



Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.

UNIDADE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA

PLANEAMENTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS OFFSHORE EM PORTUGAL

D2.2 – Validação do potencial energético offshore

António Couto, Paula Costa, João Silva, Duarte Santos, Teresa Simões e Ana Estanqueiro

LNEG, maio 2019









Resumo

O presente documento foi elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) como parte das atividades de R&D do projeto *OffshorePlan*. De acordo com o plano de atividades da Tarefa 2 - "Mapeamento do recurso renovável disponível", este relatório apresenta os resultados dos procedimentos de calibração e validação do potencial eólico *offshore* ao longo da costa Portuguesa, obtidos com base num modelo numérico de mesoescala. A aplicação destes procedimentos é crucial para estabelecer uma caracterização precisa do recurso energético *offshore* na costa portuguesa, permitindo contribuir na definição de um plano estratégico para a exploração das energias renováveis marinhas em Portugal. Apresenta-se igualmente o novo Atlas do potencial eólico *offshore*, constituído pelos campos médios da velocidade e direção do vento e fluxo de potência incidente.

De acordo com o descrito no relatório *D2.1 – Metodologias de avaliação do potencial energético offshore* numa primeira fase, efetuou-se um conjunto de testes de sensibilidade às simulações numéricas para calibrar o modelo numérico de mesoscala de acordo com as caraterísticas meteorológicas da região em estudo. A calibração do modelo incidiu sobre *i*) as condições meteorológicas iniciais/fronteira; *ii*) as parametrizações físicas; e *iii*) a assimilação de dados meteorológicos. A calibração e a identificação dos benefícios da abordagem de assimilação foram realizadas com base nas métricas estatísticas comuns neste tipo de procedimentos (*e.g.*, erro quadrático médio normalizado, viés e correlação de Pearson) e dados observados que caracterizam o escoamento atmosférico (*e.g.*, intensidade e direção do vento). Os resultados dos diferentes testes realizados são apresentados e discutidos neste documento.

Após calibração do modelo procedeu-se à simulação do período compreendido entre 01.01.2015 e 31.06.2018 correspondendo a três anos e meio contínuos de resultados simulados sendo este período, representativo das características do escoamento atmosférico de longo termo. Esta simulação permitiu *i*) validar os resultados obtidos recorrendo a dados inferidos em campanhas experimentais que ocorreram no âmbito do presente projeto, e *ii*) a obtenção do Atlas do potencial eólico *offshore* ilustrado pela distribuição espacial do campos médios da velocidade, direção do vento e fluxo de potência incidente para toda a costa Portuguesa (até uma distância correspondente à batimétrica dos 300m).





Índice

Resu	umo	2
1.	Introdução	4
2.	Dados e metodologia para obtenção, calibração e validação do novo Atlas eólico offshore	5
	 2.1. Modelo numérico – MM5 2.1.1. Condições meteorológicas iniciais e de fronteira 2.1.2. Calibração das parametrizações físicas do modelo MM5 2.1.3. Assimilação de dados meteorológicos 	6 7 8 9
	2.1.3.1. Principais tecnicas assimilação de dados 2.1.3.2. Método FDDA 2.2 ModelCalibration tool	9 10 11
	 2.3. Dados para os procedimentos de calibração, validação e assimilação 2.3.1. Dados observados	12 12 12
3.	Resultados	12
	 3.1. Identificação dos domínios de simulação	13 14 14 18 25 29 29
4.	incidente	30 30
Refe	rências bibliográficas	32
Anex	ko I - Reinício diário e Mensal das simulações	34
Anex	ko II – Parametrizações físicas do modelo: identificação dos testes de sensibilidade	37







1. Introdução

O presente relatório de progresso foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) como parte das atividades de R&D do projeto *OffshorePlan: PLANEAMENTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS OFFSHORE EM PORTUGAL*. De acordo com o plano de atividades da Tarefa 2 - "Mapeamento do recurso renovável disponível", o objetivo principal deste relatório é apresentar os resultados da calibração desenvolvida e a validação dos resultados obtidos para a caracterização do recurso eólico offshore em Portugal. A descrição detalhada das metodologias aplicadas pode ser consultada no *D2.1 – Metodologias de avaliação do potencial energético offshore* (Santos et al. 2017).

O mapeamento do recurso eólico *offshore*, com precisão adequada ao apoio a futuros investimentos, é baseado em modelação numérica de mesoescala e assenta em duas fases principais (Figura 1):

- I. Desenvolvimento do novo Atlas do Potencial Eólico Offshore;
- II. Validação do Atlas do Potencial Eólico Offshore.

Na etapa I, a calibração do modelo numérico de mesoescala usada neste trabalho incidiu sobre as suas condições iniciais e de fronteira (CIF) e as parametrizações numéricas, descritas nas etapas intermédias I.A e I.B, respetivamente. Posteriormente, os benefícios da abordagem de assimilação de dados para melhorar a caraterização da velocidade e direção do vento foram avaliados (etapa I.C). A calibração e a identificação dos benefícios da abordagem de assimilação de velocidade e direção do vento foram realizadas, recorrendo-se às métricas estatísticas comuns no setor eólico (por exemplo, o erro quadrático médio normalizado e a correlação de Pearson) aplicadas sobre dois meses¹ de dados meteorológicos observados e simulados pelo modelo numérico, em alguns locais *offshore* e na costa portuguesa. Os dados observados foram recolhidos no decorrer do projeto a partir de diferentes sistemas de medição, nomeadamente, *i*) bóias oceanográficas perto da costa portuguesa, fornecidas pelo Instituto Hidrográfico Português e pela agência espanhola Puertos del Estado, e *ii*) mastros anemométricos costeiros e sistemas *Light Detection And Ranging* (LiDAR) existentes nas bases de dados do LNEG.



Figura 1. Principais passos para obtenção do novo Atlas eólico offshore de alta resolução.



¹ Devido ao elevado esforço computacional requerido para as simulações, utilizaram-se dois períodos representativos distintos das condições atmosféricas típicas de verão (01-08-2014 a 01-09-2014) e de inverno (29-12-2014 a 29-01-2015) na região em estudo para calibração do modelo.





A etapa II - Validação, corresponde à segunda fase desta atividade, beneficiou das campanhas experimentais de medição do vento que ocorreram durante o projeto com o propósito de validação dos mapeamentos do potencial eólico *offshore*. Nesse sentido, campanhas experimentais de curta duração, recorrendo a dois sistemas LiDAR (um sistema vertical e um horizontal), foram realizadas em locais com indicadores favoráveis ao aproveitamento do recurso eólico, e que, à data deste projeto, não tinham ainda sido objeto de campanhas experimentais. De referir que, estas campanhas de curta duração permitem obter séries de velocidade e direção do vento por períodos suficientemente representativos do escoamento atmosférico nas regiões selecionadas para efetuar a validação dos mapeamentos obtidos com a modelação de mesoescala.

O relatório encontra-se estruturado da seguinte forma, na secção:

- 2. apresenta-se um resumo dos dados e das metodologias aplicadas neste trabalho.
- 3. os resultados do processo de calibração e validação do modelo são apresentados. Nesta secção disponibiliza-se igualmente o novo Atlas do potencial eólico de alta-resolução espacial.
- 4. algumas notas finais sobre a motivação deste trabalho e os principais resultados obtidos são providenciadas.

2. Dados e metodologia para obtenção, calibração e validação do novo Atlas do potencial eólico offshore

Como descrito detalhadamente em (Santos et al. 2017), para a obtenção do novo Atlas do potencial eólico offshore, recorreu-se ao modelo numérico MM5 (Grell, Dudhia, e Stauffer 1994), seguindo a metodologia aplicada pelo LNEG na geração do primeiro Atlas eólico com modelos numéricos de mesoescala para Portugal Continental (Costa 2004; Costa e Estanqueiro 2004; Costa, Miranda, e Estanqueiro 2006), Figura 2. Para calibração e validação dos resultados obtidos, o LNEG desenvolveu uma ferramenta operacional designada por *ModelCalibration_Tool*. Esta ferramenta, de base estatística suportada por informação visual, foi implementada no *software* Matlab e permite, com base em séries temporais de dados observados e simulados, obter os parâmetros estatísticos que servem de suporte para a identificação da configuração mais adequada do modelo numérico para a região em análise. Esta ferramenta foi igualmente utilizada no processo de validação dos resultados obtidos.

Seguidamente apresenta-se uma breve descrição: *i*) do modelo MM5 destacando-se os processos associados à sua calibração, *ii*) a ferramenta *ModelCalibration_Tool*, e *iii*) os dados utilizados no processo de calibração e validação dos resultados numéricos de mesoescala.









Figura 2. Metodologia utilizada pelo LNEG para a elaboração de um Atlas eólico regional e/ou nacional. Ilustração referente à geração do Atlas do recurso eólico para Portugal (Costa & Estanqueiro 2004).

2.1. Modelo numérico – MM5

Os modelos numéricos de mesoescala, resolvem as equações diferenciais que traduzem as leis físicas da descrição do comportamento dinâmico da atmosfera, permitindo obter os parâmetros meteorológicos mais relevantes para a obtenção de um Atlas de recurso eólico, *e.g.*, intensidade e direção do vento (Troen e Lundtang Petersen 1989).

O modelo numérico MM5 é um modelo atmosférico de mesoescala de acesso livre, sendo continuamente aperfeiçoado através da contribuição de diversos utilizadores das universidades e institutos de investigação em todo o mundo. Embora o MM5 tenha sido originalmente desenvolvido para previsão meteorológica de curto prazo, este passou por muitas mudanças ao longo dos anos, como a atualização das condições de limite inferior (temperatura da superfície e gelo no mar) da atmosfera e inclusão de processos de superfície terrestre, tornando-se adequado para simulação das condições atmosféricas numa determinada região.

Para a obtenção de um Atlas do potencial eólico, estes modelos são alimentados por dados meteorológicos, usualmente designados por condições iniciais e de fronteira – CIF, obtidos através de projetos de reanálises/análises. Em geral, os dados meteorológicos estão disponíveis em níveis verticais de pressão, e são transformados no modelo para níveis sigma para permitir o seguimento do terreno, tornando possível ao modelo







simular as características do comportamento do vento em diferentes escalas espaciais (mesoescala ou regional). As coordenadas verticais sigma são calculadas através de uma função linear simples envolvendo os valores da pressão atmosférica de superífice (~1013hpa) e a pressão atmosférica no topo do domínio (correspondendo à zona de tropopausa ~ 10hpa) ambas em função da pressão atmosférica resolvida pelo modelo em cada ponto de malha do domínio de simulação (Tummuri 2008).

Dentro do modelo numérico MM5, o campo terrestre e os dados meteorológicos isobáricos (pressão constante) são interpolados numa grelha latitude (*ny*) – longitude (*nx*). No modelo, os dados meteorológicos de entrada provenientes de projetos de reanálises/análises são transformados para resoluções espaciais e temporais mais detalhadas por meio de aninhamentos entre domínios. Existem dois tipos de domínios, domínios-mãe e subdomínios que, como o nome indica, são domínios que dependem e se encontram aninhados aos domínios-mãe. A interação entre domínios pode ser *i*) unidirecional, o que significa que a transferência de dados ocorre num único sentido, dos domínios-mãe para os subdomínios ou *ii*) bidirecional onde a transferência de dados ocorre nos dois sentidos. De referir que os dados de CIF são apenas forçados no domínio-mãe. Importa referir que neste projeto, as simulações são reiniciadas diariamente, *i.e.*, o tempo total de integração contínuo das simulações é de 24 horas (Anexo I).

2.1.1. Condições meteorológicas iniciais e de fronteira

Após a determinação dos domínios de simulação, o passo seguinte para a construção de um Atlas de vento, consiste na identificação dos dados de projeto de reanálise (dados históricos tri-dimensionais obtidos através de simulações numéricas físicas de modelos atmosféricos globais alimentados com todos os dados meteorológicos observados disponíveis no globo terrestre) mais adequados para alimentarem o modelo atmosférico de mesoescala.

Como descrito na revisão da literatura exaustivamente apresentada no relatório D2.1 do presente projeto (Santos et al. 2017), uma das principais fontes de erro e incerteza na avaliação do recurso eólico, baseada em modelos numéricos de mesoescala, deriva das condições iniciais e de fronteira (CIF) que alimentam o modelo (Alvarez et al. 2014; Soukissian e Papadopoulos 2015; Wang e Zeng 2012). Vários autores indicam que a precisão destes dados tem um impacto crucial nos resultados finais na avaliação do recurso eólico (Alvarez et al. 2014; Carvalho et al. 2014, 2017; Sharp et al. 2015; Wang e Zeng 2012). Nesse sentido, realizaram-se testes de sensibilidade para selecionar as CIF mais adequadas para alimentar o modelo de mesoescala na região em estudo. Os projetos de reanálise/análise testados neste trabalho foram escolhidos com base na revisão de literatura. Na Tabela 1 apresenta-se um resumo das características de cada reanálise/análise testada neste projeto.





Base de dados	Tipo de Base de Dados	Res. Temporal (horas)	Res. Espacial (Lat. X Lon.)	Níveis Verticais	Cobertura temporal
NCEP-CFSv2	Reanálise	6	0.50° x 0.50°	64	2011-Presente
ERA-Interim	Reanálise	6	0.75° x 0.75°	60	1979-Presente
ERA-5	Reanálise	1	0.28° x 0.28°	72	2010-Presente
NCEP-GFS	Análise	6	0.25° x 0.25°	64	2015-Presente
NCEP-FNL	Análise	6	1.00° x 1.00°	52	1999-Presente

Tabela 1. Principais características das reanálises/análises testadas no modelo de mesoescala MM5.

2.1.2. Calibração das parametrizações físicas do modelo MM5

Como descrito na secção 2.1, o modelo numérico MM5 permite a escolha de várias parametrizações para simular processos físicos como: a radiação, o efeito da superfície terrestre e marítima nas camadas subjacentes da atmosfera, a camada limite planetária, processos de microfísica das nuvens e conveção, entre outros. Nesse sentido, e de forma a caracterizar o mais rigorosamente possível a velocidade e direção do vento na região em estudo, o modelo foi calibrado através de testes de sensibilidade, optando-se por analisar os processos físicos com maior impacto na caracterização do recurso eólico:

-IMPHYS, esquemas de microfísica - caracterizam as nuvens e precipitação estratiforme à escala do modelo;

-*ICUPA*, esquemas de cúmulos – caracterizam a precipitação convectiva e nuvens de tipo cumulonimbus;

-*IBLTYP*, esquemas da camada limite planetária - caracterizam os fluxos de subescala verticais devido à turbulência originada por processos térmicos e de efeito de corte (cizalhamento).

Para estes processos, na Tabela 2 apresentam-se as diferentes parametrizações disponíveis no modelo MM5, destacando-se a negrito as parametrizações testadas ao longo deste trabalho. Para todos os testes efetuados, as opções físicas associadas aos esquemas de radiação (IFRAD) e de solo (ISOIL) mantiveram-se constantes tendo sido imposto a opção IFRAD=2 – *Cloud e* ISOIL=1 - Yes, respetivamente. A imposição destas opções físicas deriva do facto dos esquemas de radiação e do tipo de solo terem pouco ou nenhum impacto sobre mar/oceano.

Tabela 2. Parametrizações disponíveis dentro de cada opção física. A negrito assinalam-se as opções testadas neste trabalho

IMPHYS	IBLTYP	ICUPA
1-Dry	1-none	1-none
2-Stable Precipitation	2- Bulk PBL	2-Anthes-Kuo
3-Warm rain	3-Blackadar	3-Grell
4-Simple ice	4-Burk-Thompson	4-Arakawa-Schubert
5-Mixed-phase	5-Eta	5-Fritsch-Chappell
6-Goddard	6-MRF	6-Kain-Fritsch
-	7-Gayo-Seaman	7-Betts-Miller
-	8-Pleim-Chang	8-Kain-Fritsch 2







2.1.3. Assimilação de dados meteorológicos

As técnicas de assimilação de dados meteorológicos apresentam um elevado potencial para melhorar as estimativas das variáveis meteorológicas obtidas através de modelos de mesoescala, e, consequentemente, podem permitir obter um Atlas de vento e do potencial eólico com elevada previsão (Santos et al. 2017). A assimilação de dados é uma técnica numérica que permite combinar o uso de dados de observações meteorológicas com o próprio estado da atmosfera prognosticado por um modelo atmosférico de previsão do estado do tempo (NWP) para um determinado instante de tempo (Daley 1993). Assim, as equações e parametrizações do modelo asseguram a consistência dinâmica enquanto que, as observações mantêm o modelo próximo das condições reais e compensam desvios associados à física do modelo, Figura 3. Esta combinação de dados observados *versus* prognóstico de modelo atmosférico é conhecida por "*first guess*" ou "*backgroud forecast*" e permite obter a melhor representação possível do estado da atmosfera nesse instante de tempo. As observações meteorológicas podem vir de diversos sistemas de medição, por exemplo, estações meteorológicas, balões meteorológicos, boias oceanográficas, informação derivada por satélite, ou mesmo, oriunda de produtos específicos conhecidos por reanálises atmosféricas se forem disponibilizadas em elevada resolução espacial e temporal.



Figura 3. Representação esquemática do impacto da assimilação de dados na estimativa de uma determinada variável meteorológica.

2.1.3.1. Principais técnicas assimilação de dados

Existem três tipos de técnicas de assimilação: 3DVAR - *three-dimension variational data analysis* (Barker et al. 2004, 2012), 4DVAR - *four-dimension variational data analysis* (Huang et al. 2009) e FFDA - *four-dimensional data assimilation* (Hoke e Anthes 1976; Kuo e Guo 1989; Stauffer e Seaman 1990). A técnica 3DVAR, ou técnica variacional, consiste num princípio numérico iterativo de minimização dos erros provenientes do modelo recorrendo às observações disponíveis para um instante de tempo. A técnica 4DVAR é, igualmente, uma técnica variacional embora um pouco mais complexa que a anterior visto que a minimização iterativa é feita recorrendo a uma janela temporal por forma a corrigir e ajustar os erros do modelo com base nas observações contidas numa janela temporal pré-determinada. À semelhança da técnica 4DVAR, a técnica FDDA faz igualmente uso do conceito de janela temporal utilizando uma técnica de minimização iterativa mais simplificada a qual depende da







influência dos erros do modelo consoante a distância das observações aos pontos da malha computacional. A técnica FDDA é uma técnica robusta e, ao contrário das outras, tem a vantagem de assimilar dados de vento de elevada resolução temporal, por exemplo, séries de vento com dados de 10 em 10min, bem como de dados meteorológicos de projetos de reanálises com elevada resolução espacial e temporal (*e.g.*, projeto reanálises ERA-5).

Para o desenvolvimento do Atlas do vento e do potencial eólico *offshore* de Portugal Continental, utilizou-se a técnica de assimilação FDDA cujas características e descrições técnicas se encontram pormenorizadamente descritas no capítulo 3.1.4 (Santos et al. 2017).

2.1.3.2. Método FDDA

Em temos computacionais, o método FDDA consiste num conjunto simplificado de equações que são acopladas às equações de Navier-Stokes do modelo numérico, permitindo realizar a leitura das observações ao longo do tempo de integração e efetuar a respetiva assimilação dos dados no conjunto das equações do modelo numérico. O esquema ilustrado na Figura 4 mostra, de forma simplificada, o princípio de funcionamento deste método de assimilação.



Figura 4. Esquema de funcionamento do método de assimilação FDDA.

O esquema FDDA depende essencialmente de três parâmetros, *G*, *T* e *R*. O parâmetro *G* traduz a influência da assimilação nas equações de Navier-Stokes, o parâmetro *T* define o tempo da janela temporal e parâmetro *R* define o raio de influência das observações aos pontos de malha do modelo.

No caso exclusivo do uso de observações meteorológicas oriundas de reanálises, os valores de T e R são, *a priori,* definidos pela própria natureza dos dados. Assim, neste trabalho os valores definidos para R e T foram 27 km (quilómetros) e 1 hora, respetivamente. O parâmetro G foi estudado de acordo com os valores sugeridos na literatura (Hoke e Anthes 1976; Kuo e Guo 1989; Stauffer e Seaman 1990) que propõem valores de G a variar entre 3×10^{-4} e 16×10^{-4} , consoante a resolução espacial da malha do modelo. Geralmente, domínios de elevada resolução espacial requerem valores elevados do coeficiente G. No entanto, neste trabalho procedeu-se à realização de testes de sensibilidade, tendo-se verificado que o valor do parâmetro G mais adequado à resolução de malha a 1x1km tem o valor de $16x10^4$, sendo este o valor do parâmetro assumido na execução do esquema FDDA para assimilação dos dados meteorológicos da reanálise ERA-5.







2.2. ModelCalibration_tool

Na ferramenta desenvolvida para auxiliar no processo de calibração e validação dos resultados, obtidos com o modelo MM5, implementaram-se os parâmetros estatísticos comummente aplicados no setor eólico, *e.g.*, correlação de Pearson, viés (BIAS), erro médio absoluto (*mean absolute error* – MAE) e erro quadrático médio (*root mean square error* – *RMSE*), dados pelas seguintes expressões:

• Correlação de Pearson:

$$r = \frac{\sum_{1}^{N} (S_{i} - \bar{S})(O_{i} - \bar{O})}{\sqrt{(S_{i} - \bar{S})^{2}} \sqrt{(O_{i} - \bar{O})^{2}}}$$
(1)

• BIAS:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{N} (O_i - S_i)}{N} \tag{2}$$

• MAE:

$$MAE = \frac{\sum_{1}^{N} |(O_i - S_i)|}{N}$$
(3)

RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_i - S_i)^2}$$
(4)

Nas expressões anteriores, N é o número total de registos coincidentes entre os dados observados em cada estação e os dados simulados, $S_i \in O_i$ representam o valor de um determinado parâmetro meteorológico (velocidade ou direção do vento) simulado e observado na estação meteorológica para o instante *i*, respetivamente, e $\overline{S} \in \overline{O}$ representam o valor médio de um determinado parâmetro meteorológico simulado e observado na estação meteorológico simulado e observado na estação meteorológica, respetivamente. A performance perfeita dos parâmetros anteriormente apresentados corresponde a viés, MAE e RMSE igual a zero e correlação igual a um. Juntamente com os parâmetros estatísticos anteriormente apresentados, a ferramenta providencia informação visual que serve de apoio à decisão, da qual se destaca:

- perfil diário observado e simulado para os parâmetros meteorológicos analisados, por forma a identificar erros sistemáticos de fase e amplitude ao longo das diferentes horas do dia;

- rosa de ventos observada e simulada por forma a identificar sectorialmente os desvios na direção do vento;

- rosa de potência observada e simulada por forma a identificar sectorialmente os desvios, por direção do vento, do potencial energético observado e simulado;

- ajuste da distribuição de Weibull observado e simulado por forma a identificar a frequência de ocorrência por classes de velocidade de vento permitindo identificar desvios sistemáticos em determinadas classes de velocidade do vento.







Por motivos de brevidade, neste relatório optou-se por apresentar apenas gráficos de caixa e bigodes² e rosas de vento e potência.

2.3. Dados para os procedimentos de calibração, validação e assimilação

2.3.1. Dados observados

Os dados meteorológicos observados para utilização nos procedimentos de calibração e validação do modelo, foram recolhidos a partir de diferentes sistemas de medição, nomeadamente, bóias oceanográficas perto da costa portuguesa (Raia, Monican01, Monican02, Cabo Silleiro e Golf de Cádiz) sobre responsabilidade do Instituto Hidrográfico Português (Instituto Hidrográfico 2017) e agência espanhola Puertos del Estado (Puertos del Estado 2017), dados de mastros anemométricos costeiros e sistemas LiDAR - vertical e horizontal - obtidos em projetos anteriores, e que constam da base de dados do LNEG, foram igualmente usados no processo de calibração e validação dos resultados numéricos obtidos.

No decorrer do presente projeto, campanhas experimentais de curta duração, recorrendo a dois sistemas LiDAR (um sistema vertical e um sistema horizontal), foram realizadas em locais com indicadores favoráveis ao aproveitamento do recurso eólico e que, à data deste projeto, não foram objeto de campanhas experimentais. O objetivo das campanhas de curta duração passa por obter séries de velocidade e direção do vento por períodos suficientemente representativos do escoamento atmosférico nas regiões selecionadas para efetuar a validação dos mapeamentos obtidos com a modelação de mesoescala. De referir que nos casos em que o sistema de medição se encontrava instalado em terra, apenas os registos provenientes dos sectores *offshore* foram considerados. As localizações espaciais dos diferentes sistemas de medição considerados neste trabalho bem como as alturas de medição acima do nível médio do mar, são apresentadas na Figura 5.

2.3.2. Base de dados para assimilação

Atualmente, alguns produtos derivados da observação por satélite proporcionam a caracterização do recurso eólico com elevado grau de precisão nos níveis mais baixos da atmosfera (tipicamente 10 metros acima do nível do mar) e por isso podem ser assimilados nos modelos de mesoescala (Carvalho et al. 2017; Lorenz e Barstad 2013; Peng et al. 2013). Neste trabalho, o campo de vento médio (*Blended Mean Wind Field*), estimado a partir de dados de satélite tipo *scatterometers* ASCAT e QuiKSCAT com resolução horizontal de 25° e resolução temporal de 6 horas (Bentamy 2016) foram avaliados durante os testes de sensibilidade aos métodos de assimilação. Adicionalmente, o projeto de reanálise ERA-5 (ECMWF 2018), que apresenta uma resolução espacial (~ 31x31 km) e temporal (1 hora), foi igualmente testado.



² Neste gráficos os limites da caixa representam os quantis 25% e 75%, respetivamente, e os bigodes estendem-se até 1.57 vezes a amplitude interguartil.







Figura 5. Localização e altura de medição dos sistemas de medição usados no processo de *a*) calibração e *b*) validação do modelo MM5.

3. Resultados

3.1. Identificação dos domínios de simulação

Tendo em consideração a resolução espaciotemporal dos projetos de reanálises/análises e as características espaciais do domínio de alta resolução espacial pretendido (resolução espacial de 1 km e área de simulação até à batimétrica dos 300m) definiram-se três domínios de simulação. Na Figura 6 encontram-se representados estes domínios, sendo que, os domínios D1, D2 e D3 possuem resoluções de 25, 5 e 1 km, respetivamente. Estes três domínios são tridimensionais e, para cada um, foi selecionado um passo de tempo que permitiu cumprir com os requisitos de estabilidade numérica, Tabela 3. A resolução temporal dos resultados obtidos para os três domínios é de uma hora. A troca de informação entre os domínios realiza-se de forma unidirecional, o que significa que a transferência de dados ocorre num único sentido, dos domínios com resolução mais grosseira para os respetivos subdomínios.







Figura 6. Representação dos limites espaciais dos domínios definidos no modelo MM5.

№ do Domínio	Dimensão da grelha (nx – ny – nσ)	Resolução espacial (km)	Passo temporal (s)	
D1	180-170-26	25	30	
D2	201-271-26	5	10	
D3	351-77626	1	3	

Tabela 3. Principais características dos domínios espacial	is.
--	-----

3.2. Calibração do modelo MM5

3.2.1. Etapa I.A – Identificação das condições iniciais/fronteiras (CIF)

• Velocidade do vento

Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se, respetivamente, os resultados para os domínios de 25km e 5 km relativamente aos parâmetros estatísticos aplicados neste trabalho para identificação das CIF mais adequadas.

Através da Figura 7 e Figura 8 é possível verificar uma consistência nos resultados nos dois domínios de simulação, *i.e.*, as CIF que apresentam uma performance mais elevada no domínio de 25 km apresentam igualmente os melhores indicadores no domínio de 5 km. Adicionalmente, a amplitude da variação dos parâmetros estatísticos dentro de cada domínio de simulação é semelhante.

O produto de reanálises ERA-5 apresenta *i*) os valores pontuais de correlação mais elevados para estação *M1-04* e ao mesmo tempo *ii*) a menor amplitude de variação dos valores de correlação, especialmente no domínio de 5 km. Relativamente à mediana dos valores deste parâmetro estatístico, verifica-se uma elevada similitude entre os diferentes produtos de CIF ou análise/reanálise analisados.









Figura 7. Velocidade do vento: resultados para o teste de sensibilidade aos dados meteorológicos das CIF para o domínio de resolução de 25 km. a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.

No domínio de 25 km os diferentes produtos de CIF apresentam valores similares entre si, apresentando um valor de mediana próximo de 0 m/s (performance perfeita). No domínio de 5 km, e com a capacidade de simular com mais detalhe os efeitos locais, é possível verificar que o valor de mediana obtido com base nos dados do projeto ERA-I e ERA-5 apresentam um BIAS de, aproximadamente, 0.5 m/s. Nos resultados obtidos com estes dois projetos é possível observar uma elevada dicotomia no enviesamento dos resultados observados para os dois meses em análise, *i.e.*, no mês de verão a intensidade do vento tende a ser sobrestimada nas simulações, por outro lado, no mês de inverno observa-se uma subestimativa da intensidade do vento face às observações.

Relativamente aos parâmetros MAE e RMSE, embora se observe uma elevada dispersão nos resultados obtidos, é possível verificar que a utilização dos dados do projeto ERA-5 como CIF, apresenta menor dispersão possuindo as métricas estatísticas mais próximas da performance ideal.









Figura 8. Velocidade do vento: resultados para o teste de sensibilidade aos dados meteorológicos das CIF para o domínio de resolução de 5 km. a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.

Direção do vento

1649-038 LISBOA - Portugal

Tel: +351 210 924 600/1

www.lneg.pt

Na Figura 9 e Figura 10 apresentam-se os resultados para os domínios de 25 km e 5 km, respetivamente, dos parâmetros estatísticos aplicados neste trabalho para a identificação das condições iniciais/fronteiras mais adequadas. Através destas figuras, e como observado na análise dos resultados da velocidade do vento, é possível verificar uma consistência nos resultados nos dois domínios de simulação. Para esta componente, relevante para a caracterização do recurso eólico, o produto de reanálises ERA-5 apresenta igualmente os valores pontuais de correlação mais elevados (estação M1-04) e ao mesmo tempo, a amplitude de variação dos valores mais reduzida, especialmente no domínio de 5 km. Relativamente aos valores da mediana referentes à correlação para os diferentes produtos de CIF analisados, estes apresentam uma elevada similitude entre si, com exceção do produto ERA-I, que apresenta a pior performance.









Figura 9. Direção do vento: resultados para o teste de sensibilidade aos dados meteorológicos das CIF para o domínio de resolução de 25 km. a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.





17 de 38







Relativamente ao desvio sistemático observado no erro médio da direção do vento simulada (BIAS), o produto FNL permite obter nos dois domínios analisados, os valores de mediana mais reduzidos, por outro lado, este produto apresenta valores de MAE e RMSE superiores ao produto ERA-5. Adicionalmente, nos parâmetros estatísticos MAE e RMSE, as reanálises do projeto ERA-5 apresentam o valor pontual mais reduzido: estação *M1-04*. Destacam-se ainda os valores reduzidos do BIAS para os diferentes produtos que, como é possível identificar sectorialmente na Figura 11, permitem obter uma caracterização adequada da frequência de ocorrência da intensidade do vento e dos setores energeticamente mais favoráveis.

Face aos resultados apresentados nesta seção foi possível identificar que, em média, os dados das CIF do projeto ERA-5 apresentam a melhor performance na caracterização da velocidade e direção do vento nas estações disponíveis. Assim, optou-se por utilizar estas CIF nas simulações de longo termo para obtenção do novo Atlas do potencial eólico *offshore* de alta resolução.



Figura 11. a) - b) Rosa de ventos e c) -d) rosa de potência: resultados para o teste de sensibilidade aos dados meteorológicos das CIF.

3.2.2. Etapa I.B – Identificação das parametrizações físicas

Para identificação das parametrizações físicas mais adequadas, realizaram-se dezoito testes de sensibilidade que consistiram na combinação das diferentes parametrizações. Nos resultados obtidos, as diferentes combinações encontram-se identificadas de acordo com o número da parametrização (apresentada na Tabela 2) com a seguinte ordem *IMPHYS*, *IBLTYP* e *ICUPA*, Anexo II. Assim, por exemplo, o teste 243 representa a combinação das seguintes opções: *IMPHYS*: 2-Stable Precipitation, *IBLTYP*: 4-Burk-Thompson e *IUCUPA*: 3-Grell.







• Intensidade do vento

Nas Figuras 12 – 15 apresentam-se os resultados dos parâmetros estatísticos aplicados neste trabalho para identificação das parametrizações físicas mais adequadas.



Figura 12. Intensidade do vento: valores de correlação para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo: a) conjunto 2XX, b) 4XX e c) 5XX.

Na Figura 12 é possível verificar uma elevada similitude nos valores da mediana entre os diferentes conjuntos de parametrizações, apresentando valores de correlação ligeiramente superiores a 0.7. No entanto, é ainda possível verificar nesta figura, que o conjunto de parametrizações 5XX apresenta: *i*) os valores pontuais por estação mais elevados, e *ii*) sistematicamente, para a estação costeira AG-20 a pior performance neste parâmetro estatístico. Com exceção do conjunto de parametrizações 253 e 273, o conjunto de parametrizações 5XX apresenta a menor amplitude interquartil (distância entre os quartis 25% e 75%). Em sentido contrário, o conjunto de parametrizações 4XX - Figura 12b) – apresenta, em média, uma reduzida performance neste parâmetro estatístico.

Na Figura 13 é possível verificar uma elevada similitude nos valores da mediana do BIAS entre os conjuntos de parametrizações 2XX e 4XX. Neste caso, os valores são ligeiramente próximos de 0 m/s (performance perfeita). O conjunto de parametrizações 5XX apresenta um valor de mediana do BIAS de, aproximadamente, -0.5 m/s indicando que as simulações para este conjunto de parametrizações sobrestimam sistematicamente a







intensidade do vento observada nas estações usadas neste trabalho. O conjunto de parametrizações 5XX apresenta a menor amplitude interquartil, aproximadamente 0.5 m/s.



Figura 13. Intensidade do vento: valores de BIAS para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo: a) conjunto 2XX, b) 4XX e c) 5XX.

Através da Figura 14 e Figura 15 é possível verificar uma elevada correspondência no comportamento dos valores do MAE e RMSE. O valor da mediana nestes dois parâmetros estatísticos é semelhante nos diferentes conjuntos de parametrizações analisados, sendo o valor aproximadamente 1.8 m/s e 2.3 m/s, respetivamente. O conjunto de parametrizações 5XX apresenta os erros individuais por estação mais reduzidos, no entanto, para este conjunto de parametrizações é possível identificar uma distância interquartil superior ao conjunto de simulações 2XX, sugerindo uma elevada dispersão nos valores obtidos. O conjunto de parametrizações 4XX apresenta os erros individuais por estação mais reduzidada.

Tendo em conta todos os parâmetros estatísticos obtidos para as diferentes parametrizações físicas do modelo, o melhor desempenho encontra-se associado ao conjunto de parametrização 2XX. Neste sentido, e embora não exista um conjunto de opções físicas que se destaque claramente dos restantes, utilizando as informações complementares (por exemplo, valores extremos), foi selecionada a combinação 253 nesta etapa, que representa uma configuração conservadora do modelo.







Figura 14. Intensidade do vento: valores de MAE para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo: a) conjunto 2XX, b) 4XX e c) 5XX.











• Direção do vento

Nas Figuras 16 – 20 apresentam-se os resultados dos parâmetros estatísticos aplicados neste trabalho para identificação das parametrizações físicas mais adequadas na representação da direção do vento.



Figura 16. Direção do vento: valores de correlação para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo para o conjunto: a) 2XX, b) 4XX e c) 5XX.

Na Figura 16 é possível verificar bastante similitude nos valores da mediana da correlação entre os diferentes conjuntos de parametrizações, apresentando valores próximos de 0.7. No entanto, o conjunto de parametrizações 2XX apresenta, de forma sistemática, valores de correlação superiores aos restantes conjuntos. O conjunto de parametrizações 5XX apresenta a amplitude interquartil mais elevada devido a existência de duas gamas de valores de correlação: inferiores a 0.65 sobretudo no mês de inverno nas estações costeiras e localizadas perto da costa; e igual ou superior à 0.8 no mês de verão nas estações localizadas mais longe da costa Portuguesa. Estes resultados sugerem que este conjunto de parametrizações pode ser mais adequado para simular regiões *offshore* distantes da costa, onde a interação terra/oceano é menos significativa.

Relativamente ao erro médio (BIAS), o desvio sistemático verificado entre a direção do vento simulada e observada (Figura 17) apresenta, para o conjunto de parametrizações 5XX, os valores de mediana mais reduzidos, no entanto, este conjunto apresenta também alguns valores que são considerados como extremos. O conjunto de parametrizações 2XX apresenta os valores mais elevados da *i*) mediana e *ii*) distância interquartil do BIAS. Contudo, este conjunto de parametrizações é o único que não apresenta valores extremos (demonstrando consistência nos resultados obtidos ao longo dos diferentes pontos de medição) o que é extremamente relevante uma vez que se pretende caracterizar toda a região *offshore* de Portugal Continental até à batimétrica dos 300m.







No que diz respeito aos parâmetros estatísticos MAE (Figura 18) e RMSE (Figura 19), os resultados (mediana, distância interquartil, valores máximos e mínimos) para os diferentes conjuntos de parametrizações são muito semelhantes entre si. Assim, como expectável, a reduzida diferença destes parâmetros juntamente com os valores reduzidos do BIAS para os diferentes conjuntos de parametrizações, permitem obter uma caracterização adequada da frequência de ocorrência da direção do vento e dos setores energeticamente mais favoráveis, Figura 20.



Figura 17. Direção do vento: valores de BIAS para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo: a) conjunto 2XX, b) 4XX e c) 5XX











Figura 18. Direção do vento: valores de MAE para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo: a) conjunto 2XX, b) 4XX e c) 5XX.



Figura 19. Direção do vento: valores de RMSE para os testes de sensibilidade às parametrizações físicas do modelo conjunto: a) 2XX, b) 4XX e c) 5XX.

Contudo, através da Figura 20, é possível verificar que a estação CS-03 é a única que não permitiu identificar corretamente o setor energeticamente mais favorável. Nas restantes, independentemente do conjunto de parametrizações usado, é possível verificar uma elevada concordância sectorial entre a densidade energética do escoamento atmosférico simulada e observada.

Face aos resultados apresentados nesta seção foi possível identificar que as diferenças entre os conjuntos de parametrizações analisados não são muito significativas, especialmente no caso da direção do vento. No entanto,







o conjunto de parametrizações 2XX, nomeadamente a parametrização 253 do modelo, tende a apresentar os melhores indicadores para a caracterização da velocidade e direção do vento nas estações disponíveis. Assim, optou-se por utilizar esta combinação de parametrizações físicas nas simulações de longo termo para obtenção do novo Atlas do potencial eólico *offshore* de alta resolução.



e) Conjunto parametrizações 5XX: rosa de ventos [%] f) Conjunto parametrizações 5XX: rosa de potência [%] Figura 20. Rosas de vento e potência: resultados para o teste de sensibilidade as parametrizações físicas do modelo MM5.

3.2.3. Etapa I.C – Assimilação

Diversos testes de sensibilidade foram implementados para identificar o esquema de assimilação mais adequado. Os testes incidiram sobre os *i*) parâmetros de assimilação (G, T e R) e *ii*) conjuntos de dados usados para assimilação. De seguida apresenta-se os resultados dos parâmetros estatísticos para o melhor desempenho alcançado usando a assimilação de dados de satélite e/ou dados do projeto de reanálises ERA-5.

• Velocidade do vento

Na Figura 21 apresentam-se os resultados dos parâmetros estatísticos da velocidade do vento, para o teste de sensibilidade aos métodos de assimilação – Sem assimilação (SAss.), Assimilação de dados







de satélite (Ass.:G8,T4), Assimilação de dados de satélite com método FDDA (FDDA:G16, T1) e Assimilação de dados de satélite juntamente com dados do projeto reanálises ERA-5 através do método FDDA (Ass: G16, T1&FDDA-Rean). Em todos os casos, o parâmetro R é igual a 27 km.



Figura 21. Intensidade do vento: resultados para o teste de sensibilidade aos métodos de assimilação – Sem assimilação (SAss.), Assimilação de dados de satélite (Ass:G8,t4), Assimilação com método FDDA (FDDA:G16, t1), Assimilação de dados de satélite juntamente com método FDDA (Ass:G16, t1&FDDA-Rean): a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.

A Figura 21 mostra os benefícios da assimilação de dados para a geração do novo Atlas eólico offshore para Portugal. De acordo com os resultados obtidos, é possível observar uma melhoria reduzida para a assimilação baseada apenas em dados de satélite. Este resultado pode ser parcialmente explicado pelo uso de dados para apenas um nível baixo da atmosfera (10 m acima do nível médio do mar) e com uma resolução temporal de 6 horas. Por outro lado, melhorias significativas foram encontradas com a assimilação de dados baseada em informações inferidas por satélites juntamente com o projeto de reanálises ERA-5 - *Ass:G16, t1&FDDA-Rean.* Destaca-se ainda uma elevada similitude na performance dos diversos parâmetros estatísticos analisados no método FFDA com e sem assimilação de dados de satélite. Para a velocidade do vento, o método FDDA (com e sem assimilação de satélite) permite aumentar em 15% os valores de correlação e reduzir em mais de 20% os valores de MAE e RMSE, quando comparado com os resultados sem assimilação. Assim, é possível verificar que os benefícios da assimilação são principalmente notórios nos valores da correlação, MAE e RMSE. Por outro lado, no caso do BIAS, os métodos de assimilação apresentam um desvio mais significativo, face à performance perfeita. Assim, os resultados sugerem que, em média, o erro médio apresenta um desvio sistemático superior



Laboratorio Nacional de Energia « Geologia, I. A In EXCELLENCE IN RESEARCH



com os métodos de assimilação, no entanto é possível *i*) caracterizar mais adequadamente as variações do vento (correlação) e *ii*) diminuir a existência de desvios extremos (MAE e RMSE) nas simulações.

• Direção do vento

Na Figura 22 apresentam-se os resultados dos parâmetros estatísticos da direção do vento, para o teste de sensibilidade aos métodos de assimilação – Sem assimilação (SAss.), Assimilação de dados de satélite (Ass:G8,T4), Assimilação de dados de satélite com método FDDA (FDDA:G16, T1) e Assimilação de dados de satélite juntamente com dados do projeto reanálises ERA-5 através do método FDDA (Ass:G16, T1&FDDA-Rean). Em todos os casos, o parâmetro R é igual a 27 km.



Figura 22. Direção do vento: resultados para o teste de sensibilidade aos métodos de assimilação – Sem assimilação (SAss.), Assimilação de dados de satélite (Ass:G8,t4), Assimilação com método FDDA (FDDA:G16, t1), Assimilação de dados de satélite juntamente com método FDDA (Ass:G16, t1&FDDA-Rean): a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.

A Figura 22 mostra igualmente os benefícios da assimilação de dados na caracterização da direção do vento. Tal como observado para a velocidade do vento, o método FDDA com e sem assimilação de dados apresenta uma performance semelhante dos diversos parâmetros estatísticos analisados. Destacam-se ainda os valores reduzidos do BIAS para os diferentes produtos que, como é possível identificar sectorialmente na Figura 23, permite obter uma caracterização adequada da frequência de ocorrência da intensidade do vento e dos setores energeticamente mais favoráveis.









Figura 23. Rosas de vento e potência: resultados para o teste de sensibilidade aos métodos de assimilação – Sem assimilação (SAss.), Assimilação de dados de satélite (Ass:G8,t4), Assimilação com método FDDA (FDDA:G16, t1), Assimilação de dados de satélite juntamente com método FDDA (Ass:G16, t1&FDDA-Rean).

Face aos resultados apresentados nesta secção, é possível concluir que a assimilação de dados atmosféricos é instrumental para a caracterização do escoamento atmosférico de forma mais precisa. Foi ainda possível compreender que assimilação baseada no método FDDA (com e sem assimilação de dados de satélite) era a mais adequada para *i*) caracterizar adequadamente as variações da velocidade e direção do vento (correlação) e *ii*) diminuir a existência de desvios extremos (MAE e RMSE) nas simulações. Em complemento aos resultados apresentados anteriormente, importa referir que o esforço computacional no método FDDA com assimilação de dados de satélite é bastante superior (tempo de processamento da informação e simulação numérica duplica), quando comparado ao método FDDA sem assimilação. Nesse sentido, optou-se por utilizar o método de assimilação FDDA somente recorrendo-se aos dados do projeto ERA-5, isto é, sem assimilação de dados de satélite nas simulações de longo termo para obtenção do novo Atlas do potencial eólico *offshore* de alta resolução.







3.3. Validação das simulações para obtenção do novo Atlas offshore

3.3.1. Etapa II – Resultados da validação

Usando a ferramenta de avaliação desenvolvida neste projeto (*ModelCalibration_tool*) e o conjunto de dados disponíveis durante a fase de validação, foram determinados os valores de correlação, BIAS, MAE e RMSE para a fase de validação das simulações de longo termo da velocidade e direção do vento, Figura 24.



Figura 24. Resultados dos parâmetros estatísticos na fase de validação para: a) velocidade do vento, e b) direção do vento.

Para as simulações de longo termo, a mediana da velocidade do vento apresenta *i*) um valor elevado de correlação, próximo de 0.80, e *ii*) um desvio sistemático no erro médio (BIAS), reduzido, aproximadamente, -0.25 m/s. Comparando com o RMSE obtido durante a fase de calibração, observou-se um ligeiro aumento. Este resultado pode ser parcialmente explicado por algumas condições meteorológicas extremas observadas durante os três anos de dados simulados.

Uma sobrestimação sistemática da velocidade do vento foi observada durante todas as simulações (fase de calibração e validação), *i.e.*, a mediana dos valores do BIAS encontra-se sempre ligeiramente inferior a 0 m/s. No entanto, é possível verificar que a estação do Cabo Penedo Saudade apresenta um BIAS positivo (subestimação da velocidade do vento) para todas as alturas de medição.

Para a direção do vento, os valores de correlação, nos diferentes locais de medição, classificam-se como moderado/alto. A melhor performance foi identificada para as estações localizadas longe da costa portuguesa. Os





valores do BIAS são reduzidos (inferiores a 15°) demonstrando assim uma capacidade adequada para representar, em média, a direção do vento. O RMSE para direção do vento encontra-se em linha com os valores observados durante a fase de calibração. Neste caso é possível identificar *i*) a existência de valores extremos (*outliers*) significativos na distribuição do erro e *ii*) uma distância interquartil bastante reduzida. É ainda de realçar que, os erros observados na caracterização da velocidade e direção do vento, não apresentam dependência da altura de medição, o que significa que a estratificação vertical da atmosfera se encontra corretamente simulada.

3.3.2. Novo Atlas offshore: campo médio da velocidade e direção do vento e fluxo de potência incidente

Na Figura 25 apresentam-se os resultados referentes aos mapeamentos do novo Atlas do potencial eólico offshore para Portugal.

Os resultados confirmam que Portugal possui um elevado potencial eólico, sendo as regiões norte e centro as energeticamente mais favoráveis. Como esperado, devido às condições meteorológicas típicas observadas em Portugal, verifica-se uma predominância das direções de vento dos sectores norte/noroeste.

Figura 25. Representação especial do campo médio da a) velocidade do vento, b) direção do vento e c) fluxo de potência para o domínio 1x1km (100 metros acima do nível médio do mar). Resultados apresentados até à batimétrica dos 300m.

4. Notas Finais

Este relatório, apresenta os procedimentos de calibração e o novo Atlas do potencial eólico offshore para Portugal com uma resolução espacial de 1x1km, que visa descrever adequadamente os fenómenos do vento

sobre o mar e na interface terra/mar. Dada a impraticabilidade técnico-económica de identificar, em detalhe, o potencial eólico *offshore* português utilizando dados experimentais, a solução tecnicamente mais viável passa por simulações numéricas com modelos de mesoescala. Para superar a incerteza associada ao uso desses modelos, foram realizados testes de sensibilidade para calibrar o modelo de mesoescala MM5. A calibração incidiu sobre: *i*) os dados meteorológicos de condições iniciais/fronteira (CIF) para alimentar o modelo, *ii*) as parametrizações físicas disponíveis no modelo, e *iii*) os procedimentos de assimilação de dados meteorológicos.

Os resultados demostram que o procedimento de calibração é um passo crucial para melhorar a caracterização da velocidade do vento e da direção. A melhoria mais significativa foi associada ao procedimento de assimilação de dados através do método FDDA, seguida pelo conjunto de dados CIF utilizado. Por outro lado, os testes de sensibilidade para as parametrizações físicas do modelo mostraram pequenas diferenças entre as diversas opções testadas.

Utilizando a calibração mais adequada com base nos dados disponíveis, o novo Atlas eólico offshore, baseado em três anos de dados, foi obtido e validado. Durante a fase de validação, foi possível verificar que o modelo apresentou uma diminuição ligeira no seu desempenho: redução nos valores de correlação e aumento dos valores do erro quadrático médio. Este resultado pode ser parcialmente explicado por algumas condições meteorológicas extremas observadas durante o período de longo termo simulado para obtenção do novo Atlas. Contudo, em comparação com a fase de calibração, foi possível observar uma redução do viés nos resultados da validação. Assim, embora mais estudos sejam necessários para permitir sua validação completa, a adoção de procedimentos de assimilação, juntamente com a utilização de condições meteorológicas iniciais e de fronteira de produtos de reanálises mais atuais, permitem obter uma melhoria promissora na caracterização do recurso eólico, especialmente em regiões onde não se encontram disponíveis dados de vento observados.

Os resultados obtidos nesta tarefa permitiram obter a informação necessária para as restantes tarefas do projeto e o novo Atlas do potencial eólico *offshore* de alta resolução para Portugal Continental. Este Atlas, que se encontra validado por observações em pontos estratégicos da costa portuguesa, pretende apoiar a identificação de áreas adequadas para a implantação de parques eólicos *offshore*, permitindo melhorar o planeamento espacial das fontes de energia marinha em Portugal.

Referências bibliográficas

- Alvarez, Inés, Moncho Gomez-Gesteira, Maite DeCastro, e David Carvalho. 2014. «Comparison of different wind products and buoy wind data with seasonality and interannual climate variability in the southern Bay of Biscay (2000–2009)». *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 106:38–48.
- Barker, D. M., W. Huang, Y. R. Guo, A. J. Bourgeois, e Q. N. Xiao. 2004. «A Three-Dimensional Variational Data Assimilation System for MM5: Implementation and Initial Results». *Monthly Weather Review* 132(4):897–914.
- Barker, Dale, Xiang Yu Huang, Zhiquan Liu, Tom Aulign, Xin Zhang, Steven Rugg, Raji Ajjaji, Al Bourgeois, John Bray, Yongsh Eng Chen, Meral Demirtas, Yong Run Guo, Tom Henderson, Wei Huang, Hui Chuan Lin, John Michalakes, Syed Rizvi, e Xiaoyan Zhang. 2012. «The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA». *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(6):831–43.
- Bentamy, Abderrahim. 2016. Product User Manual for Wind product WIND_GLO_WIND_L4_NRT_OBSERVATIONS_012_004.
- Carvalho, D., A. Rocha, M. Gómez-Gesteira, e C. Silva Santos. 2014. «Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula». *Applied Energy* 135:234–46.
- Carvalho, D., A. Rocha, M. Gómez-Gesteira, e C. Silva Santos. 2017. «Offshore winds and wind energy production estimates derived from ASCAT, OSCAT, numerical weather prediction models and buoys A comparative study for the Iberian Peninsula Atlantic coast». *Renewable Energy* 102:433–44.
- Costa, P. 2004. «Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental». University of Lisbon.
- Costa, P. e A. Estanqueiro. 2004. «Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental».
- Costa, Paulo, Pedro Miranda, e Ana Estanqueiro. 2006. «Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas». P. 9 em *Proceedings of the European Wind Energy Conference 2006*. Athens, Greece.
- Daley, Roger. 1993. *Atmospheric Data Analysis*. 2.ª ed. editado por C. U. Press. Cambridge University Press.
- ECMWF. 2018. «ERA5 data documentation». Obtido 13 de Dezembro de 2018 (https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation).
- Grell, Georg, Jimy Dudhia, e David R. Stauffer. 1994. A description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5).
- Hoke, James E. e Richard A. Anthes. 1976. «The Initialization of Numerical Models by a Dynamic-Initialization Technique». *Monthly Weather Review* 104(12):1551–56.
- Huang, Xiang-Yu, Qingnong Xiao, Dale M. Barker, Xin Zhang, John Michalakes, Wei Huang, Tom Henderson, John Bray, Yongsheng Chen, Zaizhong Ma, Jimy Dudhia, Yongrun Guo, Xiaoyan Zhang, Duk-Jin Won, Hui-Chuan Lin, e Ying-Hwa Kuo. 2009. «Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results». *Monthly Weather Review* 137(1):299–314.
- Instituto Hidrográfico. 2017. «Marinha Portuguesa».
- Kuo, Ying-Hwa e Yong-Run Guo. 1989. «Dynamic Initialization Using Observations from a Hypothetical Network of Profilers». *Monthly Weather Review* 117(9):1975–98.
- Lorenz, Torge e Idar Barstad. 2013. «Wind climatology in the North Sea with WRF». 128(10):18053.
- Peng, Ge, Huai-Min Zhang, Helmut P. Frank, Jean-Raymond Bidlot, Masakazu Higaki, Scott Stevens, e William R. Hankins. 2013. «Evaluation of Various Surface Wind Products with OceanSITES Buoy Measurements». Weather and Forecasting 28(6):1281–1303.
- Puertos del Estado. 2017. «Ministry of Public Works».
- Santos, Duarte, Paula Costa, Paulo Justino, João Silva, António Couto, Teresa Simões, e Ana Estanqueiro. 2017. OFFSHOREPlan: D2.1 Methodologies to assess the renewable offshore resources.
- Sharp, Ed, Paul Dodds, Mark Barrett, e Catalina Spataru. 2015. «Evaluating the accuracy of CFSR

reanalysis hourly wind speed forecasts for the UK, using in situ measurements and geographical information». Renewable Energy 77:527-38.

Soukissian, Takvor H. e Anastasios Papadopoulos. 2015. «Effects of different wind data sources in offshore wind power assessment». Renewable Energy 77:101-14.

Stauffer, David R. e Nelson L. Seaman. 1990. «Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data». Monthly Weather Review 118(6):1250-77.

Troen, Ib e Erik Lundtang Petersen. 1989. European Wind Atlas.

Tummuri, S. 2008. «Methodology of regional climate studies for West Texas and its importance». 289.

Wang, Aihui e Xubin Zeng. 2012. «Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau». 117(July 2011):1-12.

1649-038 LISBOA - Portugal

Tel: +351 210 924 600/1

www.lneg.pt

Anexo I - Reinício diário e Mensal das simulações

Adicionalmente aos testes de sensibilidade realizados e que foram detalhadamente apresentados no corpo do presente relatório, durante este projeto analisou-se igualmente o impacto do tempo contínuo de integração das simulações considerando duas escalas reinício: i) diário e ii) mensal, Figura I.1.

Figura I. 1. Representação esquemática do tempo contínuo de integração das simulações: laranja – mensal; cinzento – diário.

Nas figuras I.2 e I.3 apresentam-se os resultados dos parâmetros estatísticos aplicados neste trabalho para identificação das parametrizações físicas mais adequadas na representação da direção do vento.

Figura I. 2. Velocidade do vento - Resultados para o teste de sensibilidade ao reinício do modelo mensal (RM) e diário (RD) para o domínio de resolução de 25 e 5 km: a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.

Figura I. 3. Direção do vento - Resultados para o teste de sensibilidade ao reinício do modelo mensal (RM) e diário (RD) para o domínio de resolução de 25 e 5 km: a) Correlação, b) BIAS, c) MAE e d) RMSE.

Os resultados da Figura I. 2 e da Figura I. 3 demonstram um impacto significativo do tempo consecutivo de integração. Este impacto pode ser parcialmente associado a propagação dos erros durante o tempo de integração do modelo que, no caso das simulações com reinício diário, é bastante atenuada. Assim, é possível verificar uma melhoria bastante significativa na performance dos parâmetros estatísticos apresentados com o reinício diário, especialmente no que diz respeito a correlação e valores extremos (diminuição do MAE e RMSE). Esta conclusão é também válida na caracterização *i*) da frequência de ocorrência da direção do vento onde é possível verificar que as simulações com o reinício diário apresentam sistematicamente valores mais próximos dos registos observados nas respetivas estações. É possível ainda identificar que a amplitude da dispersão dos parâmetros estatísticos analisados é quase sempre inferior nas simulações com reinício diário indicando uma maior consistência nos resultados ao longo das diferentes estações.

A performance dos parâmetros estatísticos para a velocidade do vento indica que o mês de verão é, em média, mais próxima do valor perfeito. Este resultado pode ser parcialmente explicado pelas condições atmosféricas típicas dos dois meses em análise na região em estudo, uma vez que o mês de verão é caracterizado por fenómenos meteorológicos locais e com maior grau de previsibilidade.

Anexo II – Parametrizações físicas do modelo: identificação dos testes de sensibilidade

Na II.1 apresenta-se de forma detalhada os diversos testes de sensibilidade realizados às parametrizações físicas do modelo MM5.

Tabela II.1. Identificação dos testes de sensibilidade realizados às parametrizações físicas do modelo.				
Conjunto	IMPHYS	IBLTYP	ICUPA	Nº simulação
	2-Stable Precipitation	4-Burk-Thompson	3-Grell	1
	2-Stable Precipitation	4-Burk-Thompson	6-Kain-Fritsch	2
222	2-Stable Precipitation	5-Eta	3-Grell	3
288	2-Stable Precipitation	5-Eta	6-Kain-Fritsch	4
	2-Stable Precipitation	7-Gayo-Seaman	3-Grell	5
	2-Stable Precipitation	7-Gayo-Seaman	6-Kain-Fritsch	6
	4-Simple ice	4-Burk-Thompson	3-Grell	7
	4-Simple ice	4-Burk-Thompson	6-Kain-Fritsch	8
	4-Simple ice	5-Eta	3-Grell	9
488	4-Simple ice	5-Eta	6-Kain-Fritsch	10
	4-Simple ice	7-Gayo-Seaman	3-Grell	11
	4-Simple ice	7-Gayo-Seaman	6-Kain-Fritsch	12
	5-Mixed-phase	4-Burk-Thompson	3-Grell	13
	5-Mixed-phase	4-Burk-Thompson	6-Kain-Fritsch	14
F	5-Mixed-phase	5-Eta	3-Grell	15
SXX	5-Mixed-phase	5-Eta	6-Kain-Fritsch	16
	5-Mixed-phase	7-Gayo-Seaman	3-Grell	17
	5-Mixed-phase	7-Gayo-Seaman	6-Kain-Fritsch	18

www.lneg.pt

