



**INFLUÊNCIA DA BRISA NO RUMO E INTENSIDADE DO VENTO LOCAL - CONTRIBUIÇÃO OU RISCO NO POTENCIAL EÓLICO:
ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE AVEIRO***

219

**INFLUENCE OF THE BREEZE ON THE LOCAL WIND - CONTRIBUTION OR RISK IN RELATION TO THE WIND POTENTIAL:
CASE STUDY IN THE REGION OF AVEIRO**

Mário Talaia

Universidade de Aveiro, CIDTFF (Portugal)
Centro de Investigação Didática e Tecnologia na Formação de Formadores, Departamento de Física
ORCID [0000-0003-4311-6209](https://orcid.org/0000-0003-4311-6209) mart@ua.pt

RESUMO

As alterações climáticas estão a condicionar o aquecimento global do planeta Terra e uma das consequências é a falência de ecossistemas que, por sua vez, alteram o clima e os tipos de circulação atmosférica registadas e previstas pelas cartas de meteorologia. Este trabalho usa dados meteorológicos registados numa estação meteorológica automática, durante um ano, para conhecer o potencial eólico num local da costa litoral junto ao mar. Os dados permitem conhecer, para intervalos de velocidade do vento, a frequência absoluta, em horas, que condiciona a escolha de um aerogerador. Determinou-se a velocidade zonal, para cada dia, com o objetivo de conhecer as características vetoriais do vento real e do vento geostrófico. Os resultados obtidos mostram, inequivocamente, que a brisa marítima tem influência no potencial eólico previsto para o local. A determinação da velocidade meridional sugere o início da nortada e o seu aumento em intensidade. Este trabalho mostra que o vento associado à formação da brisa marítima depende do Tipo de Circulação Atmosférica. A brisa marítima pode, nalguns casos, destruir o sentido do vento real, passando o anemómetro e catavento a registarem o somatório dos vetores do vento a partir da brisa e do vento geostrófico. Uma ilustração, é apresentada para esquematizar a formação da brisa.

Palavras-chave: Alterações climáticas, tipo de brisa, aproximação geostrófica, cartas meteorológicas, registo automático e registo por observação.

ABSTRACT

Climate change is contributing to the global warming of the planet Earth. One of the consequences is the collapse of ecosystems, thereby altering the climate of a region, which in turn alters the climate and the types of atmospheric circulation recorded and predicted by meteorological maps. This work uses the meteorological data recorded in an automatic meteorological station for a year, to find out the wind potential in a coastal region next to the sea. The data provides information on the absolute frequency, in hours, for wind speed intervals, which influences the choice of wind turbine. The zonal velocity was determined for each day in order to understand the vector characteristics of the actual wind and the geostrophic wind. The results unequivocally show that the sea breeze has an influence on the wind potential predicted for the region under study. The determination of the meridional velocity suggests the beginning of a north wind and its increase in intensity. This work shows that the wind associated with the formation of sea breezes depends on the type of atmospheric circulation. Sea breezes can, in some cases, distort the actual wind direction by causing the anemometer and wind vane to record the sum of the wind vectors from the breeze and geostrophic wind. An illustration, without being in scale, is presented to show how breezes form.

Keywords: Climate change, type of breeze, geostrophic approach, weather charts, automatic or recording and observational recording.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no VI Congresso Internacional de Riscos, tendo sido submetido em 17-07-2023, sujeito a revisão por pares a 17-11-2023 e aceite para publicação em 14-02-2024. Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 32 (N.º Especial), 2025, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

As alterações climáticas estão a condicionar o aquecimento global do planeta Terra. Para a previsão do estado do tempo atmosférico estão a ser usados modelos que são alimentados por registos de parâmetros meteorológicos realizados em estações meteorológicas, por radiossondagens, por plataformas marítimas, por satélites, entre outras.

As alterações climáticas referem-se a uma alteração no clima de uma região, e apresentam consequências, como por exemplo, na extinção de várias espécies vivas, fusão de glaciares, aumento de gizes com efeito de estufa, aumento do nível médio das águas do mar, riscos de inundações de costa litoral, deslocamento de pessoas de zonas de risco, consequências, estas, que se apresentam como problemas na economia, na sociedade e na política pela dificuldade de adoção de estratégias capazes de minorar os riscos associados (IPCC, 2009; IPCC, 2018; IPCC, 2019; IPCC, 2023a; IPCC, 2013b; IPCC, 2023c).

O desenvolvimento socioeconómico das últimas décadas caracterizou-se por um forte crescimento do consumo de energia produzida essencialmente a partir de combustíveis fósseis. Hoje, as fontes renováveis de energia são uma temática a valorizar. Estamos a viver um momento de mudança devido à necessidade de responder ao desafio criado pelas alterações climáticas e pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. É da responsabilidade de cada ser humano proteger e minimizar a sua pegada energética.

Na perspetiva da energia consumida é assumido que as fontes renováveis de energia são um alicerce que deve ser considerado.

Neste estudo dá-se atenção ao potencial eólico de um local. Como fonte gratuita de energia, as características do vento podem ser usadas para a escolha de um aerogerador. É sabido que as estações meteorológicas automáticas registam as características do vento a 10 metros de altura e, estes valores, através de leis físicas, podem ser projetados para a altitude que é colocado o eixo de rotação de um aerogerador. Portugal publicou, pelo Ministério da Economia e da Inovação (2007), uma obra como alicerce na tomada de decisões referentes as opções para a utilização de fontes de energia renováveis.

Este estudo mostra como o potencial eólico pode ser condicionado quando há influência de brisa. O local considerado neste estudo é a zona litoral do distrito de Aveiro e a análise da velocidade do vento zonal e vento meridional é interpretada para a variação do potencial eólico. É, também, estudada a hora da entrada na costa litoral da brisa marítima e o agravamento da nortada (NW) e apresentado um modelo ilustrativo da formação da brisa marítima num tipo de circulação de ventos de Este para Oeste.

Fundamentos teóricos

O vento é uma matéria-prima gratuita que pode ser usada para a produção de energia usando aerogeradores. O movimento das pás do aerogerador, devido à ação do vento, transfere energia mecânica sobre forma de energia elétrica. Esta contribuição permite avaliar o potencial eólico que define a potência por unidade de área criada pela ação do vento.

A expressão geral para o potencial eólico teórico (em Watt), que é varrido pelas pás do aerogerador, é

$$P = (1/2)\rho Av^3 \quad (1)$$

onde ρ representa a massa volúmica do ar a uma dada temperatura do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), A representa a área (m^2) que as pás do aerogerador descrevem em movimento, ou seja, a área varrida por ação do vento e v representa a velocidade do vento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (Holton, 2004).

O valor de v introduzido na expressão (1) é função da altitude em que é colocado o eixo horizontal de rotação do aerogerador. Na realidade, este eixo não está colocado na horizontal pois deve apresentar uma ligeira inclinação angular de modo a evitar que as pás, no seu movimento, possam colidir com a coluna vertical do aerogerador.

Para a altura do eixo de rotação do aerogerador usou-se, neste estudo, a lei da potência ou perfil potencial, dada por

$$v(z)/v(z_1) = (z/z_1)^\alpha \quad (2)$$

em que z_1 representa uma altura de referência à qual é medida a intensidade do vento $v(z_1)$. O expoente α depende da rugosidade da superfície terrestre e da estabilidade atmosférica. A literatura da especialidade mostra que o valor tipicamente aceite é de cerca de 0,15 para ventos marítimos ou zonas localizadas na costa marítima (Hsu *et al.*, 1994; Schwartz e Elliott, 2006; Wood, 2011; Rehman *et al.*, 2013).

Contudo, nem todo o potencial eólico é retirado pelos aerogeradores. Os valores registados mostram que, de acordo com o limite de Betz, o potencial máximo que um aerogerador consegue retirar do vento é de 59,3% (Burton *et al.*, 2011). Na prática, o valor da velocidade do vento que fornece potência ao aerogerador é dado pela diferença entre as velocidades de entrada e saída, em que 100% corresponde à ausência de vento na retaguarda do aerogerador (situação ideal). A expressão (3) mostra que, para o máximo de energia que pode ser retirada do vento através de qualquer tipo de aerogerador corresponde a uma diminuição no valor da potência teórica em 59% (Jones, 1950), ou seja, o coeficiente de potência é definido pelo cociente entre a potência extraída pela turbina do vento e a energia disponível do vento.

A expressão (1) deve, então, ser corrigida através da introdução de um fator adimensional chamado de coeficiente de potência, C_p que é avaliado através da performance do aerogerador, resultando em

$$P_e = (1/2)C_p \rho A v^3 \quad (3)$$

As curvas de potência são baseadas em medições na área varrida pelas pás, com baixa turbulência e com o vento a chegar perpendicularmente à área varrida pela turbina eólica. Normalmente, a curva de potência de um aerogerador é calculada por meio de medições de campo, com um anemômetro colocado na torre e perto da turbina eólica. Não deve ser colocado na própria turbina ou demasiado perto da turbina, pois esta situação pode potenciar turbulência e, consequentemente, originar erros na aquisição de parâmetros meteorológicos.

A distribuição estatística da velocidade do vento é primordial para determinar o potencial energético devido a ação do vento no local, bem como o seu desempenho em sistemas de conversão de energia, do ponto de vista estrutural e ambiental (Henessey, 1977). O período mínimo de recolha de informação meteorológica para a escolha de um aerogerador deve ser um ano civil, sendo o ideal dispor de cinco anos de dados meteorológicos. Para um conhecimento adequado do histograma das velocidades do vento registadas numa região seria conveniente que, antes da instalação de aerogeradores, fossem usadas torres com uma altitude de 100 metros acima do solo e com vários níveis de aquisição de parâmetros meteorológicos para se interpretar cabalmente o perfil do vento em altitude e a estabilidade da atmosfera. O conhecimento do perfil do vento em altitude é importante para se adotar a melhor eficiência energética para o eixo de rotação do aerogerador e para se conhecer, para a região em estudo, o valor do parâmetro α para a lei de potência que é função da rugosidade do solo e da estabilidade da atmosfera.

Um modelo estatístico baseado na função de distribuição de frequências de Weibull pode ser aplicado para se prever a velocidade do vento (Gupta, 1986). A distribuição de Weibull, muito utilizada pelo sector eólico, possibilita a previsão da produção futura de energia elétrica, e é dada por

$$p(v) = (k/C)[(v/C)^{k-1}]e^{[-v/C]^k} \quad (4)$$

onde k representa o parâmetro de forma de Weibull, C o parâmetro de escala de Weibull e v a velocidade do vento. Os parâmetros C e k são determinados para o histograma de velocidades do local e para intervalos de velocidade de 1ms^{-1} função do número de horas registados ao longo do ano. Nestes termos, os valores para C e k dependem da orografia e do histograma de velocidades do local.

O parâmetro de escala C (ms^{-1}) indica um padrão para a velocidade do vento e a posição da curva que se regista no local de estudo. O parâmetro de forma k (adimensional) indica o grau de concentração da distribuição, ou seja, indica se as velocidades do vento tendem a estar próximas ou concentradas num determinado valor. Nestes termos, se a distribuição registar um valor elevado de k , será uma distribuição muito concentrada num dado valor e favorece o potencial eólico na escolha do aerogerador.

A distribuição de Weibull para a velocidade do vento, com dois parâmetros, pode ser expressa pela densidade de probabilidade (Justus e Mikael, 1976; Justus *et al.*, 1978),

$$p(v)dv = (k/C)[(v/C)^{k-1}]e^{[-v/C]^k}dv \quad (5)$$

A função de probabilidade acumulada é dada por

$$P_i(v \leq v_i) = 1 - e^{[-v_i/C]^k} \quad (6)$$

Os parâmetros C e k determinam-se a partir da expressão (6) quando transformada na forma linear $y_i = a + bx_i$ (Justus *et al.*, 1978), ou seja

$$\ln[-\ln(1-p_i)] = -k\ln C + k\ln v_i \quad (7)$$

em que na expressão:

$$y_i = \ln[-\ln(1-p_i)], x_i = \ln v_i, a = -k\ln C \text{ e } b = k$$

Através da aplicação do método dos desvios mínimos quadrados ao conjunto de dados (x_i, y_i) determinam-se os valores de k e C , para o local de estudo. Estes valores são particulares a cada local e determinados a partir do histograma de velocidades. Neste estudo consideraram-se intervalos de velocidade de 1ms^{-1} . O grau de ajuste das séries (por aplicação do modelo de Weibull) pode ser investigado através do erro residual (Justus e Mikael, 1976; Justus *et al.*, 1978) calculado por

$$E^2 = \sum_i^n [P_{i(\text{obs})}(v \leq v_i) - P_{i(\text{cal})}(v \leq v_i)]^2 \quad (8)$$

onde $P_{i(\text{obs})}$ é a probabilidade acumulada observada e $P_{i(\text{cal})}$ a probabilidade acumulada calculada através do modelo de Weibull.

A distribuição de Weibull pode variar tanto na forma como no valor médio, mas na prática a distribuição de Weibull é uma excelente aproximação à distribuição real (Li e Li, 2005).

Existem outros métodos que podem ser aplicados para avaliar a distribuição de ventos. A distribuição de Rayleigh, e a distribuição Beta e a distribuição Log-Normal são soluções alternativas. Normalmente, cabe ao projetista avaliar a oportunidade da escolha.

A correta quantificação do potencial eólico disponível para fins energéticos em locais de topografia complexa apresenta diversas dificuldades. A modelação do

escoamento atmosférico em terrenos de elevada complexidade traz, efetivamente, várias complicações. Os modelos incorporados, utilizados comercialmente, são forçados a recorrer a algumas simplificações. A linearização das equações de movimento deixa de parte fenómenos como o deslocamento ou a recirculação, fenómenos estes que são tanto mais comuns quanto maior for a complexidade orográfica.

Com base na informação das cartas meteorológicas (<http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkfaxbraar.htm>) é possível determinar as características do vento numa determinada área.

O vento junto ao solo é originado devido às diferenças de pressão que aí se registam. O desequilíbrio das pressões faz com que o ar se desloque das altas para as baixas pressões (Holton, 2004) não se perdendo de vista o efeito da força de Coriolis. Num centro depressionário, o ar circula de fora para o interior e provoca convergência, enquanto no anticiclone o ar circula do interior para fora provocando divergência. Nestes termos, tem-se convergência de massa para uma circulação ciclónica e tem-se divergência de massa para uma circulação anticiclónica, a qual por continuidade de massa se requer movimento vertical ascendente e descendente, respetivamente. Nesta perspetiva é possível considerar uma aproximação denominada de aproximação geostrófica que é valida para escalas sinópticas nas latitudes extratropicais. Conforme mostraram Trigo e DaCamara (2000) é determinante, para o estudo de uma região, conhecer, ao longo do ano, os diferentes tipos de circulação atmosférica.

Para estudar a intensidade ou módulo do vento geostrófico pode admitir-se, com boa aproximação, que localmente a massa volúmica e o parâmetro de Coriolis (Talaia e Fernandes, 2009) pouco variam. Então, o módulo da velocidade geostrófica será dado por,

(9)

$$V_g \approx (1/\rho f)(\Delta p / \Delta n)$$

em que f representa o parâmetro de Coriolis, que na latitude de Portugal, pode ser assumido ser $10^{-4} s^{-1}$, ρ representa a massa volúmica da massa de ar e assumida ser $1,2 \text{ kg/m}^3$, Δn representa o afastamento ou a distância entre duas isóbaras consecutivas que correspondem à variação da pressão Δp . A interpretação física da expressão (9) mostra que a intensidade do vento geostrófico é inversamente proporcional ao afastamento das isobáricas.

Na interpretação física da brisa (Steele *et al.*, 2015; Rafiq *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2021) são considerados as capacidades térmicas da areia e da água do mar, o albedo da superfície, a mudança de fase (de água líquida que molha a areia no processo de evaporação de líquido

para o estado de vapor de água), a radiação solar direta na área de estudo, onde são usadas as expressões:

$$Q = mc\Delta T \quad (\text{caso de um solo considerado seco})$$

$$Q = mL \quad (\text{caso de um solo considerado húmido})$$

em que Q representa a energia, m a massa da substância, c a capacidade térmica da substância, ΔT a diferença de temperatura e L a variação da entalpia ou calor de transformação. No caso de um solo considerado húmido, a influencia da água presente no solo favorece a mudança de fase da água determinando uma menor temperatura do solo face à mesma potência solar para a mesma área, de solo considerado seco. Na prática, enquanto o solo estiver húmido há uma fração de energia proveniente do Sol (radiação solar) que será consumida para o processo da mudança de fase.

Metodologia

Os parâmetros meteorológicos foram registados de hora em hora, durante um ano civil, na estação meteorológica automática da Universidade de Aveiro. De 8760 dados previstos apenas foram considerados 8218 devido a falhas de registo dos sensores, o que é considerado de normal.

Usou-se uma folha de Excel para fazer a estatística da coleção de dados, depois de se filtrarem dados sem significado físico ou ausência de aquisição pelo sensor (instrumento de medida).

Os dados foram projetados para a altitude do eixo de rotação do aerogerador [aplicação da expressão (2)] e construiu-se o histograma para intervalos de velocidades em função do número de horas, assim como um gráfico para visualização, face à média da velocidade do vento anual, dos desvios positivos e negativos dos meses que sugerem maior potencial eólico.

Foi, também, construída, para o ano civil, a rosa dos ventos para conhecer o rumo dominante do vento.

Para o local, e para o histograma dos intervalos da velocidade do vento função do número de horas, selecionou-se, via catálogo do fabricante, um aerogerador. Para a altitude considerada, foram consultados valores de coeficiente de potência e potência do aerogerador.

Determinou-se, para cada intervalo de velocidades de vento, a energia que é prevista para as características do aerogerador selecionado.

Aplicou-se um modelo estatístico - denominado método dos desvios mínimos quadráticos - para determinar os parâmetros da distribuição de Weibull que permitiram fazer a previsão da energia do aerogerador [aplicação das expressões (4) à (8)].

Determinaram-se, também, a energia teórica, a energia pela limitação de Betz e a energia pela performance do aerogerador selecionado [aplicação das expressões (1) e (3)].

Comparou-se a energia acumulada registada pelo aerogerador, durante o ano civil, através das expressões físicas e da distribuição de Weibull.

Avaliou-se a influência da brisa local face ao vento registado nos instrumentos de medida (anemómetro e catavento) e a previsão do vento geostrófico pela aplicação das cartas meteorológicas [aplicação da expressão (9)].

Foram considerados para a análise do vento a orientação zonal e meridional, a influência da brisa terrestre e da brisa marítima, assim como a nortada (ou seja, vento de N/NW).

Apresentou-se um modelo, em imagem e sem escala, que tenta retratar o que acontece com o registo, no sensor, do vento na torre da estação meteorológica automática aos 10m de altitude, para um exemplo do tipo de circulação da atmosfera, avaliado em carta meteorológica, de ventos de Este para Oeste.

Resultados obtidos e sua análise

Para o ano civil considerado, neste estudo, os dados registados na estação meteorológica automática permitiram construir o histograma da frequência absoluta do número de horas em função dos intervalos da intensidade da velocidade e o desvio para cada mês face a média da intensidade do vento anual (fig. 1). A média da velocidade do vento local de 4,45m/s e para uma altitude de 90m, é inferior ao valor indicado para uma altitude de 50m acima do solo de 6m/s a 7m/s (Troen e Petersen, 1989; <http://www.windatlas.dk/Europe/landmap.html>). Uma amostragem realizada, a outros anos civis, sugere que estes autores sobrevalorizaram o potencial eólico na costa litoral de Aveiro.

É possível observar a rosa dos ventos para o conjunto de dados registado (fig. 2). Inequivocamente, a observação da figura mostra que a predominância do vento é NW (320°) o que favorece a interpretação da existência da nortada no local e da formação da brisa marítima devido à diferença entre as capacidades térmicas da água e do solo, para a mesma energia por unidade de área, proveniente do Sol.

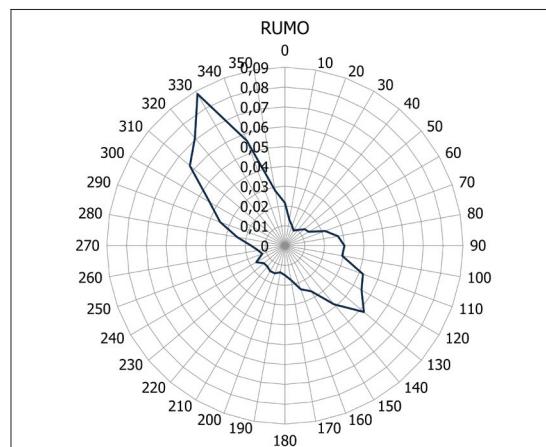


Fig. 2 - Rosa dos ventos.

Fig. 2 - Wind rose.

A observação da imagem no lado esquerdo (fig. 1), permite fazer a seleção do aerogerador face às suas características, nomeadamente o fator de potência e a potência do aerogerador (fig. 3).

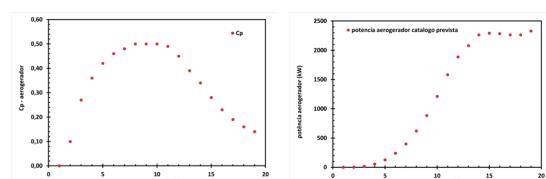


Fig. 3 - Características do aerogerador (dados do construtor).

Fig. 3 - Characteristics of the wind turbine (constructor data).

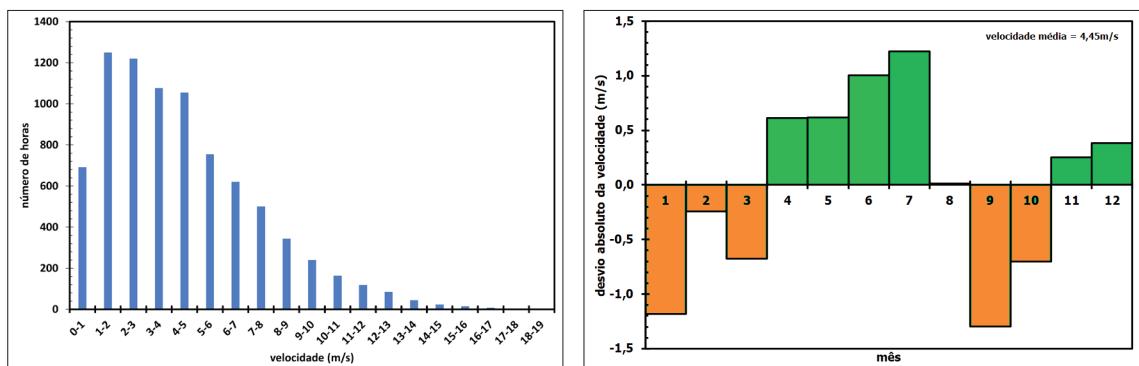


Fig. 1 - Dados registados da intensidade da velocidade do vento (histograma (esq.) e desvio absoluto (dir.)).

Fig. 1 - Recorded wind speed intensity data (left, histogram: right, absolute deviation).

A partir dos dados indicados no histograma e nos dados indicados, em catálogo de fornecedor de aerogeradores (fig. 1 e fig. 3) construiu-se o histograma da energia prevista pelo aerogerador função dos intervalos de velocidade assumidos (fig. 4). A ordenada mostra a energia prevista do aerogerador para as intensidades do vento do local.

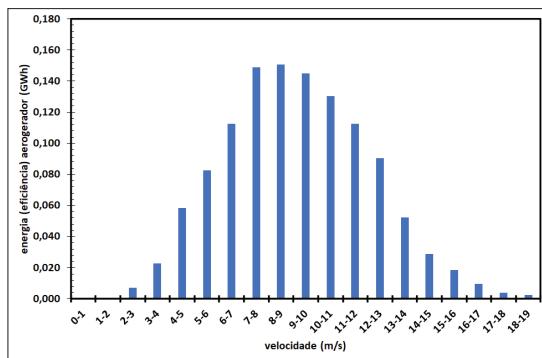


Fig. 4 - Energia prevista para o aerogerador escolhido.

Fig. 4 - Expected energy for the chosen wind turbine.

É importante interpretar os resultados indicados (fig. 1 e fig. 4). Para valores baixos (com alta frequência absoluta de horas registadas) e valores altos (com pequena frequência absoluta de horas registadas) para a intensidade do vento é prevista uma energia acumulada baixa como se indica (fig. 4). Conclui-se que o intervalo de velocidades no intervalo de 6m/s a 12m/s favorece os maiores valores para a energia prevista para o aerogerador. A consulta de catálogos dos fabricantes de aerogeradores mostra que a melhor eficiência depende da distribuição das velocidades do local e do coeficiente de potência do aerogerador. Nestes termos, esta indicação sugere que o melhor local para um potencial eólico com a máxima eficiência da escolha de um aerogerador é aquele que o histograma regista um número de horas muito concentrado entre cerca de 8m/s a 11m/s. Por exemplo, alta frequência absoluta do número de horas para baixos valores da velocidade do vento implicam a geração de pouca energia. O mesmo raciocínio pode ser feito para altas velocidades que pecam por registarem um baixo número de horas.

Determinou-se, para o aerogerador, a energia prevista que se obtém a partir do formulário teórico (considerando todo o vento que chega à área varrida pelas pás), a energia baseada na limitação de Betz e a energia baseada nas características do aerogerador (fig. 5).

A previsão do potencial eólico para o local foi prevista por aplicação da distribuição estatística de Weibull (fig. 6). A imagem superior mostra, para cada intervalo de velocidades, a previsão da energia prevista pelo uso dos fundamentos teóricos para o aerogerador e a previsão da energia pela distribuição de Weibull

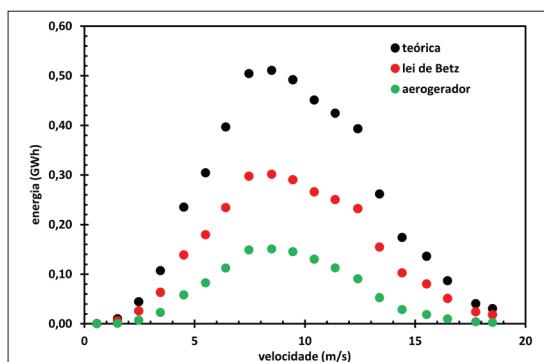


Fig. 5 - Energia teórica, lei de Betz e aerogerador.

Fig. 5 - Theoretical energy, Betz's law, and wind turbine.

para o mesmo aerogerador. A imagem inferior mostra a energia acumulada para o local. De referir que a distribuição de Weibull, neste caso de estudo, produz uma sobrevalorização da previsão do potencial eólico.

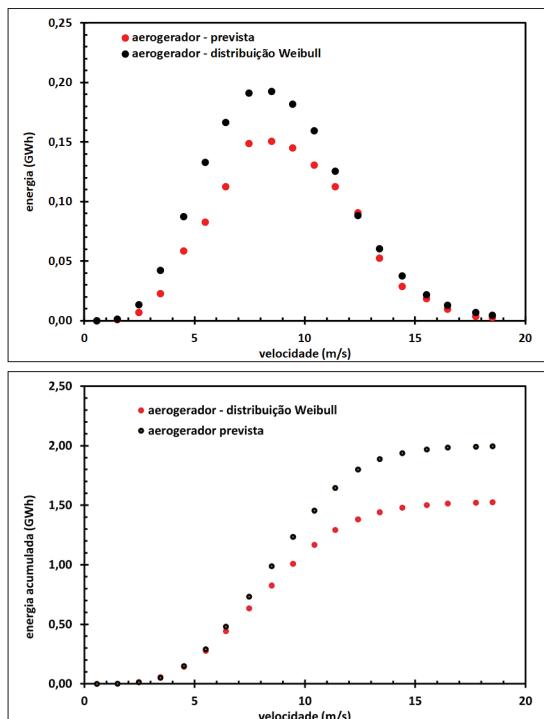


Fig. 6 - Previsão da energia para aerogerador: fundamentos teóricos e distribuição de Weibull.

Fig. 6 - Energy prediction for wind turbines (upper): theoretical and Weibull distribution (lower).

Para o mesmo local investigou-se a influência de brisa no valor registrado para a intensidade e rumo do vento pelo anemômetro e catavento, da estação meteorológica automática, face à informação indicada em cartas meteorológicas de superfície usando as linhas de pressão (isobáricas) contíguas (<http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkfaxbraar.htm>). Dadas as características do

local, zona costeira litoral, construiu-se uma ilustração para a interpretação do vento registado no anemómetro e catavento, devido ao desigual aquecimento da água do oceano e do solo, valorizando a presença das brisas terrestre e marítima (fig. 7). A ilustração mostra um caso típico de circulação da atmosfera em que a carta meteorológica prevista sugere um vento geostrófico de Este para Oeste.

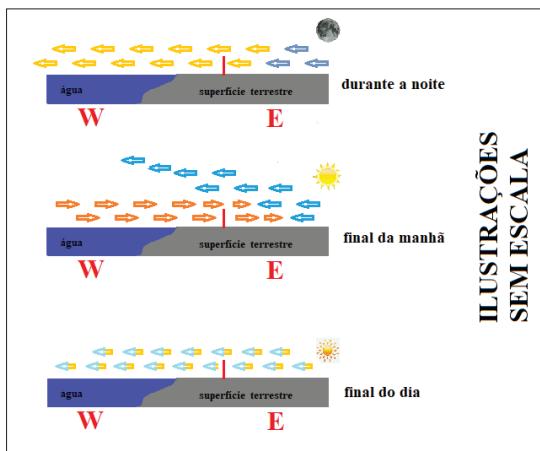


Fig. 7 - Ilustração da formação de brisa marítima - exemplo.

Fig. 7 - Illustration of the formation of maritime sea breeze - example.

São mostradas três situações (que não estão em escala). A imagem superior - durante a noite, mostra que o vento sopra de E para W o que indica que se trata da brisa terrestre potenciada pelo aquecimento devido à radiação solar direta, ou seja, devido à grande diferença das capacidades térmicas da água e do solo. A água funciona como um reservatório de calor, demora muito tempo a aumentar a temperatura, mas o mesmo é válido face à diminuição da temperatura. Durante a noite espera-se que a temperatura da água seja superior à temperatura do solo e se acontecer há condições atmosféricas para a formação da brisa terrestre. O ar adjacente sobre a superfície livre da água torna-se mais leve e ao ascender (cria um centro de baixa pressão) obriga a que seja gerado o movimento do ar que é mais denso na camada adjacente do solo a deslocar-se para o mar. A imagem central - final da manhã, mostra a formação da brisa marítima. Para a mesma potência da radiação do Sol o solo com baixa capacidade térmica aumenta significativamente de temperatura face à água do mar que devido a sua elevada capacidade térmica aumenta ligeiramente a sua temperatura. Nesta situação o ar adjacente ao solo torna-se muito menos denso e ao criar um centro de baixa pressão obriga o ar adjacente à superfície livre de água a se movimentar para terra. A situação anterior, da imagem superior, é desfeita e será tanto mais evidente quanto maior for o intervalo de temperaturas entre o mar e o solo. O mastro com sensores para registo automático de dados

meteorológicos é indicado pela linha vertical vermelha. Nestes termos a “luta” entre vetores da velocidade do vento que se origina de W para E face ao vento que estava presente de E para W, indicando sinais contrários, fazem os sensores lerem a resultante da soma de vetores e, neste caso, haverá uma inversão de valor em sinal, ou seja de W para E. A imagem inferior - final do dia, mostra que à noite a ausência de radiação solar direta favorece, novamente, a formação da brisa terrestre, se houver condições atmosféricas para tal. De notar que a brisa terrestre gera um movimento da massa de ar muito inferior à uma brisa marítima, devido ao intervalo de temperaturas que se registam (Pardo *et al.*, 2009).

No local de estudo, sendo o vento predominante de NW, assumiu-se determinar a velocidade zonal e a velocidade meridional para cada dia do ano, para interpretar porque durante as tardes, durante a maior parte do ano, há ventos de W para E e no verão, muitas vezes, geram desconforto nas tardes de praia. Há situações que o vento é significativo, gerando uma velocidade de corte na interface areia e ar em movimento, em que areias de menor calibre são facilmente movimentadas favorecendo a formação de nuvem de areia. Se a velocidade zonal favorece a compreensão da formação da brisa marítima e a hora de entrada na costa litoral, a velocidade meridional favorece a compreensão da existência da nortada, mais significativa durante as tardes.

Escolheram-se alguns dias para mostrar como o vento local depende das características geográficas e orográficas. As nuances do relevo da região é um elo forte a ter em consideração. Para cada dia consideraram-se, em coluna, três informações, a imagem superior mostra as linhas para velocidades registadas e determinadas, ou seja, a linha a vermelho a velocidade zonal, a linha a azul a velocidade meridional e a linha a negro a velocidade registrada no anemómetro. A imagem central mostra a variação do rumo do vento durante o dia e imagem inferior mostra a carta meteorológica para a situação sinótica para a região em estudo. A seta a roxo sobre a região de Aveiro mostra as características do vento (intensidade por aplicação da aproximação geostrófica, a direção e o sentido).

Apresentam-se os resultados dos dias 27 de março e 17 de abril (fig. 8).

Para o dia 27 de março é possível concluir que o vento que sopra, de acordo com as linhas isobáricas, é de origem NE, o que equivale afirmar que a componente zonal será negativa durante o dia. Se observarmos a imagem superior a velocidade zonal durante o dia muda de sinal o que indica que há formação de uma brisa marítima. A nortada é registrada entre as 14h30 e às 20h00 e é confirmada pela mudança do rumo do vento de cerca de 80° (E) para cerca de 320° (NW).

Para o dia 17 de abril a velocidade zonal tem sinal contrário ao previsto na carta meteorológica (imagem inferior) até as 11h00. Depois a velocidade zonal mantém o sinal previsto pela aproximação geostrófica, dado que os registos mostram que o vento tem origem a W (cerca de 270°). A velocidade meridional está de acordo com a previsão e sugere ausência de nortada.

Resultados para os dias 18 de maio e 15 de julho (fig. 9)

Para o dia 18 de maio é possível concluir que o vento que sopra, de acordo com a carta meteorológica é de origem NW, o que equivale afirmar que a componente zonal será positiva durante o dia. Se observarmos a imagem superior a velocidade zonal durante o dia muda de sinal o que indica que há formação de uma brisa

marítima, pelo menos a partir das 10h00, instante que muda de sentido. A nortada é registada a partir das 10h00 e confirmada pela mudança do rumo do vento para cerca 280° (W). A nortada é bem significativa a partir das 14h00.

Para o dia 15 de julho a velocidade zonal tem sinal de acordo com a carta meteorológica (imagem inferior) até as 10h00. Depois a velocidade zonal muda de sinal e esta situação só é possível pela presença de brisa marítima que favorece vento intenso (de W para E). A velocidade meridional está de acordo com a previsão e indica a nortada durante o dia com aumento da intensidade do vento que regista um rumo de cerca de 280° (W). Este dia mostra, de forma inequívoca, como a brisa influencia o potencial eólico.

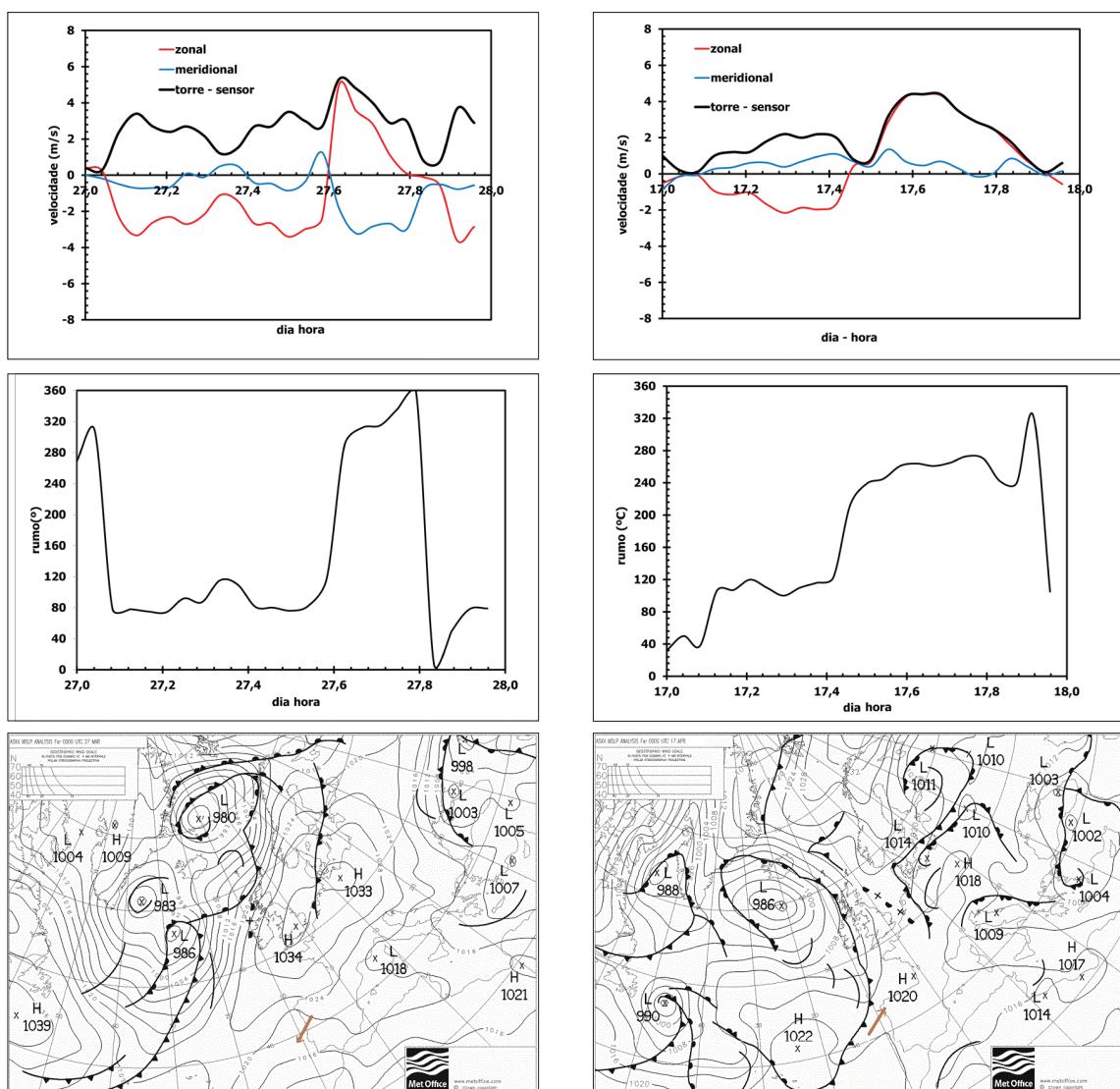


Fig. 8 - Comportamento da velocidade do vento, registada e prevista, dias 27 de março e 17 de abril.

Fig. 8 - Wind speed behaviour, recorded and forecast, 27 March 27 and 17 April 17.

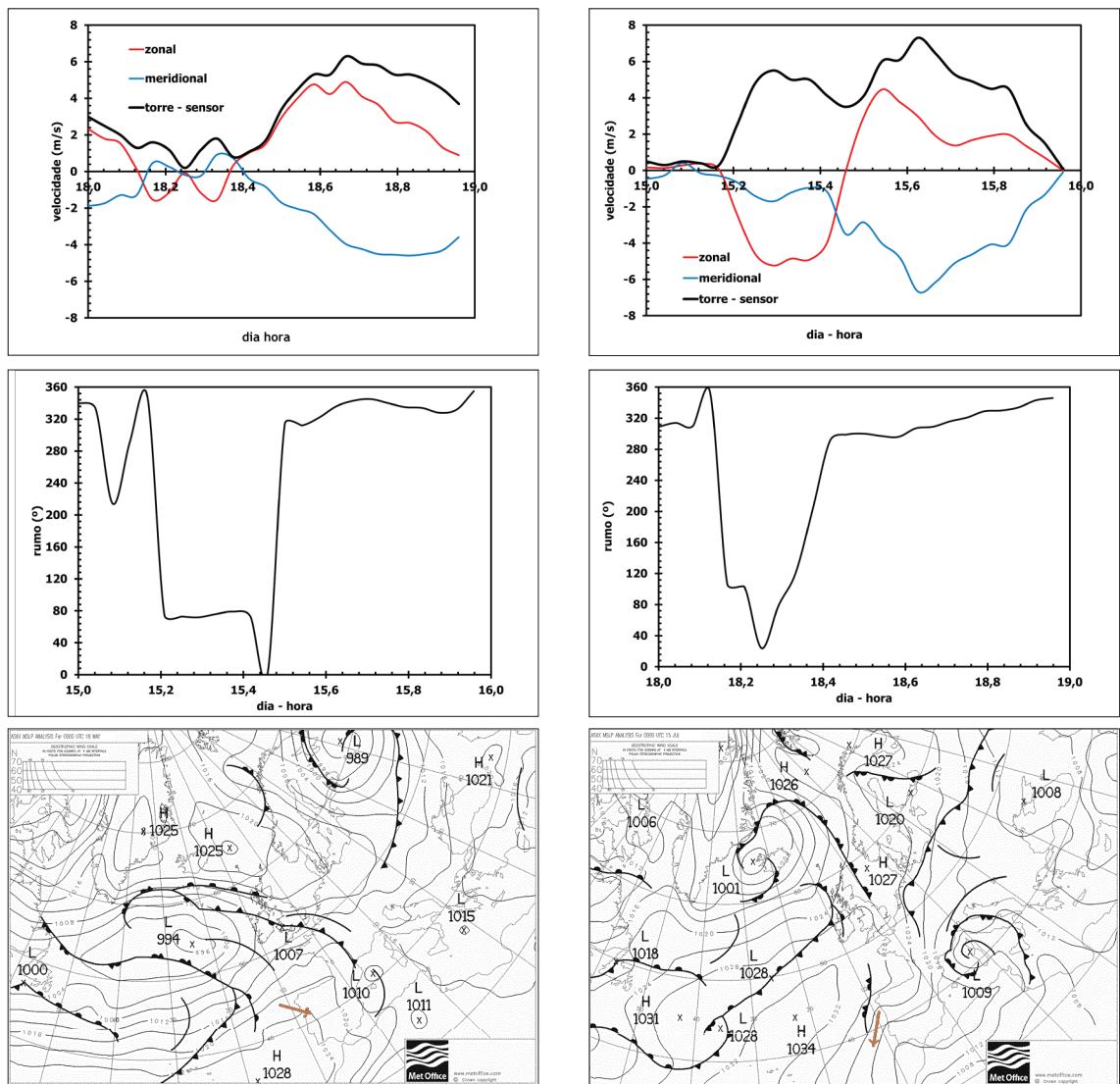


Fig. 9 - Comportamento da velocidade do vento, registada e prevista, dias 18 de maio e 15 de julho.

Fig. 9 - Wind speed behaviour, recorded and forecast, on 18 May and 15 July.

Resultados para os dias 23 de julho e 7 de agosto (fig. 10)

Para o dia 23 de julho é possível concluir que o vento que sopra, de acordo com as linhas isobáricas, é de origem NW, o que equivale afirmar que a componente zonal é positiva durante o dia (de W para E). Se observarmos a imagem superior a velocidade zonal durante o dia regista o mesmo sinal, o que indica que a brisa marítima formada vai contribuir para o aumento da intensidade do vento, através da soma vetorial. A nortada é registada a partir das 10h00 e é confirmada pelo rumo do vento de cerca de 280°.

Para o dia 7 de agosto pode-se assumir que a velocidade zonal tem o mesmo sinal durante o dia, mas a partir das 10h00 aumenta de intensidade o que mostra a contribuição da brisa marítima. A velocidade meridional

está de acordo com a previsão e aumenta após as 10h00 até atingir um máximo cerca das 15h00.

Considerações finais

Este trabalho sugere um fio condutor que pode ser seguido para a avaliação do potencial eólico de um local, a partir de uma coleção de dados meteorológicos de um ano civil. Uma distribuição estatística foi considerada para o local de modo a conhecer a energia acumulada a partir do aerogerador selecionado face à energia retirada do aerogerador.

Mostrou-se que o rumo e a intensidade do vento registados nos sensores da estação meteorológica automática podem ser diferentes aos indicados nas cartas meteorológicas e para o mesmo local.

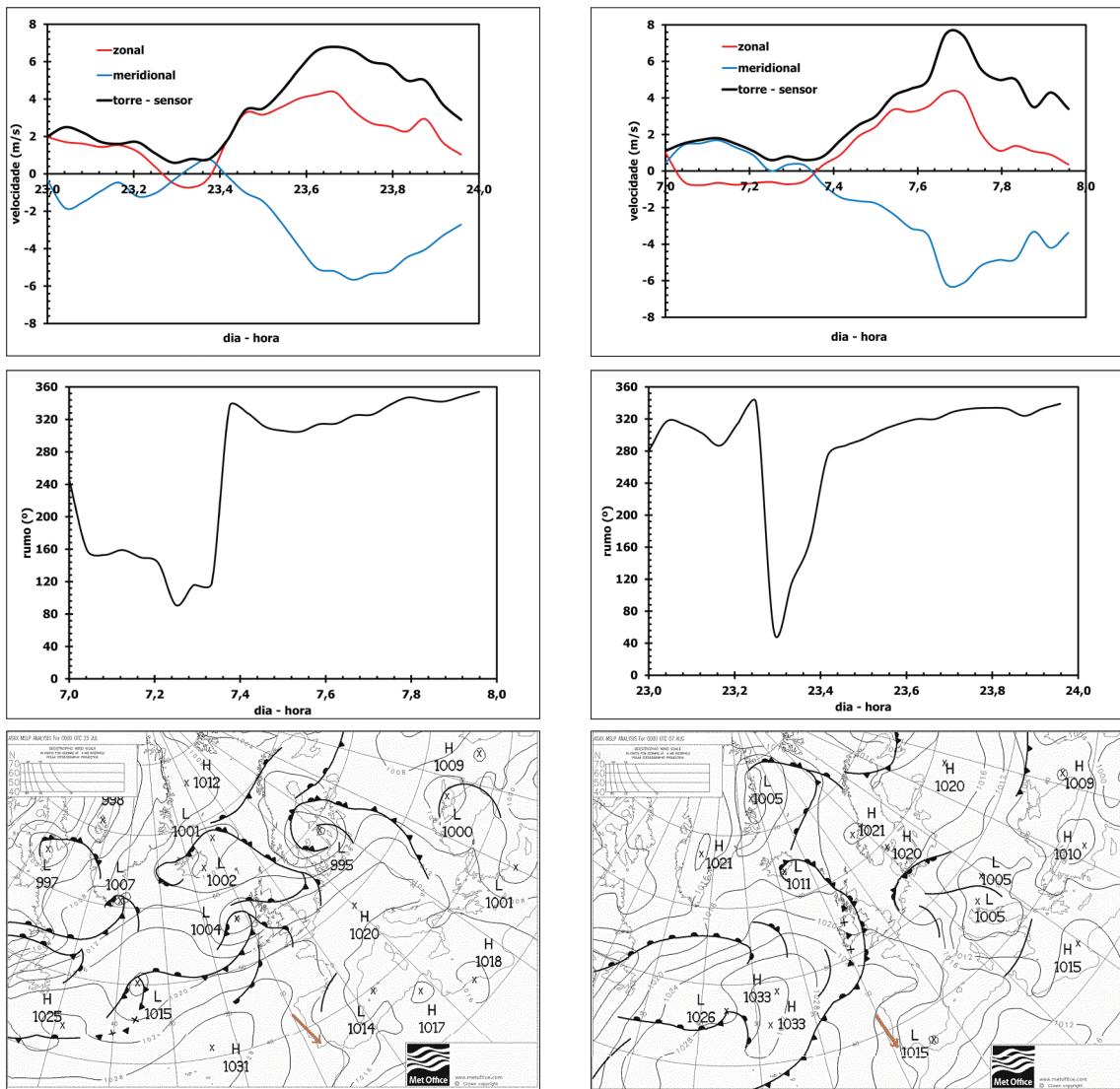


Fig.10 - Comportamento da velocidade do vento, registada e prevista, dias 23 de julho e 7 de agosto.

Fig. 10 - Wind speed behaviour, recorded and forecast, 23 July and 7 August.

Concluiu-se que os resultados obtidos mostram, inequivocamente, que a brisa marítima tem influência no potencial eólico previsto para o local e que a velocidade meridional sugere o início da nortada.

A hora da entrada, na costa, da brisa marítima (de W para E) é mostrada pela troca de sinal do vento que o anemómetro e catavento registam. A hora de entrada da brisa marítima (devido à soma dos vetores do vento geostrófico previsto e do vento real registado no anemómetro) mostram, inequivocamente, a influência que o mar e o solo, através das suas capacidades térmicas, influenciam centros de baixa pressão para a mesma radiação solar numa mesma área de interseção.

O estudo mostra que o vento associado à brisa marítima depende do Tipo de Circulação Atmosférica. A brisa marítima pode, nalguns casos, por exemplo para um

vento geostrófico de E para W, destruir o seu sentido passando o anemómetro e catavento a ler de W para E.

Sugere-se que antes da instalação de um aerogerador num local, que sejam considerados dados registados para um período de 5 anos, usando vários níveis de informação com sensores num mastro com 100m de altitude. A vantagem será conhecer a estabilidade da atmosfera no local e a influência do relevo na determinação da rugosidade do terreno.

Agradecimentos

O autor agradece a um revisor que pela sua sabedoria prática enriqueceu a linguagem do artigo tornando-o mais transparente e de fácil aplicação. O autor agradece também o subsídio de financiamento, para estar

presente na conferência, por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/00194/2020 (CIDTFF).

Referências bibliográficas

- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. e Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*, John Wiley and Sons, Ltd.
- Gupta, B.K. (1986). Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India. *Solar Energy*, 37(6), 469-671.
- Henessey, J.P. (1977). Some aspects of wind power statistics. *Journal Applied Meteorology*, 16(2), 119-128.
- Holton, J.R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Volume 88 in the International Geophysics Series. Edited by Renata Dmowska and James R. Holton. Elsevier Academic Press.
- Hsu, S.A., Meindl, E.A. e Gilhouse, D.B. (1994). Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea. *Journal Applied Meteorology*, 33, 757-765.
- IPCC (2009). *Fourth Assessment Report (AR4) The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- IPCC (2018). *Summary for Policymakers*. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3-24.
- DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- IPCC (2019). *Sumário para Formuladores de Políticas - aquecimento global*. Publicado pelo IPCC em 2018. Versão em português publicada pelo MCTIC <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>, julho, Brasil.
- IPCC (2023a). *Summary for Policymakers*. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 p.
- IPCC (2023b). *Climate Change 2023 Synthesis Report, Summary for Policymakers*. Edited by Hoesung Lee e José Romero. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- IPCC (2023c). *Longer Report IPCC AR6 SYR. SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)*, Longer Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Jones, B. (1950). *Elements of Aerodynamics*. John Wiley and Sons, Ltd. New York, USA, pp. 73-158.
- Justus, C.G., Hargraves, W.R. e Mikael, A. (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal Applied Meteorology*, 17(3), 350-353.
- Justus, C.G. e Mikail, A. (1976). Height variation of wind speed and wind distribution. *Geophys. Res. Letter*, 3, 261-264.
- Li, M. e Li, X. (2005). MEP-type distribution function: a better alternative to Weibull function for wind speed distributions. *Renewable Energy*, 30, 1221-1240.
- MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DA INOVAÇÃO (2007). *Energias Renováveis em Portugal*, 60 p.
- Pardo, L.H., Díaz, A.E.H. e Crasco, A.R (2009). *La Brisa de Mar como mecanismo de disparo de la Convección Profunda*. In Proceedings V Congreso Cubano de Meteorología, CDROM, Habana, Cuba.
- Rafiq, S., Pattiarchi, C. e Janekovi, I. (2020). Dynamics of the Land-Sea Breeze System and the Surface Current Response in South-West Australia. *Journal Marine Science Engineering*, 8, 931, 1-28
- Rehman, C., Luai, M., Al-Hadhrami, Mahbub Alam e Meyer, J.P. (2013). Empirical correlation between hub height and local wind shear exponent for different sizes of wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4(12), 45-51.
- Schwartz, M. e Elliott, D. (2006). *Wind shear characteristics at central plains tall towers* (No. NREL/CP-500-40019). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- Steele, C.J., Dorling, S.R., Glasowa, R. e Bacon; J. (2015). Modelling sea-breeze climatologies and interactions on coasts in the southern North Sea: implications for offshore wind energy. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 1821-1835.

Talaia, M. e Fernandes, R. (2009). Diagnóstico de vento de uma região usando uma carta meteorológica de superfície. *Territorium - Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, 16, ISSN: 0872-8941, Coimbra, 63-69.
DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_16_6

Trigo, R.M. e DaCamara, C.C. (2000). Circulation Weather Types and Their Influence on the Precipitation Regime in Portugal. *International Journal of Climatology*, 20, 1559-1581.

- Troen e Petersen, E.L. (1989). *European Wind Atlas*. Published for the Commission of the European Communities by Risø National Laboratory.
- Xia, G., Draxl, C., Optis, M. e Redfern, S. (2021). Detecting and Characterizing Sea Breezes Over the U.S. Northeast Coast with Implication for Offshore Wind Energy. *Wind Energy Science*, 1-23.
- Wood, D. (2011). *Small wind turbines*. In *Advances in wind energy conversion technology* (pp. 195-211). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.