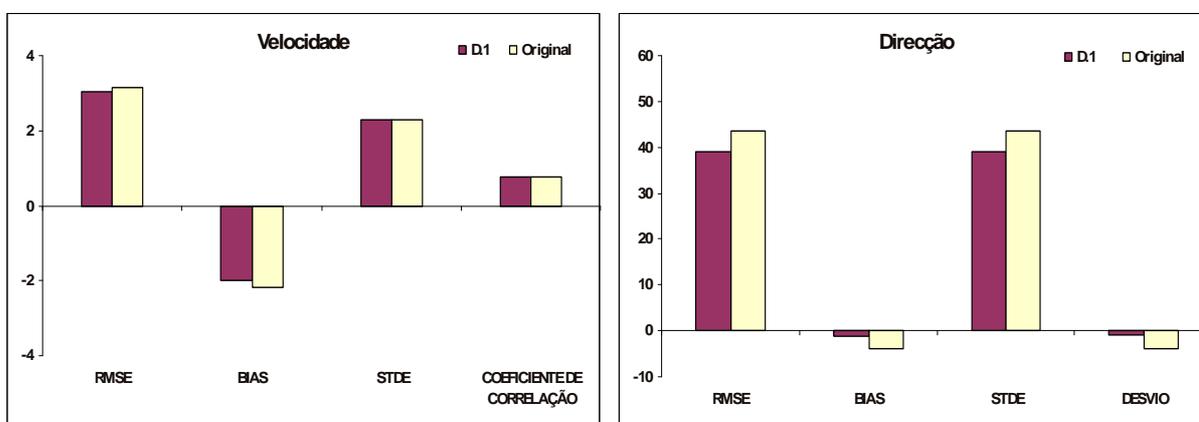


Figura 14 – Medidas de erro relativas à velocidade e direcção

4.5 – BLOCO E

Aqui irá ser analisada a influência da complexidade do terreno e da suavização do mesmo nos resultados, começando por analisar a influência da complexidade do terreno no comportamento do modelo. Considerando o mês de Janeiro, as séries temporais obtidas para as simulações E.2 e E.3 encontram-se em anexo (figuras IV a VII), enquanto que as séries temporais relativas ao ponto E.1 são as apresentadas na secção B para a simulação B.1.

Analisando as séries temporais, verifica-se que para o ponto E.2 as velocidades observadas são mais elevadas que no ponto E.3, e para a direcção o modelo consegue reproduzir melhor o vento no ponto E.3, tanto em relação à velocidade como à direcção.

As medidas de erro obtidas foram as seguintes:

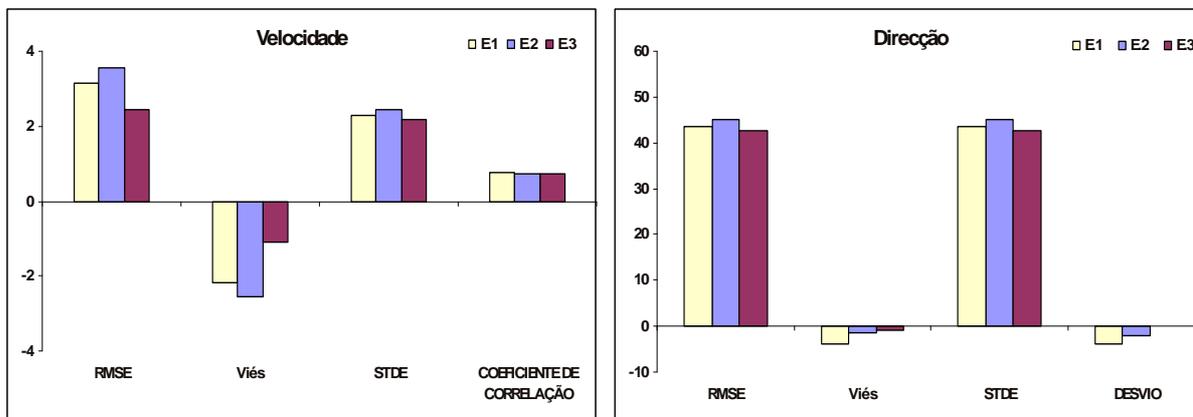


Figura 15 – Medidas de erro relativas à velocidade e direcção

As medidas de erro mostram que o ponto E.3 é aquele que apresenta menor RMSE, menor viés e menor STDE, tanto no que diz respeito à velocidade como à direcção. Os coeficientes de correlação são relativamente idênticos, se bem que o ponto E.1 é aquele que apresenta um maior R^2 , apesar de ser uma diferença mínima. Quanto aos desvios da direcção simulada relativamente à observada, no ponto E.3 esta é nula. O ponto E.2 é aquele que fornece piores resultados globais. Adicionou-se aqui mais um factor de comparação, que consiste no desvio entre a velocidade média observada e a simulada. Observou-se que os desvios são significativos, variando dos 17.8% (ponto E.3) até aos 33.7% (ponto E.2). Considerando todos estes indicadores, verifica-se que quanto maior a complexidade do terreno, pior a resposta do modelo, como seria de esperar.

Tabela 11 – Desvios da velocidade

Ponto	Velocidade Média 60m (Janeiro) [m/s]		
	WRF	Observado	Desvio
E.1	5.16	7.34	-29.7%
E.2	5.04	7.60	-33.7%
E.3	5.03	6.12	-17.8%

Aprofundando a análise, recorrendo aos coeficientes de correlação sectoriais e a rosas-dos-ventos de ocorrências e energia para os dois novos pontos (as tabelas e rosas-dos-ventos relativas ao ponto E.1 encontram-se apresentadas nas tabelas 8, 9 e ainda na figura 9), obtiveram-se as tabelas 12 a 15:

Tabela 12 – Coeficientes de correlação sectoriais relativas à velocidade entre as séries simuladas e observadas – E.2

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
a	0.395	0.346	0.240	0.330	0.361	0.518	0.835	0.829	0.546	0.511	0.648	0.657	0.740	0.597	0.599	0.494	0.549
b	1.486	2.853	3.829	2.885	2.623	1.548	0.718	0.595	2.792	1.982	0.400	0.025	-0.640	-0.231	-0.507	0.385	0.880
R^2	0.508	0.427	0.366	0.544	0.690	0.606	0.943	0.946	0.866	0.823	0.749	0.803	0.811	0.830	0.866	0.763	0.737
Número de registos	180	118	119	391	413	258	127	73	91	161	248	380	615	575	363	322	4434

Tabela 13 – Desvios sectoriais relativos à direcção entre as séries simuladas e observadas – E.2

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
Desvio [°]	24	19	21	22	23	20	33	16	17	4	-18	-44	-45	-23	17	23	-2
Número de registos	180	118	119	391	413	258	127	73	91	161	248	380	615	575	363	322	4434

Tabela 14 – Coeficientes de correlação sectoriais relativas à velocidade entre as séries simuladas e observadas – E.3

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
a	0.476	0.206	0.278	0.387	0.432	0.473	0.825	0.713	0.522	0.563	0.706	0.823	0.942	0.862	0.684	0.604	0.627
b	1.032	3.311	3.474	2.899	2.518	2.115	0.427	1.146	3.261	2.162	0.824	0.686	0.479	-0.018	0.269	0.115	1.274
R ²	0.585	0.276	0.349	0.534	0.668	0.595	0.924	0.939	0.791	0.739	0.781	0.765	0.805	0.814	0.885	0.776	0.720
Número de registos	341	104	105	312	517	239	146	78	105	245	329	344	405	442	353	349	4414

Tabela 15 – Desvios sectoriais relativos à direcção entre as séries simuladas e observadas – E.3

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
Desvio [°]	19	19	15	24	23	22	32	31	19	5	-21	-38	-37	-33	-8	15	0
Número de registos	341	104	105	312	517	239	146	78	105	245	329	344	405	442	353	349	4414

Nestas tabelas confirma-se o que foi visto nas medidas de erro, ou seja, o ponto E.2 apresenta um coeficiente de correlação global ligeiramente maior que o ponto E.3, contrariando as outras medidas de erro que apontam o ponto E.3 como o que apresenta melhores resultados. Ainda assim, o ponto E.1 continua a ser aquele que apresenta melhores coeficientes de correlação (0.765). Sectorialmente, vemos que em termos do número de ocorrências os sectores Oeste e Oés-noroeste são claramente os sectores dominantes em termos de ocorrências em ambos os pontos e os que apresentam maiores coeficientes de correlação, sendo os seus valores relativamente altos (rondando os 0.8). No que diz respeito à direcção, o ponto E.2 apresenta um desvio global de 4º no sentido ciclónico e o ponto E.3 apresenta mesmo um desvio global nulo. Seguidamente apresentam-se as rosas-dos-ventos de ocorrências e energia, bem como o histograma de velocidades para os pontos E.2 e E.3:

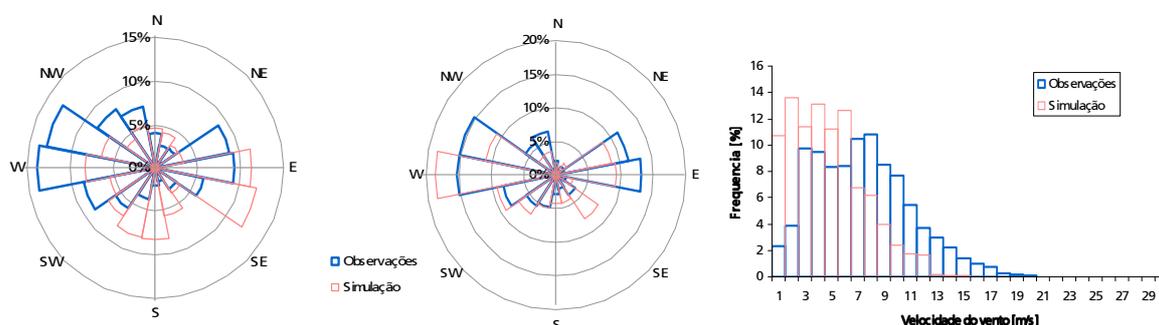


Figura 16 – Rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências e contribuição energética, respectivamente, e histograma de velocidades – Ponto E.2

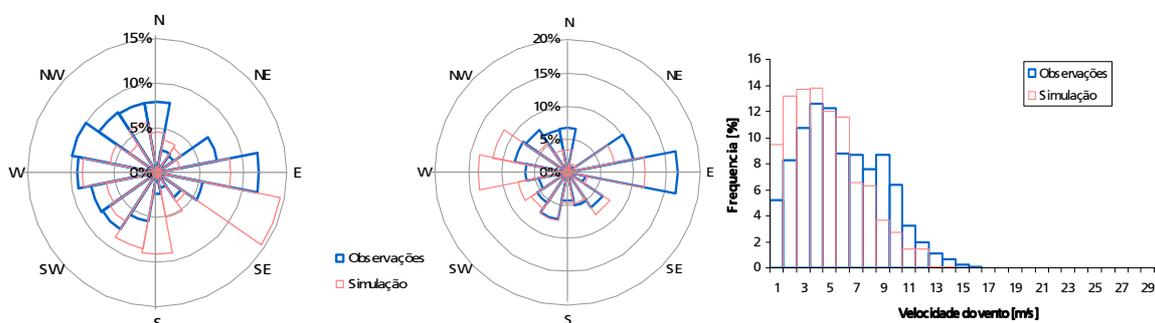


Figura 17 – Rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências e contribuição energética, respectivamente, e histograma de velocidades – Ponto E.3

Para ambos os pontos, assiste-se aos mesmos resultados do que foi visto para o ponto E.1, ou seja, o modelo consegue simular relativamente bem o rumo do vento no local em causa, mas falha na determinação do sector dominante, quer em termos de ocorrências quer em termos de contribuição energética sectorial. Já no que toca ao histograma de velocidades vemos que entre os três pontos existem diferenças substanciais. Nota-se que para o ponto E.2 o histograma mostra uma subestimação ainda maior da velocidade do vento enquanto que o histograma relativo ao ponto E.3 mostra uma subestimação menos acentuada, ambos em relação ponto E.1. Este facto mostra que quanto maior a complexidade do terreno, maior a subestimação da velocidade do vento por parte do modelo. Em termos da direcção do vento, não parece haver grande influência da complexidade do terreno na resposta do modelo.

Seguidamente, foi então usado um ponto na malha localizado a cerca de 40 Km para Nordeste do ponto E.1 que possui uma altitude idêntica à altitude real do ponto de simulação, cerca de 556 m de altitude, ponto este designado por E.4. Os resultados obtidos foram os seguintes:

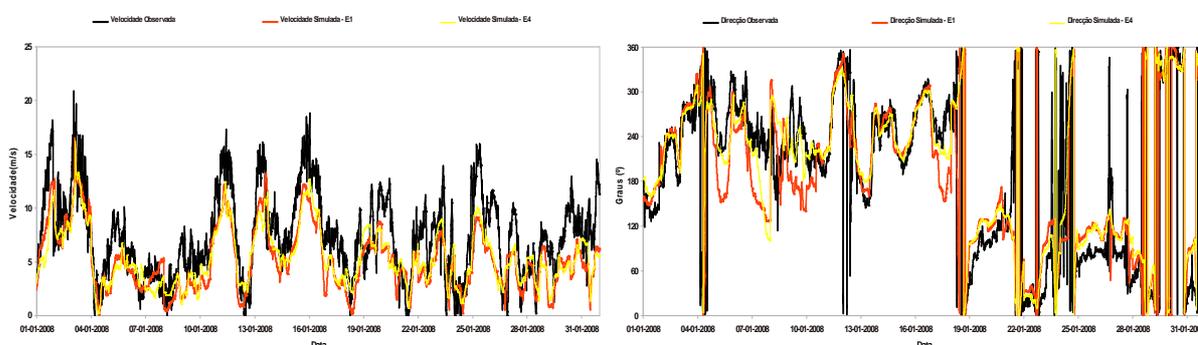


Figura 18 – Séries temporais relativas à velocidade e direcção

É visível um ligeiro melhoramento dos resultados considerando este novo ponto, assistindo-se a uma melhor concordância com os dados observados apesar de continuarem presentes a subestimação da velocidade do vento e o desvio relativamente à direcção observada (ciclónico para direcções entre os 200 e os 360° e anti-ciclónico para as restantes direcções), se bem que em menor grau do que para o ponto E.1. As medidas de erro obtidas foram as seguintes:

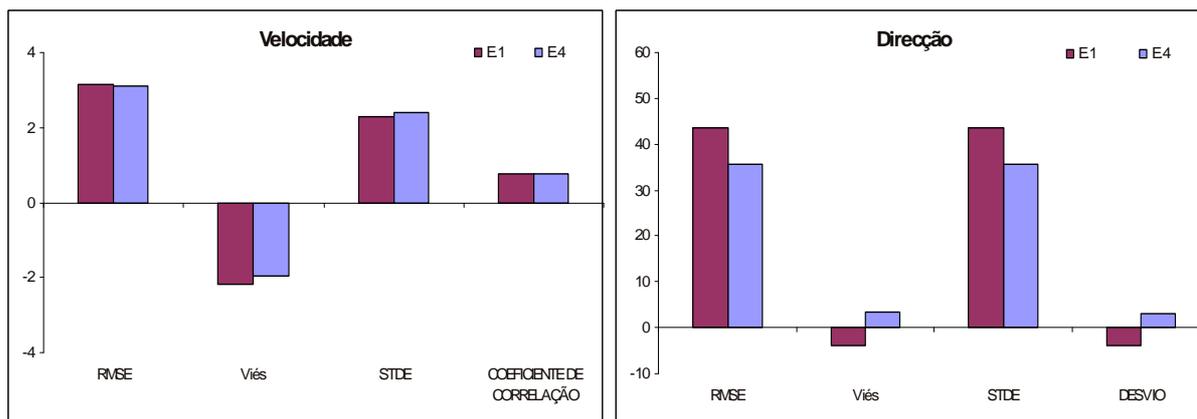


Figura 19 – Medidas de erro relativas à velocidade e direcção

Confirma-se que o modelo apresentou melhores resultados para o ponto E.4 relativamente ao ponto E.1, conseguindo diminuir o RMSE e o viés, se bem que tenha aumentado ligeiramente o STDE (no erro associado à velocidade), mas este aumento não é significativo. No que toca à direcção, assistiu-se a uma

diminuição significativa de todas as medidas de erro (incluindo o viés, que diminuiu em módulo). As duas séries possuem coeficientes de correlação praticamente idênticos, se bem que a simulação no novo ponto apresente um ligeiríssimo decréscimo no coeficiente de correlação. O desvio relativamente à direcção diminuiu em módulo, passando este desvio a ser no sentido anti-ciclónico, contrariamente à simulação relativa ao ponto original. Sectorialmente, os resultados foram os seguintes (ponto E.4):

Tabela 16 – Coeficientes de correlação sectoriais relativas à velocidade entre as séries simuladas e observadas

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
a	0.351	0.424	0.292	0.399	0.384	0.206	0.381	0.500	0.545	0.544	0.612	0.736	0.776	0.696	0.654	0.527	0.533
b	1.557	1.608	3.358	3.353	2.577	3.766	2.238	2.110	2.382	1.581	0.734	0.206	0.234	0.712	0.801	0.929	1.495
R²	0.702	0.469	0.346	0.670	0.591	0.490	0.854	0.929	0.865	0.829	0.793	0.835	0.896	0.923	0.899	0.850	0.753
Número de registos	298	313	225	181	421	123	171	140	189	293	449	369	468	283	226	288	4437

Tabela 17 – Desvios sectoriais relativos à direcção entre as séries simuladas e observadas

Parâmetros	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Global
Desvio [°]	-2	15	32	22	25	22	20	27	17	10	-8	-17	-16	-16	-20	-1	3
Número de registos	298	313	225	181	421	123	171	140	189	293	449	369	468	283	226	288	4437

Estes resultados confirmam o que já foi referido anteriormente, ou seja, o coeficiente de correlação baixou muito ligeiramente (de 0.765 para 0.753). Sectorialmente, vemos que em termos do número de ocorrências os sectores dominantes são os mesmos, como seria de esperar, e que os coeficientes sectoriais de correlação mantêm-se semelhantes. Na tabela 17 vemos que o desvio global da direcção simulada relativamente à observada é relativamente baixa, cerca de 3°, mas desta vez esse desvio é no sentido anti-ciclónico, contrariamente ao que foi visto considerando o ponto E.1. Olhando agora para as rosas-dos-ventos e histograma de velocidades, obteve-se o seguinte:

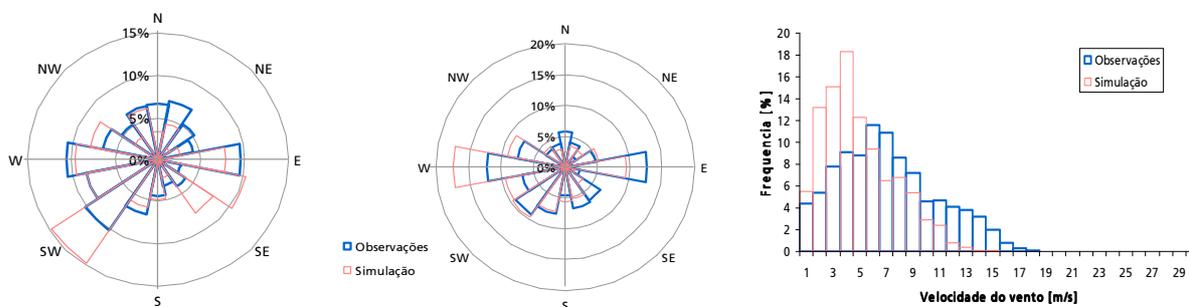


Figura 20 – Rosa-dos-ventos relativa ao número de ocorrências e contribuição energética, respectivamente, e histograma de velocidades

Vemos algumas diferenças em relação ao que se obteve considerando o ponto E.1, já que esta simulação consegue determinar correctamente quais os sectores dominantes, contrariamente ao que se assistiu considerando a simulação relativa ao ponto E.1, que falhou neste aspecto. É, no entanto, de realçar que a nova simulação diz que o sector dominante é claramente o sector Sudoeste, quando na realidade o número de ocorrências neste sector e no sector Oeste são muito semelhantes. No que diz respeito à rosa-dos-ventos relativa à contribuição energética, não se assistiram a diferenças significativas ao considerar este ponto em vez do ponto E.1. Continuam presentes as principais características que se revelaram no bloco de testes C, ou seja, o modelo é capaz de reproduzir razoavelmente bem o peso energético de cada sector e, no que toca ao sector energeticamente dominante, as observações mostram que o eixo Este-Oeste é o que contém maior fluxo energético, enquanto que o modelo considera que é o

sector Oeste apenas, não dando muita relevância ao sector Este. Mais uma vez esta rosa comparativa mostra que o sector Es-Sudeste, apesar de o modelo considerá-lo como um dos que apresentam maior número de ocorrências, a sua contribuição energética é diminuta. Ou seja, o modelo considera que as velocidades que ocorrem neste sector são baixas e não contêm expressão energética relevante. Analogamente, o sector Este é descrito pelo modelo como tendo um baixo número de ocorrências mas com velocidades elevadas, oferecendo um importante contributo energético. O histograma de velocidades mostra que, apesar de continuar presente a subestimação da velocidade do vento, esta é menor do que a que se assiste ao considerar o ponto original. Assiste-se a um aumento de frequência de velocidades superiores a 4 m/s, e a uma diminuição das velocidades inferiores a 4 m/s.

4.6 – BLOCO F

Foram configuradas no WAsP seis simulações distintas, duas para cada um dos três pontos de simulação considerados no bloco anterior (uma considerando o vento simulado e outra considerando o vento observado). Em cada uma destas simulações, foi introduzida a presença de um aerogerador num local coincidente com o respectivo ponto de simulação e estação meteorológica, com o seu rotor a 60 m acima do nível do solo. Irão ser comparadas as respectivas distribuições de recurso eólico da área circundante aos pontos de simulação, bem como as velocidades médias anuais do vento, estimativas de produção e rosas-dos-ventos de ocorrências resultantes dos dados observados e simulados para os três pontos de simulação. As estimativas de produção e velocidades médias anuais obtidas foram as seguintes:

Tabela 18 – Estimativas de produção e velocidades médias anuais resultantes de dados observados e simulados

Ponto	Produção anual [MW]			Velocidade Média [m/s]		
	WRF + WAsP	Observado	Desvio	WRF + WAsP	Observado	Desvio
E.1	5240	6172	-15.1%	6.65	7.70	-13.6%
E.2	7384	8185	-9.8%	7.64	8.93	-14.4%
E.3	4818	5121	-5.9%	6.43	7.16	-10.2%

Recordando a tabela 11 do bloco de testes anterior (que apresenta os desvios entre a velocidade do vento simulada e observada para o mês de Janeiro) e considerando estes desvios como representativos para um ano completo, verifica-se que a combinação WRF/WAsP melhora substancialmente os resultados já que a subestimação da velocidade do vento foi muito menor do que o que se assistiu usando apenas os resultados do WRF. As estimativas de produção usando os dados simulados são menores que as obtidas usando os dados observados, sendo que os desvios variam entre -5.9% e -13.5%. Estes desvios seriam esperados, já que como a potência produzida pelo fluxo está directamente ligada à sua velocidade, se esta continua a ser subestimada obviamente que as estimativas de produção baseadas nos dados simulados serão menores que as verificadas considerando dados observados.

O ponto onde se obtiveram melhores resultados é o E.3 (tanto usando os dados das simulações do WRF como os resultados da combinação WRF/WAsP), e o facto de este ponto estar situado em terreno relativamente simples leva-nos a concluir que esta combinação dos dois modelos continua a apresentar resultados substancialmente melhores quanto menor é a complexidade do terreno no local. Lembra-se que para o caso do ponto E.1 só estão disponíveis dados observados até Julho de 2008, logo, as

estimativas de produção não serão as mais correctas. Ainda assim, decidiu-se incluir este ponto na análise aqui efectuada. Seguidamente, foram calculadas no WAsP as grelhas de recurso eólico (que representam a velocidade média do vento no domínio de simulação), usando os dados simulados. Os eixos de coordenadas e localização dos três pontos foram omitidos por questões de confidencialidade.

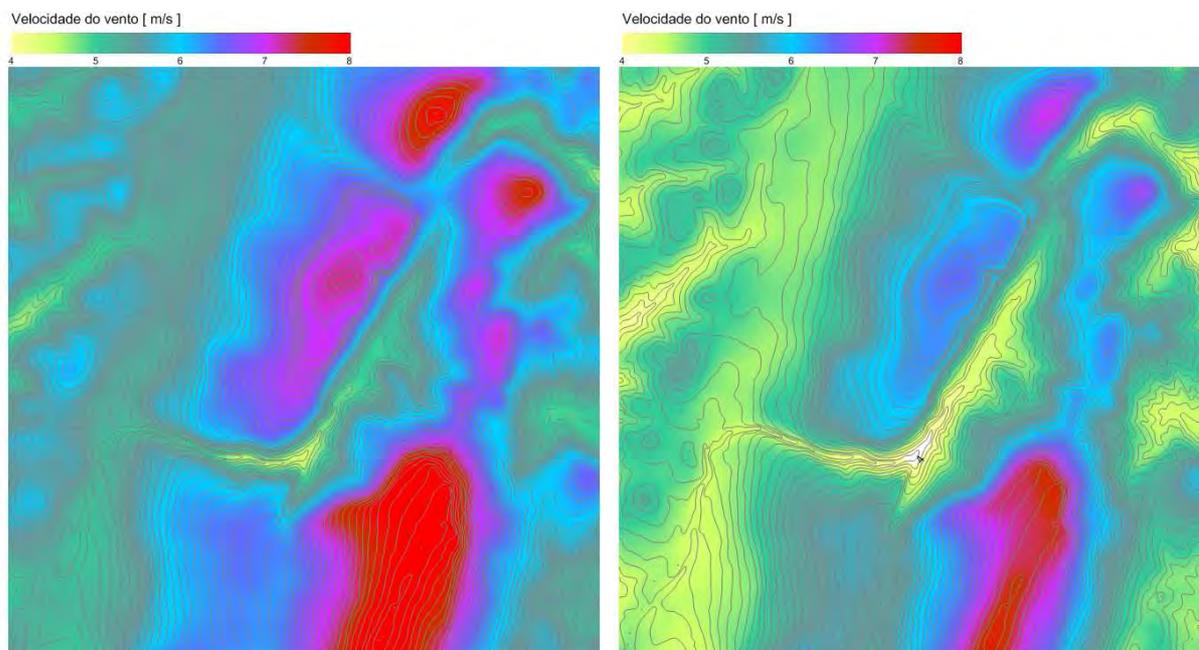


Figura 21 – Recurso eólico a 60 m de altura (velocidade média do vento) observado e simulado, respectivamente (dimensões: 4 km X 4 km)

Nota-se claramente a subestimação da velocidade do vento por parte dos modelos, já que o recurso eólico baseado nos dados observados (figura à esquerda) apresenta velocidades médias superiores ao recurso calculado a partir dos dados simulados. Mas, apesar desta subestimação, verifica-se que o modelo consegue reproduzir muito bem a sua distribuição ao longo do domínio já que os pontos com velocidades mais elevadas e mais baixas são os mesmos nas duas figuras. Este facto realça a utilidade destes dois modelos serem usados em conjunto para a visualização dos pontos de maior recurso eólico numa dada zona de interesse, apesar de mostrar esse pontos com uma velocidade menor que a real. Quanto às rosas de ocorrências simuladas e observadas, verifica-se através da tabela 19 que estas são praticamente idênticas, sendo o sector dominante bem simulado para os três pontos de simulação, o que traduz o bom comportamento do modelo na simulação do rumo do vento.

Tabela 19 – Rosas-dos-ventos de ocorrências

Ponto	E.1	E.2	E.3
Observação			
Simulação WAsP + WRF			

CONCLUSÕES

Tendo em consideração os testes aqui realizados, as principais conclusões a retirar são que o modelo revela-se capaz de simular correctamente os padrões locais do vento, nomeadamente os rumos dominantes e energeticamente mais importantes, apesar de calcular a direcção globalmente com um desvio no sentido ciclónico, exceptuando quando o vento sopra de direcções do quadrante Nordeste onde esse desvio é no sentido anti-ciclónico. A sua principal limitação revelou ser a simulação da intensidade do vento, na qual o modelo subestimou significativamente a sua magnitude (as simulações apresentaram velocidades do vento até cerca de 30% inferiores às observadas).

Quanto às opções numéricas do modelo, viu-se que é aconselhável que simulações realizadas recorrendo ao modelo WRF-ARW devem ter, no máximo, 2 a 3 dias de duração para evitar a divergência do modelo. Este aspecto é particularmente pertinente quando se pretende realizar previsões, onde não há condições fronteira e iniciais disponíveis em tempo real. Se se tratarem de simulações, e se estiverem disponíveis condições fronteira e iniciais que abarquem todo o período de simulação, não haverá o risco de o modelo divergir. Mas através do bloco A de testes ficou provado que apesar de o modelo não divergir, e até, apresentar bons resultados em simulações contínuas de 1 mês quando estão disponíveis condições fronteira que acompanham todo o período de simulação, ficou também provado que se se optar por simulações independentes de 2,3 dias os resultados melhoram, já que o modelo é reinicializado continuamente, limpando os erros acumulados durante o tempo de simulação. Viu-se também que a opção FDDA deve ser levada em conta quando se pretendem realizar simulações longas, já que permite que o modelo aplique correcções ou aproximações em tempo real nas simulações relativamente a observações ou análises fiáveis. O uso desta opção levou a resultados mais consistentes com a realidade.

No que diz respeito às opções físicas viu-se que: para a simulação de períodos temporais respeitantes a meses de Inverno, o conjunto de parametrizações físicas respeitantes à camada limite planetária que originaram melhores resultados foram: Mohnin-Obukov MM5 (Camada de superfície) + YSU (Camada limite planetária) + NOAH (Modelo de solo de superfície). Se os períodos temporais dizem respeito a meses de Verão, outro conjunto de parametrizações ofereceram melhores resultados, no caso: Pleim-Xiu (Camada de superfície) + Pleim-Xiu (camada limite planetária) + ACM2 (Modelo de solo de superfície). Este último conjunto de parametrizações, que é uma novidade nesta versão do WRF-ARW relativamente às versões anteriores, consegue reproduzir melhor as estações quentes do que as estações frias pois durante o Inverno o esquema PX+PX+ACM2 origina uma cobertura nebulosa excessiva no topo da CLP, que terá um impacto significativo na temperatura máxima diurna em algumas áreas.

Analisando pormenorizadamente as simulações no que respeita ao seu comportamento relativamente aos dados observados, viu-se que o modelo oferece uma boa resposta na determinação do rumo local do vento, já que consegue determinar quais os sectores que oferecem um maior contributo energético, apesar de não oferecer uma resposta tão satisfatória no que toca ao número de ocorrências. Viu-se também que o modelo apresentou falhas significativas no cálculo da intensidade do vento, mas essas falhas são menores nos sectores dominantes do vento, o que de alguma forma atenua esta limitação já que os sectores mais importantes energeticamente são razoavelmente simulados pelo modelo. Sabendo que uma das principais limitações do modelo é a sua fraca representação do terreno, que levará a deficientes determinações da intensidade do vento, verificou-se que, de facto, o modelo “vê” um dado ponto da malha de simulação a uma altitude muito menor do que a esse mesmo ponto possui na realidade. Determinando-se um ponto da malha de simulação que possui uma altitude idêntica à altitude real do ponto de simulação, e extraindo séries temporais de direcção e intensidade do vento nesse ponto comparando-as com as séries temporais observadas, viu-se que, efectivamente, se a altitude do ponto na malha for idêntica à altitude real, a subestimação da intensidade do vento será menor (o que seria de

esperar, já que em condições normais o vento aumenta de intensidade em altitude) e o modelo será capaz de simular melhor o rumo do vento e os respectivos sectores dominantes. Apesar desta subestimação da velocidade diminuir (se bem que apenas ligeiramente), a diferença entre simulação e observações neste aspecto continua a ser substancial. Assim, não será suficiente determinar um ponto na malha de simulação com a mesma altitude e relativamente próximo do ponto original para resolver o problema da subestimação da velocidade do vento.

Concluiu-se também que um aumento da capacidade resolutive do domínio de simulação, por si só, não irá introduzir uma melhoria substancial nos resultados dados pelo modelo, se bem que seja inegável que um aumento de resolução do modelo irá produzir melhores resultados. Mas, uma vez que o tempo de simulação aumenta enormemente com o aumento dos pontos do domínio de simulação, esta melhoria de resultados não justifica o elevado custo computacional associado ao aumento de resolução.

Resumindo, a grande limitação deste modelo consiste na subestimação da velocidade do vento, atribuída à suavização do terreno associada à discretização do terreno e que não foi resolvida nem recorrendo a domínios de maior resolução nem considerando pontos da malha de simulação à mesma altitude do ponto na realidade. Esta suavização não implica apenas uma diferença de altitudes entre os pontos reais e os pontos da malha (o modelo “vê” as montanhas mais baixas e os vales mais altos do que são na realidade), mas também uma suavização de todo o relevo, ou seja, uma relevo alto e com encostas íngremes será considerado pelo modelo como uma espécie de colina, ou seja, mais baixa mas também com as suas encostas mais suavizadas. Este aspecto resultante da suavização do relevo (encostas menos íngremes), por si só, produzirá ventos menos intensos devido ao maior efeito de atrito presente entre a superfície e a massa de ar em movimento (maior área de terreno em contacto com a superfície da massa de ar), aspecto que não acontece quando o relevo é mais acentuado (como uma montanha íngreme). Assim, a suavização do terreno produzirá ventos menos intensos não só devido à diferença de altitudes entre pontos, mas também devido ao aumento da superfície de contacto entre a massa de ar e a superfície (resultante de encostas menos íngremes). É também de realçar que os pontos de simulação aqui considerados se encontram todos em terrenos complexos, o que faz com que se note ainda mais uma deficiente representação do terreno. Será de esperar que em pontos situados em terreno menos complexo os resultados melhorem substancialmente, desde logo porque o terreno está melhor representado no modelo, sendo que é de relevo mais simples.

Uma maneira de tentar minimizar o problema dos efeitos do terreno na simulação do vento é recorrer a modelos de microscala, que possuem uma capacidade de lidar com a interacção do escoamento com o terreno que os modelos de mesoscala não possuem. Assim, considerando o vento na fronteira entre a camada limite planetária e atmosfera livre, e inserindo-o no modelo de microscala, este irá incluir neste vento os efeitos do terreno recorrendo à sua base de dados de alta resolução relativa ao terreno (altimetria e rugosidade). Seguindo este procedimento, verificou-se a capacidade do modelo de microscala WAsP em corrigir o vento simulado pelo WRF, já que a subestimação da velocidade do vento diminuiu significativamente em relação às simulações obtidas com o WRF. Daqui resulta que o modelo WAsP consegue atingir praticamente as mesmas estimativas de produção do que as que calcula considerando o vento observado, para um mesmo local e aerogerador. As grelhas de recurso eólico também revelaram bons resultados, apesar da menor velocidade média verificada no caso do recurso eólico simulado. O factor positivo aqui é que os modelos conseguem reproduzir os pontos com velocidades do vento mais elevadas, o que constitui uma ferramenta valiosa no estudo e planeamento de um parque eólico já que assim se consegue determinar com alguma fiabilidade os locais mais propícios à instalação de aerogeradores. Devido aos seus bons resultados, este procedimento poderá revelar-se como um instrumento valioso na caracterização do recurso eólico, planeamento e configuração de parques eólicos em zonas onde não existem, ou são esparsos, dados observados relativos ao vento.

REFERÊNCIAS

- Beljaars, A.C.M., 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 255–270.
- Blackadar, A. K., 1976: Modelling the nocturnal boundary layer. Third Symp. On Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality, Raleigh, NC, Amer. Meteor. Soc., 46-49.
- Byrkjedal, O., Berge, E., 2008: The Use of WRF for Wind Resource Mapping in Norway. 9th WRF Users' Workshop, NCAR Center Green Campus June 23 – 27, 2008.
- Byun, D., and K.L. Schere, 2006: Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. *Applied Mechanics Reviews*, 59, 51-77.
- Challa, V.S., Indracanti, J., Rabarison, M.K., Young, J., Patrick, C., Baham, J.M., Hughes, R., Yerramilli, A. 2007: Numerical experiments on the sensitivity of WRF-CMAQ simulations of air quality in the Mississippi Gulf coastal region to CLP and Land surface models, Presented at the 6th Annual CMAS Conference, Chapel Hill, NC, October 1-3, 2007 (communicated to Environmental Fluid Dynamics).
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.
- Chigullapalli, S., Mölders, N., 2008: Sensitivity studies using the Weather Research and Forecast (WRF) model. Summer internship report in Purdue University.
- Dyer, A. J., and B. B. Hicks, 1970: Flux-gradient relationships in the constant flux layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, 715–721.
- Ferreira, A. P., 2007: Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental. Relatório de estágio em Meteorologia e Oceanografia Física. Universidade de Aveiro, Aveiro - Portugal. 125 pp.
- Gallus, W. A. and J. F. Bresch, 2006: Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2632–2641.
- Gilliam, R.C., Hogrefe, C., and S.T. Rao, 2006: New methods for evaluating meteorological models used in air quality applications. *Atmos. Environ.*, 40, 5073- 5086.
- Gilliam, R., Pleim, J., Xiu, A., 2007: Implementation of the Pleim-Xiu land Surface Model and Asymmetric Convective Model in the WRF Model. Atmospheric Sciences Modeling Division, NOAA, Research Triangle Park and Carolina Environmental Program, University of North Carolina
- Gilliam, R., Pleim, J., 2008: Performance assessment of the Pleim-Xiu MSS, Pleim surface-layer and ACM CLP physics in version 3.0 of WRF-ARW. *Journal of Applied Meteorology and Climate*.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer: 1995, A Description of the Fifth-Generation PennState/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note NCAR/TN-398+STR.

- Holtstlag, A. A. M. and B. A. Boville, 1993: Local versus non-local boundary layer diffusion in a global climate model, *J. Climate*, 6, 1825–1842.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
- Hong, S.-Y., 2007: Stable Boundary Layer Mixing in a Vertical Diffusion Scheme. The Korea Meteor. Soc., Fall conference, Seoul, Korea, Oct. 25-26.
- Horváth, L., Horváth, K., 2006: Validation of the wind resource prediction for coupled ALADIN/WAsP modelling system in complex terrain. EWEC 2006 Proceedings.
- Hutchinson, T. A., Sousounis, P., Marshall, S., 2005: WRF enhancements for operational simulations. WRF/MM5 User's Workshop – June 2005.
- Janjic, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: physical package, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429–1443.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- Janjic, Z. I., 1996: The surface layer in the NCEP Eta Model, Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August; *Amer. Meteor. Soc.*, Boston, MA, 354–355.
- Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note, No. 437, 61 pp.
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia, 2007: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 2897-2913.
- Jankov, I., W. A. Gallus, M. Segal, B. Shaw, and S. E. Koch, 2005: The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall. *Wea. and Forecasting*, 20.
- Jankov, I., P. J. Schultz, C. J. Anderson, and S. E. Koch, 2007: The impact of different physical parameterizations and their interactions on cold season QPF in the American River basin. *J. Hydromet.*
- Krieger, J.R., Zhang, J., Atkinson, D.E., Shulski, M.D., Zhang, X., 2009: Sensitivity of WRF model forecasts to different physical parameterizations in the Beaufort Sea region. Eighth Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction and Processes, P1.2.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851–875.
- Michalakes, J., J. Dudhia, D. Gill, T. Henderson, J. Klemp, W. Skamarock, and W. Wang: The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzyński. World Scientific, 2005, pp 156 – 168.
- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock: Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 2001, pp. 269-276.

Miranda, P., Valente., Ferreira, J., 2003: Simulação numérica do escoamento atmosférico sobre a Ilha da Madeira: efeitos não lineares e de estratificação no estabelecimento do potencial eólico na zona do paul da Serra. Relatório técnico do Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa.

Monin, A.S. and A.M. Obukhov, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci., USSR*, (151), 163–187.

Mortensen, N.G., Hansen, J.C., Badger, J., Jørgensen, B.H., Hasager, C.B., Georgy Youssef, L., Said Said, U., Abd El-Salam Moussa, A., Akmal Mahmoud, M., El Sayed Yousef, A., Mahmoud Awad, A., Abd-El Raheem Ahmed, M., Sayed, M. A.M., Hussein Korany, M., Abd-El Baky Tarad, M., 2005: Wind Atlas for Egypt, Measurements and Modelling 1991-2005. New and Renewable Energy Authority, Egyptian Meteorological Authority and Risø National Laboratory. ISBN 87-550-3493-4. 258 pp.

Mortensen, N.G., Heathfield, D.N., Myllerup, L., Landberg, L., Rathmann, O., 2007: Wind Atlas Analysis and Application Program, WAsP 9 Help Facility. Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark. 353 topics. ISBN 978-87-550-3607-9.

Noilhan, J., and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536–549.

Noh, Y., W.G. Cheon, S.-Y. Hong, and S. Raasch, 2003: Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, 107, 401–427.

Paulson, C. A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, 9, 857–861.

Pielke, Sr., R. A., 2002: *Mesoscale meteorological modelling*. Academic Press.

Pleim, J. E. and A. Xiu, 1995: Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. *J. Appl. Meteor.*, 34, 16–32.

Pleim, J.E., and A. Xiu, 2003: Development of a Land Surface Model. Part II: Data Assimilation. *Journal of Applied Meteorology*, 42, 1811–1822.

Pleim, J. E., 2006: A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Appl. Meteor. and Clim.*, 45, 341–347.

Pleim, J.E., 2007: Combined Local and Non-local Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Model Description and Testing. *J. Appl. Meteor. Clim.*, In Press.

Pleim, J.E. and R.C. Gilliam, 2008: An indirect data assimilation scheme for deep soil temperature in the Pleim-Xiu land surface model. Submitted to *J. Appl. Meteor. Climatol.*

Skamarock, W. C., 2004: Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 3019-3032.

Skamarock W. C., 2005: Timesplitting techniques for multidimensional transport, available at http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d_2005.pdf, 26 pp.

Skamarock, W. C., 2006: Positive-Definite and Monotonic Limiters for Unrestricted-Timestep Transport Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2241-2250

Skamarock, W. C. and J. B. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comp. Phys.*, 227, 3465–3485. Smirnova, T. G., J. M.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (NCAR Technical Note), Mesoscale and Microscale Meteorology Division do NCAR.

Stauffer, D. R., and N. L. Seaman, 1990: Use of four-dimensional data assimilation in a limited area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1250–1277.

Stauffer, D. R., N. L. Seaman, and F. S. Binkowski, 1991: Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 734–754.

Stauffer, D. R., and N. L. Seaman, 1994: Multiscale four-dimensional data assimilation. *J. Appl. Meteor.*, 33, 416–434.

Steenefeld, G.J.; Hartogensis, O.K.; Moene, A.F.; Baltink, H.K.; HoltCSag, A.A.M, 2008: Using a network of scintillometers and ceilometers for validation of the WRF-mesoscale model. 18th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Stockholm, Sweden, 9 - 13 June, 2008. - Boston : American Meteorological Society, 2008.

Wang, W., D. Barker, C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, J. Michalakes, and S. Rizvi, 2008: WRF Version 3 Modeling System User's Guide.

Webb, E. K., 1970: Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, 67–90.

Wicker, L. J., and W. C. Skamarock, 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2088-2097.

Xiu, A. and J. E. Pleim, 2001: Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *J. Appl. Meteor.*, 40, 192– 209.

Zhang, D.-L., and R.A. Anthes, 1982: A high-resolution model of the planetary boundary layer – sensitivity tests and comparisons with SESAME–79 data. *J. Appl. Meteor.*, 21, 1594–1609.

Zilitinkevich, S. S., 1995: Non-local turbulent transport: pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows, *Air Pollution III — Volume I. Air Pollution Theory and Simulation*, Eds. H. Power, N. Moussiopoulos and C.A. Brebbia. Computational Mechanics Publications, Southampton Boston, 53–60.

[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide V3/](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/V3/)

ANEXO

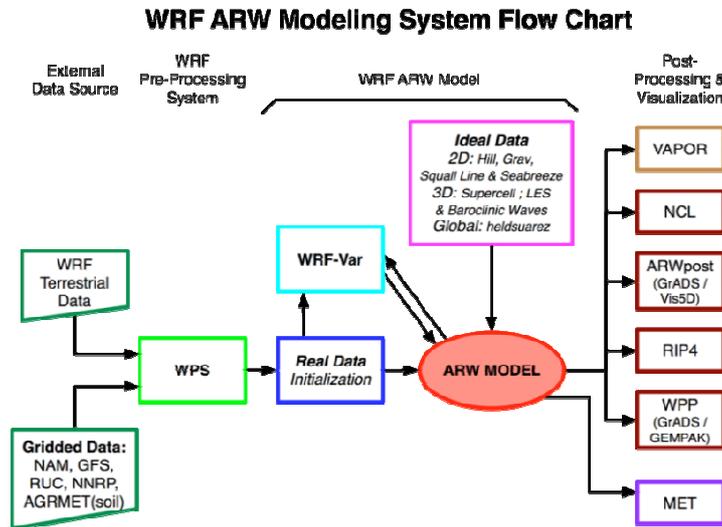


Figura I – Diagrama acerca da arquitectura do sistema WRF

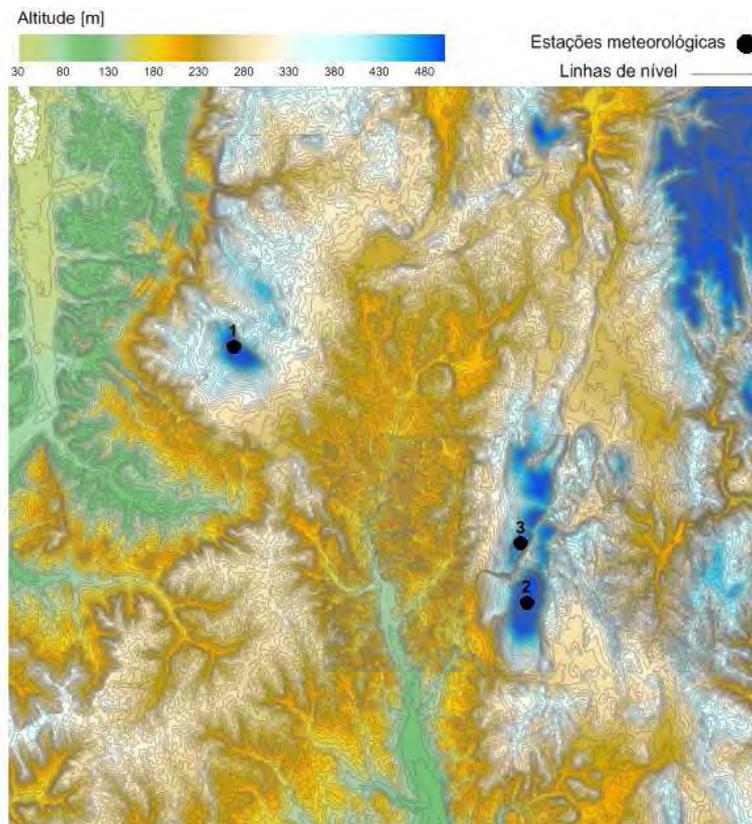


Figura II – Estações meteorológicas de referência (dimensões: 30 km X 30 km)

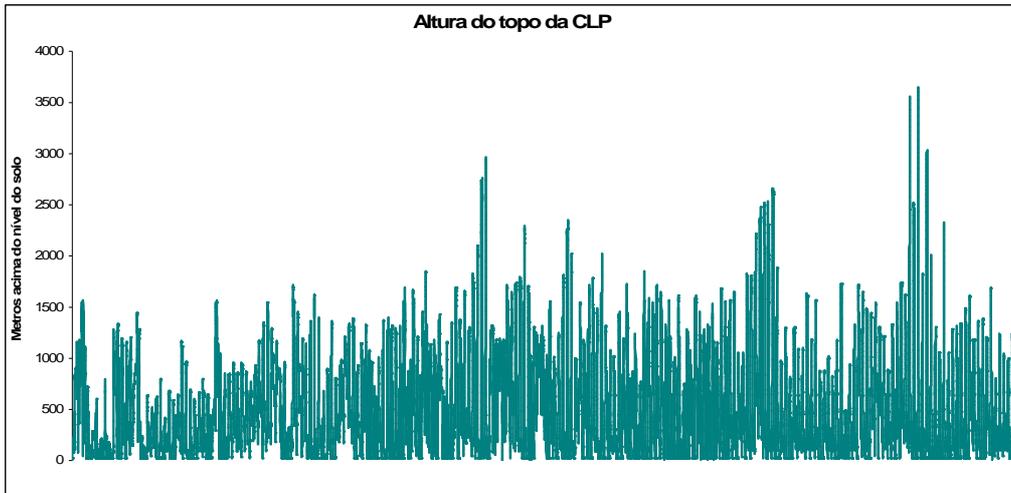


Figura III – Altura do topo a camada limite planetária para o ano de 2008*

*Nesta figura não está representado o eixo dos xx porque a série possui mais de 52.000 registos, quando o Excel apenas permite um máximo de 32.000 registos no eixo inferior.

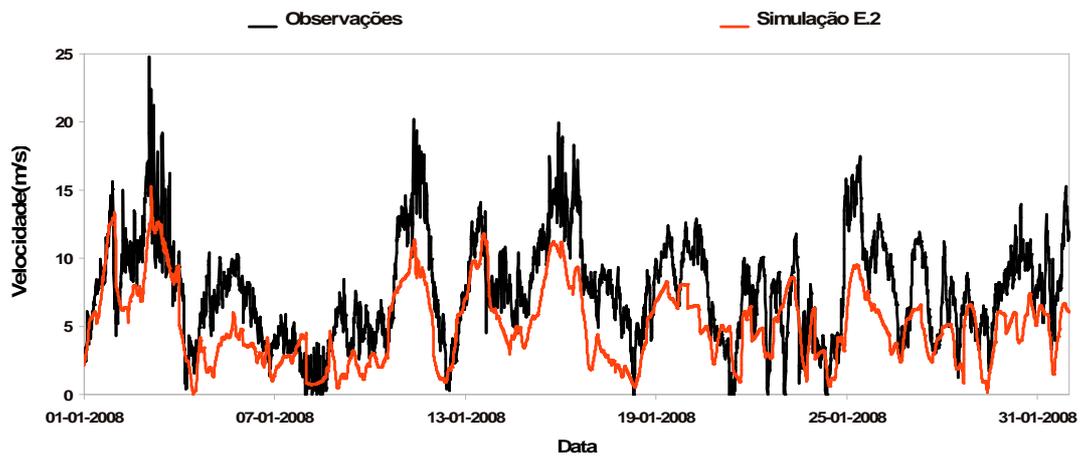


Figura IV – Série temporal relativa à velocidade (Bloco E – Simulação E.2)

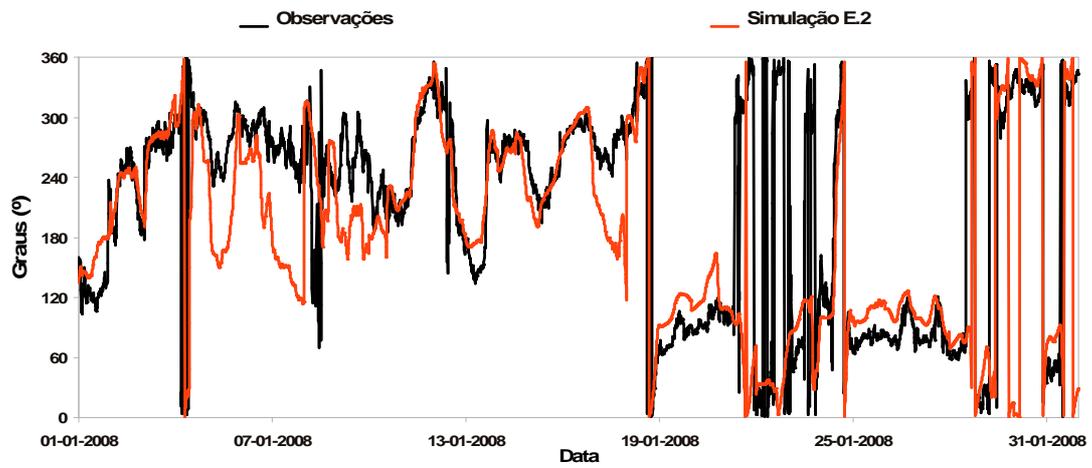


Figura V – Série temporal relativa à direcção (Bloco E – Simulação E.2)

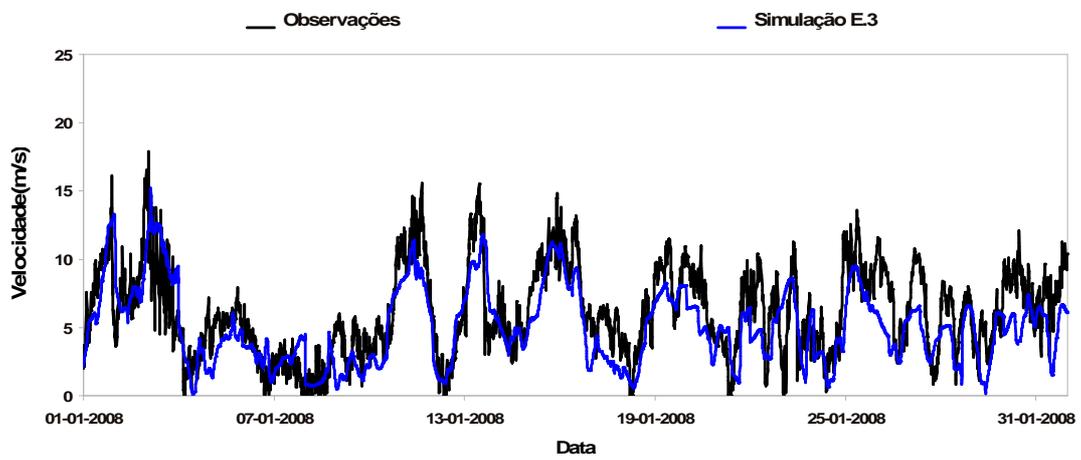


Figura VI – Série temporal relativa à velocidade (Bloco E – Simulação E.3)

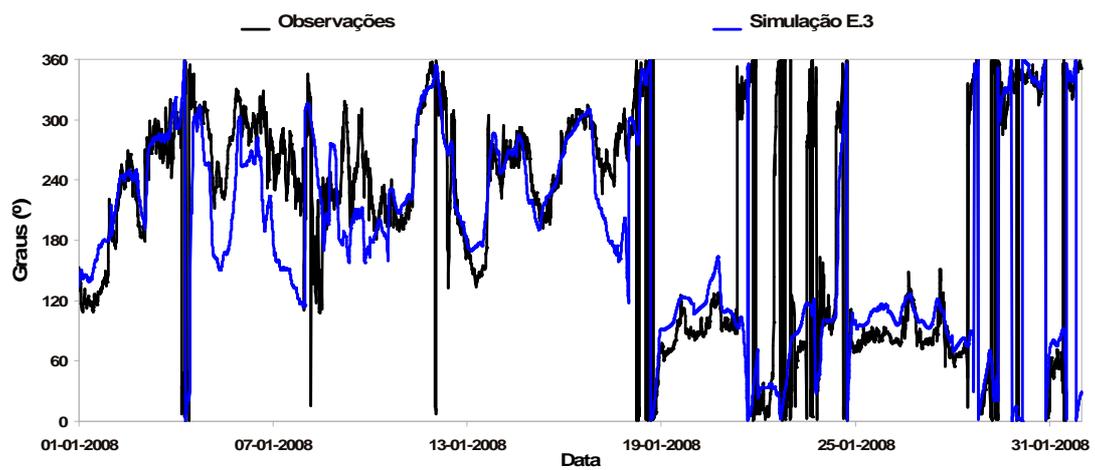


Figura VII – Série temporal relativa à direcção (Bloco E – Simulação E.3)