

**CARATERIZAÇÃO DO RECURSO RENOVÁVEL OFFSHORE PARA O PLANEAMENTO DA  
INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS MARINHAS NA COSTA PORTUGUESA****Simões T., Couto A., Justino P., Estanqueiro A.**

Unidade de Energias Renováveis e Integração de Sistemas de Energia, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038, Lisboa, Portugal, [teresa.simoese@lneg.pt](mailto:teresa.simoese@lneg.pt), [antonio.couto@lneg.pt](mailto:antonio.couto@lneg.pt), [paulo.justino@lneg.pt](mailto:paulo.justino@lneg.pt), [ana.estanqueiro@lneg.pt](mailto:ana.estanqueiro@lneg.pt)

<https://doi.org/10.34637/cies20201.3075>

**RESUMO**

As energias renováveis marinhas (*Offshore*) apresentam um grande potencial de exploração em Portugal, por um lado devido à situação geográfica do país, com a sua área extensa de costa e uma das maiores zonas económicas exclusivas – e por outro, pelos indicadores de existência de elevado recurso energético, cujo estudo tem vindo a ser efetuado nos últimos anos. Não obstante esses estudos, persistem várias barreiras a ultrapassar para a disseminação das tecnologias de energias renováveis com maior aplicabilidade em Portugal – eólica *offshore* e ondas. Neste contexto, surgiu o projeto *OffshorePlan* - Planeamento da instalação de energias renováveis *offshore* em Portugal, no qual se desenvolveu uma metodologia de planeamento da instalação de sistemas de energias renováveis *offshore* – eólica *offshore* e ondas – onde se inclui o refinamento e a validação dos mapeamentos do potencial eólico e das ondas existentes. Neste trabalho apresentam-se as metodologias desenvolvidas para o mapeamento do recurso eólico *offshore* e das ondas, e a sua validação com dados experimentais obtidos com base em sensores LiDAR e bóias hidrográficas. Os resultados constituem atualmente os Atlas do potencial eólico *offshore* e de energia das ondas em Portugal.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Eólica Offshore, Energia das Ondas, LiDAR, Modelação de Mesoescala, recurso energético renovável.

**ABSTRACT**

Marine renewable energies have great potential for exploitation in Portugal, on one hand, due to the country's geographical situation, with its extensive coastline and one of the largest exclusive economic zones – and, on the other hand, due to the existence of high energy resources, whose study has been carried out in recent years. Despite these studies, several barriers still remain for the dissemination of renewable energy technologies with greater applicability in Portugal - offshore wind and waves. In this context, the OffshorePlan project - Planning the installation of offshore renewable energies in Portugal emerged, in which a methodology for planning the installation of marine renewable energy systems - offshore wind and waves - was developed, including the refinement and validation of mappings wind potential and existing waves. This work presents the methodologies developed for the mapping of offshore wind resources and waves, and their validation with experimental data obtained based on LiDAR sensors and hydrographic buoys. Currently, the results constitute the offshore wind and wave energy potential Atlases for Portugal.

**KEYWORDS:** Offshore wind energy, Wave energy, LiDAR, Mesoscale modelling, renewable resource assessment.

## INTRODUÇÃO

No atual contexto de transição energética em que Portugal se encontra, em linha com os restantes estados da União Europeia, as energias renováveis *offshore*, em especial a energia eólica *offshore*, representam um contributo expressivo para o cumprimento dos objetivos definidos pela Europa. Em 2019 foram publicados o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 e o Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica 2050. Em ambos os documentos são estabelecidos objetivos e metas ambiciosos para o setor das renováveis, sendo a Energia Eólica um dos principais atores. Sendo Portugal um país onde a capacidade renovável tem crescido de forma marcante desde os anos 90, no momento atual, uma das apostas refere-se à Energia Eólica *Offshore*. No entanto, apesar da elevada implementação da tecnologia eólica convencional – caso *onshore* – a tecnologia *offshore* ainda apresenta limitações técnicas, em particular para zonas de águas profundas, bem como custos de instalação, operação e manutenção elevados, acrescendo ainda os custos associados à realização de estudos de avaliação do potencial eólico fiáveis (Carvalho et al. 2014b, 2017), (Standridge C. et al., 2012) especialmente associados às campanhas experimentais de medição do vento. Da mesma forma, o desenvolvimento da área da energia das ondas conta ainda com barreiras especialmente relacionadas com a tecnologia e os custos associados à sua implementação. A grande variedade de sistemas já desenvolvidos, com vários tipos de estruturas, não chegou ainda a um dimensionamento ótimo e comercialmente viável. Neste contexto, e por forma permitir um planeamento ao nível nacional que permita desenvolver de forma eficaz este tipo de tecnologias, carece, obrigatoriamente, de uma caracterização do recurso renovável marinho com precisão. Assim, o LNEG desenvolveu entre 2017 e 2020 um projeto que visa contribuir para ultrapassar num futuro próximo as barreiras ao desenvolvimento das energias renováveis *offshore* e acelerar a sua disseminação na costa continental portuguesa, o projeto OffshorePlan – Planeamento do Aproveitamento das Energias Renováveis Offshore em Portugal. Neste artigo, apresentam-se as metodologias desenvolvidas para a avaliação do recurso renovável marinho, as quais conduziram aos Atlas do Potencial Eólico Offshore e ao Atlas de Energia das Ondas. Os Atlas do recurso *offshore* e das ondas obtidos permitem a identificação de áreas adequadas para a implantação de centrais servindo de apoio ao ordenamento do território das fontes de energia marítima para a área marítima de Portugal Continental, tendo como objetivo final o desenvolvimento de um plano estratégico para a exploração de uma forma sustentável destas tecnologias.

## AValiação DO POTENCIAL RENOVÁVEL MARINHO

### Energia Eólica Offshore

O principal desafio na avaliação do recurso eólico consiste na obtenção de dados experimentais, uma vez que a instalação de um mastro meteorológico para batimetrias superiores a 30m apresenta custos elevados (Standridge C. et al., 2012). Da mesma forma, as observações do vento inferidas por satélites tendem a apresentar i) falhas de dados e/ou dados com qualidade reduzida, e ii) baixa resolução espacial/temporal. Assim, para uma caracterização rigorosa do recurso eólico, sem recorrer a uma extensa e onerosa rede de estações anemométricas ou boias, é necessário o uso de modelos numéricos de mesoescala. Estes têm a capacidade de descrever fenómenos atmosféricos importantes para o setor eólico, como turbulência atmosférica, estratificação e processos de brisa marítima-terrestre. Vários estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de produzir atlas eólicos regionais ou nacionais, sendo o mais popular o Atlas eólico europeu (Troen and Petersen, 1989). A fim de melhorar o desenvolvimento do Atlas de vento, vários estudos surgiram com métodos matemáticos mais robustos para lidar com fenómenos de turbulência local (Mortensen, 2014), (Frank et al, 2001), (Tammelin et al, 2001). Esses estudos foram matematicamente focados em áreas regionais específicas, tendo-se concluído que os modelos numéricos de última geração usados para fins de previsão do tempo são uma ferramenta valiosa para produzir um Atlas eólico em escala regional/ nacional com boa precisão. Uma vez que o primeiro Atlas do Potencial Eólico para Portugal foi produzido em 2006, e várias melhorias foram observadas desde então nas metodologias desenvolvidas, neste trabalho, apresenta-se um Atlas de vento de alta resolução espacial (1 km) baseado em simulações numéricas de mesoescala (modelo MM5 - "*Fifth Generation Mesoscale Model*") (Grell et al. 1995)). O modelo é calibrado por meio de testes de sensibilidade usando as métricas estatísticas comuns e os dados simulados/observados. Os dados meteorológicos observados foram obtidos a partir de diferentes sistemas de medição, nomeadamente, boias oceanográficas, sistemas flutuantes de *Light Detection and Ranging* (LiDAR) horizontais e verticais usando diferentes alturas acima do nível do mar e mastros anemométricos costeiros.

### Energia das Ondas

A energia das ondas pode ser considerada como uma das mais promissoras fontes de energia nas zonas costeiras da Europa. Admitindo-se que somente uma fração da ordem dos 10 a 15% do recurso estimado para águas profundas pode ser convertida em energia elétrica, chega-se a um valor médio de potência anual de 20 GW, correspondendo a 175 Twh/ano de produção de energia se fossem aproveitadas todas as costas dos países da União Europeia (ETSU e CCE, 1992)). O recurso é mais abundante nas zonas costeiras dos países voltados para o oceano Atlântico.

É de fundamental importância a avaliação do recurso para o projeto de sistemas de extração de energia das ondas. Esta avaliação permite-nos calcular a potência associada aos diversos estados do mar, assim como a frequência com que estes ocorrem. Antes que se proceda ao projeto detalhado e construção do dispositivo para o aproveitamento da energia das ondas, há que se proceder a uma correta avaliação do recurso no local, não somente em termos de potências como também em termos dos parâmetros associados ao estado do mar que podem ter interesse para o dimensionamento do sistema. Para a avaliação do recurso das ondas recorreu-se a base de dados existentes no LNEG, nomeadamente, Ondatlas e a dados de boias oceanográficas adquiridos ao Instituto Hidrográfico. Os dados de agitação marítima, correspondem a altura significativa, período de pico, médio de zeros ou/e de energia, a potência (ou fluxo de energia), a direção média das ondas, etc. Com base nestes parâmetros que são obtidos para vários instantes no tempo que podem perfazer vários anos de dados, é possível determinar estatísticas de agitação marítimas. São estas estatísticas que definem o clima e o recurso de energia das ondas num determinado local. Neste projeto o mapeamento do recurso energético das ondas resulta do acoplamento da informação de um modelo numérico – MAR3G-Ondatlas, com os dados observados - boias do Instituto Hidrográfico (IH), Leixões, Sines e Faro (10 anos), e outras boias do IH, Aveiro e Figueira da Foz (< 5 anos).

### MODELAÇÃO DE MESOSCALA: METODOLOGIA E ASPETOS RELEVANTES PARA A AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO

Os modelos numéricos de mesoescala resolvem as equações diferenciais que traduzem as leis físicas descrevendo o 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.

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. Para a obtenção de um Atlas do potencial eólico, estes modelos são usualmente alimentados por dados meteorológicos, usualmente designados por condições iniciais e de fronteira – CIF, obtidos através de projetos de reanálises/análises. 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.

#### Condições iniciais e de fronteira (CIF)

Uma das principais fontes de erro e incerteza na avaliação do recurso eólico, baseada em modelos numéricos de mesoescala, deve-se às CIFs que alimentam o modelo (Soukissian e Papadopoulos 2015), uma vez que a precisão destes dados tem um impacto crucial nos resultados finais na avaliação do recurso eólico (Carvalho et al. 2014b, 2017). Assim, realizaram-se testes de sensibilidade para selecionar as CIFs mais adequadas para a região em estudo, com base nos seguintes conjunto de projetos reanálise/análise pré-selecionados de acordo com as suas características (Carvalho et al. 2014a): NCEP-R2, CFSR, ERA-Interim, GFS, FNL e ERA-5.

#### Assimilação de dados no modelo de mesoescala

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, conseqüentemente, 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 numérico 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. Esta combinação de dados observados *versus* prognóstico de modelo atmosférico é conhecida por “*first guess*” ou “*background forecast*” e permite obter a melhor representação possível do estado da atmosfera nesse instante de tempo. As observações podem vir de diversos sistemas de medição, por exemplo, estações e balões meteorológicos, boias oceanográficas, informação derivada por satélite, ou mesmo, oriunda de produtos específicos conhecidos por reanálises atmosféricas, se disponibilizadas com elevada resolução espacial e temporal. Uma descrição detalhada dos procedimentos de assimilação pode ser consultada em (Santos et al. 2017; Couto et al. 2019b).

#### Metodologia de avaliação do recurso eólico marinho

O novo Atlas do potencial eólico *offshore* para Portugal, apresentado neste trabalho, foi obtido com uma resolução espacial de 1 km e resolução temporal de uma hora e baseia-se em simulações numéricas utilizando o modelo MM5. Numa primeira esta o modelo foi calibrado através de testes de sensibilidade para identificação de: etapa I.A) conjunto de dados meteorológicos das condições iniciais e de fronteira (CIF), etapa I.B) parametrizações numéricas - opções físicas, e etapa I.C) procedimentos de assimilação de dados meteorológicos para lidar com os fenómenos do escoamento atmosférico nos níveis mais baixos da atmosfera, interação terra/mar. No final, com base na melhor

configuração, simularam-se três anos consecutivos para obtenção do novo Atlas eólico *offshore* e procedeu-se a sua validação - etapa II, Fig. 1.

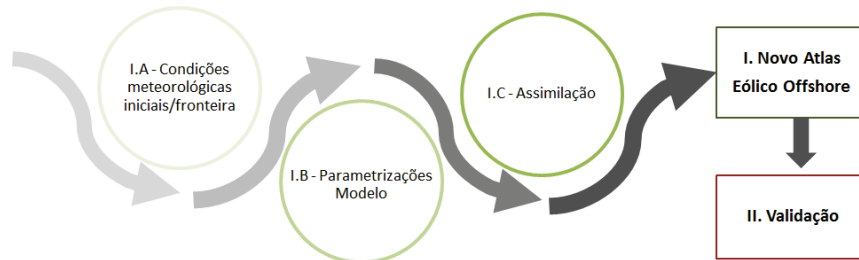


Fig.1 Principais passos para obtenção do novo Atlas eólico *offshore* de alta resolução.

Para identificação das melhores opções em cada uma das etapas anteriores, aplicaram-se as métricas estatísticas comuns no setor eólico (por exemplo, viés - *BIAS*, o erro quadrado médio normalizado - *root mean square error (RMSE)* e a correlação de Pearson) usando dois meses de dados meteorológicos observados e simulados pelo modelo numérico em alguns locais *offshore* na costa portuguesa. Os dados observados foram obtidos de diferentes sistemas de medição, nomeadamente, i) bóias oceanográficas perto da costa portuguesa, e ii) mastros anemométricos costeiros e sistemas LiDAR existentes nas bases de dados do Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

### METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO RECURSO DAS ONDAS

Os dados de agitação marítima necessários à avaliação do recurso podem ser obtidos com base em modelos numéricos, ou recorrendo-se a boias ondógrafo, transdutores de pressão, satélites (radares), transdutores resistivos ou capacitivos. Para os modelos numéricos a área para a qual se pretende obter dados é discretizada numa malha na qual temos condições de agitação iniciais e de fronteira, assim como a batimetria da zona. Os dados obtidos são espectros de agitação marítima direcionais. As boias ondógrafo medem a elevação da superfície livre do mar, por intermédio de acelerómetros. Com base em software específico são obtidos espectros de agitação marítima que poderão ser direcionais ou não direcionais. Uma vez obtidos os espectros e por intermédio dos cálculos apresentados seguidamente no texto obtêm-se parâmetros de agitação marítima como sejam a altura significativa, período de pico ou/e de energia das ondas, a potência (ou fluxo de energia) das ondas, a direção média para as ondas, etc. Com base nestes parâmetros que são obtidos para vários instantes no tempo que podem perfazer vários anos de dados é possível determinar estatísticas de agitação marítimas, definidas posteriormente no texto. São estas estatísticas que definem o clima e o recurso de energia das ondas num determinado local.

#### Cálculo dos parâmetros das ondas

O comportamento local das ondas é descrito pelo espectro direcional de um estado do mar  $S(f, \theta)$  que especifica como a energia da onda, que é proporcional à variância da elevação da superfície do mar, é distribuída em termos de frequência  $f$  e direção  $\theta$ . Este espectro é geralmente resumido pela altura significativa da onda  $H_s$ , período de pico  $T_p$  e parâmetros de direção. O espectro de frequência que descreve a distribuição de energia no domínio da frequência está relacionado com o espectro direcional por:

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (1)$$

em que  $f$  é a frequência e  $\theta$  é a direção das ondas incidentes. Para que se possam calcular os parâmetros da onda com base em  $S(f, \theta)$  e  $S(f)$  é necessário recorrer-se a momentos espectrais definidos como,

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (2); \text{ ou } m_n = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta df \quad (3)$$

Alguns parâmetros das ondas e parâmetros energéticos podem ser dados por:

$$H_s \approx 4\sqrt{m_0}; \quad (4)$$

em que  $H_s$  é a altura significativa.

$$T_p = \frac{1}{f_p}; \quad (5)$$

em que  $f_p$  é a frequência de pico, e  $T_p$  é o período de pico.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}; \quad (6)$$

em que  $T_e$  é o período de energia. O fluxo de energia ou nível de potência por unidade de comprimento de crista é dado por:

$$P = \rho g \int_0^\infty c_g(f, h) S(f) df; \quad (7)$$

ou para um espectro direcional, por:

$$P = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} c_g(f, \theta, h) S(f, \theta) d\theta df; \quad (8)$$

onde  $\rho$  é a densidade da água do mar,  $h$  a profundidade no local e  $g$  a aceleração da gravidade e  $c_g$  a celeridade de grupo. Relativamente à direção das ondas tem-se que a direção média da onda é calculada por:

$$\bar{\theta}_w = \arctang \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \sin(\theta) d\theta df}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cos(\theta) d\theta df}; \quad (9)$$

e a direção média de potência por:

$$\bar{\theta}_p = \arctang \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) c_g(f, \theta, h) \sin(\theta) d\theta df}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) c_g(f, \theta, h) \cos(\theta) d\theta df}; \quad (10)$$

E quando os dados direcionais são obtidos a partir de direções médias por banda de frequência,  $\theta_b$ , e  $S(f)$ , tem-se,

$$\bar{\theta}_w = \arctang \frac{\int_0^\infty S(f) \sin(\theta_b) df}{\int_0^\infty S(f) \cos(\theta_b) df} \quad (11)$$

$$\bar{\theta}_p = \arctang \frac{\int_0^\infty S(f) c_g(f, h) \sin(\theta_b) df}{\int_0^\infty S(f) c_g(f, h) \cos(\theta_b) df} \quad (12)$$

As estatísticas descrevendo o clima de ondas são os valores médios dos parâmetros,  $H_s, T_p, T_e$  e  $P$  e direção  $\bar{\theta}_w$  e  $\bar{\theta}_p$  e as estatísticas bivariadas (diagramas de dispersão)  $(H_s, T_p), (H_s, T_e), (H_s, T_z)$  e  $(H_s, \bar{\theta}_w)$ . Por vezes também se calculam histogramas para  $H_s, T_e$  e  $T_p, P$  e  $\theta_b$ .

## DESENVOLVIMENTO DO ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE

### Etapa I - Calibração do modelo

Nesta secção, apresenta-se de forma resumida os resultados do passo I.A – identificação das CIFs meteorológicas mais adequadas, Fig. 2. Os restantes passos da calibração podem ser encontrados em (Couto et al. 2019a).

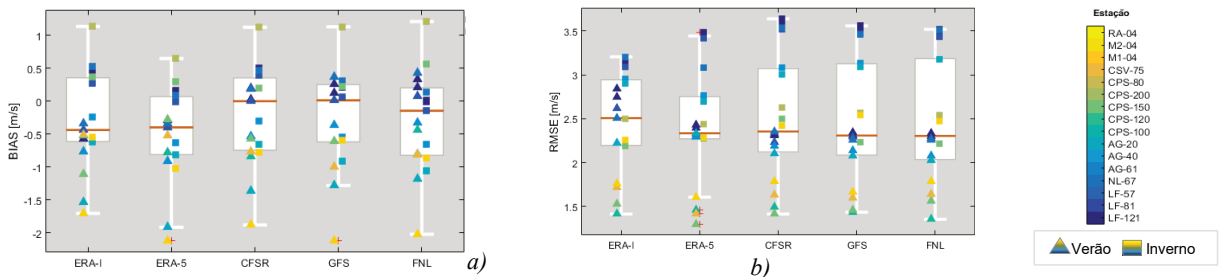


Fig. 2 - Velocidade do vento: resultados para o teste de sensibilidade aos dados meteorológicos das CIFs. a) viés (BIAS) e b) RMSE para os dois meses de teste. As cores representam as diferentes estações em análise.

Na Fig. 2 é possível verificar que o valor de mediana obtido com base nos dados do projeto ERA-I e ERA-5 apresentam um viés (BIAS) de, aproximadamente, 0,5 m/s. Nos resultados obtidos com estes dois projetos observa-se 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, e, no mês de Inverno observa-se uma subestimação da intensidade do vento face às observações. No parâmetro RMSE, embora exista dispersão nos resultados obtidos, verifica-se que a utilização dos dados do projeto ERA-5, apresenta os valores mais próximos da

*performance* ideal. Face a estes resultados foi possível concluir que, em média, os dados 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 CIFs nas simulações de longo termo para obtenção do Atlas do potencial eólico.

Etapa II - Validação do modelo

Usando as opções mais adequadas em cada passo da calibração e o conjunto de dados disponíveis foram determinados os valores da correlação de Pearson, do viés (BIAS) e RMSE para a etapa de validação das simulações de longo termo da velocidade e direção do vento, Fig. 3.

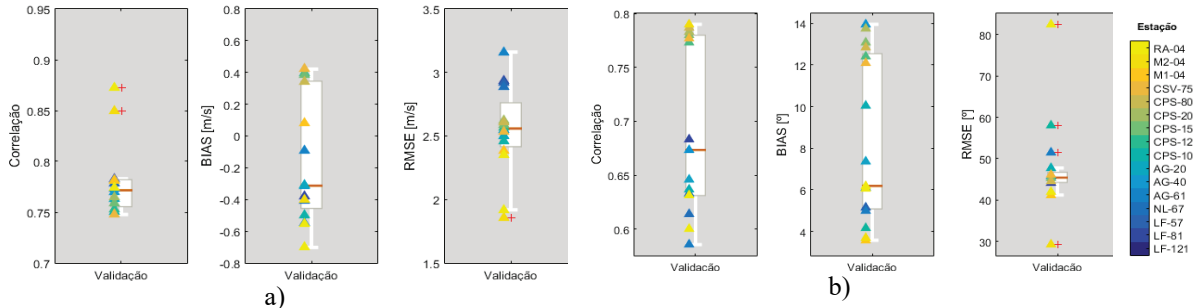


Fig. 3. Resultados dos parâmetros estatísticos para: a) velocidade do vento, e b) direção do vento.

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 erro sistemático (BIAS) reduzido, aproximadamente, -0.25 m/s. É possível observar uma sobrestimação sistemática da velocidade do vento, i.e., a mediana dos valores do BIAS encontra-se sempre ligeiramente inferior a 0m/s. No entanto, é possível verificar que a estação do Cabo Penedo Saudade (CPS) 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 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. A análise do RMSE permite 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 são dependentes da altura de medição, o que significa que a estratificação vertical da atmosfera se encontra corretamente simulada.

Novo Atlas do potencial eólico offshore

Na Fig. 4 apresentam-se os resultados referentes aos mapeamentos do novo Atlas eólico offshore para Portugal.

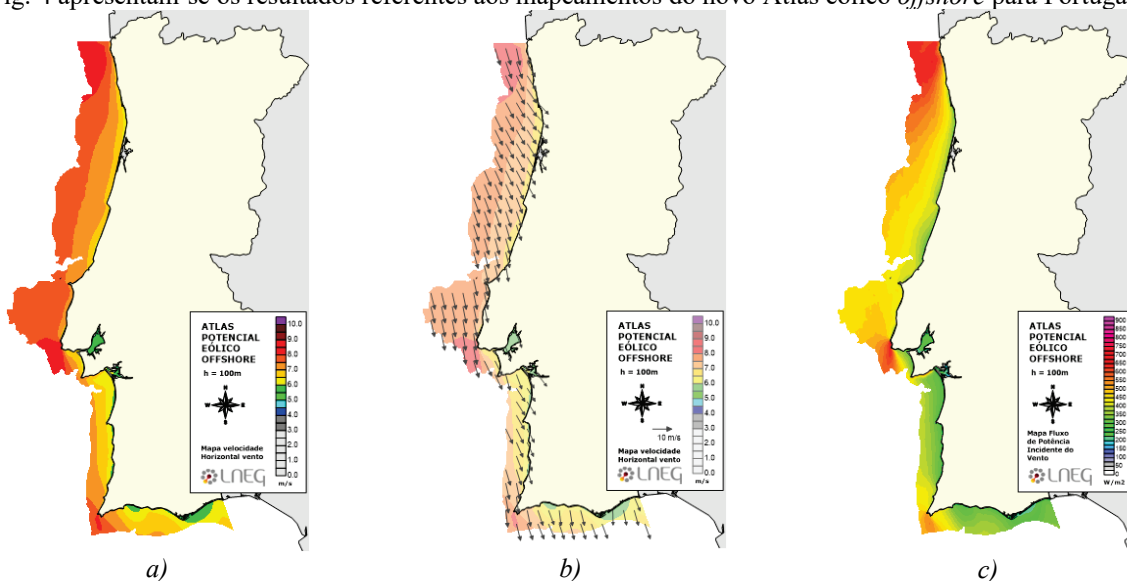


Fig. 4. Representação espacial do campo médio, até à batimétrica dos 300m, da a) velocidade e b) direção do vento e c) fluxo de potência para o domínio 1x1km (100 metros acima do nível médio do mar).

Os resultados demonstrados através da representação espacial confirmam que Portugal possui um elevado potencial eólico. As regiões norte e centro são 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.

DESENVOLVIMENTO DO ATLAS DE ENERGIA DAS ONDAS

Com base nos dados medidos, foram obtidos diagramas de dispersão (em permilagem) para um período de 10 anos para os pontos offshore (Leixões: Lat = 41° 19' 00" N; Long = 8° 59' 00" W; Prof = 83 metros, Sines: Lat = 37° 55' 16" N; Long = 8° 55' 44" W; Prof = 97 metros, Faro: Lat = 36° 54' 17" N; Long = 7° 53' 54" W; Prof = 93 metros) e para a Figueira da Foz (Lat = 40° 11' 24" N; Long = 9° 9' 0" W; Prof = 92 metros) para um período de 4 anos. Para o período de 10 anos também foram obtidos diagramas de dispersão mensais, de Janeiro a Dezembro. No processamento desta informação houve a necessidade de ter em atenção que em situações de estado do mar tempestuoso as medidas das boias hidrográficas são espaçadas em intervalos de tempo curtos da ordem dos 20 a 30 minutos e para situações de agitação marítima regulares as medidas são espaçadas de 3 em 3 horas. Os registos de elevação da superfície livre do mar têm, usualmente, uma duração de 20 minutos. As células dos diagramas de dispersão são obtidas para classes de  $H_s$  com um intervalo de 0.5m e para classes de  $T_{m02}$  ( $T_z$  espectral) ou  $T_e$  com um intervalo de 1s. Estes diagramas fornecem a distribuição bivariada (em permilagem) dos estados do mar pelas células  $[H_s, T_{m02}]$ , ou,  $[H_s, T_e]$ . Os valores de  $H_s$ ,  $T_{m02}$  ou  $T_e$  presentes nos diagramas de dispersão dizem respeito ao valor superior da respetiva classe, assim, para os diagramas de dispersão, um valor de 8s para  $T_{m02}$  representará a classe  $[7,8]$ s. Seguidamente apresentam-se diagramas de dispersão (frequência de ocorrência) anuais para as boias de Leixões, Sines e Faro - 10 anos de dados (Fig. 5). Conjugando os dados do Ondatlas com os dados das boias do Instituto Hidrográfico foi possível um mapeamento de base estatística da distribuição espacial da energia das ondas ao longo da costa portuguesa (Fig. 5d)).

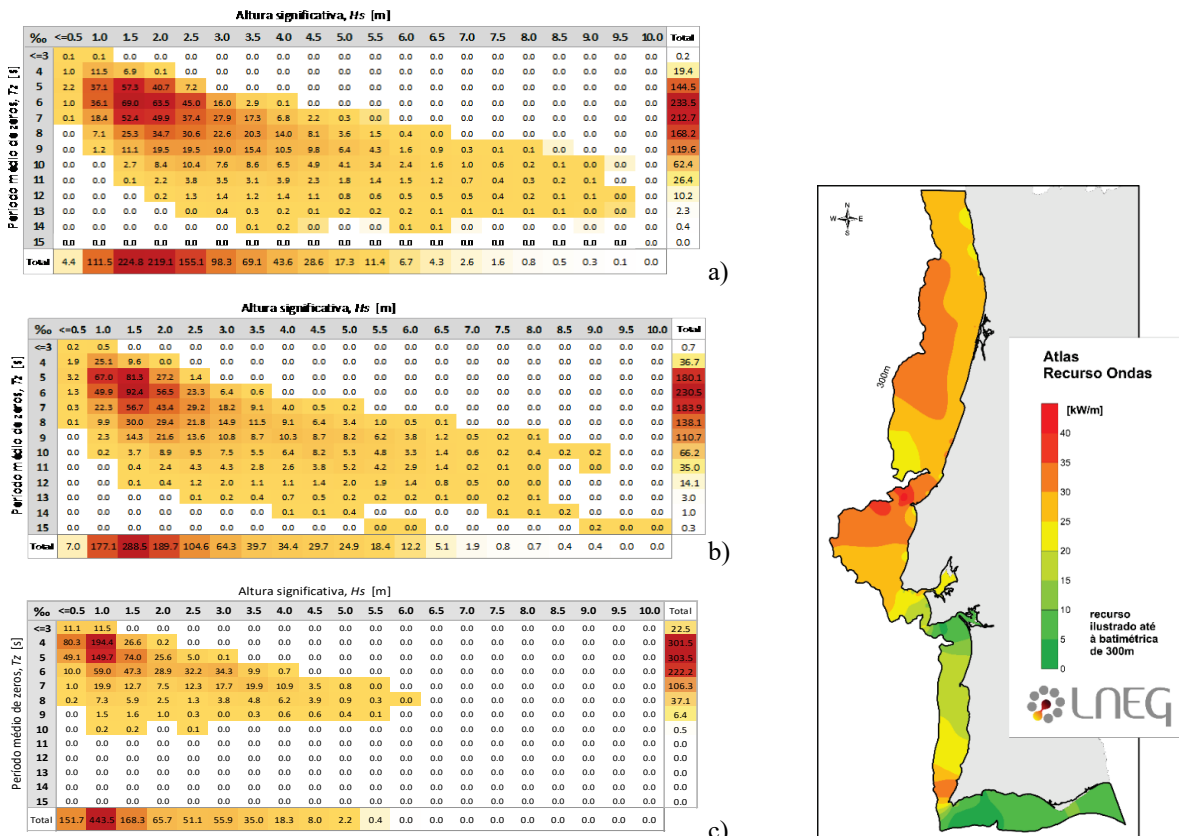


Fig. 5. Diagrama de frequência de ocorrência (permilagem): a) Boia de Leixões - 10 anos, prof. 83m; b) Boia de Sines - 10 anos, prof. 97m; e c) Boia de Faro - 10 anos, prof. 93m. d) mapeamento de base estatística da distribuição espacial da energia das ondas ao longo da costa portuguesa.

CONCLUSÕES

Portugal tem um grande potencial de exploração das Energias *Offshore*, em particular da Energia Eólica offshore. O trabalho apresentado neste artigo, foi desenvolvido no âmbito do projeto OffshorePlan e permitiu o desenvolvimento e validação do Atlas do Potencial Eólico Offshore e do Atlas de Energia das Ondas. O Atlas do Potencial Eólico Offshore foi desenvolvido com recurso ao modelo de mesoscala MM5, tendo-se desenvolvido testes de sensibilidade com vista à calibração deste modelo e de forma a minimizar a incerteza associada ao uso deste tipo de modelos. A calibração incidiu sobre: i) os dados meteorológicos de condições iniciais/fronreira (CIF) para alimentar o modelo,

ii) as parametrizações físicas disponíveis no modelo, e iii) os procedimentos de assimilação de dados meteorológicos. Os resultados demonstram 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. Após o procedimento de calibração, foi possível obter o novo Atlas eólico *offshore*, baseado em três anos de dados. Durante a etapa de validação, foi possível verificar que o modelo reduz, ligeiramente, o seu desempenho: redução nos valores de correlação e aumento dos valores da raiz do erro médio quadrático. 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 etapa 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 das condições meteorológicas iniciais e de fronteira mais atuais, permitem obter uma melhoria promissora na caracterização do recurso eólico, especialmente em regiões onde não se encontram disponíveis dados de vento observados. Para a energia das ondas a metodologia desenvolvida permitiu obter uma estimativa para o atlas de energia das ondas com base em dados numéricos e experimentais, apresentando-se como resultado um mapeamento de base estatística da distribuição espacial da energia das ondas ao longo da costa portuguesa, bem como as tabelas de dispersão para determinados pontos na mesma costa.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Projeto OffshorePlan, (POSEUR – 01-1001-FC-000007), co-financiado pelo Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (POSEUR), através do Portugal 2020 e do Fundo de Coesão.

#### REFERENCIAS

Alvarez I, Gomez-gesteira M, Carvalho D (2014) Deep-Sea Research II Comparison of different wind products and buoy wind data with seasonality and interannual climate variability in the southern Bay of Biscay ( 2000 – 2009 ). Deep Res Part II 106:38–48. doi: 10.1016/j.dsr2.2013.09.028

Carvalho D, Rocha A, Gómez-gesteira M, Santos CS (2014a) 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. Appl Energy 135:234–246. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.082

Carvalho D, Rocha A, Gómez-Gesteira M, Silva Santos C (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. Renew Energy 102:433–444. doi: 10.1016/j.renene.2016.10.063

Carvalho D, Rocha A, Gómez-Gesteira M, Silva Santos C (2014b) 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. Appl Energy 135:234–246. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.082

Costa P, Miranda P and Estanqueiro A 2006 Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas Proceedings of the European Wind Energy Conference 2006 (Athens, Greece) p 9

Couto A, Costa P, Silva J, et al (2019a) Planeamento das energias renováveis offshore em Portugal: D2.2 - Validação do potencial energético offshore

Couto A, Silva J, Costa P, et al (2019b) Towards a high-resolution offshore wind Atlas - The Portuguese Case. IOP Conf Ser J Phys Conf Ser 1356:14. doi: 10.1088/1742-6596/1356/1/012029

Daley R (1993) Atmospheric Data Analysis, 2nd edn. Cambridge University Press

ETSU e CCE (1992). An assessment of the state of art, technical perspectives and potential market for wave energy. Technical direction Dr.-Ing. W. Dursthoff, report for DG XVII.

Frank H P, Rathmann O, Mortensen N G, Landberg L and Petersen E L 2001 The numerical wind atlas - The KAMM/WAsP method Wind Energy New Millenn. Proc. 661–4

Grell G, Dudhia J, Stauffer DR (1995) A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR 121

- Mortensen N G 2014 46200 Planning and Development of Wind Farms : Wind resource assessment using the WAsP software Wind Energy E Report 2014
- Santos D, Costa P, Justino P, et al (2017) OFFSHOREPlan: D2.1 – Methodologies to assess the renewable offshore resources
- Sharp E, Dodds P, Barrett M, Spataru C (2015) Evaluating the accuracy of CFSR reanalysis hourly wind speed forecasts for the UK , using in situ measurements and geographical information. *Renew Energy* 77:527–538. doi: 10.1016/j.renene.2014.12.025
- Soukissian TH, Papadopoulos A (2015) Effects of different wind data sources in offshore wind power assessment. *Renew Energy* 77:101–114. doi: 10.1016/j.renene.2014.12.009
- Standridge C, Zeitler D, Nieves Y, Turnage T J and Nordman E 2012 Validation of a buoy-mounted laser wind sensor and deployment in Lake Michigan. Michigan Alternative and Renewable Energy Center
- Tammelin B, Bergström H, Botta G, Douvikas S, Rathmann M and MHyvönen R 2001 Verification on wind energy predictions produced by WAsP and some mesoscale models in European mountains European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC '01) (Copenhagen) pp 678–685
- Troen I, Lundtang Petersen E (1989) European Wind Atlas
- Wang A, Zeng X (2012) Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res Atmos* 117:n/a-n/a. doi: 10.1029/2011JD016553