

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Impacto da circulação atmosférica nas rampas de produção eólica em Portugal

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Madalena Guerreiro Bravo de Lacerda

Dissertação orientada por:
Doutora Ana Estanqueiro
Mestre António Couto

Resumo

A integração em larga escala de fontes de energia renováveis com um comportamento estocástico, como a energia eólica, introduz uma incerteza adicional na operação do sistema elétrico. Esta incerteza coloca novos desafios aos operadores do sistema elétrico, uma vez que é necessário, em todo o instante, manter o equilíbrio entre a produção e o consumo, de modo a garantir a estabilidade do sistema electroprodutor. Para a manutenção dos elevados padrões da qualidade do serviço, nomeadamente no que respeita à segurança de abastecimento e robustez do sistema, bem como a otimização do seu desempenho económico, o operador do sistema elétrico pode beneficiar do conhecimento da probabilidade de ocorrência de variações severas na produção de energia eólica, usualmente definidas como eventos de rampa. Assim, na presença de uma rampa de descida, o operador pode ativar unidades de resposta rápida *e.g.*, centrais hídricas ou térmicas por forma a produzir a energia necessária para suprir o consumo. Por outro lado, perante um evento de rampa de subida na produção eólica, é possível ao gestor do sistema electroprodutor tomar uma série de medidas, *e.g.*, a desativação de um grupo de turbinas, com o propósito de evitar a produção excedente de energia.

O impacto das rampas de produção eólica pode ser minimizado através da compreensão dos seus mecanismos sinóticos forçadores. Trabalhos recentes identificaram que os principais impulsionadores para as rampas severas de produção eólica são estruturas meteorológicas que se estendem por largas áreas e têm uma assinatura espacial bastante característica, *e.g.*, frentes frias e sistemas de baixas pressões. Nesse sentido, este trabalho visa identificar estas estruturas e compreender o seu impacto durante eventos de rampa no agregado nacional de produção de energia eólica. Para se conseguir alcançar os objetivos traçados neste trabalho recorreu-se a algoritmos de deteção e seguimento *i)* de ciclones e *ii)* de tempestades, recorrendo a dados históricos das reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. Esta diferenciação foi realizada porque um ciclone *per se* nem sempre se traduz numa forte intensidade do vento. Uma vez que a existência de variações severas na produção num determinado instante é dependente do instante anterior, neste trabalho propõem-se um novo algoritmo com base em algumas adaptações aos algoritmos anteriores de forma a permitir a sua aplicabilidade como ferramenta de alerta para variações severas na produção eólica. Para cada um dos algoritmos foram identificadas as principais características (*e.g.*, localização, intensidade e trajetórias) destes fenómenos meteorológicos com maior impacto na variabilidade da energia eólica.

Com o intuito de verificar o impacto dos sistemas meteorológicos na produção eólica foi efetuada uma análise de compósitos, na qual foi determinada a probabilidade dos eventos que afetam uma determinada região originarem situações de produção superior a 60% da capacidade nominal ou situações de produção inferior a 30% da capacidade nominal. Através desta análise foi possível verificar que os eventos com ocorrência nos meses de Inverno e que intersejam as regiões Norte e Centro de Portugal Continental são os que apresentam maior impacto no nível de produção. Foram também estabelecidos dois algoritmos de deteção de rampas de produção eólica, cujos resultados foram comparados com os resultados da aplicação das metodologias de deteção de sistemas meteorológicos a fim de verificar a precisão e viabilidade de utilização deste tipo de metodologias enquanto ferramentas de alerta a variações severas na produção eólica. Os resultados obtidos sugerem que as metodologias de deteção de tempestades são mais apropriadas para detetar rampas de produção eólica, no entanto todas as metodologias usadas neste trabalho permitem identificar de forma automática uma percentagem elevada das rampas observadas, embora com um número não desprezável de falsos alarmes, especialmente na Metodologia 1. Foi por fim efetuada uma análise por agrupamento, por forma a identificar as trajetórias mais propícias à ocorrência de rampas de produção eólica. Os resultados permitiram identificar que as trajetórias com maior impacto na produção são originadas/passam a Oeste/Sudoeste da Península Ibérica, entre as ilhas dos Açores e da Madeira, chegando a intersejar a região de Portugal Continental.

Palavras-Chave: Rampas de Produção Eólica, Atividade Ciclónica, Gestão do Sistema Electroprodutor, Condições Meteorológicas, Tempestades de Vento

Abstract

The large-scale integration of renewable energy sources with a stochastic behavior, such as wind power, introduces an additional uncertainty in the electric system operation. This uncertainty poses new challenges to the power system operator since it is necessary in every moment to keep the balance between production and consumption in order to ensure the stability of the power system. For the maintenance of high standards of quality of service, particularly with regard to security of supply and system robustness as well as from an economic point of view, it is important that the system operator is aware of the occurrence of severe fluctuations in wind energy production (usually defined as ramps). Thus, during a downward wind power ramp, the system operator can activate rapid response units *e.g.*, hydro or thermal power plants in order to produce the necessary energy. On the other hand, when the system operator faces an upward ramp event in wind power, it is possible to take a series of measures, *e.g.*, disabling a group of turbines in order to avoid excess production of energy.

The impact of wind power ramps can be minimized by understanding the underlying role of the synoptic circulation in triggering these events. Recent studies have identified that the key drivers for the harsh wind power ramps are weather synoptic structures that extend over large areas, and have a quite characteristic spatial signature, *e.g.*, cold fronts and low pressure systems. In this sense, this work aims to identify these structures and understand their impact during ramp events of wind energy in the production of the national aggregate. Detection and tracking algorithms of *i)* cyclones and *ii)* wind storms were implemented using the *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* historical reanalysis. This distinction was made because a cyclone itself does not always mean a strong wind intensity. Since the existence of severe variations in the wind production at a particular time is dependent on the previous instant, this thesis proposes a new algorithm based on a few adjustments to the previous algorithms, in order to allow its applicability as a warning tool to severe wind power variations. For each of the algorithms, the key characteristics of each event with greatest impact on the wind power production were identified (*e.g.*, location, intensity and trajectories).

In order to check the impact of weather systems in the wind production, a composite analysis was performed in order to determine the probability of events that, intersecting a given region, can originate situations of production above 60% of the rated capacity or situations of production below 30% of the rated capacity. Through this analysis, it was possible to verify that the events occurring in the winter months and that intersect the northern and central regions of Portugal are those with the greatest impact on the production level. It was also developed two algorithms of wind power ramp detection. The outputs of these algorithms were then compared with the results derived from the application of the three methodologies for detection of meteorological systems in order to verify the accuracy and feasibility of using such methodologies as warning tools to severe variations in wind power production. The results suggest that storm detection methods are more suitable to detect wind power ramps when compared to the cyclone methodology, and these methodologies allow to identify a large number of true ramps, although with a high number of false alarms, especially in Methodology 1. In order to identify the trajectory of weather events more probable to cause wind power ramps a cluster analysis was performed. The results showed that the trajectories with the greatest impact on production are originated/come through the West/Southwest of Iberia, between the Madeira and Azores islands, reaching the continent in the North/Centre regions of Portugal.

Keywords: Wind Power Ramps, Cyclonic Activity, Power Generation System Management, Weather Conditions, Wind Storms

Índice

Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Agradecimentos.....	xiii
Simbologia e Notações.....	xv
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação da dissertação.....	1
1.2. Panorama Energético Renovável Atual.....	1
1.3. Características da Energia Eólica	5
1.4. Impacto da Produção Eólica na Gestão do Sistema Electroprodutor	6
1.5. O papel da circulação atmosférica na variabilidade da produção eólica.....	7
1.5.1. Ferramentas de diagnóstico da variabilidade eólica.....	10
1.6. Organização da dissertação	11
Capítulo 2 – Circulação Atmosférica	13
2.1. Vento à Escala Sinóptica - definições e terminologias	13
2.2. Circulação atmosférica de larga escala na região Euro-Atlântica.....	14
2.3. Circulações locais.....	15
2.3.1. Brisa marítima e terrestre	15
2.3.2. Brisa de vale e montanha	16
2.3.3. Depressão térmica na Península Ibérica.....	17
2.4. Tempestades – Conceito e deteção.....	18
Capítulo 3 – Dados e Metodologias	21
3.1. Dados.....	21
3.1.1. Dados Meteorológicos.....	21
3.1.2. Dados da produção eólica do agregado nacional	22
3.2. Deteção de ciclones – Metodologia 1.....	23
3.3. Deteção de tempestades – Metodologia 2	24
3.4. Deteção de tempestades adaptada – Metodologia 3	28
3.5. Análise de trajetórias – Agrupamento de trajetórias	30
3.6. Deteção de rampas	31
3.7. Métricas de avaliação	35
Capítulo 4 – Resultados	39
4.1. Análise de tempestades e validação das metodologias.....	39
4.2. Relação entre a produção eólica e a circulação atmosférica	41
4.3. Relação entre rampas de produção eólica e a circulação atmosférica.....	45

4.3.1. As cinco rampas mais gravosas (tipo 1).....	45
4.3.2. Resultados das Rampas de produção eólica: Análise geral.....	46
4.3.3. Meses de Inverno	46
4.3.4. Meses de Verão	49
4.4. Análise das trajetórias com base em técnicas de agrupamento	52
4.4.1. Análise das trajetórias - Metodologia 1.....	53
4.4.2. Análise das trajetórias - Metodologia 2.....	54
4.4.3. Análise das trajetórias - Metodologia 3.....	56
4.5. Considerações Finais.....	59
Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	61
Referências Bibliográficas	63
Anexo A - Análise dos dados das reanálises	69

Índice de Figuras

Figura 1 - Mix energético em Dezembro de 2014: Repartição da produção (à esquerda) e Abastecimento do consumo (à direita). Fonte:[4].	2
Figura 2 - Evolução da produção anual renovável (em GWh) durante o período compreendido entre 2006 e 2014. Fonte:[9].	2
Figura 3 - Evolução da potência instalada (em MW) durante o período compreendido entre 2006 e 2014. Fonte:[9].	3
Figura 4 - Diagrama de cargas para o dia 3 de Março de 2014. Fonte:[12].	3
Figura 5 – Distribuição das centrais de energia eólica em Dezembro de 2014 para Portugal Continental discretizadas por intervalo de potência instalada. Fonte:[13].	4
Figura 6 - Mapa de correlação da velocidade do vento com a produção eólica do agregado nacional para o período entre 2009 e 2010. Os pontos representam os parques eólicos instalados em Portugal no final de 2010. Fonte: [6].	5
Figura 7 - Representação das séries de potência para diferentes agregados e efeito de alisamento espacial. Adaptado de: [22].	7
Figura 8 - Carta de superfície do dia 19 de Janeiro de 2013. Fonte:[32].	9
Figura 9 - Representação esquemática de um centro de baixas pressões (à esquerda) e de um centro de altas pressões (à direita).	14
Figura 10 - Representação esquemática da brisa marítima (à esquerda) e da brisa terrestre (à direita).	16
Figura 11 - Representação esquemática da brisa de vale (à esquerda) e de montanha (à direita).	17
Figura 12 - Representação esquemática da depressão térmica da Península Ibérica.	18
Figura 13 - Esquema ilustrativo das condições ideais para o desenvolvimento de uma tempestade extratropical. Fonte:[45].	18
Figura 14 - Representação do domínio espacial e dos pontos da grelha (numa resolução de 1°x1°). A região sombreada representa a “área de interesse”	22
Figura 15 - Mapas com a velocidade do vento para o Percentil 98% para a estação de Inverno (à esquerda) e Percentil 99% para a estação de Verão (à direita).	25
Figura 16 - Figura esquemática da aplicação do invólucro convexo para determinação de um polígono com base num conjunto de pontos de grelha dispersos.	25
Figura 17 - Exemplo de eventos detetados (zonas sombreadas) e do respetivo invólucro convexo (linha azul) e centro geométrico (ponto azul).	26
Figura 18 - Seguimento da tempestade Gong (área dentro da linha preta) desde a ciclogénese à ciclólise (dias 18 a 20 de Janeiro de 2013). O centro geométrico do evento é representado por “*”.	27
Figura 19 - Representação dos eventos detetados a 08/01/2008 às 3h com base nas três metodologias, a tracejado encontram-se representados os eventos que não satisfazem a premissa da área. O símbolo “*” representa o centro do evento para cada metodologia.	30
Figura 20 - Fluxograma do método de deteção de rampas aplicado de forma independente para rampas de subida e de descida.	34
Figura 21 - Gráfico de barras com a distribuição mensal das rampas de: a) subida do tipo 1; b) descida do tipo 1; c) subida do tipo 2; e d) descida do tipo 2.	35
Figura 22 - Trajetória das três tempestades e instante comum (quadrado): a) Gong (18-01-2013 12:00), b) Klaus (23-01-2009 21:00) e c) Xynthia (25-02-2010 21:00), respetivamente, por aplicação das três metodologias de deteção de sistemas meteorológicos.	40
Figura 23 - Representação gráfica da potência produzida normalizada (%) nos dias de passagem das tempestades Gong (2009), Klaus (2013) e Xynthia (2010), linha vermelha marca início e fim da tempestade de acordo com a data da ciclogénese e ciclólise identificada para cada tempestade de acordo com [74], [76], [77]; a tracejado encontra-se o instante inicial de cada tempestade de acordo com o assinalado na figura anterior.	41

Figura 24 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para a Metodologia 1. Valor de TC igual a 364 para os meses de Inverno e 384 para os meses de Verão.	42
Figura 25 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para a Metodologia 2. Valor de TC igual a 151 para os meses de Inverno e 91 para os meses de Verão.	43
Figura 26 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para eventos positivos da Metodologia 3. Valor de TC igual a 145 para os meses de Inverno e 38 para os meses de Verão.	44
Figura 27 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para eventos negativos da Metodologia 3. Valor de TC igual a 135 para os meses de Inverno e 47 para os meses de Verão.	44
Figura 28 - Representação gráfica das trajetórias para as 5 rampas mais intensas (a) de subida para a Metodologia 1, (b) de subida para a Metodologia 2, (c) de subida para a Metodologia 3, (d) de descida para a Metodologia 1, (e) de descida para a Metodologia 2, (f) de descida para a Metodologia 3. A localização inicial de cada evento é assinalada com ponto.	45
Figura 29 - Agrupamento das trajetórias para $K=6$ com aplicação da Metodologia 1 para o Inverno.	53
Figura 30 - Representação em diagrama de caixas das características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 1.	54
Figura 31 - Agrupamento das trajetórias para $K=6$ com aplicação da Metodologia 2 para o Inverno.	54
Figura 32 - Representação em diagrama de caixas as características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 2.	55
Figura 33 - Agrupamento das trajetórias para $K=6$ com aplicação da Metodologia 3 para o Inverno: eventos de subida (à esquerda); eventos de descida (à direita).	56
Figura 34 - Representação em diagrama de caixas as características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 3 para os eventos positivos.	57
Figura 35 - Representação em diagrama de caixas as características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 3 para os eventos de descida.	58

Índice de Tabelas

Tabela 1. Percentagem da produção eólica por região entre 2008-2014. Fonte: [9].....	4
Tabela 2 - Representação do Tipo de Sistemas Meteorológicos com mais influência na produção eólica. Fonte:[17].	9
Tabela 3 - Classificação do tipo de sistema através do valor do Laplaciano da Pressão. Fonte: [62].	23
Tabela 4 - Tabela de Contingência de eventos diagnosticados e observados; VP =Verdadeiros Positivos, FP=Falsos Positivos, FN=Falsos Negativos, VN=Verdadeiros Negativos, Obs=Observado, Diag=Diagnosticado. Fonte:[33].	36
Tabela 5 - Resumo das diferentes métricas de avaliação. Fonte: [33].	37
Tabela 6 - As cinco rampas mais gravosas do tipo 1.	45
Tabela 7 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Inverno com aplicação da Metodologia 1.	46
Tabela 8 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Inverno com aplicação da Metodologia 2.	47
Tabela 9 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Inverno com aplicação da Metodologia 3.	47
Tabela 10 - Resultados das métricas de avaliação das três metodologias para as rampas de subida de Inverno.....	47
Tabela 11 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Inverno com aplicação da Metodologia 1.	48
Tabela 12 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Inverno com aplicação da Metodologia 2.	48
Tabela 13 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Inverno com aplicação da Metodologia 3.	48
Tabela 14 - Resultados das métricas de avaliação dos três métodos para as rampas de descida de Inverno.	49
Tabela 15 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Verão com aplicação da Metodologia 1.	49
Tabela 16 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Verão com aplicação da Metodologia 2.	50
Tabela 17 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Verão com aplicação da Metodologia 3.	50
Tabela 18 - Resultados das métricas de avaliação dos três métodos para as rampas de subida de Verão.	50
Tabela 19 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Verão com aplicação da Metodologia 1.	51
Tabela 20 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Verão com aplicação da Metodologia 2.	51
Tabela 21 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Verão com aplicação da Metodologia 3.	51
Tabela 22 - Resultados das métricas de avaliação dos três métodos para as rampas de descida de Verão.	52

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho é importante, antes de mais, realçar todo o apoio, colaboração, disponibilidade e atenção prestada por parte de diversas pessoas que contribuíram de forma substancial para o desenvolvimento e criação de novas capacidades e aprendizagens adquiridas no decorrer desta tese. Sendo assim, deixo o meu agradecimento a todos os envolvidos e a todos aqueles que me orientaram em todo o meu percurso académico, profissional e pessoal.

Agradeço à orientadora, Doutora Ana Estanqueiro, pelo excelente tema de dissertação proposto, pela disponibilização das ferramentas computacionais necessárias à realização deste trabalho, pela orientação prestada e revisão de todo o trabalho escrito.

Agradeço ao coorientador, Mestre António Couto, por toda a atenção e disponibilidade prestada na discussão e resolução de problemas, pelo enorme apoio, paciência e confiança demonstrados no decorrer de todo o trabalho e, fundamentalmente pelo interesse e cooperação para a obtenção e otimização de resultados.

Agradeço ao Engenheiro João Silva, pela disponibilidade e ajuda prestadas na validação das bases de dados com base em dados medidos em estações meteorológicas.

Agradeço ao Mestre Tiago Rodrigues pela sua essencial colaboração, que possibilitou o contacto com os Drs. Kevin Key e Ian Simmonds da Universidade de Melbourne.

Agradeço aos Drs. Kevin Key e Ian Simmonds da Universidade de Melbourne pela disponibilização do código para implementação do algoritmo de deteção de ciclones (Algoritmo de Melbourne).

Agradeço ao Pedro W. Abreu por todo o apoio e ajuda no desenvolvimento de aptidões computacionais essenciais para a elaboração deste trabalho, bem como na revisão do trabalho escrito.

Agradeço a todos os amigos que se demonstraram sempre presentes e colaboraram de modo incondicional por forma a garantir um bem-estar emocional no decorrer de todo o meu percurso.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais e irmã pelo enorme apoio e atenção prestados no decorrer desta tese, bem como no acompanhamento em todo o meu percurso pessoal, profissional e académico.

Deixo por fim um enorme agradecimento e dedicatória ao meu tio (26 Janeiro 2016) e à minha avó (10 Dezembro 2015) que constituíram um enorme alicerce à minha construção enquanto pessoa e a todos os momentos de atenção e afeto que demonstraram toda a vida por todos os seus entes queridos.

Simbologia e Notações

TSO	Operadores do Sistema de Transmissão (<i>Transmission System Operators</i>)
NWP	<i>Numerical Weather Prediction models</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
PI	Península Ibérica
ERA – INTERIM	Projeto de reanálises do <i>ECMWF</i>
ERA-I	<i>ERA-INTERIM</i>
IMILAST	<i>Intercomparison of Mid-Latitude STorm diagnostics</i>
MSLP	Pressão média à superfície do mar (<i>Mean Sea Level Pressure</i>)
MERRA-2	Projeto Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 - <i>NASA Global Modeling and Assimilation Office</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático (<i>Root-mean-square deviation</i>)
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
∇P	Gradiente de Pressão (Pa/°)
STD	Desvio Padrão (<i>Standard Deviation</i>)
EDS	<i>Extreme Dependency Score</i>
VP	Verdadeiros Positivos
FP	Falsos Positivos
VN	Verdadeiros Negativos
FN	Falsos Negativos
HS	Hemisfério Sul
HN	Hemisfério Norte
C	Coordenadas (<i>Long, Lat</i>)
Int	Intensidade do sistema
$Perc$	Matriz Percentil
p	Percentil
F_*	Função de distribuição cumulativa
Lat	Latitude (°)
$Long$	Longitude (°)
δ	Domínio

ENSO *El-Niño Southern Oscillation*

SE Sistema Electroprodutor

$w(Long, Lat, t)$ Velocidade para coordenadas ($Long, Lat$) e instante t

Seguimento Função Custo

X Matriz de seguimento

P Pressão média à superfície do mar (Pa)

M Segmentos de interpolação

$dist$ Distância entre os segmentos

$edist$ Comprimento dos segmentos interpolados

X^* Matriz de coordenadas interpoladas

K Número de grupos

I Classificação binária da produção eólica

Pot Potência (MW)

Pot_{val} Limite de Potência (MW)

PRR_{val} Limite de taxa de variação da potência no tempo (%/h)

KSS Hanssen & Kuipers Skill Score

Pr_{lim} Probabilidade de determinado nível de produção

AC Evento meteorológico

TC Todos os eventos detetados

IPMA Instituto Português do Mar e da Atmosfera

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Enquadramento e motivação da dissertação

O rápido aumento da instalação de sistemas de aproveitamento de fontes de energia renováveis com um comportamento estocástico, como a energia eólica, trouxe novos desafios aos operadores do sistema elétrico [1],[2]. Este aumento também apresenta um forte impacto económico-social porque, de modo a flexibilizar o sistema electroprodutor para lidar com a variabilidade e incerteza da previsão da produção destas fontes estocásticas, os níveis determinísticos de alocação das reservas operacionais (para subir e descer) também aumentam [3]. Assim, no atual contexto do sistema elétrico português, onde a energia eólica apresentou em 2014 uma taxa de penetração de cerca de 24% do total do consumo de eletricidade [4], o aumento da sua previsibilidade assume um papel muito relevante na gestão do binómio consumo/produção.

Atualmente, a operação eficiente e segura de um sistema electroprodutor requer que a produção de energia elétrica eólica seja objeto de previsão. Esta previsão, juntamente com a previsão do consumo, permite a redução da necessidade de ponderação da energia e reserva de potência, uma vez que se tratam de ferramentas úteis para a otimização do escalonamento das centrais convencionais. Este procedimento permite manter os padrões elevados da qualidade do serviço, nomeadamente no que respeita à segurança de abastecimento e robustez do sistema, dado que permite ao operador ter conhecimento dos valores atuais e futuros da produção eólica para cada área e pontos de ligação das centrais eólicas à rede elétrica. Assim, a previsão e o aumento da previsibilidade da produção eólica é crucial para o apoio à decisão, com o propósito de assegurar a estabilidade da rede elétrica [5],[6]. Pese embora a maioria dos operadores de sistemas elétricos recorra atualmente a sistemas de previsão eólica, estes ainda apresentam erros substanciais, especialmente no que respeita à previsão de eventos extremos de variação da produção [7]. Os desvios detetados são de amplitude e de fase das séries de produção eólica previstas [7],[8]. Estes erros ocorrem devido à incapacidade das atuais técnicas capturarem as rápidas dinâmicas da atmosfera que desencadeiam mudanças bruscas na produção. Trabalhos recentes [6] permitem afirmar que compreender estas dinâmicas, de uma forma holística, utilizando metodologias capazes de descrever a evolução espacial e temporal da circulação atmosférica de larga escala, constitui um passo crucial para melhorar e complementar as atuais técnicas de previsão. Assim, neste trabalho pretende-se aplicar algoritmos que visam compreender, com base em dados históricos, os mecanismos atmosféricos de larga escala, forçadores da variabilidade da produção de energia eólica no agregado nacional, com especial ênfase em fenómenos designados por “rampas de produção eólica”. Esta compreensão vai permitir: *i*) minimizar o impacto da integração em larga escala da energia eólica; e *ii*) o desenvolvimento de ferramentas operacionais de diagnóstico da variabilidade eólica com maior fiabilidade que, em conjunto com um sistema dinâmico da alocação de reservas [3],[5] podem ser facilmente integradas no processo de decisão por parte do operador do sistema electroprodutor [5].

1.2. Panorama Energético Renovável Atual

Atualmente existe uma grande consciencialização para a importância das fontes de energia renováveis, não só a nível ambiental, como também a nível social e económico. Em Portugal verifica-se uma forte dependência energética externa, uma vez que grande parte da energia consumida em Portugal é importada. De facto, durante 2014, a energia importada atingiu os 40% da energia total produzida (Produção bruta + Saldo importador), valor que tem vindo a diminuir ao longo dos anos com o aumento da produção renovável, contribuindo assim para a redução da dependência externa [9]. A acrescentar a esta dependência está o facto de Portugal não apresentar

qualquer tipo de exploração de energia fóssil. Este motivo, aliado à crescente consciencialização para o impacto ambiental provocado pelo uso de combustíveis fósseis, levou ao surgimento de vários incentivos que permitissem a aposta noutros tipos de energia provenientes de fontes de energia renováveis [10].

Na Figura 1 abaixo encontra-se representado o *mix* energético para Dezembro de 2014, tanto no que respeita à repartição da produção (à esquerda) como no abastecimento do consumo (à direita).

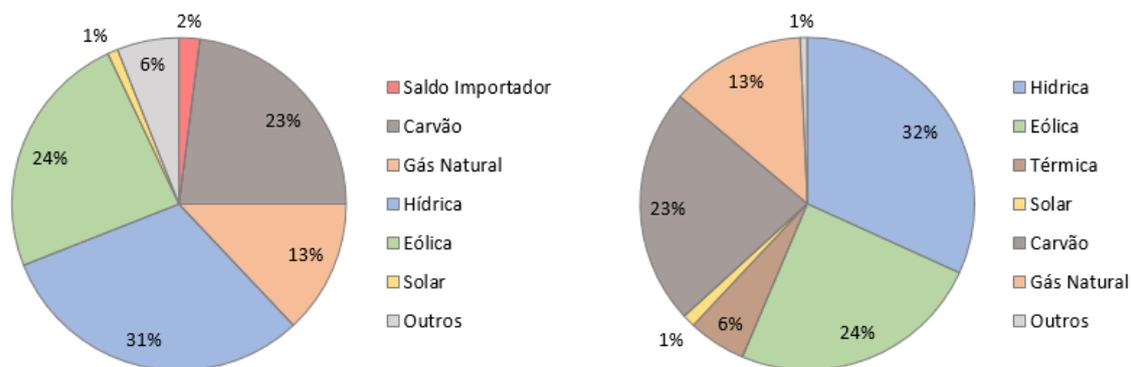


Figura 1 - Mix energético em Dezembro de 2014: Repartição da produção (à esquerda) e Abastecimento do consumo (à direita). Fonte:[4].

Atualmente o portfólio das fontes de energia renováveis, existente no sistema elétrico português, é composto por uma vasta gama de tecnologias com diferentes níveis de desenvolvimento. Algumas, como a energia hídrica, a energia eólica e a biomassa já atingiram um elevado nível de maturidade, considerando-se como fontes economicamente competitivas quando comparadas com as tecnologias de conversão de energia fóssil [10]. Nas figuras seguintes, é possível verificar a evolução da contribuição das fontes de energia renováveis no sistema elétrico português quer no que diz respeito a produção anual (Figura 2) quer nos valores da potência instalada (Figura 3).

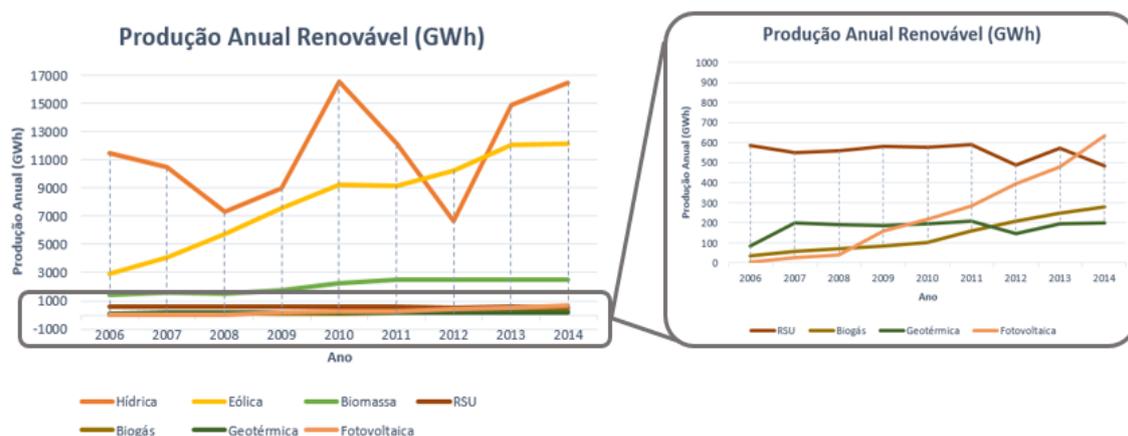


Figura 2 - Evolução da produção anual renovável (em GWh) durante o período compreendido entre 2006 e 2014. Fonte:[9].

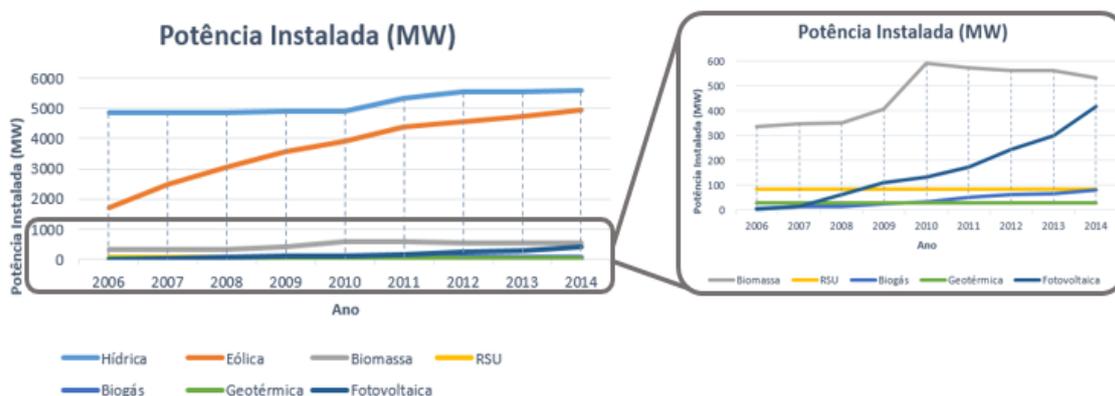


Figura 3 - Evolução da potência instalada (em MW) durante o período compreendido entre 2006 e 2014. Fonte:[9].

As figuras anteriores permitem compreender que, com exceção do ano 2012 (quinto ano mais seco dos últimos oitenta anos) a energia hídrica tem contribuído para grande parte do consumo energético português [11]. No entanto, tal como é possível distinguir em ambas as figuras, tem-se verificado um crescimento exponencial da energia eólica, em particular entre os anos de 2006 e 2010. A produção de eletricidade através de fontes de energia renováveis atingiu, em 2014, 65% do consumo nacional, constituindo um novo recorde para o território português e refletindo uma redução da dependência de combustíveis fósseis [9], [11].

Em 2014, a capacidade instalada de energia eólica representava sensivelmente cerca de 24% da capacidade operacional total e 42% da capacidade renovável instalada. Neste ano os parques eólicos produziram um total de 12,1TWh. Este valor de penetração da energia eólica é idêntico ao verificado durante o ano de 2013 [4][11]. Um exemplo da elevada penetração da energia eólica no sistema elétrico pode ser verificado no dia 3 de Março de 2014 onde a produção eólica representou, em média, 64% do consumo diário, Figura 4 [12]. A maior produção diária de energia eólica durante 2014 foi também registada neste dia, contabilizando um total de 88,4GWh. De referir que a maior penetração instantânea de energia eólica (dados com intervalos de 15 minutos) foi, até final de 2014, obtida a 13 de Novembro de 2011, com 93% [12][11]. Este valor foi, no entanto, ultrapassado no mês de Dezembro de 2015, tendo sido registado um valor de penetração instantânea superior a 100 % durante vários períodos [12].

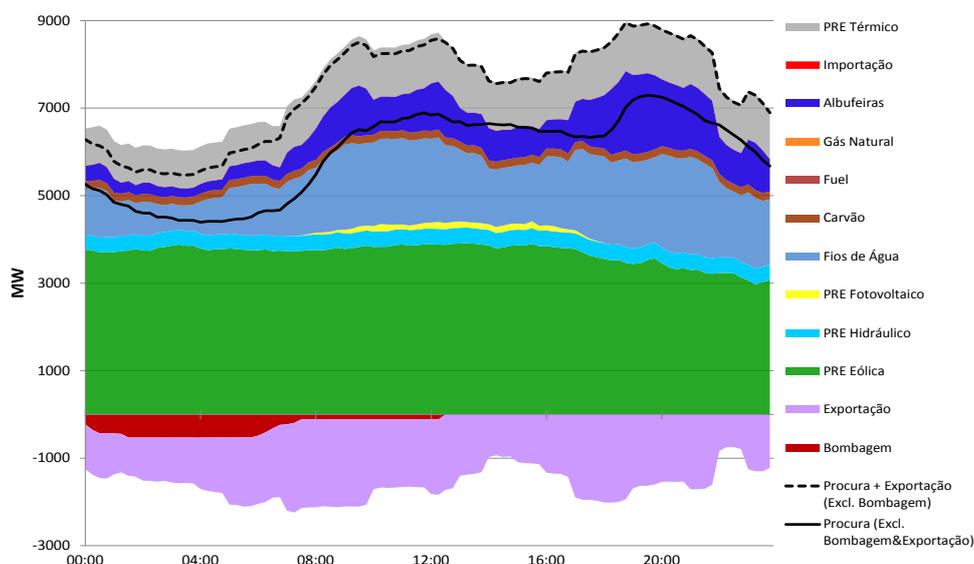


Figura 4 - Diagrama de cargas para o dia 3 de Março de 2014. Fonte:[12].

Outro aspeto relevante no que diz respeito a esta fonte de energia é o conhecimento da localização dos parques eólicos em Portugal Continental. Na Figura 5 encontra-se a distribuição das centrais de produção de energia eólica em Portugal Continental discretizadas em intervalos de potência instalada.

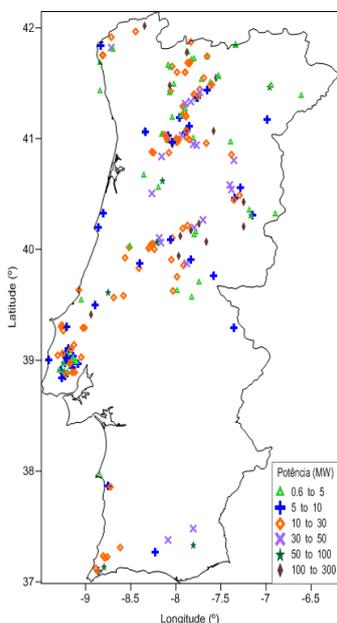


Figura 5 – Distribuição das centrais de energia eólica em Dezembro de 2014 para Portugal Continental discretizadas por intervalo de potência instalada. Fonte:[13].

Com base na Figura 5, é possível distinguir três grandes focos de capacidade eólica instalada *i)* a região do Norte, *ii)* a região do Centro e *iii)* a região do Sul. A Tabela 1 representa a distribuição da produção eólica para as diferentes regiões de Portugal Continental no intervalo de anos entre 2008 e 2014 [9].

Tabela 1. Percentagem da produção eólica por região entre 2008-2014. Fonte: [9].

Região	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Norte	31%	34%	36%	37%	40%	43%	39%
Centro	57%	54%	52%	51%	49%	47%	49%
Sul	12%	12%	12%	12%	11%	10%	12%

Com base nos dados da Tabela 1 conclui-se que 88% da produção eólica registada no ano de 2014 foi produzida nas regiões Centro e Norte, valor semelhante ao registado desde 2008. A região Sul é a que apresenta menor contribuição de produção eólica dado à escassez de recurso em comparação com as restantes regiões. Esta particularidade do sistema elétrico português, explicada pela existência de maior recurso eólico nas zonas montanhosas [14], é de extrema importância uma vez que os parques eólicos se encontram, geralmente, sobre influência de condições atmosféricas semelhantes, como se pode verificar pela correlação entre os dados da produção eólica e a velocidade do vento, Figura 6. Consequentemente, e como descrito por [6], os sistemas meteorológicos que afetam o território Centro/Norte de Portugal tendem a ter mais impacto na variação da produção eólica do que um sistema que influencie a região Sul.

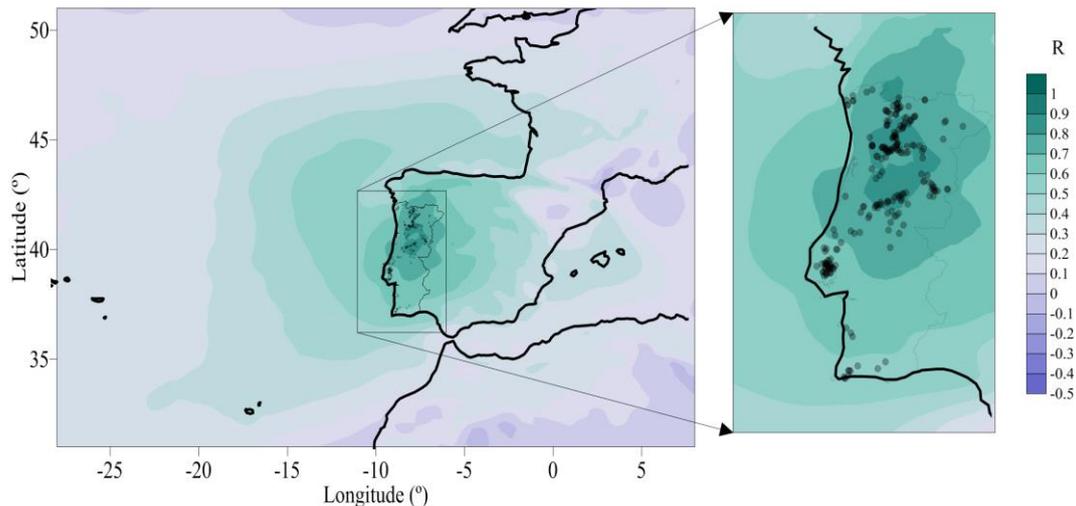


Figura 6 - Mapa de correlação da velocidade do vento com a produção eólica do agregado nacional para o período entre 2009 e 2010. Os pontos representam os parques eólicos instalados em Portugal no final de 2010. Fonte: [6].

1.3. Características da Energia Eólica

O consumo de combustíveis fósseis tem vindo a aumentar ao longo dos anos e, juntamente com estes, o aumento dos gases de efeito de estufa na atmosfera. Por forma a evitar a degradação do ambiente, o consumo a partir de fontes de energia renováveis aumentou de forma visível nos últimos anos. Foram criados incentivos à produção de energia renovável por parte da União Europeia que, em Julho de 2007, decidiu reduzir as emissões dos gases de efeito de estufa em 20%, aumentar o uso de sistemas de energias renováveis em 20%, assim como o aumento em 20% da eficiência energética até ao final de 2020 [15].

A energia eólica tem inúmeros benefícios que a tornam uma fonte de energia atraente tanto para *i)* os grandes consumidores de energia como para *ii)* as pequenas aplicações de produção distribuída [16]. Os principais benefícios deste tipo de energia incluem [16]:

- Energia limpa e inesgotável – Após a sua instalação, a energia eólica não produz qualquer tipo de emissões e não se esgota ao longo do tempo. Um megawatt produzido por uma turbina eólica é capaz de evitar a produção de cerca de 1,5 toneladas de dióxido de carbono, 6,5 toneladas de dióxido de enxofre, 3,2 toneladas de óxidos de nitrogénio e 27 kg de mercúrio.
- Tecnologia modular e escalável – As aplicações eólicas podem tomar diversas formas, incluindo grandes centrais, produção distribuída e sistemas para uso final.
- Estabilidade do preço da energia – Ao colaborar na diversificação do *mix* energético, a energia eólica reduz a dependência relativamente aos combustíveis convencionais reduzindo a volatilidade dos preços de oferta de energia em mercado.
- Redução da dependência de combustíveis importados – As despesas da energia eólica não resultam da importação do combustível, reduzindo assim a dependência energética e económica do exterior e aumentando a segurança do abastecimento de energia.
- Desenvolvimento económico local – Os parques eólicos podem fornecer um fluxo financeiro estável para os investidores nestas centrais e também para os proprietários locais que alugam os seus terrenos para a implementação das turbinas eólicas e que, consequentemente, aumentam também as receitas fiscais das propriedades para as comunidades locais.

1.4. Impacto da Produção Eólica na Gestão do Sistema Electroprodutor

Apesar dos inúmeros benefícios inerentes ao seu aproveitamento, a energia eólica apresenta uma série de problemas e desafios no que diz respeito à sua integração na rede elétrica, sobretudo em sistemas com elevada penetração eólica [2],[6]. O principal desafio advém do fato de ser uma fonte de eletricidade não despachável e fortemente variável no tempo apresentando *i)* uma reduzida garantia de potência e *ii)* reduzida previsibilidade que pode, em alguns casos, acarretar problemas de regulação de tensão na rede local e na própria estabilidade de todo o sistema elétrico. Estas características e a constante necessidade que um sistema elétrico tem de, a cada instante, igualar a produção ao consumo, trazem novos desafios aos Operadores do Sistema de Transmissão (*Transmission System Operators – TSO's*) porque, para flexibilizar o sistema a fim de lidar com a variabilidade e incerteza da produção desta fonte de energia estocástica, foi necessário aumentar significativamente os níveis determinísticos de alocação das reservas operacionais¹ [17],[18]. Este aumento na quantidade de reserva operacional disponível é fortemente dependente do nível de penetração eólica no sistema elétrico em consideração [19]. Estas reservas operacionais necessárias para compensar as súbitas flutuações na potência eólica são muitas vezes disponibilizadas por fontes de energia de cariz não-renovável, com capacidade de resposta rápida como por exemplo o gás natural sendo, contudo, mais onerosas [20],[21]. Estas preocupações associadas às flutuações da energia eólica deixaram de ser irrelevantes para a gestão da rede elétrica, tendo em conta que há uns anos atrás estes problemas eram facilmente evitados através de uma boa gestão e planeamento. No entanto, atualmente são colocadas uma série de questões a respeito da integração em larga escala da energia eólica [22], nomeadamente:

“Será o sistema elétrico capaz de lidar com as especificidades da produção de energia eólica em larga escala sem a criação de novos modelos de parques eólicos, ferramentas de operação do sistema, aumento da eficiência das turbinas eólicas ou mesmo uma mudança no modo convencional de operação dos TSO's?”

Assim, é legítima a preocupação dos TSO's a respeito das características da produção eólica, especialmente em períodos de flutuações severas, uma vez que é da sua responsabilidade a manutenção dos padrões elevados da qualidade do serviço, nomeadamente no que respeita à segurança de abastecimento e robustez do sistema, bem como a otimização do seu desempenho económico.

Do ponto vista operacional, uma forma de lidar com as flutuações de produção eólica pode passar por tirar partido da falta de correlação espaço-temporal do recurso eólico, que é de uma das suas características mais básicas podendo, em alguns casos, estas flutuações serem canceladas, não sendo detetadas pelos TSO's. De acordo com vários autores [6] o efeito estatístico de alisamento da produção (*“statistical power smoothing effect”*) pode ser extremamente benéfico para a operação do sistema elétrico, uma vez que as rápidas flutuações da produção induzidas pelo vento se tendem a cancelar naturalmente tal como se pode observar na Figura 7.

¹ Reserva operacional – Serve para compensar os desvios relativos às previsões de produção de energia e variações no consumo de eletricidade e para limitar o impacto de perturbações no sistema de produção e transmissão. As reservas operacionais englobam regulação primária, secundária e terciária, que diferem na velocidade de resposta.

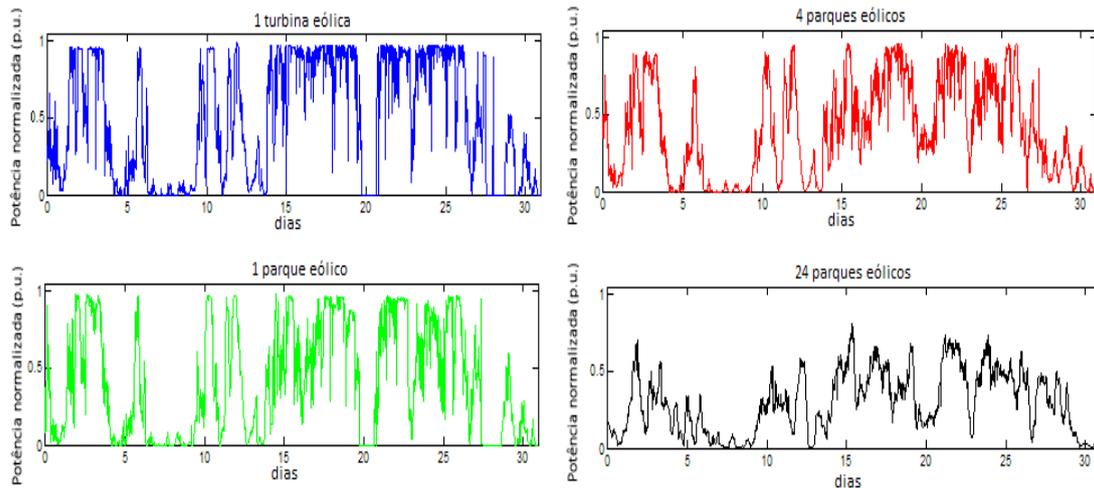


Figura 7 - Representação das séries de potência para diferentes agregados e efeito de alisamento espacial. Adaptado de: [22].

Pela análise da Figura 7 é possível verificar que as flutuações na produção observadas para uma turbina eólica vão sendo atenuadas à medida que se aumentam o número de turbinas e a dispersão espacial dos parques eólicos em análise, reduzindo assim o aparecimento de flutuações extremas de produção [6]. Contudo, vários autores [6], [23], [24] apontam que a agregação de parques eólicos, mesmo que amplamente dispersos entre si, não é suficiente para mitigar eventos únicos quando um país inteiro, ou uma zona de controlo, está imerso em determinadas condições atmosféricas que apresentem uma estrutura coerente e que normalmente se estendem ao longo de várias centenas de quilómetros (*e.g.*, frentes frias). Este resultado foi evidenciado num estudo realizado por [24], no qual os autores detetaram que tanto a ocorrência de trovoadas como a presença de um forte gradiente de pressões são duas das maiores causas para a ocorrência de rampas numa determinada região. Em [23] os autores identificaram que os maiores impulsionadores para a ocorrência de rampas são regiões de forte convecção, frentes ou jatos de baixa altitude. Sendo assim, torna-se fundamental a compreensão do impacto deste tipo de eventos na produção eólica que, juntamente com técnicas de previsão e modelação adequadas podem auxiliar os TSO's na gestão eficiente e segura do sistema elétrico [25].

1.5. O papel da circulação atmosférica na variabilidade da produção eólica

O papel da circulação atmosférica em despoletar rampas de produção eólica é um tópico de investigação relativamente recente que, nos últimos anos, tem verificado um aumento significativo no número de estudos e projetos publicados sobre este tópico e sobre as causas adjacentes à ocorrência de rampas, que podem diferir muito de caso para caso. De acordo com [23], em 2007 foram publicados apenas dois trabalhos acerca desta temática e, em 2013, foram lançados 15 artigos, facto que ressalva o crescimento e importância desta temática adjacente a um incremento na potência eólica instalada a nível mundial. Um outro facto bastante interessante descrito por [23] é que as publicações sob a forma de relatórios técnicos dominaram um primeiro estágio de 2007 a 2008 enquanto que os artigos de conferência se tornaram mais frequentes a partir de 2010, seguidos de um, também, crescimento notório de publicações em jornais. A compreensão destes eventos não tem sido uma tarefa fácil, especialmente porque são raros os casos para os quais as condições meteorológicas são iguais para diferentes parques eólicos. Mesmo quando dois parques se encontram localizados a latitudes semelhantes, os efeitos locais podem diferir em muito devido às características do terreno, rugosidade, topografia ou mesmo devido a fenómenos como brisas do mar/terrestre [23]. A juntar a estes aspetos está também a configuração e disposição do parque eólico que pode ou não justificar a ocorrência de rampas através de processos meteorológicos que envolvam variações na direção do vento. Como

discutido na secção anterior, outro problema consiste no tamanho da área considerada uma vez que, caso o agregado de potência eólica disponível seja relativamente grande, é esperado que a ocorrência de rampas esteja relacionada com processos meteorológicos de larga escala por forma a que grande parte dos parques eólicos sejam afetados ao mesmo tempo. Nesse sentido os processos meteorológicos de larga escala associados à variabilidade das latitudes médias podem ajudar a explicar que países como Portugal e algumas regiões dos Estados Unidos da América sofram de flutuações de produção eólica ligeiramente superiores em contraste com as flutuações experienciadas em países nórdicos [1]. Em [26], foram analisados três projetos distintos, e concluiu-se que o tamanho do projeto em termos de capacidade instalada tem grande impacto no número de rampas, de modo que projetos mais pequenos apresentam um maior número de rampas. No entanto, quando se aborda a intensidade das rampas, esta já é mais dependente da localização específica do parque eólico. Em [27] foi apresentada uma abordagem inovadora com vista à determinação de vales depressionários com recurso a uma técnica baseada na geometria destes sistemas através de métodos de processamento de imagem. A metodologia determina, em primeiro lugar, os candidatos através da união dos pontos de curvatura máxima das isóbaras, de seguida, é aplicado um filtro que elimina candidatos com curvatura menos acentuada. Os autores verificaram que, de facto, os vales depressionários conseguem distinguir, com sucesso, situações com ocorrência de rampas de produção eólica de períodos onde não ocorrem rampas de produção eólica. Em [28], foi também feita uma classificação dos sistemas que possibilitam a ocorrência de rampas de produção eólica. De acordo com o autor, é possível distinguir os fenómenos com origem em processos atmosféricos horizontais dos fenómenos com origem em processos atmosféricos verticais na ocorrência de variações severas na produção eólica. O autor demonstrou que os mecanismos atmosféricos com maior impacto são: *i*) a passagem de sistemas meteorológicos de larga escala (*e.g.* frentes frias); e *ii*) a presença de circulações locais/mesoscala (*e.g.* brisas de mar/terrestre e brisas de montanha/vale). Em [29], foi também abordado este tópico, mais concretamente, a distinção entre processos meteorológicos geralmente responsáveis pela ocorrência de eventos de rampa de subida (*e.g.* frentes frias, trovoadas, brisas de montanha e marítima) e de eventos de rampa de descida (*e.g.* relaxação após passagem de uma frente fria e frente quente) que, neste caso, de um ponto de vista meramente estatístico são menos frequentes que as rampas de subida. Segundo os autores, este facto pode ser explicado pela passagem de sistemas meteorológicos, tais como frentes frias que provocam um aumento súbito da velocidade do vento seguido de um decréscimo gradual. [30] também verificou que as rampas de subida são principalmente causadas por eventos convectivos durante as estações quentes (Primavera e Verão) e pela passagem de sistemas frontais durante as estações frias (Outono e Inverno). [31] comparou as causas adjacentes à ocorrência de 154 rampas de produção eólica num parque eólico em Pomeroy (Iowa) às causas de 1485 eventos de rampa de cinco turbinas num parque eólico de Iowa a cerca de 160 km de distância, para o mesmo período temporal. Os autores verificaram que 40% das rampas no parque eólico de Iowa ocorreram dentro de um intervalo de tempo de 6h de uma rampa detetada em Pomeroy, o que sugere alguma consistência espacial no que se refere à ocorrência de rampas de produção eólica. Os mesmos autores verificaram também que 20% das rampas ocorreram simultaneamente em Iowa central e Pomeroy devido à passagem de sistemas de larga escala (*e.g.* fortes gradientes de pressão). Em [17] o autor identifica de uma forma exaustiva, os sistemas com maior influência na produção eólica. Esta categorização em sistemas meteorológicos foi realizada através de uma inspeção visual *e.g.*, inspeção de cartas de superfície como é exemplo a Figura 8 que representa uma carta de superfície para o dia 19 de Janeiro de 2013.

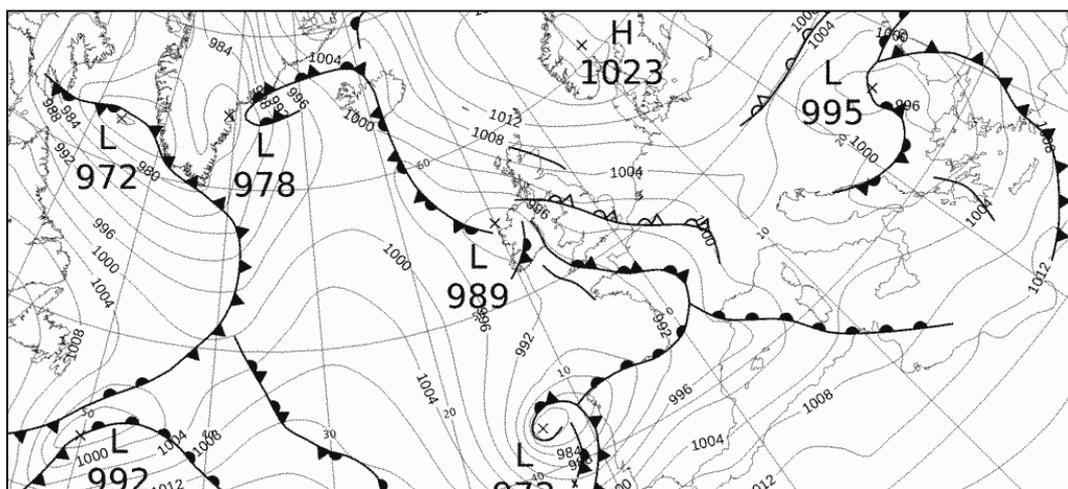


Figura 8 - Carta de superfície do dia 19 de Janeiro de 2013. Fonte:[32].

Através da análise à Figura 8 é possível destacar a presença de vários sistemas de baixas pressões no Oceano Atlântico, nomeadamente um sistema a Noroeste da Península Ibérica com pressão mínima central de, aproximadamente, 968hPa acompanhado por um sistema frontal frio. Este é apenas um dos vários exemplos de sistemas com impacto na produção eólica. Outros exemplos descritos por [17] encontram-se sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Representação do Tipo de Sistemas Meteorológicos com mais influência na produção eólica. Fonte:[17].

Sistema Meteorológico	Definição	Representação
Frente Fria	Zona de transição entre duas massas de ar frio e ar quente.	
Sistema de Baixa Pressão	Região atmosférica marcada por correntes de ar ascendente, gerando condições para a ocorrência de chuva e instabilidade atmosférica.	
Sistema de Alta Pressão	Região atmosférica marcada por correntes de ar descendente, gerando condições de céu limpo ou geralmente fraco.	
Cava	Região alongada de baixas pressões, geralmente associadas a frentes.	
Entre Sistemas	Região influenciada por dois ou mais sistemas (zonas de convergência de ventos).	N/A

De facto, recorrendo a dados de três parques eólicos, [17] detetou que 40% das grandes e rápidas variações são causadas pela passagem de frentes frias nos locais onde se situam os parques eólicos. Os sistemas de baixas pressões contabilizam 15% destas súbitas variações, enquanto que a categoria “Entre-Sistemas” cobre cerca de 25% dos casos. A maioria das restantes variações súbitas na produção eólica é devida à influência de cavas depressionárias. Estes resultados vêm demonstrar que existe uma relação bastante acentuada entre as oscilações súbitas e gravosas da produção eólica e a passagem de sistemas meteorológicos de larga escala. No que diz respeito a Portugal, em [6] através de uma identificação manual e automática os autores concluíram que fortes eventos de rampa são geralmente detetados no Inverno, sendo os eventos de rampa de

subida de Inverno maioritariamente associados à passagem de sistemas depressionários e frentes sobre as regiões do Norte e Centro de Portugal, enquanto que os eventos de rampa de descida são gerados por um decréscimo da velocidade através da passagem de centros de baixas pressões com direção ao continente. No Verão são detetados menos eventos de rampa e de menor intensidade e constituem, em muitos casos, uma consequência da intensificação da baixa térmica na Península Ibérica. Estes resultados indicam que no agregado da produção nacional: *i*) a sazonalidade tem um grande impacto na produção eólica; e *ii*) as estruturas meteorológicas identificadas durante os meses de Inverno se estendem por largas áreas e apresentam uma assinatura muito característica.

1.5.1. Ferramentas de diagnóstico da variabilidade eólica

Atualmente, já é possível encontrar diversas formas de previsão da produção eólica na literatura, sendo que a abordagem mais comum consiste na utilização de séries temporais (determinísticas ou probabilísticas) [33] para determinados pontos obtidas a partir *i*) de métodos estatísticos, *ii*) de modelos numéricos de previsão do tempo (*Numerical Weather Prediction models – NWP*) ou *iii*) de métodos que recorrem à combinação dos anteriores. Regra geral, as abordagens acima mencionadas apresentam dois tipos de erros associados: erros de amplitude e erros de fase [33]. Estes erros ocorrem, principalmente, devido à dificuldade que estas técnicas apresentam em capturar as rápidas dinâmicas da atmosfera que desencadeiam oscilações bruscas na produção eólica. Trabalhos recentes apontam para a importância da compreensão destas dinâmicas de uma forma holística utilizando metodologias capazes de considerar tanto a evolução espacial como a evolução temporal da circulação atmosférica, que constitui um passo crucial para melhorar e complementar as atuais metodologias de previsão [6],[22]. Vários autores *e.g.*, [21] têm analisado a importância dos sistemas de previsão do ponto de vista dos TSO's, e referem que as principais prioridades de um sistema de previsão e monitorização são: *i*) criação de uma interface gráfica simples para o utilizador por forma a acompanhar as previsões e dados históricos da produção para diferentes áreas e diferentes parques eólicos; *ii*) avisos de ocorrência de rampas de produção eólica; *iii*) medidas para avaliar a incerteza das previsões. Assim, este trabalho tem como intuito a compreensão da variabilidade eólica através da sua relação com a circulação atmosférica, com especial ênfase nos eventos que conduzem à ocorrência de “rampas de produção eólica”. O desenvolvimento e implementação deste tipo de ferramentas tem como finalidade melhorar a previsibilidade da produção eólica *i*) permitindo aumentar a fiabilidade dos sistemas de previsão, e *ii*) serem facilmente integradas no processo de decisão por parte do operador do sistema elétrico, reduzindo o risco que a elevada taxa de penetração representa na gestão do sistema elétrico. Caso os resultados das ferramentas de diagnóstico sejam consensuais, estas podem vir a ser utilizadas como sistema de alerta para rampas severas da produção eólica, sendo facilmente integradas nos sistemas atuais de previsão, permitindo ao mesmo tempo fornecer informação visual e informação sobre a incerteza na produção durante estes eventos.

Para atingir os objetivos do trabalho foram aplicados/desenvolvidos algoritmos que permitem identificar algumas das estruturas sinópticas descritas na secção anterior com maior impacto na produção eólica. Embora com outras aplicações *e.g.*, forte precipitação [34] e deslizamentos de terra [35], na literatura atual encontram-se várias metodologias com esta finalidade que, apesar das suas características intrínsecas, apresentam, em geral, uma estrutura semelhante entre elas. O primeiro passo destes algoritmos passa por identificar as localizações dos centros dos eventos com base num determinado campo atmosférico (*e.g.*, pressão média ao nível do mar e velocidade do vento) para cada instante temporal e, posteriormente, as suas trajetórias são obtidas através da ligação dos seus centros entre os diferentes instantes [36].

De referir que a aplicação de diferentes algoritmos gera diferentes resultados, isto deve-se ao facto de não haver uma definição correta de ciclone e, mais concretamente para este estudo, de tempestades. Consequentemente, cada algoritmo envolve diferentes premissas, por esta razão um determinado algoritmo de deteção não pode ser considerado como superior ou mais correto que os demais, uma vez que são utilizadas diferentes definições [37] e a sua precisão é dependente

dos fenómenos em análise. Salienta-se o facto de que determinados sistemas, como por exemplo os sistemas de baixas pressões, nem sempre são acompanhados de ventos fortes e, por essa razão, não serão contabilizados nos métodos de deteção de tempestades, uma vez que não podem ser considerados como eventos extremos [38]. Sendo assim, foram escolhidos dois algoritmos existentes na literatura que visam a determinação de sistemas distintos: um foca-se na deteção de sistemas ciclónicos (Metodologia 1) e o outro baseia-se na determinação de tempestades com base num determinado percentil da velocidade do vento (Metodologia 2). Posteriormente procedeu-se à modificação da Metodologia 2, através da utilização do campo do gradiente de pressão e a introdução de um “efeito de memória” (Metodologia 3).

1.6. Organização da dissertação

A tese encontra-se estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 2 aborda a temática da circulação atmosférica e quais as condições favoráveis à existência de vento, especificando os vários tipos de circulação (*e.g.*, brisas terrestres) mais típicos sobre Portugal Continental e que necessitam de ser tidos em conta quando é feita uma análise das condições atmosféricas propícias à ocorrência de rampas de produção eólica. Neste capítulo, e de forma sucinta, são apresentadas as várias definições de tempestade encontradas na literatura.

O Capítulo 3 apresenta as diferentes metodologias utilizadas, começando por uma descrição e caracterização dos dados utilizados (meteorológicos e de produção eólica). São também especificadas as metodologias para determinação de rampas utilizadas neste trabalho, assim como as métricas aplicadas para a classificação e avaliação dos resultados. Seguidamente são apresentados dois métodos existentes na literatura para identificação de tempestades e de ciclones. Tendo em consideração o caso específico das rampas de produção eólica, propõem-se um terceiro método recorrendo *i)* às melhores características identificadas nos dois algoritmos anteriores, *ii)* análise de várias variáveis meteorológicas, e *iii)* testes de sensibilidade a vários parâmetros (*e.g.*, “memória do algoritmo”). Por fim, é descrita a abordagem estatística utilizada para a análise das trajetórias dos eventos, de forma a identificar zonas, ou “caminhos”, potencialmente mais favoráveis à ocorrência de rampas de produção eólica.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da aplicação das diferentes metodologias de deteção de sistemas meteorológicos e, para tal, é feita uma análise de três tempestades previamente selecionadas (Gong, Klaus e Xynthia) para posterior validação dos métodos. É também feita uma relação entre a produção eólica e a circulação atmosférica através da análise de mapas compósitos de determinados níveis de produção (superior a 60% da capacidade instalada e também para níveis inferiores a 30% da capacidade instalada). É, posteriormente, avaliada a relação entre as rampas de produção eólica e a circulação atmosférica com base na determinação e demonstração das cinco rampas mais gravosas (subida e descida) e da análise geral dos resultados das rampas de produção eólica. De seguida são apresentados os resultados da aplicação das métricas de avaliação das metodologias de deteção de sistemas meteorológicos, tendo sido apresentados, de forma independente, os resultados para as duas estações definidas neste trabalho: Inverno e Verão. Para cada estação, são também analisados, de forma independente, os resultados das métricas para as rampas de subida e descida. É também feita uma análise das trajetórias com base na aplicação da técnica de agrupamento *K-means* para cada metodologia a fim de identificar trajetórias mais propícias à ocorrência de rampas.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões da dissertação bem como possíveis desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2 – Circulação Atmosférica

No capítulo anterior foi descrita a problemática abordada nesta tese e introduzida a aplicabilidade e importância da implementação de ferramentas de diagnóstico de sistemas meteorológicos sendo, por essa razão, importante a caracterização da circulação atmosférica da região Euro-Atlântica. Por fim, será introduzido o conceito de tempestade e formas de deteção, que permite compreender a aplicabilidade adjacente à utilização dos algoritmos criados no decorrer deste trabalho.

2.1. Vento à Escala Sinóptica - definições e terminologias

A fim de conhecer os tipos de fenómenos meteorológicos mais frequentes e os respetivos impactos nas mais diversas áreas de investigação, é crucial a compreensão das definições e terminologias utilizadas na área da meteorologia e climatologia, daí a importância deste capítulo no enquadramento literário do estudo em causa.

O vento é caracterizado por três grandezas: direção, intensidade e sentido. A literatura descreve, maioritariamente, o vento em termos de velocidade horizontal e direção. O sentido reflete se o vento, oriundo dos sistemas meteorológicos, se desloca mais na horizontal ou na vertical. Nos sistemas meteorológicos mais frequentes e para regiões de campo aberto, *i.e.*, longe da presença de perturbações orográficas ou de rugosidade variada – atrito do solo - ou de locais com fortes contrastes térmicos horizontais e verticais (*e.g.*, contraste terra-mar), a componente vertical do vento pode ser desprezada por ter pouca ou quase nenhuma influência. Os casos onde os sistemas meteorológicos estão mais sujeitos à presença da componente vertical do vento, mesmo nas regiões de campo aberto, são as tempestades convectivas e regiões de estratificação e turbulência atmosférica. Apesar da velocidade do vento ser considerada como o rácio entre a distância alcançada pelo ar e o tempo necessário a realizá-la, na prática, a maior parte dos instrumentos de medida do vento continuam a medir a componente horizontal para uma determinada cota [17]. Relativamente aos sistemas meteorológicos mais comuns destacam-se os anticiclones e os ciclones (ou depressões). Um anticiclone é caracterizado como um sistema de isóbaras fechado e de larga escala, no qual se verifica um aumento de pressão à medida que nos aproximamos do centro, registando um valor máximo de pressão atmosférica no centro do sistema. Contrariamente ao anticiclone, num ciclone a pressão diminui da periferia para o centro, e é no centro deste sistema onde se regista um valor mínimo de pressão atmosférica.

A compreensão do equilíbrio de forças na atmosfera torna-se essencial para uma melhor perceção da circulação do ar nos centros de baixa pressão (ciclones) e nos de alta pressão (anticiclones). A atmosfera tende sempre a repor o equilíbrio das pressões horizontais e verticais entre a superfície e a alta atmosfera. O vento é, por essa razão, uma consequência das diferenças de pressão que se registam, sendo a força que impele o deslocamento do ar das altas para as baixas pressões conhecido como a força do gradiente de pressão. A rotação da Terra força a deslocação de uma partícula de ar para a direita no Hemisfério Norte (para a esquerda no Hemisfério Sul), a que se dá o nome de efeito de Coriolis ou em termos físicos, a força de Coriolis. Esta força é proporcional à velocidade, sendo por isso nula no instante inicial para o qual o módulo da velocidade é também nulo. Nas latitudes médias e altas na atmosfera livre verifica-se que o vento é quase geostrófico, *i.e.*, o balanço entre o efeito da força de Coriolis e a força do gradiente de pressão é nulo. Este conceito de vento é muito útil, uma vez que pode ser utilizado para justificar a presença de vento em diversas regiões do globo, em particular sobre os oceanos, e possibilita o cálculo da intensidade do vento a partir da distribuição da pressão atmosférica. Em adição à força de Coriolis, é também considerada a força de atrito que tem impacto na direção e intensidade do vento no meio terrestre. Neste caso onde a força de atrito tem particular interesse para o equilíbrio do sistema de forças, o vento que daí resulta denomina-se por vento do gradiente. A força de atrito tende a gerar um movimento da massa de ar para o interior do centro depressionário e para o exterior do centro de um anticiclone. Posto isto, perante um ciclone verifica-se a existência de

convergência de ar à superfície e, como consequência, o ar junto ao solo tende a ascender forçando a temperatura a diminuir. Caso esta diminuição da temperatura seja suficiente ao ponto de a temperatura do ar igualar a temperatura de orvalho, geram-se condições para que o vapor de água condense levando à formação de nuvens e, possivelmente, de precipitação.

Contrariamente ao que acontece nos centros depressionários, os anticiclones favorecem a divergência do ar à superfície, conduzindo à descida e acumulação de ar junto ao solo e, posteriormente, ao aumento da temperatura, resultando na redução da humidade relativa do ar. Sendo assim, para estas situações não se verifica a formação de nuvens e precipitação, razão pela qual este tipo de sistemas está geralmente associado ao bom tempo [39]. Na Figura 9 pode-se observar o movimento do vento do gradiente para sistemas em regime ciclónico (à esquerda) e anticiclónico (à direita).

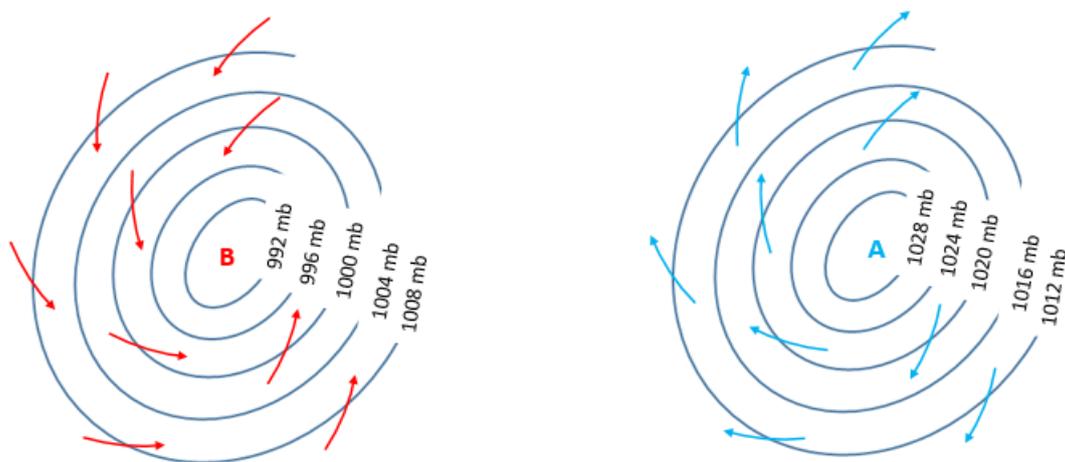


Figura 9 - Representação esquemática de um centro de baixas pressões (à esquerda) e de um centro de altas pressões (à direita).

2.2. Circulação atmosférica de larga escala na região Euro-Atlântica

Portugal situa-se numa faixa de latitudes onde a circulação atmosférica é fortemente influenciada pela migração sazonal do sistema de circulação atmosférica situado nas latitudes médias. No Verão a circulação atmosférica é maioritariamente dominada por um sistema subtropical de altas pressões centrado nos Açores, mais conhecido como Anticiclone dos Açores, favorecendo o bom tempo e temperaturas elevadas [39]. Os meses de Abril e Outubro assumem-se como meses de transição em que, normalmente se regista um equilíbrio entre situações anticiclónicas e depressionárias. Durante o Inverno verifica-se uma deslocação deste sistema para as baixas latitudes, permitindo a passagem de superfícies frontais frias e quentes e outras perturbações meteorológicas em movimento de Oeste para Este ao longo do Oceano Atlântico em direção à Europa. Os sistemas frontais, geralmente designados por frentes, resultam do contacto entre duas massas de ar que, apesar da sua interação, não se fundem, mantendo as suas propriedades termodinâmicas totalmente independentes. Quando a frente resulta de uma aproximação de ar frio, em substituição do ar quente, estamos perante uma frente fria, a qual resulta numa maior extensão de nebulosidade e precipitação forte [40]. Caso contrário, denomina-se frente quente, para a qual se verifica a presença de céu nebuloso e precipitação fraca e persistente. Na situação em que nenhuma das massas de ar avança em substituição da outra, a frente resultante será estacionária.

Dentro dos sistemas ciclónicos/anticiclónicos salientam-se os sistemas tropicais e os sistemas extratropicais que, de acordo com determinados critérios, variam com a sua assinatura espacial, a

sua localização, entre outros. Por exemplo, os ciclones tropicais apresentam características que fazem deles fáceis de detetar: são raros, são geralmente simétricos, deslocam-se lentamente e apresentam uma estrutura relativamente bem definida. Devido ao movimento de rotação da Terra, os ciclones tropicais circulam no sentido anti-horário no Hemisfério Norte e horário no Hemisfério Sul. Este tipo de fenómeno pode formar-se em todas as regiões oceânicas tropicais, com exceção do Atlântico Sul e Pacífico Sudeste, e são geralmente causa de cheias, chuvas torrenciais, ventos fortes e tempestades, sendo por isso considerados uns dos mais perigosos fenómenos meteorológicos nas regiões tropicais. Por outro lado, os ciclones extratropicais são bastante mais comuns, podem variar muito em forma e estrutura, diferem mais em dimensão e têm velocidades translacionais que podem apresentar elevadas variações. A identificação precisa de ciclones extratropicais pode-se revelar uma tarefa árdua uma vez que, por vezes, um único ciclone se pode separar em várias estruturas ou se pode também verificar a junção de dois ciclones num único. Os ciclones extratropicais podem ocorrer em diversas escalas sinópticas, não permitindo haver: *i*) qualquer definição consensual de um ciclone extratropical; e *ii*) técnicas consensuais na identificação e seguimento destes sistemas [41].

Uma vez que este estudo se foca na região de Portugal Continental, o tipo de fenómenos meteorológicos mais comuns são os ciclones extratropicais que são estruturas meteorológicas fundamentais na dinâmica da atmosfera. São considerados uma componente central para a manutenção do equilíbrio da energia na atmosfera, e podem produzir ventos à superfície com elevada intensidade, acompanhados de rajadas de vento que podem variar entre os 120 km/h nas regiões costeiras e os 100 km/h nas regiões interiores [42]. Estes sistemas estão intimamente ligados a muitos desastres naturais que afetam as médias e altas latitudes [41] devido ao forte vento por eles gerado e à elevada precipitação que produzem. Um exemplo deste tipo de sistemas com elevado impacto socioeconómico ocorreu no dia 23 de Dezembro de 2009 na região Oeste de Portugal Continental. Esta tempestade originou rajadas de vento superiores a 140 km/h, tendo sido registado um maior impacto nos distritos de Lisboa, Leiria e Santarém, levando ao desalojamento de diversas famílias no Bombarral e Cadaval, em consequência da destruição dos telhados das suas habitações [42]. As consequências deste tipo de sistemas são geralmente graves, sendo por isso fundamental um máximo conhecimento do tipo de consequências adjacentes bem como da sua evolução e relação com a produção eólica.

2.3. Circulações locais

Nas secções anteriores foi analisado o vento forçado/associado a sistemas de escala sinóptica (dimensão horizontal de 1000 a 2500 km). No entanto, existem sistemas de mesoscala ou microescala que se fazem sentir junto da superfície terrestre que apresentam dimensões espaciais mais reduzidas e são desencadeados por determinadas características topográficas ou devido à existência de diferenças de temperatura entre superfícies próximas, que são genericamente designadas por brisas, podendo originar uma circulação organizada capaz de afetar o clima local e, conseqüentemente, ter impacto na produção eólica.

2.3.1. Brisa marítima e terrestre

Contrariamente aos sistemas sinópticos descritos na secção anterior, as brisas marítimas e terrestres são efeitos locais fomentados pelas diferenças de temperatura registadas nas zonas costeiras. Estas diferenças podem ser da ordem dos 10°C em poucas dezenas de quilómetros. Este tipo de circulação é verificado numa extensão relativamente curta, no entanto e sob condições favoráveis, pode modificar o clima de uma vasta região. Este tipo de brisa caracteriza-se por duas etapas fundamentais:

(1) Durante o dia, com especial atenção nos meses de Verão, uma fina camada mais superficial da terra é aquecida pela radiação, enquanto que uma outra camada mais espessa se estende sobre o oceano absorvendo a radiação onde, em grande parte, acaba por ser perdida sob a forma de evaporação. Apesar da absorção da radiação, a temperatura no oceano não observa grandes variações ao longo do dia devido à elevada capacidade calorífica da água. Por outro lado, a temperatura do ar tende a aumentar devido ao aquecimento da superfície terrestre. Este processo resulta assim na geração de um elevado gradiente de temperatura responsável pela ocorrência de uma circulação de ar. Assim, o ar quente continental tenderá a deslocar-se para cima e em direção ao mar e, por sua vez, o ar frio (ou menos quente) marítimo tenderá a deslocar-se para baixo e em direção à terra, originando ventos moderados à superfície (entre os 5 e os 7 m/s). Este sistema de circulação de vento é denominado de brisa marítima (Figura 10 à esquerda) [43].

(2) Durante a noite, a temperatura da superfície terrestre tende a arrefecer gradualmente devido à fraca capacidade calorífica da terra, resultando numa temperatura inferior à registada na superfície do mar. Sob estas condições, a temperatura à superfície da terra sofre um rápido decréscimo enquanto que a temperatura do mar permanece praticamente inalterada, resultando novamente na criação de um mecanismo de circulação direta no sentido contrário ao anterior. Esta brisa é denominada de brisa terrestre (Figura 10 à direita) [43].

A Figura 10 representa de forma esquemática a brisa marítima (à esquerda) e terrestre (à direita).

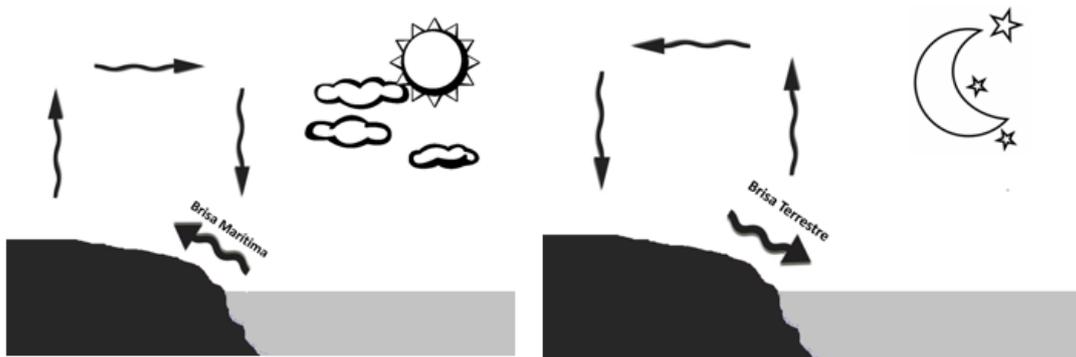


Figura 10 - Representação esquemática da brisa marítima (à esquerda) e da brisa terrestre (à direita).

2.3.2. Brisa de vale e montanha

Na brisa de vale e montanha, o grande impulsionador para a existência de brisa é a topografia e, de modo semelhante à brisa marítima e terrestre, apresenta duas etapas fundamentais:

(1) Durante o dia, junto da montanha, o ar tende a aquecer mais depressa que o ar circundante - região do vale - favorecendo o estabelecimento de uma circulação de ar entre o vale e a montanha e sendo assim, para a situação diurna, a montanha funciona como fonte de aquecimento, despoletando uma circulação de ar mais fresco oriundo do vale denominada por brisa de vale ou vento anabático (Figura 11 à esquerda) [43].

(2) Durante a noite, ocorre o fenómeno inverso, isto é, junto da montanha o ar tende a arrefecer mais rapidamente do que na região do vale motivando uma nova circulação de ar entre a montanha e o vale. Neste caso a montanha funciona como fonte de arrefecimento, resultando numa descida do ar mais frio em direção ao vale, originando um vento à superfície definido como catabático, podendo atingir velocidades bastante elevadas. Esta circulação é denominada de brisa de montanha (Figura 11 à direita) [43].

A Figura 11 representa de forma esquemática a brisa de vale (à esquerda) e montanha (à direita).



Figura 11 - Representação esquemática da brisa de vale (à esquerda) e de montanha (à direita).

2.3.3. Depressão térmica na Península Ibérica

Quando as circulações de brisa dominam o escoamento atmosférico numa região extensa, estas podem dar origem à formação de depressões quentes sobre o continente, designadas por depressões térmicas [14]. A circulação de Verão na Península Ibérica é frequentemente deste tipo e possui dimensões que geralmente são consideradas de mesoscala (*meso-alpha*, *i.e.*, entre 200 e 2000 km). A prevalência deste regime de circulação na Península Ibérica deve-se à geometria da península, onde o aquecimento do continente durante um dia de Verão dá início à circulação da brisa marítima. Dado que a altitude do solo vai crescendo em direção ao interior da Península Ibérica onde existem várias cadeias montanhosas, a circulação de brisa é reforçada por uma brisa de vale. De acordo com [44], os meses com maior frequência de existência de depressões térmicas são Julho e Agosto, e concluiu-se que os ventos do mar para terra aumentam de intensidade com a intensificação da depressão térmica, podendo ter valores superiores a 10 m/s quando forçados a passar por regiões estreitas como vales de rios ou passagens entre montanhas. Como o sistema se mantém ao longo de muitas horas, o efeito da força de Coriolis faz-se sentir, desviando a brisa para a direita, *i.e.*, transformando uma circulação quase perpendicular à costa numa circulação praticamente paralela. O resultado é uma circulação fechada no centro da península, rodando no sentido ciclónico - contrário aos ponteiros do relógio, no caso do Hemisfério Norte [14].

A circulação da depressão térmica na Península Ibérica (Figura 12) dá origem a ventos de Norte ou Noroeste em toda a costa ocidental, com uma intensidade crescente ao longo do dia, atingindo um máximo ao fim da tarde. Esta situação é geralmente definida como regime da Nortada, característica do Verão português. Durante a noite, a Nortada perde intensidade mas não ocorre, geralmente, uma inversão da circulação, *i.e.*, não se observa uma brisa de terra significativa. De facto, durante o Verão, a temperatura no interior da Península baixa durante o período noturno, mas mantém-se quase sempre um pouco acima da temperatura da superfície do Atlântico, que é relativamente baixa na vizinhança da Península, devido ao afloramento costeiro que aí tem lugar [14].

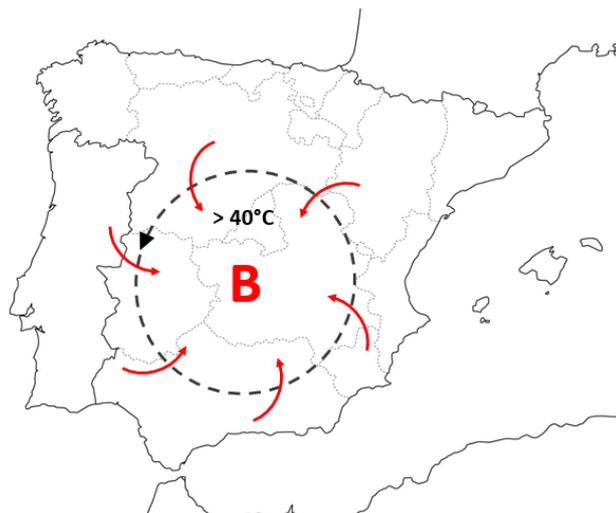


Figura 12 - Representação esquemática da depressão térmica da Península Ibérica.

2.4. Tempestades – Conceito e deteção

Antes de proceder à descrição das metodologias nas secções seguintes, é importante compreender o conceito de tempestade. A formação de uma tempestade depende muito das condições na alta troposfera, sobretudo do posicionamento das zonas de vento mais intensas. Os locais mais propensos à sua formação são, regra geral, zonas de elevados gradientes térmicos e nas zonas adjacentes às montanhas ou bacias oceânicas com elevadas temperaturas à superfície do mar. O desenvolvimento de uma tempestade apresenta várias etapas, desde a sua formação (ciclogénese), ao seu crescimento e posterior dissipação (ciclólise). Todo este processo se desenrola em intervalos de tempo que vão de alguns dias a uma semana, dependentemente das condições de origem da tempestade e das condições verificadas nos níveis mais altos da atmosfera. Na Figura 13 apresenta-se um esquema ilustrativo das condições ideais para o desenvolvimento de uma tempestade extratropical.

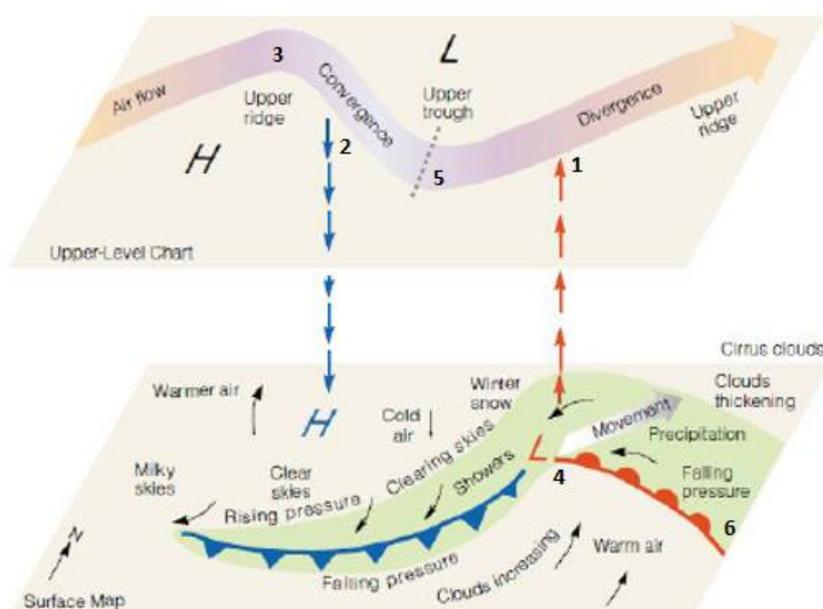


Figura 13 - Esquema ilustrativo das condições ideais para o desenvolvimento de uma tempestade extratropical.

Fonte:[45].

Com base na Figura 13 é possível verificar que nas zonas onde a circulação de jato favorece a divergência de vento (alta atmosfera) (1) ocorre a ascendência de ar mais quente da superfície

(movimento vertical ascendente), enquanto que nas zonas onde a circulação de jato potencia a convergência de vento (na alta atmosfera) (2) é favorecida a descida de ar frio (movimento vertical descendente) dos níveis superiores da atmosfera para a superfície. Quando a convergência dos ventos em altitude é superior à convergência dos ventos à superfície, a pressão no centro da tempestade diminui rapidamente, o que favorece a sua intensificação, permitindo assim a conversão de energia potencial em energia cinética. Nesta fase de crescimento da tempestade, os sistemas sinóticos de superfície tendem a desfasar-se dos sistemas sinóticos em altitude, ou seja, devido aos movimentos verticais do vento na atmosfera a crista anticiclónica à superfície adianta-se relativamente à crista anticiclónica em altitude (2 e 3), sucedendo o mesmo princípio com o vale depressionário (4 e 5) [45].

Apesar da teoria das condições ideais para a geração de uma tempestade ser em grande parte conhecida, não há uma definição precisa relativamente à identificação de tempestades, uma vez que é, de certa forma, subjetiva, *i.e.*, depende daquilo que cada investigador considera ser e do método aplicado para quantificar as suas características. Sendo assim, podem ser obtidos diversos resultados e selecionadas diversas aplicações. De acordo com [46] uma tempestade pode então ser considerada consoante três diferentes perspetivas:

- **Teórica** – Esta perspetiva é muito comum e assenta na teoria da instabilidade baroclínica. Baseia-se em dois diferentes aspetos, a presença de um gradiente térmico vertical e o papel dos centros de vorticidade relativa das circulações depressionárias. A vorticidade relativa é definida como a componente vertical da vorticidade da circulação depressionária e está fortemente relacionada com o processo que conduz à ciclogénese (formação) e consequentemente, ao crescimento de perturbações à escala sinótica [46].
- **Pragmática** – Sob esta perspetiva, uma tempestade é considerada no contexto dos seus impactos, *i.e.*, para alguns, uma tempestade é definida em termos de como é manifestada à superfície: ventos intensos, nuvens, precipitação, entre outros. Pode também ser observada através da obtenção de uma “fotografia” da condição média da tempestade, tal como é utilizada nos métodos de filtragem por passa-banda, que permite diagnosticar o trajeto de uma tempestade, determinando estatísticas associadas a escalas temporais sinóticas pré-definidas. A principal limitação desta metodologia é que, apesar de se focar em padrões espaciais associados a diversas escalas temporais, estes padrões ou trajetos nem sempre estão associados a tempestades. Isto deve-se ao facto de uma banda corresponder a determinada escala temporal, enquanto que os ciclones podem apresentar diversas escalas associadas aos seus tempos de vida [47]. Outra aproximação é a análise utilizando o ponto de vista Euleriano dos sistemas, tal como é aplicado em algoritmos baseados na velocidade do vento num determinado local. Apesar desta perspetiva considerar aspetos qualitativos dos eventos e depender da “perceção” que o investigador tem do sistema, pode ser de grande relevância na ausência de medições [46]. Têm sido desenvolvidos métodos para quantificar esta “perceção” utilizando variáveis meteorológicas e limites para definir quando ocorre uma tempestade. Semelhante a uma das metodologias desenvolvidas neste trabalho, em [48] o autor criou um algoritmo que contabiliza eventos tempestuosos com base na velocidade do vento. Segundo esta definição, uma tempestade não é apenas o centro de um sistema, como também o efeito observado a uma determinada distância dentro do seu raio de influência.
- **Seguimento** – As tempestades podem ser estudadas detetando cada sistema individualmente e seguindo-o no tempo, o termo geral para este método é a aproximação Lagrangeana. Mesmo considerando esta perspetiva, é necessário ter em conta o conceito de tempestade, sendo assim, diferentes definições podem gerar diferentes resultados. Este problema manifesta-se quando se seleciona uma determinada variável atmosférica para caracterizar a tempestade. Esta perspetiva é a que se aproxima mais das metodologias desenvolvidas neste trabalho [46].

Na literatura atual existem vários exemplos das diferentes perspetivas descritas anteriormente, em [49] o autor comparou os resultados obtidos utilizando três métodos de seguimento distintos: *i)* [50], que localiza o sistema de baixas pressões, utilizando a pressão média à superfície do mar

(*Mean Sea Level Pressure* - MSLP); *ii*) [51], que procura o valor mínimo do campo MSLP para cada ponto da grelha; e *iii*) [52], que identifica o máximo numa curvatura de uma interpolação bi-cúbica ao campo MSLP. Os três modelos apresentam diferenças tanto no número de tempestades como na sua localização. Apesar das diferentes perspetivas possíveis para o desenvolvimento de um método de deteção de eventos, todas as metodologias apresentam uma etapa muito semelhante, a identificação, na qual são estabelecidas uma série de premissas a fim de controlar o número e intensidade dos sistemas detetados [37]. Por exemplo, em [37] a deteção de um centro teve por base três premissas relativamente à pressão média ao nível do mar: *i*) a grelha representativa do campo de pressão deve ter um valor mínimo entre os pontos adjacentes; *ii*) o valor mínimo deve ser inferior a um determinado limite; e *iii*) o campo do gradiente de pressão deve ser superior a determinado limite. Contudo, a aplicação de tais constrangimentos pode conduzir à deteção de ciclones apenas nos seus estágios mais elevados de maturidade e, conseqüentemente, sistemas mais fracos podem ser ignorados [37]. De acordo com o autor [37], um algoritmo de deteção de ciclones eficiente deve ser capaz de decidir se os sistemas identificados mudaram de posição ou se deixaram de existir para cada espaço de tempo. Um desafio para este tipo de algoritmos consta na capacidade de identificar a repartição de um sistema ou mesmo a junção de sistemas. Outro aspeto relevante consiste na possibilidade de existir mais do que uma localização candidata a ser considerada como o centro do próximo evento. Neste caso, estamos perante campos “ruidosos”, para os quais são considerados como centros diversos pontos da grelha, tipicamente localizados juntos uns dos outros. Para evitar este problema, o algoritmo deve determinar automaticamente que candidatos devem ser contabilizados e quais os que devem ser ignorados. Muitos algoritmos aplicam a aproximação ao “vizinho mais próximo”, onde os trajetos são obtidos através dos centros detetados num determinado instante com os vizinhos mais próximos no instante seguinte. Outros estudos fazem uma aproximação mais complexa, recorrendo a funções custo, baseadas na velocidade de deslocamento. Nestes casos, a metodologia seleciona uma possível localização para o evento e escolhe a estrutura mais próxima da potencial localização. Contudo, deve-se ter em consideração que o modelo adotado deve ser escolhido mediante o tipo de análise pretendida. Sendo assim, no que se refere a algoritmos para deteção de sistemas meteorológicos, não se pode afirmar que determinado método é errado/correto, mas sim adequado ou desadequado ao estudo de uma determinada situação [47]. No seguimento deste trabalho, foram implementadas três metodologias distintas para a deteção de sistemas meteorológicos, a primeira centra-se na deteção de sistemas ciclónicos enquanto que as duas restantes consistem na deteção de tempestades, onde a segunda utiliza dados de velocidade do vento à superfície e a terceira utiliza dados de pressão ao nível médio do mar. As metodologias podem ser subdivididas em duas partes principais: *i*) a deteção dos eventos e *ii*) o seu seguimento. Nas secções que se seguem serão abordados, de forma mais detalhada, os algoritmos implementados e, por fim, serão comparados os resultados das metodologias.

Capítulo 3 – Dados e Metodologias

Nesta secção serão identificados os dados utilizados nos algoritmos, tanto os dados meteorológicos como os dados de produção eólica em agregado nacional. De seguida serão apresentadas as metodologias utilizadas para a deteção dos sistemas atmosféricos de interesse e as metodologias para deteção de rampas de produção eólica no agregado nacional. De referir que todo o processamento foi realizado com o *software* Matlab [53].

3.1. Dados

3.1.1. Dados Meteorológicos

Para este trabalho foram selecionados dados de reanálises *i.e.* dados históricos que são obtidos através do ajustamento dos dados observados à física de um modelo numérico [54], uma vez que oferecem uma vasta gama de parâmetros atmosféricos e permitem, numa primeira fase, utilizar dados com um grau de confiabilidade elevado para compreender os fenómenos em análise.

Foram selecionados os dados das reanálises do projeto *ERA-Interim* (ERA-I) [55], [56] do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) [54] que estão disponíveis com uma resolução temporal de 6h (00, 06, 12 e 18 UTC). Esta resolução temporal pode ser em alguns eventos de rampa, manifestamente inferior ao desejável. Nesse sentido, optou-se por considerar também as previsões disponibilizadas na mesma base de dados para as 03, 09, 15 e 21 UTC. Por forma a averiguar a aplicabilidade dos dados da base de dados ERA-I nas horas de previsão *i.e.*, verificar se efetivamente os dados não influenciavam os resultados, procedeu-se à comparação dos dados das reanálises com os dados observados para as estações de Castelo Branco IPMA 2005 e Sines SNIRH 2002-2004. Durante este procedimento foi realizada a mesma análise para os dados das reanálises do projeto MERRA-2 [57] uma vez que este disponibiliza os dados com uma resolução temporal de 3h. Os resultados desta análise para as duas variáveis de interesse nesta tese *i)* pressão reduzida ao nível médio do mar e *ii)* velocidade do vento aos 10 metros de altura são apresentados no Anexo A. A escolha da base de dados foi também suportada com recurso a uma revisão de literatura, nomeadamente através das publicações do projeto IMILAST (*“Intercomparison of Mid-Latitude STorm diagnostics”*) que tem como objetivo a comparação de diferentes algoritmos automatizados de identificação e seguimento de ciclones. Neste projeto foi escolhida esta base de dados para a comparação dos diferentes algoritmos devido a sua reconhecida qualidade/precisão [58], tendo sido aplicada em vários estudos sobre a região em análise [59]. De acordo com o exposto anteriormente, e tendo em consideração os resultados obtidos no Anexo A, optou-se pela utilização dos dados do projeto ERA-I. Através dos resultados do anexo A, é possível também verificar que no caso da pressão reduzida ao nível médio do mar: *i)* o coeficiente de correlação de Pearson é bastante elevado e próximo de um; *ii)* através de uma análise de escala é possível verificar que a magnitude do erro é bastante inferior quando comparada aos erros da velocidade do vento; e *iii)* as duas bases de dados conseguem reproduzir o perfil diário típico nas duas estações. Estes resultados demonstram uma melhor adequação dos dados de pressão aos objetivos do trabalho, facto que foi tido em consideração na criação de um novo algoritmo proposto nesta tese.

De acordo com as diferentes definições de ciclone, o seu seguimento pode ser realizado utilizando um número distinto de variáveis atmosféricas. Após a escolha de determinada definição e das variáveis atmosféricas a utilizar, é crucial considerar a resolução espaço-temporal dos dados utilizados, uma vez que têm impacto significativo nos resultados obtidos. Sendo assim, uma elevada resolução dos dados é um critério essencial à deteção de todo o tempo de vida dos sistemas e possibilita a identificação de pequenas tempestades que, mesmo não tendo uma intensidade tão elevada quanto as demais, podem causar um sério impacto na variável em análise [41], neste caso na produção eólica. Nesse sentido, neste trabalho optou-se por recorrer aos dados com uma resolução de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

Uma vez que se pretende analisar o continente europeu, com maior enfoque na região de Portugal Continental e Atlântico Norte, foi escolhida a região geográfica 25°N a 65°N e 60°W a 20°E (Figura 14). A Figura 14 apresenta também a representação da “Área de interesse” de coordenadas: longitude de 10°W a 5°W e latitude de 35°N a 43°N. Esta área foi identificada como sendo a região que tem maior impacto na produção eólica nacional.

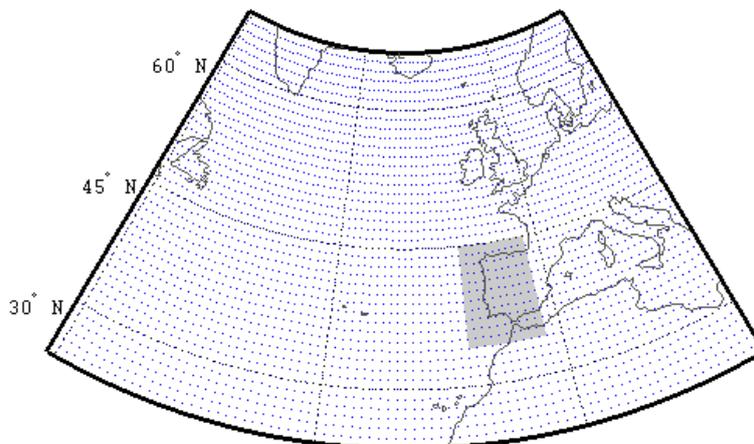


Figura 14 - Representação do domínio espacial e dos pontos da grelha (numa resolução de 1°x1°). A região sombreada representa a “área de interesse”.

Os dados foram obtidos para o intervalo de tempo compreendido entre Janeiro de 2008 e Dezembro de 2014 em formato *Network Common Data Form* (NetCDF) e são disponibilizados em grelhas uniformes longitude-latitude com pontos da grelha ($Long_j, Lat_i$), onde $Long_j$ representa a j longitude e Lat_i a i latitude. Estes dados encontram-se separados por intervalo de tempo e agrupados consecutivamente por forma a que cada ficheiro NetCDF represente um intervalo de tempo discreto (neste caso de Janeiro de 2008 a Dezembro de 2014) [36].

De acordo com o descrito nas secções anteriores, as condições atmosféricas sobre Portugal Continental apresentam uma forte componente sazonal, podendo resultar em características atmosféricas e impactos distintos no despoletar de rampas de produção eólica. Nesse sentido, optou-se por dividir os dados em meses de “Inverno” e “Verão”. A divisão por “Inverno” e “Verão” foi feita da seguinte forma:

- 1) Inverno – Janeiro, Fevereiro, Março, Outubro, Novembro e Dezembro;
- 2) Verão – Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro.

3.1.2. Dados da produção eólica do agregado nacional

Os dados de produção eólica utilizados neste trabalho são disponibilizados pelo operador do sistema elétrico português, com resolução temporal de 15 minutos sendo, no entanto, normalizados para 1h [12]. Após obtenção dos dados horários para o intervalo de Janeiro de 2008 a Dezembro de 2014, e de forma a atenuar o impacto do aumento da capacidade instalada ao longo do período em análise, os dados foram normalizados relativamente à capacidade eólica instalada no final de cada mês, de acordo com as estatísticas mensais disponíveis no portal da Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG) [60]. De referir que a normalização dos dados para um determinado dia é feita com base na capacidade instalada registada no último dia do mês anterior. Assim, por exemplo, no final do mês Dezembro de 2013, verificou-se uma potência instalada de 4630MW, e à 1h do dia 1 de Janeiro de 2014 observou-se uma potência eólica produzida média de 1945,32MW que, aplicando a normalização, resulta numa percentagem de 42,0% da capacidade total instalada.

3.2. Detecção de ciclones – Metodologia 1

O algoritmo para deteção de ciclones aqui utilizado foi desenvolvido na Universidade de Melbourne [52]. Este algoritmo foi inicialmente desenvolvido para o Hemisfério Sul (HS), tendo sido adaptado por vários autores para que fosse possível a sua utilização para o Hemisfério Norte (HN) [45]. Atualmente, a bibliografia relacionada com este algoritmo é vasta, e uma descrição detalhada do mesmo pode ser encontrada em [52],[61]. Subsequentemente é feita uma descrição sucinta do algoritmo.

O algoritmo recorre aos dados do campo MSLP e identifica os possíveis candidatos através de uma busca dos máximos e mínimos do Laplaciano da pressão, sendo que este valor deverá ser superior a um determinado limite definido pelo utilizador. De seguida o algoritmo verifica a existência de um mínimo/máximo de pressão nas proximidades do local onde foi detetado o mínimo/máximo do Laplaciano. O procedimento final para a identificação dos sistemas consiste na criação de limites por forma a eliminar sistemas fracos. Para tal é analisado o valor mínimo da sua intensidade para um determinado raio em redor do centro do sistema, resultando num valor médio do Laplaciano da pressão. O valor limite utilizado para incluir um sistema na contagem é $0,2 \text{ hPa } (\text{° lat})^{-2}$ dentro de um raio de 2° lat . Caso o valor do Laplaciano se encontre entre $0,2$ e $0,6 \text{ hPa } (\text{° lat})^{-2}$, a tempestade é considerada fraca, caso este seja superior a $0,6 \text{ hPa } (\text{° lat})^{-2}$, é considerada forte [46],[62]. Sistemas com tempo de vida inferior a 6h são também excluídos da contagem. A distância mínima é igualmente analisada, sendo que são apenas contabilizados sistemas com um raio superior a 3° lat . A eliminação de sistemas fracos pode ser feita através da suavização dos dados, contudo, há a possibilidade de desprezar eventos que, apesar de fracos podem ter algum impacto no parâmetro em estudo. O algoritmo possibilita também a identificação dos sistemas enquanto abertos e fechados. Um sistema aberto/fechado é definido comparando o Laplaciano da pressão em cada ponto da grelha com os seus pontos vizinhos. Quando uma possível baixa pressão é detetada, a localização do mínimo da pressão é interpolada através de uma aproximação iterativa ao centro de um elipsoide que melhor se ajuste à pressão na superfície. Quando um centro fechado não é determinado pelo elipsoide a uma distância de cerca de 1200km, é feita uma busca a um sistema aberto. As restrições impostas relativamente à força do evento dependem assim do tipo de sistema, existindo quatro classificações: Forte Fechado, Forte Aberto, Fraco Fechado e Fraco Aberto [62]. Na Tabela 3 encontra-se a classificação dos tipos de sistemas, bem como os seus limites de força e a respetiva classe.

Tabela 3 - Classificação do tipo de sistema através do valor do Laplaciano da Pressão. Fonte: [62].

Classe	Tipo	Laplaciano ($\nabla^2 P$)
00	Forte Fechado	$x > 0,6$
01	Forte Aberto	$x > 0,6$
10	Fraco Fechado	$0,1 < x \leq 0,6$
11	Fraco Aberto	$0,2 < x \leq 0,6$

De seguida, é realizado o seguimento dos eventos para o qual é feita uma previsão da posição seguinte e respetiva pressão central. A escolha dos candidatos é feita para uma determinada área, geralmente escolhida como um círculo com centro na posição original. Todos os candidatos para a posição seguinte são examinados e é escolhido o candidato mais adequado [62]. Esta escolha utiliza uma velocidade de previsão que é deduzida através da posição anterior. A probabilidade da associação entre os sistemas e os seus possíveis sucessores é determinada com base numa função custo [62]. Esta função envolve a distância a partir da posição previamente determinada e a diferença de pressão central. As associações entre os sistemas previstos e os seus possíveis sucessores são organizadas por grupos e, para cada grupo, a combinação mais provável de associações é determinada. Caso um sistema não apresente qualquer associação, significa que este acabou de emergir (ciclogénese) ou deixou de existir (ciclólise). Este procedimento evita assim a separação ou junção de sistemas. Após executados estes procedimentos, é obtida uma tabela de

seguimento com as várias posições dos eventos, os instantes em que foram detetados (intervalo de 3h em 3h), datas, velocidade, área e classificação por tipo de sistema (fechado forte, aberto forte, fechado fraco e aberto fraco).

Este algoritmo, que se encontra gratuitamente disponível, foi cedido pelos autores ao LNEG, e a sua configuração (data inicial, data final, *namelists*, etc..) foi adaptada para a região em estudo de acordo com [45], e seguindo igualmente as recomendações dos autores. Para a execução deste algoritmo recorreu-se aos dados MSLP para o intervalo de tempo entre Janeiro de 2008 e Dezembro de 2014. É de acrescentar que este algoritmo foi instalado e compilado em sistema operativo Linux.

3.3. Detecção de tempestades – Metodologia 2

A metodologia da detecção de tempestades foi apresentada por [38] onde o autor demonstrou uma nova abordagem para a identificação individual de tempestades durante os meses de Inverno e verificou uma grande concordância entre a metodologia desenvolvida e as tempestades observadas. O primeiro passo para a aplicação desta metodologia é a determinação dos pontos de grelha onde as velocidades do vento aos 10 metros são superiores a determinado percentil. Posteriormente, para cada instante temporal, foi retirado o valor do percentil em cada ponto da grelha. O valor do percentil usualmente utilizado é 98% dado que climatologicamente é o valor que apresenta um melhor compromisso entre estes eventos e os efeitos socioeconómico causados [38]. O cálculo do percentil é feito com base na seguinte formulação [63]:

$$Perc_x = F_*^{-1}(p) = \min\{w: p \leq F_*(W)\} \quad (1)$$

Onde $p = 0,98$ e F_* é a função de distribuição cumulativa ponderada pela raiz quadrada do cosseno da latitude de $\{w(Long, Lat, t): (Long, Lat) \in \delta\}$ onde δ corresponde ao domínio e $w(Long, Lat, t)$ a velocidade do vento para as coordenadas $(Long, Lat)$ e instante t . A ponderação torna-se necessária para que todos os pontos da grelha tenham a mesma representatividade espacial. Para os meses de Verão, na literatura atual não se encontra nenhum valor de percentil. Após testes sensibilidade optou-se por utilizar o Percentil 99% para identificar os eventos de tempestade. De referir que neste caso o termo “tempestade” é mantido para os meses de Verão, apenas para designar os eventos de ventos extremos, não sendo expectável que estes eventos sejam acompanhados das condições atmosféricas observadas durante os meses de Inverno *e.g.*, precipitação intensa. Na Figura 15 apresentam-se os mapeamentos representativos da velocidade do Percentil 98% para o Inverno e do Percentil 99% para o Verão para os anos de 2008 a 2014.

Através da análise da Figura 15 é possível verificar que as velocidades do vento máximas registadas são identificadas na região do Atlântico Norte, a Sul da Gronelândia. Como esperado, também se destacam velocidades superiores para a estação de Inverno, no entanto, sobre a região continental esta diferença não é muito significativa. É também de destacar que devido ao “efeito de atrito” provocado pelo solo, o vento é significativamente inferior nos continentes, logo será de esperar que qualquer evento tempestuoso que ocorra no Atlântico perca geralmente intensidade assim que intersete a costa.

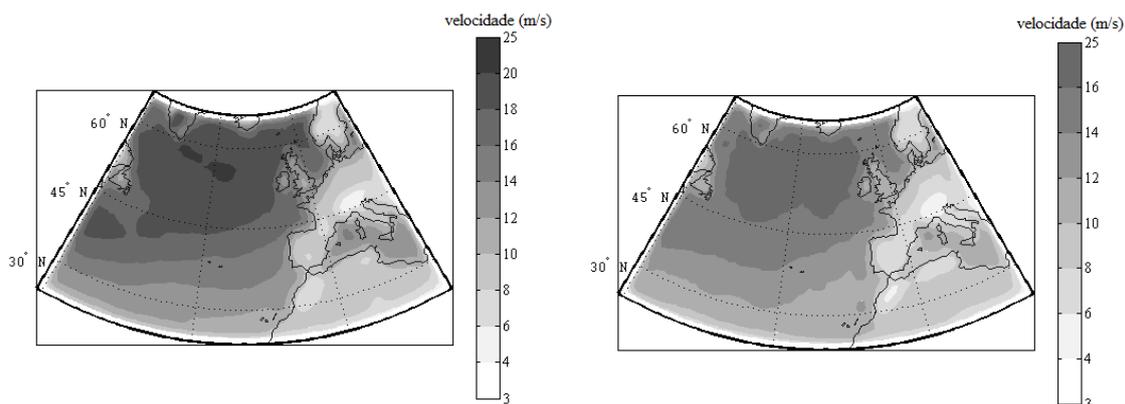


Figura 15 - Mapas com a velocidade do vento para o Percentil 98% para a estação de Inverno (à esquerda) e Percentil 99% para a estação de Verão (à direita).

Na segunda etapa desta metodologia, e para cada instante temporal, são identificados os pontos para os quais a diferença entre a velocidade do vento e o valor do percentil é superior a zero, correspondendo aos pontos de elevada velocidade do vento. O próximo passo consta na identificação de áreas contínuas para as quais ocorra a condição do Percentil, sendo necessário contabilizar todos os objetos identificados em cada instante. Para cada objeto identificado procedeu-se ao cálculo do invólucro convexo (*Convex Hull*) [29] com base nos dados da grelha que permite, para um determinado conjunto de pontos, identificar o polígono convexo que contém todos os pontos, possibilitando assim a identificação de pontos que possam corresponder a um mesmo evento sinóptico.

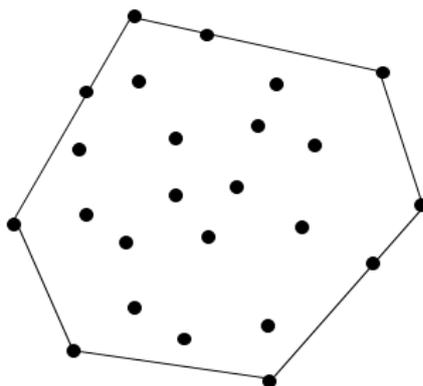


Figura 16 - Figura esquemática da aplicação do invólucro convexo para determinação de um polígono com base num conjunto de pontos de grelha dispersos.

Aplicando o conceito do invólucro convexo esquematizado na Figura 16 é possível obter o limite da área dos eventos e, conseqüentemente, a localização geométrica do centro dos mesmos. A Figura 17 representa um exemplo de um evento detetado, o respetivo invólucro convexo e o seu centro geométrico.

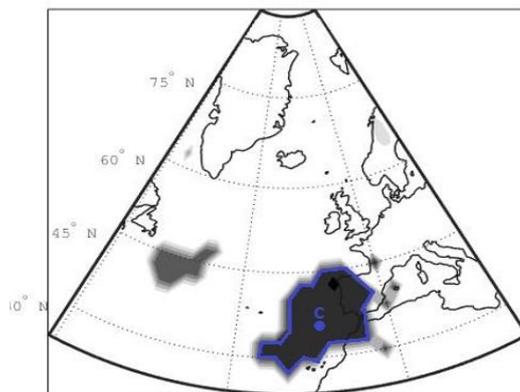


Figura 17 - Exemplo de eventos detetados (zonas sombreadas) e do respetivo invólucro convexo (linha azul) e centro geométrico (ponto azul).

Na Figura 17 é então possível distinguir um evento de área abrangente junto à Península Ibérica. Por forma a determinar a sua área foram identificados os seus limites (linha azul) tendo sido considerada toda a região interior aos mesmos, sendo esta região a área correspondente a este evento. De referir que são apenas considerados os eventos com uma área mínima de 150 000 m² [38]. Para cada evento é posteriormente determinado o seu centro sendo designado por “*centro do evento*”. No presente estudo, esta identificação dos pontos para os quais a velocidade excede a velocidade do percentil (quando a diferença é superior a 0) corresponde à fase de “*busca espacial*” [36] acima mencionada, podendo ser esquematizada pelo seguinte pseudocódigo:

Algoritmo: *Busca Espacial*

Entrada: Dados Atmosféricos com intervalo de 3h; **Saída:** Lista de eventos sinópticos associados a possíveis tempestades - L

1. L = Lista vazia
2. N = número de iterações (nº de tempos para cada estação)
3. **for** i = 1:N
4. Calcular a diferença entre a velocidade em cada ponto e o percentil
5. Encontrar posições onde diferença > 0
6. Para posições do passo anterior, determinar pontos da grelha próximos que podem representar o mesmo evento sinóptico - função *bwboundaries* - e o nº total de eventos sinópticos para o instante i
7. Identificação da área de cada evento sinóptico (Candidatos) – função *regionprops*
8. Identificação do centro geométrico do evento sinóptico
9. **for** j = 1:número de candidatos
10. **if** candidato cumpre requisito da área
11. I_j = Coordenadas do centro do evento, Coordenadas do ponto, Hora do evento, Intensidade da velocidade no centro do evento e Área
12. I_j é adicionado à lista L
13. **end**
14. **end**
15. **end**

O resultado deste algoritmo de “*busca espacial*” é uma lista de eventos sinópticos associados às potenciais tempestades. Respeitando os passos acima mencionados, é possível fazer uma seleção das possíveis tempestades para cada instante. Na Figura 18 encontram-se os resultados do algoritmo *busca espacial*, para o seguimento da tempestade Gong com ciclogénese a 18 de Janeiro de 2013 e ciclólise a 20 de Janeiro de 2013.

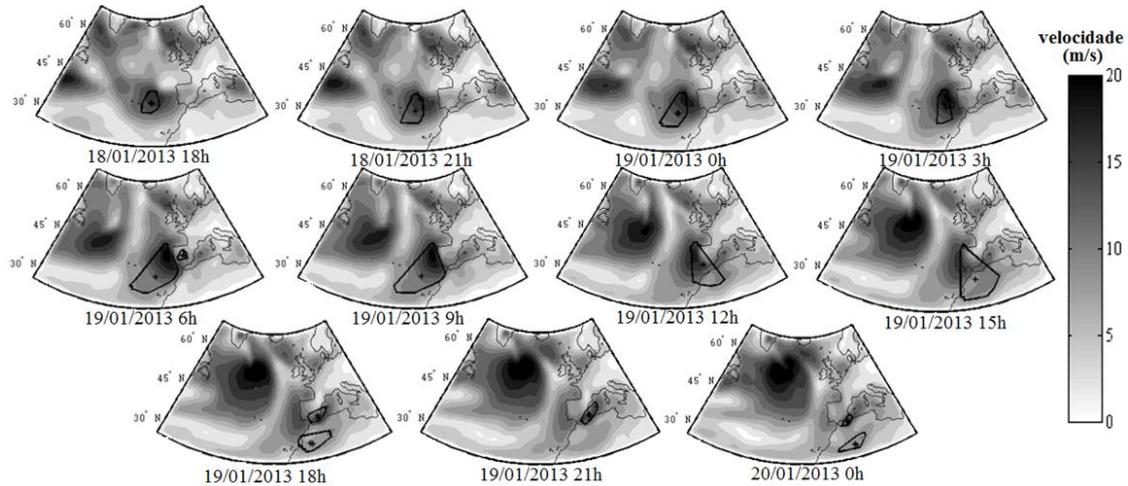


Figura 18 - Seguimento da tempestade Gong (área dentro da linha preta) desde a ciclogénese à ciclólise (dias 18 a 20 de Janeiro de 2013). O centro geométrico do evento é representado por “*”.

Na Figura 18 é possível verificar que a Tempestade Gong apresentou um acentuado desenvolvimento e consequente intensificação no dia 19 de Janeiro. Estas figuras foram obtidas através do algoritmo em estudo e representam a velocidade do vento para cada ponto da grelha para instantes de 3h em 3h. É possível observar que esta tempestade foi identificada junto às ilhas e se foi deslocando para Este, em direção à Península Ibérica (PI), onde perdeu força, acabando por se separar.

Uma vez identificados os eventos sinópticos para cada 3h, torna-se necessário fazer o seguimento temporal dos eventos. As premissas impostas no algoritmo para identificar as sequências temporais foram:

1. Distância euclidiana entre os centros de um mesmo evento em dois instantes consecutivos não deve exceder um determinado limite, sendo esta distância máxima definida como 720 km [38];
2. Tempo de vida e velocidade, sendo que apenas interessam eventos com um tempo de vida mínimo de 6h e velocidade máxima de propagação igual a 120 km/h [38].

Este procedimento permite identificar se o evento detetado no instante seguinte corresponde ao evento anteriormente detetado ou se foi já contabilizado como um outro evento totalmente distinto. É importante verificar que todos os eventos que não apresentam qualquer continuação sejam imediatamente eliminados, porque só interessam eventos que tenham um percurso identificável. Adicionalmente, e nos casos em que são detetados mais que um evento que cumpra as premissas anteriores aplicou-se uma função custo (*Seguimento* – equação 2) que permite determinar a trajetória mais adequada. A função custo utilizada neste trabalho é semelhante à apresentada por [37], que é expressa por:

$$Seguimento = \underset{j=1}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{j=1}^{j=N} (C_t - C_{t+1,j}) \times \left(\left\| \frac{(Int_t - Int_{t+1,j})}{Int_t} \right\| \right) \right) \quad (2)$$

Onde C_t representa as coordenadas geográficas do evento sinóptico no instante t , $C_{t+1,j}$ representa as coordenadas geográficas do evento sinóptico no instante $t+1$ para o j evento, Int_t representa a intensidade observada no centro geométrico do evento sinóptico no instante t e $Int_{t+1,j}$ representa a intensidade observada no centro geométrico para o j evento sinóptico no instante $t+1$.

Todo o processo acima descrito insere-se no algoritmo de “*correlação temporal*” [36] que pode ser facilmente representado pelo pseudocódigo designado por “*correlação temporal*”. Através do algoritmo *correlação temporal* é possível obter uma tabela de seguimentos onde se encontram

identificados todos os eventos e as respetivas propriedades para todo o tempo de vida considerado e para cada espaço de tempo.

$$X = \begin{bmatrix} t_1 & Area_{.1} & Long_{.1,1} & \dots & Long_{.1,n} & Lat_{.1,1} & \dots & Lat_{.1,n} \\ t_i & Area_{.i} & Long_{.i,1} & & Long_{.i,n} & Lat_{.i,1} & & Lat_{.i,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde i é o número do evento, n o número de tempos de cada evento, t_1 e t_i representam o primeiro instante de tempo para o primeiro e o i evento, respetivamente, $Long_{.1,n}$ e $Long_{.i,n}$ correspondem à longitude média do evento detetado no instante inicial e no instante n , respetivamente, e $Lat_{.1,n}$ e $Lat_{.i,n}$ a latitude média do objeto no instante inicial e no instante n . De referir que a metodologia foi aplicada de forma independente para cada uma das estações do ano em estudo.

Algoritmo: *Correlação Temporal*

Entrada: Lista L com eventos sinópticos identificados através da busca espacial; **Saída:** Lista T das trajetórias das tempestades.

```

1. T = Lista vazia
2. N = número de iterações (tamanho da Lista L)
3. while N > 1
4.     j = 0
5.     t2 = t0 + ΔT (t0 é o instante inicial e ΔT o intervalo de tempo de 3h)
6.     Posições1 = encontrar valores da Lista L com instante igual a t2
7.     if tamanho (Posições1) >= 1
8.         while tamanho (Posições1) >= 1
9.             j = j + 1
10.            Cálculo da Distância percorrida através da distância euclidiana de Lat e Long
11.            Posições2 = para Posições1 procurar eventos que cumpram o critério da distância máxima entre
centros
12.            if tamanho (Posições2) >= 1
13.                Aplicação da função custo – função Seguimento
14.                tj = ponto da Lista L para argmin (Seguimento)
15.                tj é adicionado à lista T
16.                N = N - 1
17.            else
18.                Ponto não é adicionado
19.                N = N - 1
20.            end
21.            t2 = t0 + j × ΔT (t0 é o instante inicial e ΔT o intervalo de tempo de 3h)
22.            Posições1 = encontrar valores da Lista L com instante igual a t2
23.        end
24.    else
25.        N = N - 1
26. end

```

3.4. Detecção de tempestades adaptada – Metodologia 3

De forma a compreender como as atuais técnicas de deteção de ciclones/tempestades se encontram relacionados com a produção eólica, nomeadamente em períodos de rampa (subida ou descida) de produção, foram criadas e aplicadas as duas metodologias acima descritas, contudo, no trabalho conducente a esta dissertação não se procedeu à sua otimização. No entanto, e tendo em consideração alguns resultados obtidos durante a elaboração da presente tese, nesta secção é proposto um novo algoritmo. No anexo A foi demonstrado que os dados de pressão são bastante mais fiáveis que os dados de velocidade utilizados na Metodologia 2. Outro exemplo das limitações das metodologias anteriores é que a existência de uma rampa de produção eólica *per*

se não se encontra sempre relacionada com extremos da velocidade do vento, depende essencialmente do estado anterior, sendo necessário introduzir um “efeito de memória”. Outra limitação das metodologias anteriores é a sua incapacidade para distinguir rampas de subida e de descida, sendo apenas possível apurar a existência de rampas de produção eólica na presença de ciclones/tempestades e a sua respetiva localização. Posto isto, e tendo com base a Metodologia 2, seguidamente é proposta uma terceira metodologia [64] que se baseia na pressão média ao nível do mar. Por forma a poder identificar as zonas onde existe maior variação da pressão, foi calculado o gradiente da pressão [6] recorrendo ao método das diferenças finitas, expresso por:

$$\nabla P = \frac{\partial P}{\partial Long} \hat{i} + \frac{\partial P}{\partial Lat} \hat{j} \approx \frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{2\Delta Long} + \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{2\Delta Lat} \quad (4)$$

Onde P é pressão média ao nível do mar, $Long$ é a longitude e Lat é a latitude (ponderada pela raiz quadrada do cosseno). De seguida, e de forma a introduzir um efeito memória procedeu-se à diferenciação numérica no tempo do módulo do gradiente da pressão, de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{\partial \|\nabla P\|}{\partial t} \approx \frac{\|\nabla P\|_t - \|\nabla P\|_{t-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

Com base nos resultados das equações anteriores é possível identificar os candidatos de interesse que serão novamente avaliados a respeito da sua área, distância entre centros, tempo de vida e velocidade, de acordo com um determinado percentil (algoritmos de *Busca espacial* e de *Correlação* – Secção 3.3). Os resultados desta metodologia apresentam-se da mesma forma que na Metodologia 2, *i.e.*, uma matriz com as posições de cada evento e os seus instantes iniciais. As grandes diferenças entre esta metodologia e a anterior constam nos seguintes aspetos: *i*) utilização de dados de pressão, podendo permitir uma melhor identificação dos centros dos sistemas; *ii*) identificação, de forma independente, dos eventos extremos que se encontram associados a variações positivas/negativas no tempo, possibilitando uma melhor relação com os eventos de rampa de produção eólica [64]. Assim, considerou-se que os eventos com variações negativas são aqueles que apresentam uma variação no tempo do módulo do gradiente de pressão inferior ao Percentil 2%. Por outro lado, os eventos de subida são identificados como eventos que apresentam uma variação no tempo do módulo do gradiente de pressão superior ao Percentil 98%. Para os meses de Verão, os valores do Percentil foram modificados, para 1% no Verão e 99% no Inverno.

A título de exemplo, na Figura 19 encontram-se representados os sistemas meteorológicos detetados no dia 08/01/2008 às 3h para as diferentes metodologias apresentadas. Na Figura 19 são detetados seis sistemas na Metodologia 1, três sistemas na Metodologia 2, um evento positivo e três eventos negativos na Metodologia 3. Para delimitar a área de influência de cada ciclone na Metodologia 1, optou-se por utilizar a formulação apresentada em [34]. De acordo com a formulação aplicada em [34], a definição da área dos eventos para a Metodologia 1 é circular, aspeto que influencia a área do sistema, uma vez que as restantes metodologias apresentam sistemas não circulares delimitados através do resultado da aplicação do invólucro convexo. A Metodologia 1 deteta mais sistemas, uma vez que não apresenta uma restrição tão exigente no que se refere à intensidade dos eventos. A tracejado encontram-se representados os sistemas que foram detetados no instante em análise mas que, no entanto, não satisfazem a premissa imposta para a área (Metodologias 2 e 3).

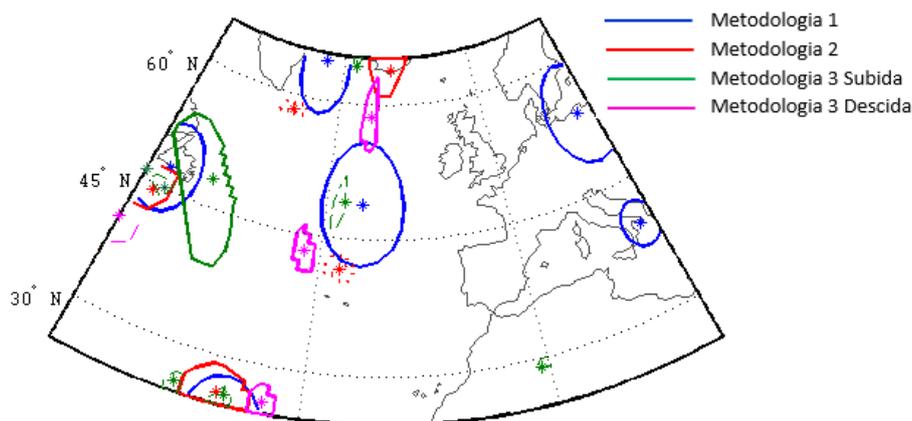


Figura 19 - Representação dos eventos detetados a 08/01/2008 às 3h com base nas três metodologias, a tracejado encontram-se representados os eventos que não satisfazem a premissa da área. O símbolo “*” representa o centro do evento para cada metodologia.

3.5. Análise de trajetórias – Agrupamento de trajetórias

A grande variedade de trajetórias de sistemas meteorológicos resultantes da aplicação das metodologias apresentadas anteriormente pode ser mais facilmente compreendida agrupando cada uma em subgrupos com características espaço-temporais homogêneas. Este procedimento é muito útil na previsão e monitorização dos seus trajetos para uma determinada região [65]. No presente caso este procedimento visa identificar trajetórias de ciclones/tempestades semelhantes que possam ser usadas como diagnóstico para alertar os operadores do sistema elétrico para a ocorrência de eventos extremos de produção. Sendo assim, é importante a organização das trajetórias num conjunto definido de padrões de trajetos, e isto é possível através da utilização de técnicas de agrupamento (*clustering*). Existem inúmeras metodologias de agrupamento com diferentes áreas de aplicação como a engenharia, a bio-informática ou marketing [66]. A classificação de trajetórias em agrupamentos já foi aplicada por vários autores, *e.g.*, [67], [68] recorrendo a critérios de semelhança baseados na posição inicial dos eventos, na localização do máximo de velocidade, na forma das trajetórias, entre outros fatores. Em [68] os autores analisam os diferentes tipos de trajetórias e as respetivas características, como a sua sazonalidade, a sua relação com as circulações de larga-escala e com o ENSO (*El-Niño Southern Oscillation*) [68]. [68] criou também um método de agrupamento probabilístico com o propósito de descrever vários aspetos adjacentes aos ciclones tropicais: a localização da sua ciclogénese, a sua sazonalidade, a localização de derrocadas e a respetiva intensidade [68].

Por forma a obter o agrupamento das trajetórias dos eventos detetados, neste trabalho foi utilizada a técnica de agrupamento *K-means* utilizando a distância Euclidiana que visa a divisão de uma determinada amostragem num certo número de grupos *K*, e a cada amostra é associado um grupo que apresente uma média mais próxima do valor da amostra, sendo assim, esta metodologia tem como objetivo agrupar as trajetórias com base em medidas de semelhança. O foco está em maximizar a homogeneidade entre os elementos de cada grupo [69]. O problema adjacente à utilização de qualquer técnica de agrupamento advém da sua incapacidade em abranger vetores com diferentes comprimentos, o que acontece em qualquer tipo de conjunto de trajetórias. Uma forma de superar este problema consiste na interpolação dos vetores de trajetórias num número fixo, resultando assim em vetores com o mesmo comprimento, possibilitando a aplicação de um método de agrupamento, como descrito em [70]. As trajetórias são então interpoladas em *M* segmentos, sendo *M* o tempo médio dos eventos (tempo médio de cada evento vezes o número de intervalos analisados por dia). Uma vez que os dados são fornecidos para intervalos de 3h em 3h, são analisados 8 intervalos por dia e, visto que o tempo médio de um evento é de aproximadamente 5 dias [70], o número de segmentos utilizado será $M=5 \times 8=40$ segmentos. Para

cada evento é definida a distância entre cada segmento de 3h, sendo mais claramente caracterizada através da seguinte expressão:

$$dist_i = \sqrt{(Long_{i+1} - Long_i)^2 + (Lat_{i+1} - Lat_i)^2} \text{ para } i = 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$

Onde $Long_i$ e Lat_i são, respetivamente, a longitude e a latitude para a posição i e N é o número de posições detetadas para todo o intervalo temporal em estudo [70]. O comprimento dos segmentos interpolados é dado por:

$$edist = \frac{1}{M} \sum_i^{N-1} dist_i \quad (7)$$

Após aplicada a interpolação, obtém-se uma matriz X^*_k , definida por:

$$X^*_k = [\widetilde{Long}_1, \widetilde{Long}_2, \dots, \widetilde{Long}_{M+1}, \widetilde{Lat}_1, \widetilde{Lat}_2, \dots, \widetilde{Lat}_{M+1}]^T \text{ para } k = 1, \dots, K \quad (8)$$

Em que X^*_k é um vetor coluna para a tempestade k , \widetilde{Long} e \widetilde{Lat} são as longitudes e latitudes interpoladas [70].

3.6. Detecção de rampas

A ocorrência de rampas eólicas pode ser especialmente arriscada e onerosa para o sistema electroprodutor (SE) no caso de integração em larga escala de energia eólica no sistema elétrico, em face da dimensão e elevada derivada (dP/dt) que tais rampas podem assumir. Assim, é neste tipo de SE's - de que o Português constitui um excelente exemplo - que a previsão da ocorrência de rampas contribui para a caracterização do risco de operação do SE em instantes de grande variabilidade e, sobretudo, para a mitigação das suas consequências técnicas e económicas, *e.g.*, através da alocação dinâmica de reservas de potência adicionais. Por essa razão, e devido ao elevado crescimento da produção eólica nos últimos anos, a importância e relevância da caracterização e previsão das rampas eólicas tem vindo a aumentar muito. No entanto, a caracterização e definição perentória destes eventos onde se verifica uma acentuada variabilidade eólica é muito difícil de obter, uma vez que esta varia de sistema para sistema e é definida de acordo com as características técnicas do sistema elétrico em que se insere [23]. Atualmente não existe uma definição unanimemente estabelecida, dado que a ideia adjacente à noção de rampa é descrita como um evento local que é suficientemente crítico para merecer especial atenção. Esta caracterização "crítica" encontra-se relacionada com os potenciais danos e custos associados à má, ou inadequada, gestão do evento que são considerados demasiado elevados ou suficientes para os poder distinguir de situações sem ocorrência de rampa [23]. Outra definição, um pouco mais específica, consiste numa alteração súbita e significativa da potência eólica injetada na rede elétrica por um parque eólico, ou agregado de centrais eólicas, de tal forma que obrigue a um reajuste, mais ou menos intempestivo, da potência elétrica a entregar pelas centrais elétricas em operação nesse momento. De acordo com o relatório para o projeto-piloto Alberta (AWS Truewind 2008) [71], ocorre uma rampa sempre que se verifica uma variação na energia produzida com amplitude suficiente num período relativamente curto de tempo. Neste caso, os autores consideram que esta variação tem que ser no mínimo 50% da capacidade instalada, para um período de tempo de cerca de 4h ou menos. Uma rampa pode então ser caracterizada pelos seguintes parâmetros [23]:

- 1) Magnitude: Corresponde à variação da potência observada durante a ocorrência de um evento meteorológico;

- 2) Duração: Período temporal para o qual ocorre uma grande variação de potência produzida;
- 3) Taxa de variação: Derivada das grandezas anteriores (dP/dt) que permite quantificar a intensidade da rampa;
- 4) Instante de ocorrência: Corresponde ao instante temporal para o qual ocorre o evento de rampa. Este parâmetro pode ser definido tanto como o instante inicial do evento, ou como o instante central do evento;
- 5) Sentido: Quando a rampa representa uma subida ou descida de potência.

Tal como foi acima mencionado, existem várias alternativas à definição de um evento de rampa e todas as definições podem ser aproximadas a uma classificação binária baseada na função I_t [23].

$$I_t = \begin{cases} 1 & \text{se } S_t \geq S_0 \\ 0 & \text{se } S_t < S_0 \end{cases} \quad (9)$$

Onde o S_t representa uma função critério avaliada num determinado instante temporal t e S_0 representa um valor limite. Todas as definições de rampa encontradas em bibliografia são derivadas desta última, adquirindo diferentes funções S_t e consequentemente, limites S_0 distintos.

De seguida são apresentadas algumas das definições usualmente aplicadas para deteção de eventos de rampa [33]:

Definição 1: Considera-se que um evento de rampa tem início num determinado instante se o aumento ou decréscimo da magnitude da potência eólica (Pot) para um intervalo de tempo Δt acima do intervalo considerado é superior ao limite predefinido (Pot_{val}) [33]:

$$|Pot(t + \Delta t) - Pot(t)| > Pot_{val} \quad (10)$$

Esta definição concentra-se apenas nos pontos finais e iniciais do intervalo, ignorando as rampas que possam ocorrer a meio do intervalo.

Definição 2: É considerado um evento de rampa com ocorrência num determinado intervalo de tempo Δt quando a diferença entre a potência máxima e mínima medida para esse mesmo intervalo é superior ao limite em consideração (Pot_{val}) [33];

$$\max(Pot[t, t + \Delta t]) - \min(Pot[t, t + \Delta t]) > Pot_{val} \quad (11)$$

Desta forma consegue-se considerar a flutuação na magnitude total para todo o intervalo em estudo. No entanto, não é tido em conta o declive da curva, que descreve o quão rápido a potência aumenta ou diminui. Por forma a considerar este fator não é possível a restrição da análise a um único limite Pot_{val} , mas sim, a um limite que represente a variabilidade de potência com o tempo, que será inserido na próxima definição.

Definição 3: Considera-se que ocorreu um evento de rampa se o rácio entre a diferença absoluta da potência eólica medida para dois instantes diferentes no tempo e o intervalo de tempo Δt é superior a um valor de referência (PRR_{val}) [33];

$$\frac{|Pot(t + \Delta t) - Pot(t)|}{\Delta t} \geq PRR_{val} \quad (12)$$

Esta definição é muito semelhante à Definição 1, com a adição de um parâmetro temporal que atribui determinado peso à variação da Potência.

Definição 4: Uma forma também muito usual para determinar a ocorrência de uma rampa é removendo a cada instante a média móvel com uma janela deslizante n_{am} , permitindo identificar os períodos extremos [33]:

$$\text{mean}\{Pot(t) - Pot(t - n_{am})\} > Pot_{val} \quad (13)$$

Definição 5: Recentemente [72] propôs uma outra métrica definida pelo desvio padrão de um sinal de banda limitada inserido numa janela deslizante. Esta métrica, aplicada também por [73], depende de três parâmetros: a ordem do filtro (um inteiro superior a 1), a banda de frequências (máxima e mínima) do sinal extraído e o comprimento da janela deslizante [73]. Em primeiro lugar, o sinal original de potência eólica é suavizado numa janela de dimensões $[m, n]$, por forma a que:

$$r_t = \begin{cases} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Pot_{t-i-1} & \text{se } m > 1 \\ Pot_t & \text{se } m = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Para $t \geq m$ a série funciona de forma retrospectiva, *i.e.*, cada ponto da série depende, unicamente, de valores “históricos” da série original. Uma vez que o sinal suavizado é $m - 1$ vezes inferior ao sinal original, define-se $r_t = r_m$, para $t = 1, 2, \dots, m - 1$ [73]. Seguidamente, é calculado o desvio padrão do sinal suavizado numa janela deslizante de comprimento n . Sendo assim, se r_t é um ponto do sinal suavizado, a nova métrica é definida por:

$$\sigma_t = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(r_{t-i+1} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{t-j+1} \right)^2} & \text{se } n > 1 \\ r_t & \text{se } n = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Para $t \geq n$. Novamente, define-se $\sigma_t = \sigma_n$ para $t = 1, 2, \dots, n - 1$.

As definições acima especificadas serviram de base para a construção das metodologias elaboradas para a deteção de rampas de produção eólica neste trabalho. Após vários testes de sensibilidade às diferentes metodologias apresentadas optou-se por considerar duas definições de rampa, muito semelhantes às Definições 3 e 5, uma vez que permitiam descrever eventos de forte variabilidade da produção eólica mas com diferentes características. Para determinação das rampas, são utilizados como dados de entrada os dados de produção normalizados em médias de 1h [12]. É de seguida aplicado um filtro de passa-baixas para um período de corte de 3h, para eliminar inversões pouco significativas nos dados da produção eólica.

Depois da aplicação do filtro são identificados os índices iniciais (i) e finais (j) das possíveis rampas, considerando que, para classificar como possível rampa, a derivada da potência em ordem ao tempo deve ser nula em dois pontos no tempo, onde se verifica a seguinte premissa:

$$Pot_{filt}(t)' = 0 \quad (16)$$

Onde Pot_{filt} é a potência normalizada após aplicado o filtro de passa-baixas. Este procedimento permite separar e distinguir a direção da rampa entre subida/descida.

Seguidamente, e para rampas tipo 1 são avaliados os intervalos de duração da rampa. Caso a duração da rampa seja igual ou superior a 6h, é calculado o desvio padrão móvel da série de potências, com uma janela temporal deslizante de 3 horas.

$$\sigma_{movel}(t) = \text{std}\{Pot(t - n_{am}; t + n_{am})\} \quad (17)$$

O procedimento é aplicado para as rampas de subida e de descida de forma independente. Para o tempo de intervalo de cada possível rampa é apenas retido o valor mais elevado do desvio padrão móvel.

Para as rampas do tipo 2 foi aplicada uma metodologia semelhante à da Definição 3, onde se considerou um Δt igual a 6h. Novamente, a metodologia foi aplicada de forma independente para rampas de subida e de descida. Para o tempo de intervalo de cada possível rampa é novamente apenas retido o valor mais intenso de PRR_{val} . As rampas de subida variam entre 33 e 67 %/6h. As rampas de descida variam entre -35 e -56 %/6h.

A Figura 20 apresenta um fluxograma com os passos fundamentais à elaboração deste algoritmo onde, para cada tipo de rampa, foram apenas considerados os 100 eventos mais intensos. De referir que a escolha das 6h se deveu à resolução temporal dos dados atmosféricos considerados, e que as rampas do tipo 1 pretendem identificar períodos onde existiram flutuações severas podendo ter um tempo de vida superior a 6h, enquanto as rampas do tipo 2 pretendem detetar períodos com fortes variações em apenas 6 h.

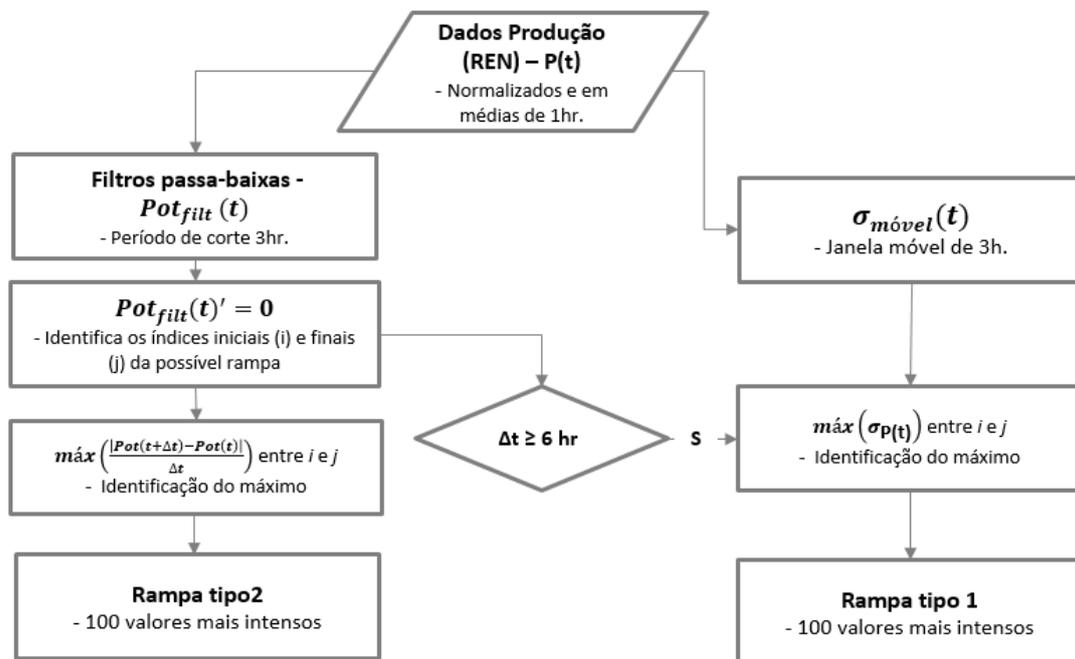


Figura 20 - Fluxograma do método de deteção de rampas aplicado de forma independente para rampas de subida e de descida.

Na Figura 21 apresenta-se a distribuição das rampas de produção eólica (tipo 1 e tipo 2), de acordo com os meses do ano.

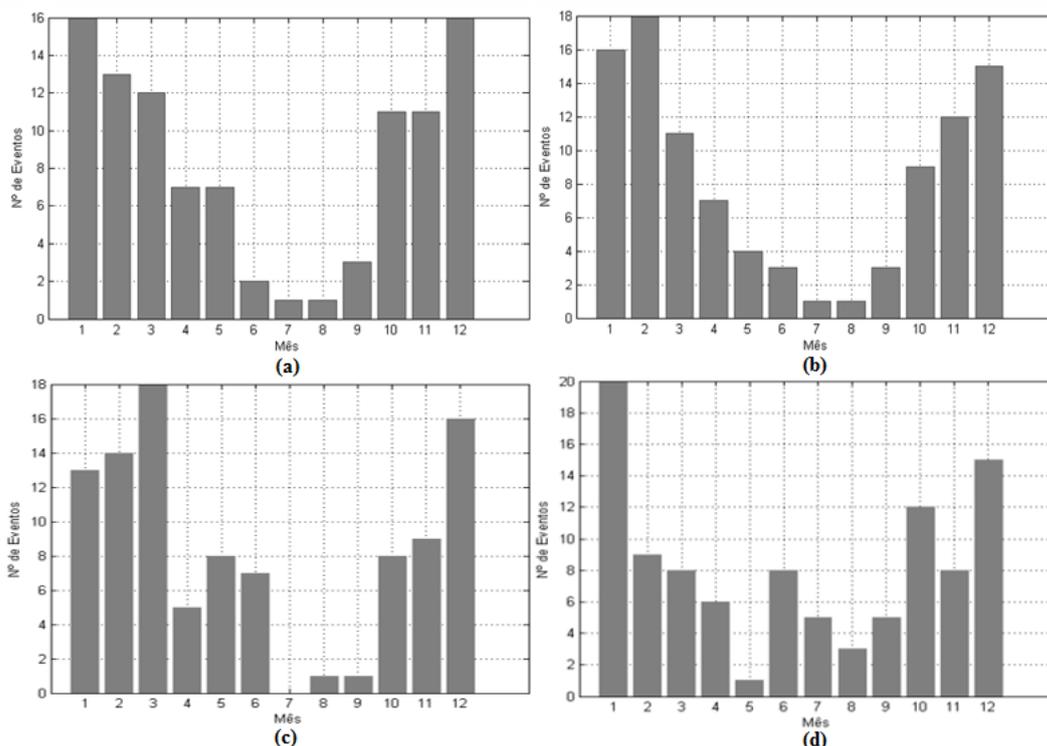


Figura 21 - Gráfico de barras com a distribuição mensal das rampas de: a) subida do tipo 1; b) descida do tipo 1; c) subida do tipo 2; e d) descida do tipo 2.

Através da análise da Figura 21 anterior, é possível destacar a diferença entre a quantidade de rampas detetadas no Inverno e a quantidade de rampas detetadas no Verão para ambas as metodologias, realçando a separação sazonal que deve ser feita. É também possível distinguir variações no número de rampas detetadas, tanto de subida como de descida para as duas tipologias de rampas, variações estas que são mais acentuadas no caso das rampas de descida, em particular nos meses quentes (Maio, Junho, Julho e Agosto).

3.7. Métricas de avaliação

Esta secção apresenta uma listagem de metodologias e métricas, que permitem avaliar a qualidade da deteção dos eventos de rampa recorrendo às metodologias propostas neste trabalho (Secção 3.2-3.4). Na literatura, podem ser destacados dois tipos de métricas [33]:

- 1) Métricas de deteção de eventos - são utilizadas em modelos de deteção de eventos;
- 2) Exatidão da previsão - são utilizadas em modelos de regressão determinísticos/probabilísticos.

Dadas as características dos fenómenos em análise, apenas são utilizadas neste trabalho as métricas de deteção de eventos (1). Existem inúmeras métricas de deteção de eventos e todas elas avaliam a qualidade da deteção com base na quantidade de eventos diagnosticados (*i.e.*, que foram detetados pelas ferramentas de deteção) e na quantidade de eventos que efetivamente foram observados. Este tipo de informação é geralmente apresentado numa “Tabela de Contingência” que apresenta as quatro possíveis combinações de observações/ocorrências (Sim ou Não).

Tabela 4 - Tabela de Contingência de eventos diagnosticados e observados; VP =Verdadeiros Positivos, FP=Falsos Positivos, FN=Falsos Negativos, VN=Verdadeiros Negativos, Obs=Observado, Diag=Diagnosticado. Fonte:[33].

Diagnosticado	Evento Observado		Total
	Sim	Não	
Sim	VP	FP	Diag: Sim
Não	FN	VN	Diag: Não
Total	Obs: Sim	Obs: Não	N= VP+FP+FN+VN

Sendo assim, os Verdadeiros Positivos (VP) correspondem aos eventos que foram diagnosticados e observados na “área geográfica de interesse” e que originaram uma rampa, Falsos Positivos (FP) os eventos que foram diagnosticados na “área de interesse”, e que não foram observados, *i.e.*, que não correspondem a um evento de rampa, Falsos Negativos (FN) as rampas que não correspondem a qualquer dos eventos diagnosticados com as metodologias propostas, mas que foram observados e Verdadeiros Negativos (VN) eventos que não foram diagnosticados nem ocorreram dentro do intervalo de amostragem, *i.e.*, que não correspondem a qualquer uma das situações [33].

Tal como foi mencionado anteriormente, existem inúmeras métricas de avaliação das ferramentas de deteção de eventos sendo que apenas três foram selecionadas para aplicação no presente trabalho. Das métricas selecionadas, é exemplo o *Bias Score* que mede o rácio entre a frequência de eventos detetados e a frequência de eventos observados, sendo assim expresso por:

$$Bias\ Score = \frac{VP + FP}{VP + FN} \quad (18)$$

Este índice indica a tendência que um sistema de deteção tem de detetar em excesso (*Bias Score* > 1) ou em escassez (*Bias Score* < 1) o número de eventos. É de acrescentar que o *Bias* não é capaz de distinguir os eventos bem detetados dos eventos mal detetados, uma vez que se baseia apenas no valor da frequência relativa [33]. Uma outra métrica, esta mais focada à determinação de eventos raros, é a métrica de extrema dependência (*EDS – Extreme Dependency Score*). Esta métrica não tem em consideração os falsos alarmes (FP), nem mesmo os verdadeiros negativos (VN), no entanto considera o tamanho da amostragem *N* [33].

$$EDS = \frac{2\log\left(\frac{VP + FN}{N}\right)}{\log\left(\frac{VP}{N}\right)} - 1 \quad (19)$$

A métrica *EDS* tem valores entre -1 e 1, onde -1 é o pior resultado e 1 o resultado perfeito [33].

Um outro exemplo é o *KSS (Hanssen & Kuipers Skill Score)*, também conhecido como *Peirce’s Skill Score* que tem em consideração todos os elementos da tabela de contingência. Mede a capacidade de separar os eventos “Sim” dos eventos “Não”. O *KSS* é então dado por:

$$KSS = \frac{VP \times VN - FP \times FN}{(VP + FN) \times (FP + VN)} \quad (20)$$

O *KSS* toma valores no intervalo [-1,1] onde 1 indica um resultado perfeito. Esta métrica é mais apropriada à deteção de eventos frequentes.

Estas três métricas (*Bias Score*, *EDS* e *KSS*) serão assim aplicadas a fim de avaliar o desempenho das metodologias de deteção de eventos meteorológicos na determinação de rampas de produção eólica. É de acrescentar que a utilização de apenas uma métrica não seria capaz de caracterizar e avaliar corretamente as metodologias, uma vez que avaliam aspetos específicos de cada metodologia e cada métrica pretende dar resposta a questões inteiramente distintas. Na Tabela 5

são apresentadas todas as métricas acima referidas bem como as perguntas às quais cada métrica é capaz de responder [33].

Tabela 5 - Resumo das diferentes métricas de avaliação. Fonte: [33].

Métrica	Pergunta
Bias Score	Como é que o número de “Sim” diagnosticados se compara com o número de “Sim” observados?
EDS	Qual a associação entre eventos raros observados e diagnosticados?
KSS	Qual a capacidade de separar os eventos observados e diagnosticados dos restantes?

Capítulo 4 – Resultados

4.1. Análise de tempestades e validação das metodologias

Numa primeira fase, as metodologias de deteção de sistemas meteorológicos foram aplicadas a três tempestades a fim de obter a trajetória de cada uma e de estabelecer uma comparação entre as diferentes metodologias. Adicionalmente, esta análise permite avaliar se três das tempestades mais intensas observadas nos últimos anos se encontram relacionadas com eventos de rampa de produção eólica.

Para análise dos impactos provocados por eventos extremos na produção eólica foram selecionadas três tempestades extratropicais que passaram junto a Portugal Continental ou que chegaram mesmo a intersectar a costa: a Gong, a Klaus e a Xynthia. Estes tipos de eventos são considerados como uma das mais gravosas catástrofes nos extratropicais e são reconhecidos por ter um impacto socioeconómico substancial. Por exemplo a tempestade Xynthia, foi descrita em França como a tempestade mais violenta desde Lothar e Martin em Dezembro de 1999, uma vez que causou, pelo menos, 51 óbitos e 12 desaparecimentos. Também causou danos graves na Alemanha (6 óbitos), Espanha (3 óbitos) e Portugal (1 óbito). Cerca de 2 milhões de pessoas perderam o acesso à eletricidade, mais de 50 000 hectares de terras foram inundadas e cerca de 10 000 pessoas foram obrigadas a abandonar as suas habitações na Costa Atlântica Francesa. Esta tempestade gerou perdas económicas totais de cerca de € 3,6 mil milhões [74]. A tempestade Xynthia atravessou a Europa Ocidental entre 27 de Fevereiro e 1 de Março de 2010 e resultou do desenvolvimento de um sistema de baixas pressões detetado a Sul dos Açores a 26 de Fevereiro 12:00 UTC [74]. Cerca de 18h depois, apresentou uma rápida intensificação assim que se deslocava para Este, atingindo a costa portuguesa com uma pressão central abaixo dos 975 hPa. Em [75] é feita uma análise às consequências desta tempestade e respetivas características. A tempestade Gong teve início a 19 de janeiro de 2013, colocando Portugal em estado de alerta de risco meteorológico, tendo apresentado um período de fortalecimento muito rápido ao atravessar o Norte dos Açores. Esta tempestade despoletou rajadas de vento de 140 km/h em alguns locais do litoral Português e foi responsável pela queda de milhares de árvores em algumas das florestas nacionais portuguesas, pela destruição de várias centenas de fazendas entre outras perdas socioeconómicas e algumas fatalidades [59]. A tempestade Klaus formou-se a 21 de Janeiro de 2009, tendo-se verificado uma intensificação acentuada a 23 de Janeiro do sistema de baixas pressões que se dirigiu rapidamente para a Baía de Biscaia, onde se intensificou ainda mais. Nesta fase da tempestade, foram registadas rajadas que atingiram os 198 km/h em estações meteorológicas à superfície, que foram acompanhadas de chuvas intensas e fortes inundações. Os ventos mais fortes e as chuvas mais intensas foram concentrados em torno dos Pirenéus. As consequências deste tipo de eventos são evidentes e a sua deteção é crucial por forma a incrementar a segurança não só da população como do abastecimento energético, nomeadamente no que diz respeito à previsão da produção eólica e da sua eventual desligação intempestiva sob efeito de tempestades fortes. Na Figura 22 encontram-se as trajetórias das três tempestades consideradas: Gong, Klaus e Xynthia.

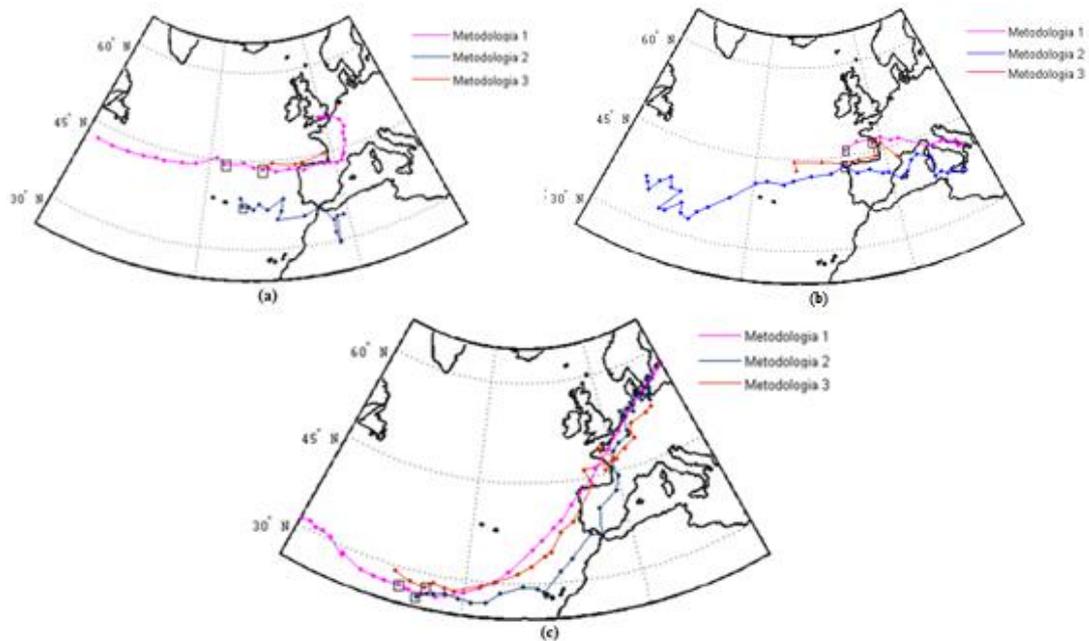


Figura 22 - Trajetória das três tempestades e instante comum (quadrado): a) Gong (18-01-2013 12:00), b) Klaus (23-01-2009 21:00) e c) Xynthia (25-02-2010 21:00), respetivamente, por aplicação das três metodologias de deteção de sistemas meteorológicos.

Da análise da Figura 22, salienta-se o desfasamento das trajetórias obtidas para a Metodologia 2 em comparação com as restantes. Este desfasamento, sempre para Sul, deve-se ao facto de os centros de velocidade elevada definidos na Metodologia 2 serem desfasados espacialmente dos centros de baixas pressões, uma vez que, no centro de baixas pressões, se registam velocidades reduzidas devido à ausência de gradientes de pressão. Sendo assim, e como descrito em [38] é expectável que as posições dos centros na Metodologia 2 se encontrem ligeiramente deslocadas do centro de um ciclone. O caso da tempestade Gong é um caso muito específico, uma vez que, para as Metodologias 2 e 3 ocorre separação do evento sendo detetado apenas quando se aproxima da PI, como é possível verificar na Figura 18. Outra questão detetada nesta tempestade é que, mesmo com aplicação da função custo, a Metodologia 2 apresenta algumas dificuldades na deteção de eventos com separação no instante seguinte. Esta situação pode ocorrer quando o algoritmo *correlação temporal* deteta centros distintos podendo seguir o centro errado. Regra geral, pode-se afirmar que as metodologias que utilizam dados de pressão apresentam maior sensibilidade para deteção de eventos com “separação” o que se traduz numa melhor representação da trajetória. De referir que as trajetórias obtidas, especialmente para a Metodologia 1, foram comparadas com resultados obtidos por outros autores [59], [74], [76] tendo-se obtido um elevado nível de concordância.

Estas três tempestades são exemplo de eventos extremos meteorológicos, no entanto, ressalta a questão de haver, ou não, impacto da passagem destes sistemas na produção eólica no agregado nacional. Nesse sentido a Figura 23 representa a potência normalizada para os dias de passagem dos três eventos.

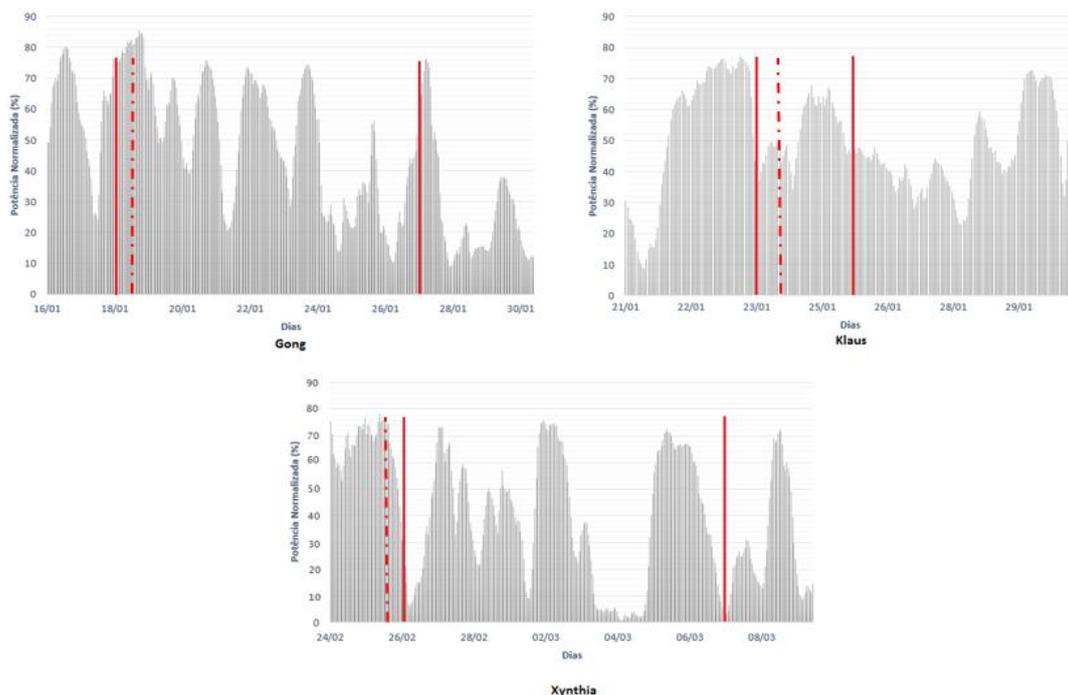


Figura 23 - Representação gráfica da potência produzida normalizada (%) nos dias de passagem das tempestades Gong (2009), Klaus (2013) e Xynthia (2010), linha vermelha marca início e fim da tempestade de acordo com a data da ciclogénese e ciclólise identificada para cada tempestade de acordo com [74], [76], [77]; a tracejado encontra-se o instante inicial de cada tempestade de acordo com o assinalado na figura anterior.

Estas três tempestades têm efeitos muito distintos na produção eólica. Tanto a tempestade Gong e especialmente a tempestade Xynthia causam variações de produção muito acentuadas. Regra geral, à medida que as tempestades se afastam do território nacional, a produção vai diminuindo. No entanto, o caso da Xynthia é peculiar, uma vez que o seu surgimento acontece após uma diminuição acentuada da produção num curto período de tempo e é acompanhada de outro sistema de baixas pressões nos dias 2 e 6 de Março, provocando novamente variações bruscas na produção. Verifica-se também que o instante representado a tracejado na Figura 23 se encontra fora dos limites sugeridos na bibliografia [78], o que sugere que a aplicação de qualquer dos métodos de deteção de sistemas fornece uma deteção antecipada deste evento. A tempestade Klaus é aquela que apresenta variações menos notórias na produção, no entanto, como é possível verificar na Figura 23, a produção já era elevada na altura da formação da tempestade. Ocorreu, efetivamente uma oscilação no dia 23 detetada pelo algoritmo de deteção de rampas (à semelhança das restantes), sendo esta rampa menos intensa que as demais. Este facto está também relacionado com a localização da tempestade, uma vez que a Klaus passou mais a Norte da PI, não provocando assim uma variação tão acentuada na produção eólica. Contudo, qualquer uma destas três tempestades originou uma variabilidade acentuada da produção eólica durante a sua existência, de acordo com as metodologias aplicadas para a determinação de rampas de produção eólica.

4.2. Relação entre a produção eólica e a circulação atmosférica

Na secção anterior foi possível estabelecer uma relação entre a passagem de eventos meteorológicos extremos e diferentes níveis de produção eólica. Por forma a verificar estatisticamente este pressuposto, procedeu-se à análise entre os eventos detetados e o impacto que estes tiveram na produção, seguindo a formulação apresentada em [34]. Esta formulação permite, para cada ponto do domínio considerado, estimar a probabilidade de um evento meteorológico, que afeta a “área de interesse”, estar associado a diferentes níveis de produção eólica. Considerando toda a área de cada evento, a probabilidade de ocorrência de um

determinado nível de produção (Pr_{lim}) provocado por um evento meteorológico (AC) face ao número total de eventos detetados (TC) para cada ponto do domínio, pode ser dada por:

$$Pr_{lim} = \frac{AC}{TC} \quad (21)$$

Onde lim é um determinado nível de produção eólica. Assim, e para cada metodologia, foram seleccionados os instantes temporais associados a uma produção superior a 60% da potência instalada e em que, ao mesmo tempo, existia um evento meteorológico que passou na “área de interesse”. Seguidamente, e para cada ponto do domínio, foi calculado o número de ocorrências tendo em consideração a área de influência de cada evento. Este procedimento foi também realizado para identificar eventos relacionados com uma produção inferior a 30% da potência instalada. De referir que no caso da Metodologia 1, para definir o perímetro de influência de cada evento considerou-se uma circunferência [34], e nas restantes considerou-se o resultado da aplicação do invólucro convexo. Sendo assim, na Figura 24 encontra-se a densidade de eventos (em percentagem) correspondentes a uma produção superior a 60% para o Inverno (a) e Verão (c) e inferior a 30% para o Inverno (b) e Verão (d) para a Metodologia 1.

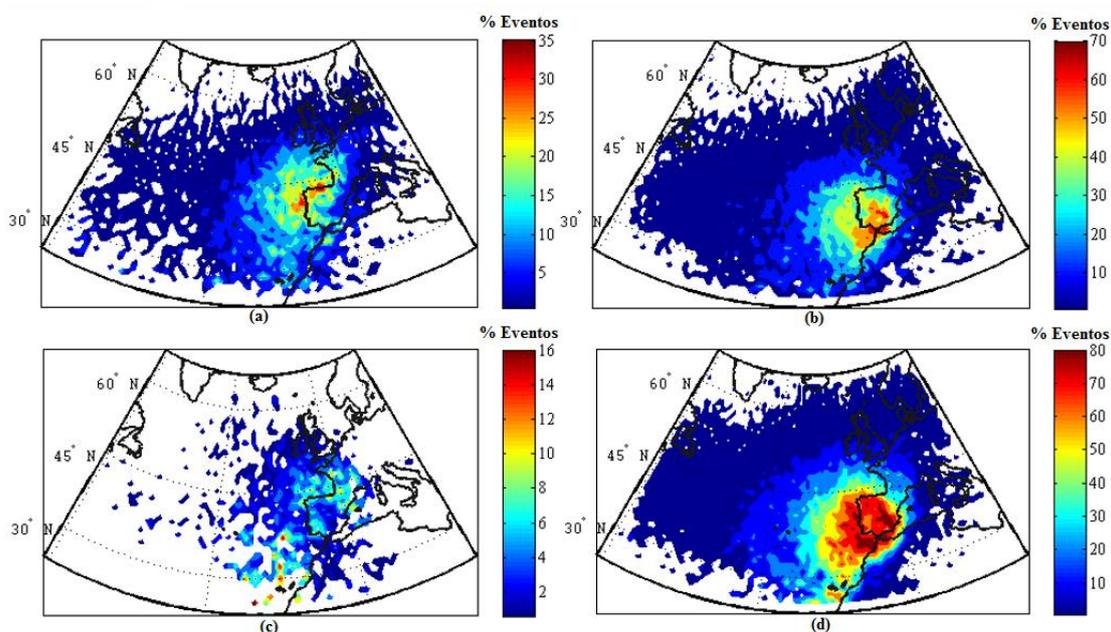


Figura 24 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para a Metodologia 1. Valor de TC igual a 364 para os meses de Inverno e 384 para os meses de Verão.

Com base na Figura 24 é possível verificar que os eventos que estão relacionados com uma produção superior a 60% correspondem a eventos que intersejam Portugal Continental na região Norte/Centro. No Verão não é possível destacar nenhuma zona com impacto relevante para o nível de produção eólica considerado. Quanto à densidade de eventos com uma produção inferior a 30%, verifica-se que a probabilidade dos ciclones que atravessam a região da PI não terem grande impacto na produção é elevado. Este resultado pode ser explicado pelo tipo de eventos detetados por este algoritmo, uma vez que, tal como já foi mencionado, a Metodologia 1 seleciona eventos ciclónicos, no entanto, não baseia a sua definição para situações extremas, estas situações extremas são determinadas pelos restantes algoritmos, o que pode permitir um melhor compromisso entre a existência deste tipo de sistemas atmosféricos e a produção eólica. Na Figura 25 apresenta-se a mesma análise para a Metodologia 2.

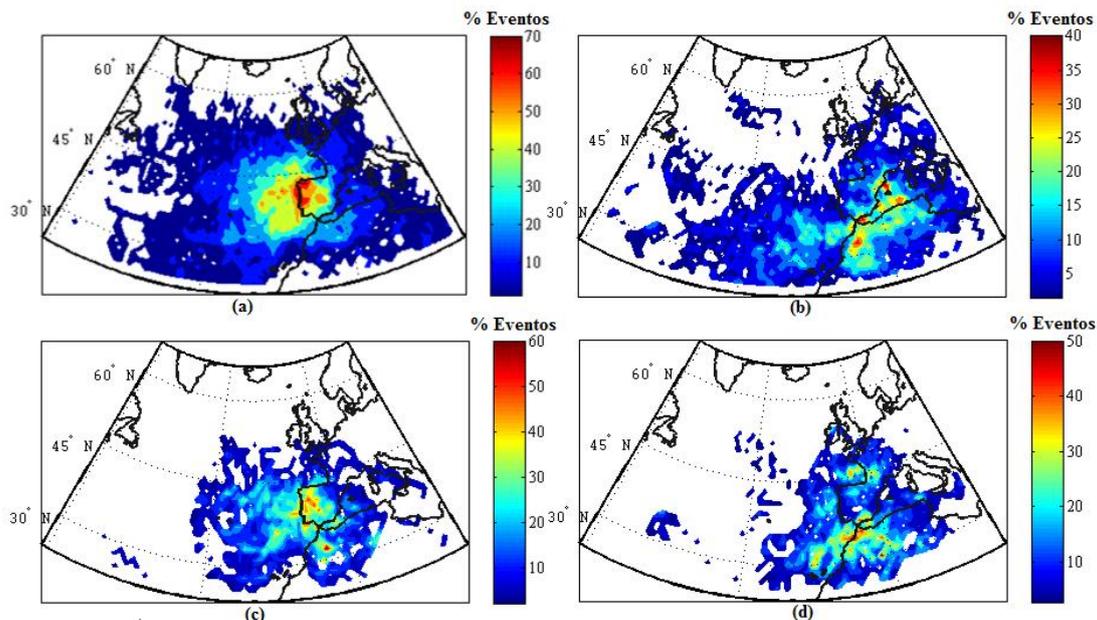


Figura 25 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para a Metodologia 2. Valor de TC igual a 151 para os meses de Inverno e 91 para os meses de Verão.

Com base na Figura 25 é possível verificar que os eventos que estão relacionados com uma produção superior a 60% correspondem a eventos que intersejam Portugal Continental a Norte/Centro. Esta situação verifica-se, tanto no caso dos meses de Inverno como no caso dos meses de Verão. No Verão, é possível verificar que os eventos meteorológicos associados a níveis elevados de produção se encontram mais centrados na região da PI, facto que se encontra relacionado com a presença da Baixa Térmica da PI durante períodos mais intensos. Como seria de esperar: *i)* a localização dos eventos correspondentes a valores de produção inferiores a 30% é exatamente oposta à localização dos eventos associados a níveis de produção superiores a 60%, sendo que, quanto mais afastados estiverem os eventos da PI, menor será o impacto na produção; *ii)* esta metodologia, baseada em extremos, e recorrendo à fonte primária da produção eólica, mostra uma forte relação com a produção eólica nacional.

No caso da Metodologia 3, visto que esta é capaz de fazer a distinção entre eventos que causam rampas de subida e eventos que causam rampas de descida, estes resultados serão apresentados para os dois tipos de eventos sendo, em primeiro lugar, apresentados os resultados para os eventos de subida (Figura 26) e seguidamente os resultados para os eventos de descida (Figura 27).

Através da análise da Figura 26 e da Figura 27 é possível verificar que os eventos que originam rampas de subida têm um trajeto maioritariamente idêntico aos eventos que originam rampas de descida, tornando-se a sua distinção possível devido à identificação da localização para a qual se verifica a maior probabilidade de ocorrência. Assim nos eventos de subida associados a níveis elevados de produção a percentagem de ocorrência dos eventos é superior sobre Portugal Continental, enquanto que os eventos de descida ocorrem maioritariamente a Oeste do território nacional. No entanto, tal facto seria de esperar uma vez que muitas das rampas de subida se encontram associadas à passagem de um evento meteorológico intenso que por sua vez, após a passagem do mesmo irá provocar uma redução na produção associada a rampas de descida. Este resultado ajuda a compreender quais as zonas mais críticas durante a passagem destes eventos meteorológicos, podendo permitir a adoção de medidas como por exemplo, redes de monitorização, para uma melhor gestão do sistema elétrico nestas situações.

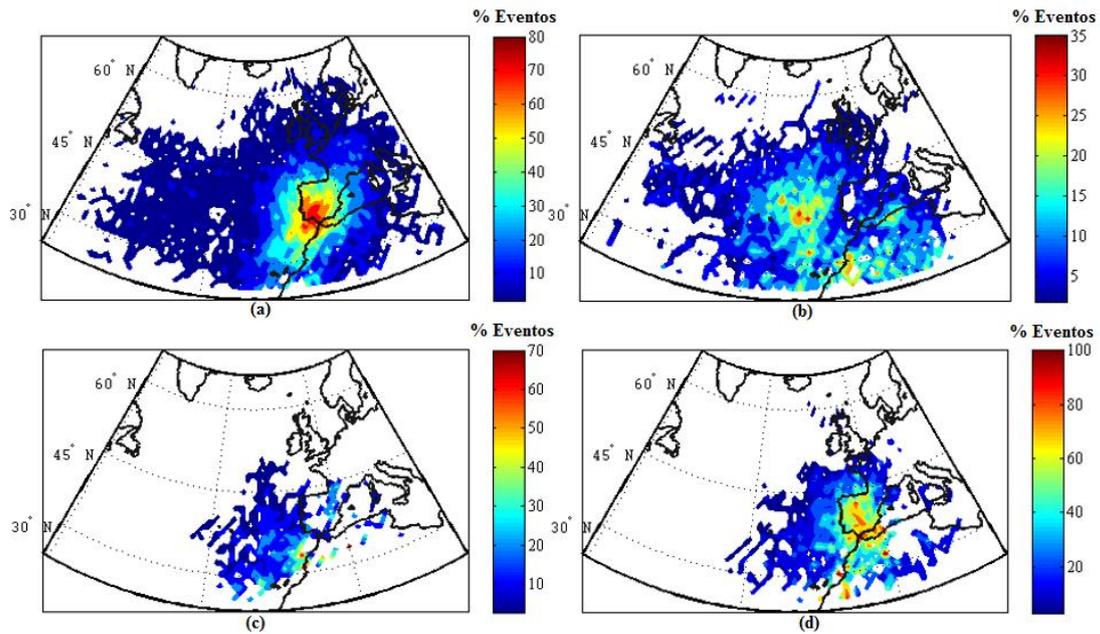


Figura 26 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para eventos positivos da Metodologia 3. Valor de TC igual a 145 para os meses de Inverno e 38 para os meses de Verão.

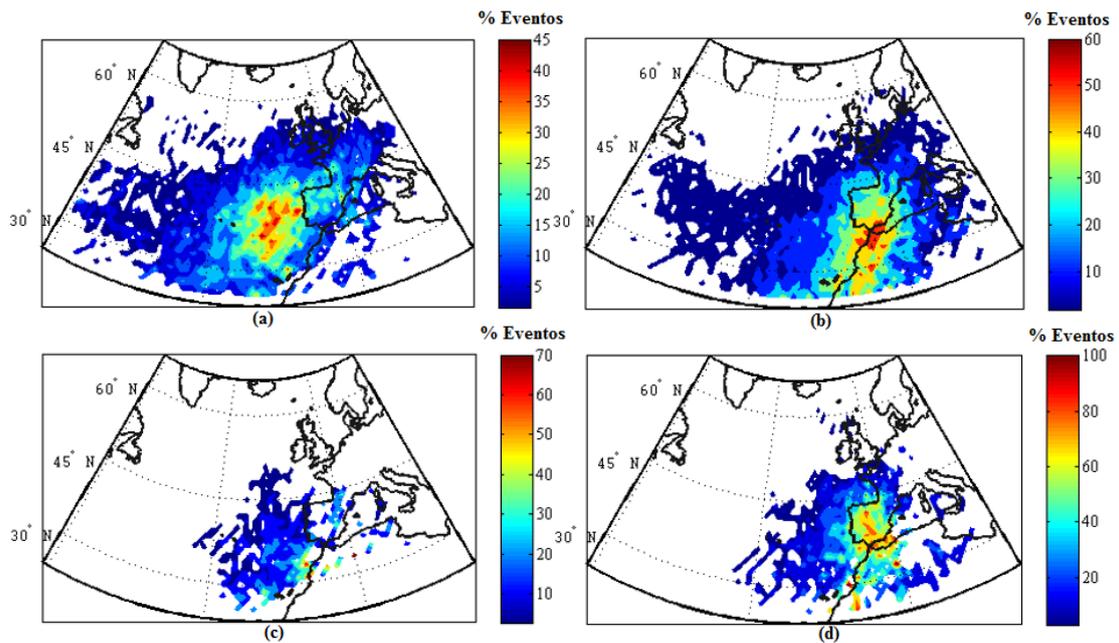


Figura 27 - Percentagem de eventos correspondentes a situações de produção superior a 60% - Inverno (a) e Verão (c) – e de eventos correspondentes a situações de produção inferior a 30% - Inverno (b) e Verão (d) para eventos negativos da Metodologia 3. Valor de TC igual a 135 para os meses de Inverno e 47 para os meses de Verão.

É também possível verificar que os locais onde se observa maior densidade de eventos são distintos para as Metodologias 2 e 3, facto que se encontra associado à tendência para a separação dos eventos. Na Metodologia 2 verificou-se que esta separação é muito comum em sistemas que intersejam a costa continental, resultando em alterações na sua velocidade de propagação que pode ser inferior ao percentil em consideração, contribuindo para a separação dos centros. Geralmente, estes centros propagam-se *i)* sobre o Norte da PI, e *ii)* a Sul da PI, podendo este comportamento ser explicado pela existência das bacias hidrográficas onde o efeito do atrito do solo é menos notório.

4.3. Relação entre rampas de produção eólica e a circulação atmosférica

Nesta secção, e a título de exemplo, serão apresentados os resultados adjacentes à aplicação do algoritmo de deteção de rampas acima apresentado. Em primeiro lugar, serão referidas as cinco rampas mais gravosas (subida e descida) do tipo 1 obtidas e, de seguida, será feita uma análise geral dos resultados deste algoritmo por forma comprovar a relação entre a passagem de sistemas meteorológicos na área de interesse e a ocorrência de rampas de produção eólica.

4.3.1. As cinco rampas mais gravosas (tipo 1)

De forma a validar a relação entre rampas de produção eólica e a circulação atmosférica foram seleccionadas as cinco rampas do tipo 1 mais intensas (cinco rampas de subida e cinco rampas de descida) que se encontram na Tabela 6. A seleção das rampas mais gravosas foi feita com base no valor máximo da produção eólica de acordo com o discutido na Secção 3.6.

Tabela 6 - As cinco rampas mais gravosas do tipo 1.

Rampa	Rampa Subida			Rampa Descida		
	STD _{max} (%)	Data	Hora inicial	STD _{max} (%)	Data	Hora inicial
1	29,294	15/11/2009	0	26,001	24/11/2012	4
2	26,720	01/03/2010	17	23,498	23/12/2009	2
3	26,373	11/11/2011	18	23,084	28/10/2012	5
4	25,378	23/12/2009	13	22,861	22/12/2009	14
5	25,203	22/03/2012	16	22,857	17/02/2011	13

Através da análise da Tabela 6 é possível verificar que as rampas de subida são mais intensas uma vez que os valores do desvio padrão máximos verificados são superiores, regra geral, aos valores do desvio padrão obtidos para as rampas de descida. Depois de determinar quais as rampas mais gravosas procedeu-se à análise de todos os eventos obtidos para cada metodologia de forma a averiguar se seriam capazes de detetar as rampas. As trajetórias das rampas de subida e descida detetadas por cada algoritmo encontram-se assim na Figura 28.

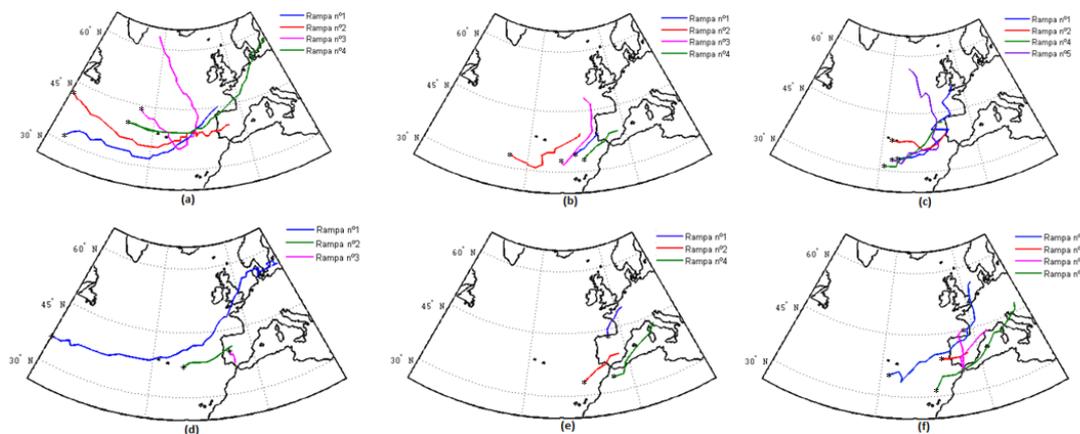


Figura 28 - Representação gráfica das trajetórias para as 5 rampas mais intensas (a) de subida para a Metodologia 1, (b) de subida para a Metodologia 2, (c) de subida para a Metodologia 3, (d) de descida para a Metodologia 1, (e) de descida para a Metodologia 2, (f) de descida para a Metodologia 3. A localização inicial de cada evento é assinalada com ponto.

Em primeiro lugar, é possível observar que as metodologias propostas tiveram maior dificuldade na deteção das rampas de descida, uma vez que tanto a Metodologia 1 como a Metodologia 2 detetaram apenas três das cinco rampas. Seguidamente, e de acordo com o discutido nas secções anteriores, observa-se uma variação significativa na trajetória das rampas detetadas pelos algoritmos de deteção de tempestades (Metodologias 2 e 3) e pelo algoritmo de deteção de ciclones (Metodologia 1). Relativamente aos tipos de trajetões definidos por estes eventos, é possível verificar que, regra geral, são eventos formados junto às ilhas propagando-se no sentido Nordeste e que, geralmente interseam a costa de Portugal Continental. O que vem a demonstrar que, para uma busca de eventos com sérias repercussões na produção eólica, é possível reduzir a janela de busca dado que os resultados sugerem que estes eventos interseam a costa portuguesa. Assim, para as rampas de subida mais gravosas, é possível denotar que o caminho adotado por um sistema pode ser uma das características fundamentais na avaliação do impacto destes eventos meteorológicos na produção eólica nacional.

Para as rampas de descida, as trajetórias das rampas apresentam características mais diferenciadas entre si. As rampas de descida foram mais facilmente identificadas pela Metodologia 3, recorrendo aos valores inferiores ao percentil 2%. Os resultados obtidos com esta metodologia sugerem uma associação entre a passagem destes eventos sobre Portugal e os eventos de rampa de descida. De referir ainda que, para este algoritmo, a única rampa de subida não detetada se deveu às dimensões serem inferiores à Área considerada nas premissas das Metodologias 2 e 3.

4.3.2. Resultados das Rampas de produção eólica: Análise geral

Como demonstrado anteriormente, os resultados sugerem a existência de uma relação entre as rampas de produção eólica e a passagem de eventos meteorológicos de larga escala. De forma a complementar a análise da secção anterior e identificar a aplicabilidade das metodologias aplicadas neste trabalho procedeu-se, para cada um dos métodos de deteção de sistemas meteorológicos, à determinação das métricas de avaliação apresentadas na Secção 3.7. Esta análise encontra-se repartida entre meses de Verão e meses de Inverno, uma vez que o comportamento da atmosfera e consequentemente da produção eólica nos meses de Verão é diferente quando comparado com os meses de Inverno. Em primeiro lugar será feita uma análise das tabelas de contingência resultantes da aplicação das três metodologias tanto para as rampas de subida como para as rampas de descida e, seguidamente, serão apresentadas as métricas aplicadas para a avaliação dos métodos, sendo estas o *Bias Score*, o EDS e o KSS. De referir que a análise é feita para os eventos que foram observados durante um período de rampa e cuja trajetória (incluindo área do evento para cada instante) passou na “área de interesse”.

4.3.3. Meses de Inverno

4.3.3.1. Rampas de Subida

Na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 apresenta-se os resultados da tabela de contingência para as diferentes metodologias durante rampas de subida observadas nos meses de Inverno.

Tabela 7 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Inverno com aplicação da Metodologia 1.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	59	305	364	56	308	364
Não	22	9 822	10 127	22	9 822	10 130
Total	81	9 844	10 208	78	9 844	10 208

Tabela 8 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Inverno com aplicação da Metodologia 2.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	60	91	151	46	105	151
Não	21	10 036	10 127	32	10 025	10 130
Total	81	10 057	10 208	78	10 057	10 208

Tabela 9 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Inverno com aplicação da Metodologia 3.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	64	81	145	65	80	145
Não	17	10 046	10 127	13	10 050	10 130
Total	81	10 063	10 208	78	10 063	10 208

Numa primeira análise é possível verificar que não existe grande discrepância relativamente ao número de rampas de cada tipologia para as diferentes metodologias, sendo o valor de rampas de subida registadas no Inverno de 81 para rampas do tipo 1 e 78 para rampas do tipo 2. É também possível observar que o número de falsos positivos (FP) é significativamente superior na Metodologia 1, o que salienta que este tipo de métodos de determinação de ciclones deteta mais falsos alarmes, uma vez que não se restringem a eventos extremos, possivelmente mais relacionados com a ocorrência de rampas de produção eólica.

Com base nos resultados apresentados nas tabelas de contingência, foram geradas as métricas de avaliação das três metodologias, representadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados das métricas de avaliação das três metodologias para as rampas de subida de Inverno.

Metodologia/ Rampa	Bias Score		EDS		KSS	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
1	4,494	4,667	0,877	0,873	0,698	0,688
2	1,864	1,936	0,883	0,804	0,732	0,579
3	1,790	1,859	0,907	0,928	0,782	0,825

Através da análise da Tabela 10 é possível verificar, em primeiro lugar, que o valor do *Bias Score* é mais elevado para a Metodologia 1, o que se encontra relacionado com o número de FP observados nesta metodologia. Por outro lado, o *Bias Score* é mais próximo de 1 (resultado ótimo) na Metodologia 3, o que significa que esta metodologia determina um número de rampas “possíveis” mais concordante com o número de rampas reais. Quanto aos valores de EDS registados, verifica-se que este é superior no caso da Metodologia 3. Sendo assim, pode-se afirmar que a metodologia que apresenta melhor prestação na deteção de eventos raros é a Metodologia 3. O KSS avalia a capacidade que cada método tem de separar eventos “Sim” de eventos “Não” e, baseando-se na Tabela 10 verifica-se que a metodologia que apresenta melhor prestação na divisão de eventos que efetivamente ocorreram dos que não foram observados é a Metodologia

3. Nesta métrica regista-se uma diferença mais acentuada entre as duas tipologias de rampa, mais concretamente, na Metodologia 2.

4.3.3.2. Rampas de Descida

Da mesma forma como foram apresentadas as tabelas de contingência para os três métodos de deteção de sistemas meteorológicos para as rampas de subida nos meses de Inverno, são apresentados os resultados destes mesmos métodos para as rampas de descida.

Tabela 11 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Inverno com aplicação da Metodologia 1.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	60	304	364	44	320	364
Não	19	9 825	10 129	28	9 816	10 136
Total	79	9 844	10 208	72	9 844	10 208

Tabela 12 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Inverno com aplicação da Metodologia 2.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	55	96	151	39	112	151
Não	24	10 033	10 129	33	10 024	10 136
Total	79	10 057	10 208	72	10 057	10 208

Tabela 13 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Inverno com aplicação da Metodologia 3.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	65	70	135	63	72	135
Não	14	10 059	10 129	9	10 064	10 136
Total	79	10 073	10 208	72	10 073	10 208

Observa-se que o número de rampas de descida de Inverno do tipo 1 (79) é ligeiramente superior às rampas do tipo 2 (72). Comparando com o número de rampas de subida obtidas para os meses de Inverno, verifica-se um número de rampas muito semelhante nos dois casos. Salienta-se, novamente, o elevado valor de FP obtido para a Metodologia 1.

A Tabela 14 apresenta os resultados das métricas de avaliação para as rampas de descida na estação de Inverno para os três algoritmos acima apresentados.

Tabela 14 - Resultados das métricas de avaliação dos três métodos para as rampas de descida de Inverno.

Metodologia/ Rampa	Bias Score		EDS		KSS	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
1	4,608	5,056	0,893	0,819	0,729	0,580
2	1,911	2,097	0,861	0,780	0,687	0,531
3	1,709	1,875	0,923	0,948	0,816	0,868

O valor do *Bias Score* permanece superior a 1 no caso das rampas de descida, não se verificando grande variação relativamente ao resultado obtido para as rampas de subida. Estes resultados indicam que o número de eventos detetados continua um pouco superior ao número de rampas observadas, tal facto é mais visível no caso da Metodologia 1 e mais reduzido para a Metodologia 3. Quanto aos valores de EDS, destaca-se a Metodologia 3 como sendo a que apresenta valores de EDS mais elevados, enquanto que a Metodologia 2 apresenta um decréscimo no valor do EDS, em particular para as rampas do tipo 2. Ressalva-se que o EDS averigua a relação entre os eventos raros e os eventos observados, sendo assim, e comparando com os valores obtidos para as rampas de subida (Tabela 10), pode-se afirmar que, quando analisadas as 100 rampas mais gravosas, as rampas de descida são mais facilmente identificadas com as metodologias usadas neste trabalho. Estes resultados são extremamente importantes uma vez que, como mencionado anteriormente, as rampas de descida podem ser mais difíceis de gerir por parte do TSO, uma vez que necessita de acionar reservas onerosas de subida para equilibrar a oferta/consumo. A Metodologia 3 foi, novamente, a que demonstrou mais facilidade e precisão na determinação das rampas de descida, sendo esta a que apresenta melhores métricas de avaliação. De referir ainda que o KSS apresenta também valores muito distintos nas rampas do tipo 1 e 2 e, em média, inferiores aos obtidos para as rampas de subida.

4.3.4. Meses de Verão

Nesta secção apresenta-se uma análise semelhante à apresentada na secção anterior, mas para os meses de Verão. No entanto, e uma vez que os eventos extremos nos meses de Verão tendem a ser menos intensos e mais dependentes de fenómenos locais, foi aplicado o Percentil 99% por forma a seleccionar apenas eventos efetivamente gravosos com possível impacto no sistema electroprodutor, evitando um número elevado de falsos alarmes nas Metodologia 2 e 3. De referir que neste caso não foi possível identificar na literatura um valor de percentil adequado para estes meses sendo que, para tal, foi necessário recorrer a testes de sensibilidade a fim de averiguar qual o valor de percentil a utilizar.

4.3.4.1. Rampas de Subida

A Tabela 15, a Tabela 16 e a Tabela 17 apresentam os resultados da tabela de contingência após aplicação dos diferentes métodos para as rampas de subida para os meses de Verão.

Tabela 15 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Verão com aplicação da Metodologia 1.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	12	372	384	16	368	384
Não	7	9 857	10 229	6	9 858	10 226
Total	19	9 864	10 248	22	9 864	10 248

Tabela 16 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Verão com aplicação da Metodologia 2.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	16	75	91	16	75	91
Não	3	10 154	10 229	6	10 151	10 226
Total	19	10 157	10 248	22	10 157	10 248

Tabela 17 - Tabela de contingência para as rampas de subida de Verão com aplicação da Metodologia 3.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	12	26	38	16	22	38
Não	7	10 203	10 229	6	10 204	10 226
Total	19	10 210	10 248	22	10 210	10 248

Registam-se 19 rampas de subida do tipo 1 e 22 rampas de subida do tipo 2, valores significativamente inferiores àqueles obtidos nos meses de Inverno. Não se verifica grande variação no número de rampas detetadas nas diferentes tipologias. De seguida, é também notória a quantidade de eventos detetados pela Metodologia 1 o que realça que grande parte dos sistemas ciclónicos que intersesta/forma na área de interesse não originam rampas de produção eólica. De referir que o número de eventos superiores no Verão para a Metodologia 1 se encontra em concordância com obtido por [45] devido ao surgimento da baixa térmica da PI, *i.e.*, ciclones quase estacionários. E ainda se destaca o facto de o número de rampas do tipo 2 detetadas ser exatamente igual para cada metodologia. Outro aspeto relevante é que a Metodologia 3 apresenta um número reduzido de falsos alarmes. Isto significa que as premissas utilizadas permitem filtrar um número elevado de eventos. A Tabela 18 apresenta as métricas de avaliação para os três métodos para as rampas de subida nos meses de Verão.

Tabela 18 - Resultados das métricas de avaliação dos três métodos para as rampas de subida de Verão.

Metodologia/ Rampa	Bias Score		EDS		KSS	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
1	20,211	17,455	0,864	0,901	0,595	0,691
2	4,789	4,136	0,947	0,901	0,835	0,720
3	2,000	1,727	0,864	0,901	0,629	0,725

O resultado com maior destaque na Tabela 18 é o valor do *Bias Score* para a Metodologia 1, sendo este muito superior em comparação com as restantes metodologias. Este aspeto vem ressaltar o argumento anteriormente referido, de que esta metodologia, ao não se restringir à determinação de eventos extremos, deteta em excesso os possíveis eventos meteorológicos com impacto na produção. Este resultado é bastante mais saliente no Verão porque as condições atmosféricas fomentam a ciclogénese sobre a Área de interesse, nomeadamente a presença da Baixa Térmica da PI que, embora tenha algum impacto no nível de produção eólica, geralmente não se encontra associada com o despoletar de rampas de produção eólica. Quanto ao EDS, verifica-se que o seu valor é idêntico nas diferentes metodologias para as rampas do tipo 2, isto porque, como foi verificado anteriormente, o número de rampas do tipo 2 detetadas em cada metodologia é o

mesmo. Contudo, verificam-se valores de EDS superiores no caso da Metodologia 2 para rampas do tipo 1. A Metodologia 3 verifica um decréscimo acentuado no valor de KSS, sendo a Metodologia 2 a que apresenta melhores resultados. Este resultado indica que a utilização de dados de velocidade do vento no Verão pode permitir uma melhor determinação de períodos de rampas de produção eólica, embora com um elevado número de falsos alarmes.

4.3.4.2. Rampas de Descida

A Tabela 19, a Tabela 20 e a Tabela 21 representam tabelas de contingência para a deteção de rampas de descida nos meses de Verão, com aplicação dos três métodos abordados.

Tabela 19 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Verão com aplicação da Metodologia 1.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	17	367	384	21	363	384
Não	4	9 860	10 227	7	9 857	10 220
Total	21	9 864	10 248	28	9 864	10 248

Tabela 20 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Verão com aplicação da Metodologia 2.

Diagnosticado	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	19	72	91	16	75	91
Não	2	10 155	10 227	12	10 145	10 220
Total	21	10 157	10 248	28	10 157	10 248

Tabela 21 - Tabela de contingência para as rampas de descida de Verão com aplicação da Metodologia 3.

Ocorreu	Rampa tipo 1			Rampa tipo 2		
	Observado		Total	Observado		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
Sim	15	32	47	20	27	47
Não	6	10 195	10 227	8	10 193	10 201
Total	21	10 201	10 248	28	10 220	10 248

Registam-se 21 rampas de descida do tipo 1 e 28 rampas de descida do tipo 2. Novamente, salienta-se o elevado número de FP na Metodologia 1. A Tabela 22 apresenta o resultado das métricas para as rampas de descida nos meses de Verão com aplicação dos três métodos.

Tabela 22 - Resultados das métricas de avaliação dos três métodos para as rampas de descida de Verão.

Metodologia/ Rampa	Bias Score		EDS		KSS	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
1	18,806	13,714	0,934	0,907	0,774	0,714
2	4,333	3,250	0,968	0,827	0,898	0,564
3	2,238	4,821	0,897	0,892	0,711	0,703

Contrariamente ao verificado para os meses de Inverno, não existe uma metodologia que apresente uma melhor capacidade de deteção das rampas de descida. A Tabela 22 demonstra, novamente, que o valor do *Bias Score* é bastante superior para a Metodologia 1 pela razão mencionada na Secção 4.3.4.1, sendo que as restantes apresentam melhores resultados consoante o tipo de rampa em análise. Considerando os dois tipos de rampas, os parâmetros EDS e KSS apresentam, em média, valores elevados para as três metodologias, em particular para a Metodologia 1, o que denota uma maior facilidade na deteção de rampas de descida, embora seja esperado um número elevado de falsos alarmes.

4.4. Análise das trajetórias com base em técnicas de agrupamento

Nesta secção serão descritos os resultados registados através da análise do agrupamento das trajetórias obtidas para cada metodologia, com o intuito de compreender se, por exemplo, existem trajetórias típicas para a ocorrência de rampas severas da produção eólica, ou outra característica que possa ser usada como forma de diagnosticar a existência destes eventos. A aplicação da técnica *K-means* exige a escolha *a priori* do número de grupos. Nesse sentido, foram realizados vários testes de sensibilidade por forma a averiguar qual o número de grupos que melhor se adequava aos resultados obtidos pelos algoritmos, tendo-se optado por *K* igual a 6. Com o intuito de compreender quais as principais características de cada grupo, foram identificadas as trajetórias pertencentes a cada grupo, tendo-se procedido à análise, durante todo o tempo de vida de cada evento, dos seguintes parâmetros: tempo de vida do evento, velocidade de propagação por evento para cada grupo, potência média produzida nos instantes de ocorrência dos eventos de cada grupo, potência máxima e mínima detetada durante o tempo de vida de cada evento e o máximo/mínimo da derivada da potência normalizada em ordem ao tempo em 6 horas. Estes três últimos parâmetros foram determinados de acordo com os cálculos efetuados para a determinação dos diferentes tipos de rampas considerados neste trabalho. Por exemplo, a derivada da potência normalizada é um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito à gestão de um sistema elétrico, uma vez que identifica a taxa de variação da potência, aspeto que se encontra inteiramente relacionado com a definição de rampa de produção eólica. Ter conhecimento das características médias de cada grupo de trajetórias pode auxiliar no diagnóstico de eventos meteorológicos com mais impacto na produção eólica, possibilitando a criação de medidas de prevenção que visem equilibrar o binómio produção-consumo para situações de rampa de subida da produção eólica (derivada positiva/máxima em ordem ao tempo) e para situações de rampa de descida da produção eólica (derivada negativa/mínima em ordem ao tempo).

De referir que, nesta análise e para cada metodologia *i*) optou-se por considerar apenas os eventos que intersejam a janela espacial identificada na Secção 2 (“área de interesse”); e *ii*) dadas as características mais locais dos fenómenos detetados nos meses de Verão, a análise das trajetórias foi apenas realizada para os meses de Inverno. Nos digramas de caixas com bigodes apresentados nas secções seguintes, a mediana é desenhada a vermelho e os limites da caixa de bigodes representam os quartis 25 e 75. Os bigodes estendem-se até 1,57 vezes o intervalo interquartil

(quartis 25 e 75) dos limites da caixa de bigodes, e os valores atípicos (“*outliers*”) são representados pelo símbolo “+”.

4.4.1. Análise das trajetórias - Metodologia 1

Na Figura 29 apresenta-se a distribuição espacial das trajetórias da Metodologia 1 e que intersectaram a “área de interesse” identificada na Secção 3.1.1, durante os meses de Inverno.

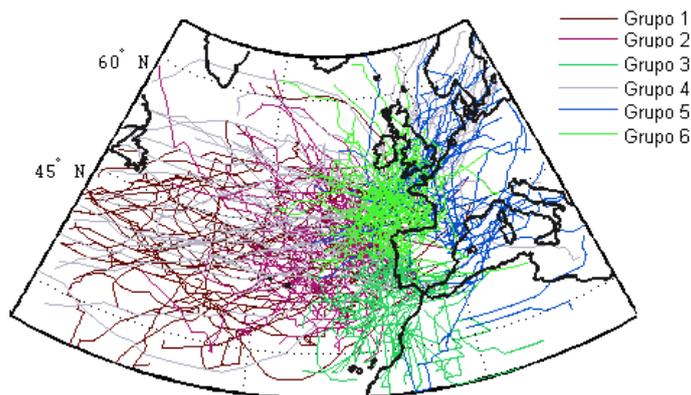


Figura 29 - Agrupamento das trajetórias para $K=6$ com aplicação da Metodologia 1 para o Inverno.

De modo a completar a análise, será necessário avaliar as características de cada grupo a fim de compreender o seu impacto na produção eólica e destacar trajetórias com maior impacto. Sendo assim, na Figura 30 encontram-se diagramas de caixa para as diversas características mencionadas.

Na análise à Figura 30 verifica-se que o grupo que apresenta maior velocidade de propagação é o grupo 4, sendo também este o grupo que verifica maior potência média normalizada e o valor mais elevado de potência máxima normalizada. Por outro lado, as trajetórias alocadas ao grupo 1 apresentam os valores mais reduzidos da potência mínima normalizada. Assim, no que se refere às derivadas da potência em ordem ao tempo, tanto a máxima como a mínima são registadas no grupo 1. Foi calculado também o desvio padrão móvel da potência normalizada, cujo valor máximo foi obtido para o grupo 1. Assim, através da análise da figura anterior, é possível verificar que o grupo com mais impacto na variabilidade da produção eólica em Portugal Continental é o grupo 1, que intersecta a costa proveniente de Oeste/Sudoeste. É também o grupo 1 que apresenta maior duração média, facto que pode explicar a diferença entre o máximo e o mínimo de potência que também é máxima para este grupo, demonstrando que eventos com um tempo de vida mais prolongado podem ter génese longe do local de interesse e, por isso, o seu impacto será reduzido, no entanto, à medida que evolui e se aproxima de Portugal Continental registam-se relações mais evidentes entre a sua passagem e a produção eólica. Este resultado pode ser um bom indicador uma vez que a sua formação e deslocamento podem ser monitorizados ao longo de vários dias, podendo ser mais fácil acomodar o seu impacto no sistema elétrico por parte dos TSO's. O agrupamento 3, que tem uma maior predominância no Sul da PI, apresenta uma menor duração dos eventos, bem como um menor impacto nos parâmetros associados a variações severas da produção eólica, Figura 30 e) – g).

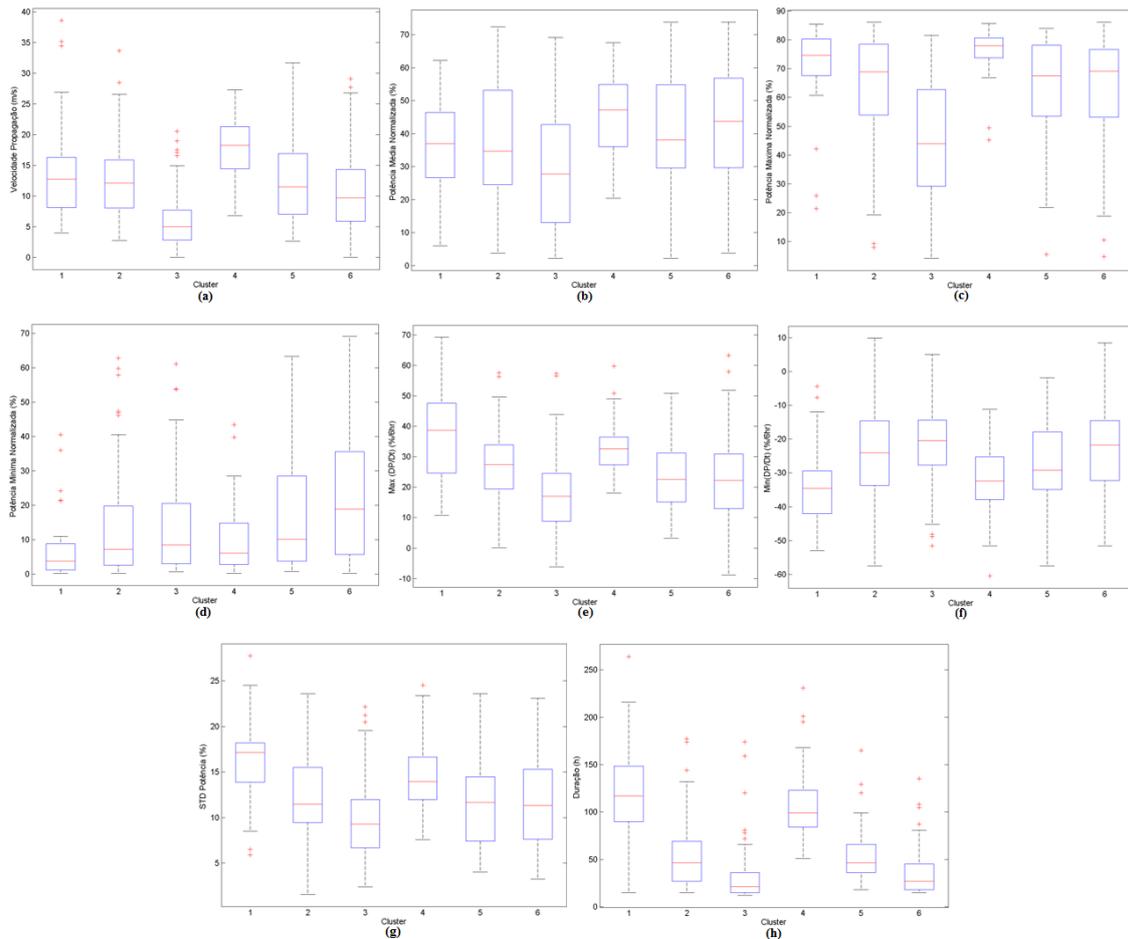


Figura 30 - Representação em diagrama de caixas das características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 1.

4.4.2. Análise das trajetórias - Metodologia 2

Na Figura 31 apresenta-se a distribuição espacial das trajetórias da Metodologia 2 e que intersectaram a janela espacial identificada na Secção 3.1.1., durante os meses de Inverno.

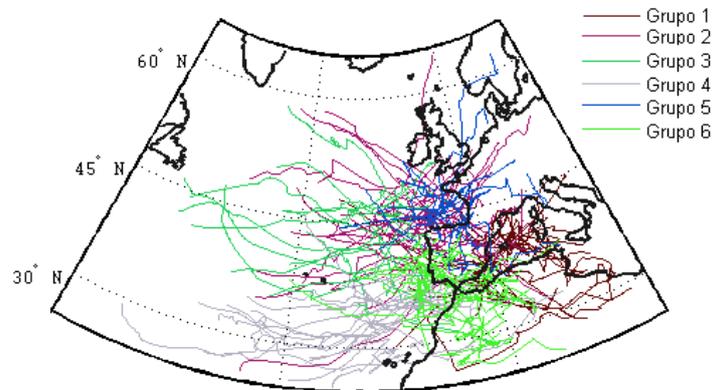


Figura 31 - Agrupamento das trajetórias para $K=6$ com aplicação da Metodologia 2 para o Inverno.

Por forma a completar a análise, será novamente necessário avaliar as características de cada grupo a fim de compreender o seu impacto na produção eólica e destacar trajetórias com maior impacto. Sendo assim, na Figura 32 encontram-se diagramas de caixa para as diversas características mencionadas.

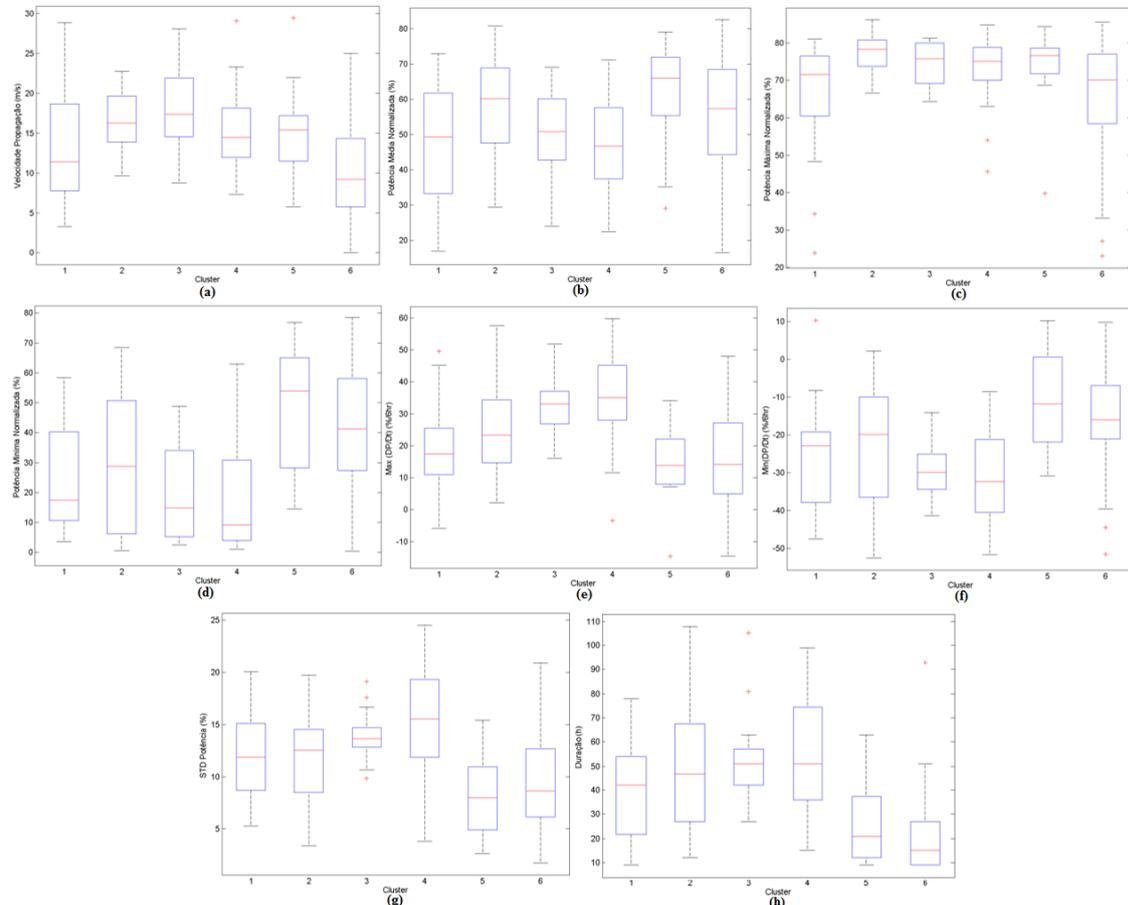


Figura 32 - Representação em diagrama de caixas as características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 2.

Como análise à Figura 32 verifica-se que o grupo que apresenta maior velocidade de propagação, em média, é o grupo 3 e o agrupamento que apresenta maior potência média normalizada é o grupo 5. No que se refere à máxima potência registada, esta é obtida no grupo 2 - Figura 32 c) - e a mínima no grupo 4 - Figura 32 d). Um outro aspeto bastante importante no que se refere a este tipo de análise é a derivada da potência em ordem ao tempo, aspeto que se encontra mais relacionado com a variabilidade eólica e o seu impacto na produção. Sendo assim, foram analisadas as derivadas máximas e mínimas da produção eólica em 6 horas, sendo que a derivada máxima está associada a rampas de subida da produção eólica e a derivada mínima a rampas de descida da produção eólica. O grupo que apresenta maior derivada máxima da potência normalizada em ordem ao tempo é o grupo 4, sendo também este o grupo que apresenta o mínimo de derivada da potência normalizada em ordem ao tempo. Este resultado classifica o grupo 4 como o grupo com maior impacto na ocorrência de variações severas em 6 horas da produção eólica. Outro aspeto também relacionado com a variabilidade da produção eólica é o desvio padrão da potência (também utilizado para a definição de rampa de produção eólica), sendo igualmente o grupo 4 o que apresenta maior desvio padrão da potência, facto que permite explicar

as variações da produção observadas, uma vez que é também neste grupo que se regista o máximo e o mínimo de potência normalizada. O grupo 4 forma-se a Sudoeste da PI e desloca-se, maioritariamente, em direção à PI, com bastantes eventos a intersetarem a costa de Portugal Continental. Este facto vem realçar que a trajetória é um aspeto muito importante no que se refere ao impacto que determinado sistema meteorológico tem na produção eólica. Assim, o grupo que apresenta maior probabilidade de gerar rampa de produção eólica é o grupo 4. Por outro lado, os grupos 5 (Sul da PI) e 6 (Norte da PI) tendem a ser os agrupamentos que apresentam menor ligação com a existência de variações acentuadas da produção eólica, Figura 32 e – g).

4.4.3. Análise das trajetórias - Metodologia 3

Dado que esta metodologia tem a capacidade de distinguir “possíveis rampas de subida” e “possíveis rampas de descida”, na Figura 33 apresenta-se a distribuição espacial das trajetórias que intersetaram a janela espacial identificada na Secção 3.1.1., durante os meses de Inverno para os eventos de subida (esquerda) e para os eventos de descida (direita).

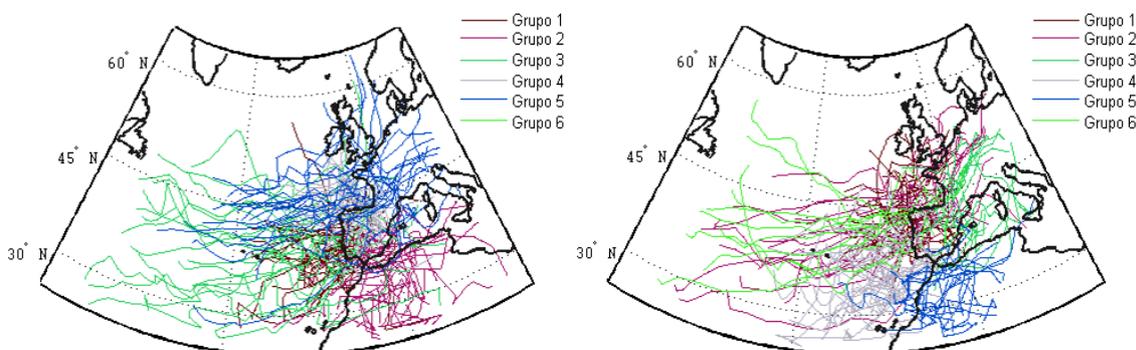


Figura 33 - Agrupamento das trajetórias para $K=6$ com aplicação da Metodologia 3 para o Inverno: eventos de subida (à esquerda); eventos de descida (à direita).

Por forma a completar a análise, será novamente necessário avaliar as características de cada grupo a fim de compreender o seu impacto na produção eólica e destacar trajetórias com maior impacto. Sendo assim, na Figura 34 encontram-se diagramas de caixa para as diversas características mencionadas anteriormente, para os eventos positivos.

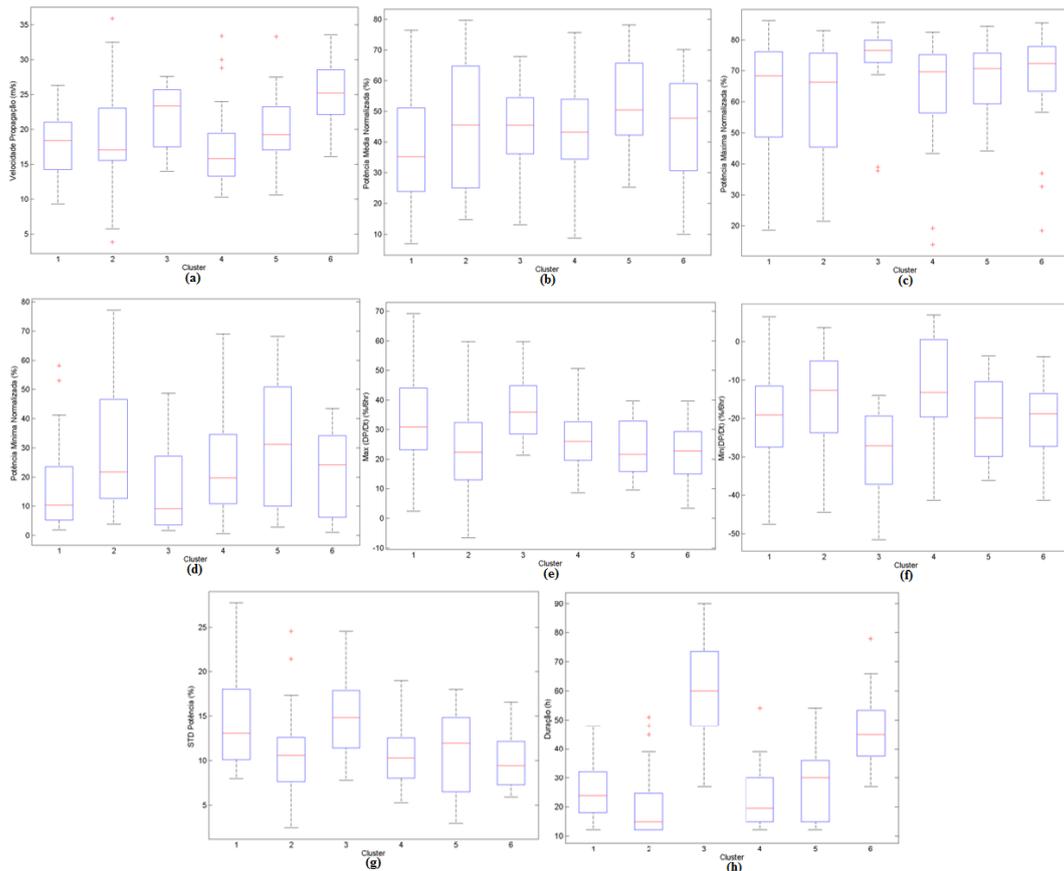


Figura 34 - Representação em diagrama de caixas as características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 3 para os eventos positivos.

Através da análise à Figura 34 verifica-se que o grupo que apresenta, em média, maior velocidade de propagação é o grupo 6. Contudo, o grupo que apresenta maior potência média normalizada é o grupo 5. No que se refere ao agrupamento com máxima potência registada, em média, esta é obtida no grupo 3. A mínima potência registada é também obtida no grupo 3. O grupo que apresenta em média o valor máximo da derivada da potência normalizada em ordem ao tempo é o grupo 3 e que, ao mesmo tempo, apresenta o valor em módulo mais elevado do mínimo da derivada da potência normalizada. Realça-se o facto de este agrupamento também apresentar o maior desvio padrão móvel da potência normalizada. O segundo agrupamento com mais impacto é o grupo 1 e as suas trajetórias são semelhantes às do agrupamento 3, embora a sua ciclogénese ocorra mais junto do território nacional. Estes resultados apontam que eventos provenientes de Oeste/Sudoeste (junto às ilhas) e que intersejam as regiões Norte/Centro de Portugal Continental são os que apresentam maior impacto no que se refere à ocorrência de rampas de subida de produção eólica. Pela análise das figuras anteriores, é possível identificar as trajetórias do agrupamento 2 (Sul da PI) como sendo as que aparentam ter uma menor relação com a existência de variações severas na produção eólica.

A mesma análise foi feita para os eventos negativos da Metodologia 3 e encontra-se representada na Figura 35.

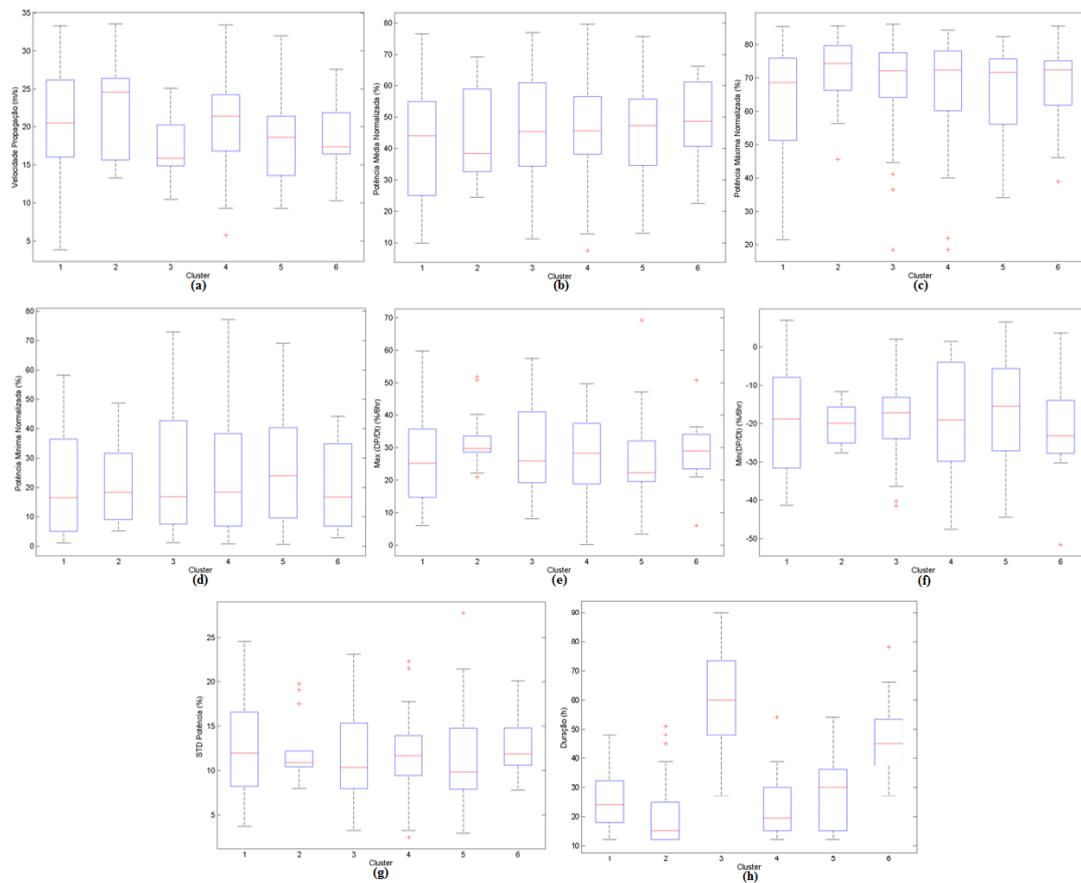


Figura 35 - Representação em diagrama de caixas as características de cada grupo de trajetórias determinado: (a) Velocidade de propagação (m/s), (b) Potência média normalizada (%), (c) Potência máxima normalizada (%), (d) Potência mínima normalizada (%), (e) Máximo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (f) Mínimo da derivada da Potência normalizada em ordem ao tempo (%/6hr), (g) Desvio padrão da potência em janela deslizante (%), (h) Duração média dos eventos (horas) para a Metodologia 3 para os eventos de descida.

Quando comparados com os agrupamentos dos eventos de subida, os eventos de descida parecem ter características mais homogêneas entre si, dado que o valor da mediana é semelhante, embora apresentem uma elevada dispersão dentro de cada agrupamento. Estes resultados sugerem que as trajetórias dos eventos de descida podem ser mais difíceis de distinguir. Através da análise à Figura 35 verifica-se que o grupo 2 é o que apresenta maior velocidade de propagação, sendo, no entanto, o grupo 6 o que apresenta maior potência média normalizada. É no grupo 2 que se regista a potência máxima normalizada e nos grupos 1, 3 e 6 onde se regista a mínima potência normalizada. A máxima derivada da potência em ordem ao tempo é obtida para o grupo 2. É de realçar que, para esta metodologia, para a determinação de rampas de descida, o aspeto mais relevante será a derivada mínima da potência em ordem ao tempo, uma vez que se encontra relacionada com variações negativas da produção eólica. Neste sentido, o agrupamento 6 é o que apresenta um valor em módulo mais elevado, no que diz respeito à mediana. No entanto, existem vários agrupamentos (1, 4 e 5) com valores elevados e bastante dispersão. Os agrupamentos que apresentam maior desvio padrão móvel são os grupos 6 e 1, que têm uma formação mais a Oeste/Noroeste de Portugal e cujos centros interseam as regiões onde se verifica uma grande concentração da capacidade eólica nacional (zona Centro/Norte).

Os resultados obtidos com esta metodologia sugerem que, os eventos que originam as rampas de descida mais gravosas têm uma assinatura espacial, especialmente no que diz respeito a ciclogénese, ligeiramente distinta daqueles que originam rampas de subida. Este aspeto é de extrema importância para os operadores do sistema elétrico uma vez que, baseando-se na trajetória dos eventos, podem estimar o impacto que a passagem destes eventos terá na produção

eólica e, baseando-se nestes resultados, poderão decidir que tipo de ações devem ser tomadas de modo a equilibrar o binómio produção-consumo.

4.5. Considerações Finais

Por forma a compreender os fenómenos atmosféricos que fomentam a ocorrência de rampas de produção eólica, foram testadas três metodologias para a deteção de eventos, duas delas criadas com o intuito de detetar eventos extremos (Metodologias 2 e 3) e uma delas com o objetivo determinar eventos ciclónicos (Metodologia 1). Apesar da Metodologia 1 também apresentar limites de intensidade dos eventos a fim de serem classificados como fortes ou fracos, este critério não foi considerado neste trabalho. Um dos grandes objetivos assentes na aplicação de metodologias focalizadas para a determinação de eventos extremos está na criação de um padrão que defina os eventos como possíveis impulsionadores de rampas de produção eólica e se, efetivamente, à ocorrência de eventos extremos tende a corresponder a ocorrência de um elevado número de fenómenos de rampas de produção eólica.

Em resumo do desempenho das três metodologias na deteção das três tempestades mais gravosas salienta-se um deslocamento espacial da trajetória na Metodologia 2, bem como a sua dificuldade em detetar eventos com separação dos centros. Pela aplicação das três metodologias de deteção de sistemas meteorológicos, foram obtidos resultados distintos para cada metodologia no que diz respeito a deteção dos 100 eventos de rampa mais gravosos. A Metodologia 1 apresenta um número elevado de falsos alarmes explicado pelas suas características, uma vez que se focaliza na determinação de sistemas ciclónicos, não aplicando fortes restrições a respeito da intensidade do evento, contrariamente ao que acontece nas restantes metodologias, que se restringem à determinação de eventos extremos. Sendo assim, verifica-se um melhor compromisso entre a passagem destes eventos extremos e as rampas de produção eólica. Quando comparada às restantes metodologias, a Metodologia 2 apresenta resultados ligeiramente superiores às restantes durante o período de Verão. Neste caso, a metodologia poderá estar a beneficiar do uso da velocidade uma vez que a convergência da velocidade do vento se encontra geralmente mais centrada na região da PI, dentro da área de interesse. No entanto, e tendo em consideração as diferentes estações e definições de rampas, as métricas de avaliação apontam para uma melhor prestação da Metodologia 3.

Relativamente à análise por agrupamento, os resultados são mais consistentes entre as três metodologias, e verificou-se que os trajetos com maior impacto na produção eólica são relativos a eventos gerados a Sudoeste/Oeste da PI e que se deslocam em direção à costa de Portugal Continental. De destacar ainda que a velocidade de propagação dos eventos detetados não apresenta uma forte ligação com os parâmetros associados à existência de variações acentuadas na produção eólica nacional.

Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Nesta dissertação foi proposta uma análise da relação entre a ocorrência de rampas de produção eólica e a circulação atmosférica e, para tal foram utilizadas metodologias de deteção de sistemas meteorológicos, usualmente aplicadas a outro tipo de fenómenos, (*e.g.* precipitação). Assim, foram aplicadas três metodologias distintas *i*) Metodologia 1, baseada na deteção de ciclones através da determinação do Laplaciano do campo de pressão; *ii*) Metodologia 2, que se baseia na deteção de eventos extremos, *i.e.*, tempestades, que consta na determinação do Percentil 98% da velocidade do vento e, seguidamente, dos pontos onde se registam velocidades do vento superiores ao percentil, juntamente com a aplicação de restrições ao nível do tempo de vida do evento, velocidade do evento, área do evento e distância entre centros; *iii*) Metodologia 3, também baseada na determinação de um percentil, no entanto, recorre-se aos dados de pressão e, sendo assim, é realizada a análise para o Percentil 98% do gradiente do campo de pressão. É, contudo, importante assinalar que esta última metodologia tem a capacidade de distinguir eventos impulsionadores de eventos de subida e eventos de descida, com a introdução de um “efeito de memória”, permitindo uma melhor aproximação ao conceito de rampas de produção eólica.

As três metodologias foram testadas para três eventos extremos: Xynthia (Fevereiro 2010), Gong (Janeiro de 2013) e Klaus (Janeiro de 2009). As Metodologias 1 e 3 apresentaram trajetórias concordantes com os resultados existentes na literatura atual, e a Metodologia 2, devido às suas características, apresentou uma localização do centro das tempestades ligeiramente desfasado espacialmente face às restantes metodologias. Foi também analisada a produção eólica para os dias de passagem destes três eventos, tendo-se verificado que, de facto, estes eventos provocaram variações assinaláveis na produção eólica, sendo que a deteção prévia deste tipo de eventos pode contribuir para alertar os operadores do sistema elétrico da potencial ocorrência de eventos com variação acentuada da produção eólica. Adicionalmente foram identificadas, para cada metodologia, quais as localizações espaciais que se encontram relacionadas com a existência/passagem dos eventos detetados e conducentes a diferentes níveis de produção eólica.

Foram aplicadas três métricas de avaliação às três metodologias, tendo sido selecionados os parâmetros *Bias Score*, EDS e KSS. A metodologia que apresentou melhores resultados foi a Metodologia 3, tanto a nível do valor de falsos positivos como no número de verdadeiros positivos. Regra geral, as metodologias apresentaram maior dificuldade na deteção das rampas de subida, em particular para os meses de Verão. Estes resultados podem ser explicados, por um lado, pelo menor número de rampas detetadas, e por outro lado, pela menor ligação destes eventos à circulação atmosférica de larga escala e, conseqüentemente, intui-se que algumas das premissas assumidas durante este trabalho podem necessitar de otimização.

Com o propósito de validar e verificar a influência da passagem destes eventos na produção eólica, foi realizada uma análise das trajetórias efetuadas pelos sistemas meteorológicos e obtidas recorrendo ao método de agrupamento, *K-means*. Esta análise foi feita com base em parâmetros pré-selecionados: velocidade de propagação, produção média, entre outros, considerando *K* (número de agrupamentos) igual a 6 uma vez que apresentava um melhor compromisso entre as trajetórias e os diferentes parâmetros analisados. Verificou-se que os eventos que apresentam maior influência na produção eólica são, geralmente, gerados a Sudoeste/Oeste da PI e que se dirigem para a PI, chegando a interseção a costa de Portugal Continental. A Metodologia 2 foi a única que não conseguiu reproduzir corretamente este resultado, uma vez que as trajetórias resultantes da aplicação desta metodologia tendem a apresentar um ligeiro deslocamento face às restantes metodologias. Tal ocorre devido à utilização de dados de velocidade do vento, uma vez que o centro de um sistema de baixas pressões regista velocidades próximas de 0 m/s e, apenas na sua periferia, são registados valores elevados de velocidade, existindo, desse modo, uma tendência de deslocamento do centro para a periferia. Assim, durante este trabalho foram identificadas algumas características que podem ser utilizadas para auxiliar a operação de sistemas electroprodutores com elevada penetração eólica, *e.g.*, as trajetórias mais propícias a

eventos impulsionadores de rampas de produção eólica. Este tipo de análise pode ser bastante útil para os TSO's, uma vez que, o recurso a mecanismos de deteção de tempestades, associado a uma ferramenta de previsão da produção eólica, tem a capacidade de os alertar para eventos graves que podem gerar variações acentuadas na produção eólica, facto que possibilita a adoção de medidas de prevenção a fim de assegurar a estabilidade do binómio produção-consumo.

O desenvolvimento futuro deste trabalho passa pela otimização das Metodologias 2 e 3 através da aplicação de mais testes de sensibilidade ao percentil, aplicação de filtros espaciais de forma a identificar melhor as estruturas de cada evento e uma possível alteração da definição de centro utilizada na Metodologia 2. Esta otimização é particularmente relevante em casos como a tempestade Gong, de forma a excluir o segundo centro de altas velocidades detetado. Esta exclusão em alguns casos pode passar pelo aumento do percentil usado nos meses de Inverno. No entanto, é importante compreender o impacto desta alteração, porque aumentar o percentil pode reduzir significativamente o tempo de vida (ignorando ciclogénese e ciclólise) das tempestades detetadas, principalmente nas zonas de interseção na costa, que são as localizações mais importantes para validar o impacto de uma tempestade na produção eólica nacional. Adicionalmente, e para Metodologia 2, serão testados dados de níveis mais elevados da atmosfera em vez da velocidade do vento aos 10 metros. Relativamente à Metodologia 1, considera-se que é necessário um estudo mais aprofundado da distinção entre a intensidade (fraco ou forte) e o tipo de evento (aberto ou fechado) que o algoritmo fornece. A estes métodos está sempre associada uma determinada gama de incerteza. Assim, uma solução para mitigar esta incerteza seria estabelecer uma combinação entre os diferentes métodos de forma a que se complementem na deteção de diferentes categorias de eventos meteorológicos. Na aplicação das três metodologias foram utilizadas duas variáveis meteorológicas: a pressão média ao nível do mar e a velocidade do vento. Embora seja evidente a relação entre estes sistemas e estas duas variáveis, a utilização de outras variáveis poderia constituir uma mais-valia por forma a complementar o trabalho até aqui desenvolvido, *e.g.*, utilização da temperatura para determinação de diferentes frentes meteorológicas.

As metodologias desenvolvidas podem ser também aplicadas para parques eólicos, *i.e.*, analisar a passagem de sistemas meteorológicos para uma área mais restrita, permitindo distinguir os eventos de rampa provocados por movimentos de larga escala atmosférica dos eventos de rampa provocados por fenómenos locais. Logo, será possível analisar quais os fenómenos locais que podem despoletar rampas de produção eólica num parque eólico, contribuindo, assim, para um aumento da sua previsibilidade. É importante mencionar que este estudo serviu de diagnóstico e compreensão deste tipo de fenómenos meteorológicos e do seu impacto na produção eólica nacional. Sendo assim, é necessário verificar com base em resultados de previsões operacionais se este tipo de metodologias pode, efetivamente, ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão. Alerta-se para o facto desta ferramenta não pretender, em condição alguma, substituir os atuais sistemas de previsão de produção eólica, mas sim ser utilizada como complemento aos sistemas existentes para melhoria da robustez de operação do sistema elétrico, *e.g.*, através da alocação de reservas adicionais de potência em situações de tempestade. Por fim é de realçar que a presente tese providencia os principais passos e funções possibilitando a sua aplicabilidade na compreensão de outras componentes do sistema elétrico, como por exemplo a energia solar fotovoltaica.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Estanqueiro, «Impact of Wind Generation Fluctuations in the Design and Operation of Power Systems.», em *7th international Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, 2008.
- [2] M. Marquis, J. Wilczak, M. Ahlstrom, J. Sharp, R. Stern, J. Charles Smith, e S. Calvert, «Forecasting the Wind to Reach Significant Penetration Levels of Wind Energy», *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 92, n. 9, pp. 1159–1171, 2011.
- [3] H. Holttinen, M. Milligan, N. Menemenlis, J. Dobschinski, B. Rawn, R. J. Bessa, D. Flynn, e E. G. Lazaro, «Methodologies to Determine Operating Reserves due to Increased Wind Power», *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, n. 4, pp. 713–723, 2012.
- [4] REN, «Dados técnicos», 2014.
- [5] R. J. Bessa, M. Matos, I. C. Costa, L. Bremermann, I. G. Franchin, R. Pestana, N. Machado, H. Waldl, e C. Wichmann, «Reserve setting and steady-state security assessment using wind power uncertainty forecast: A case study», *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, n. 4, pp. 827–836, 2012.
- [6] A. Couto, P. Costa, L. Rodrigues, V. Lopes, e A. Estanqueiro, «Impact of Weather Regimes on the Wind Power Ramp Forecast in Portugal», *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, n. 3, pp. 934–942, 2015.
- [7] C. W. Potter, E. Gritmit, e B. Nijssen, «Potential benefits of a dedicated probabilistic rapid ramp event forecast tool», *Proc. IEEE/PSCE '09, Seattle, 2009*, p. 5.
- [8] G. Giebel, R. Brownsword, G. Kariniotakis, M. Denhard, e C. Draxl, «The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power A Literature Overview», *Tech. Report, ANEMOS.plus*, pp. 1–109, 2011.
- [9] DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), «Renováveis - Estatísticas Rápidas», 2015.
- [10] M. F. T. Moreira, J. S. Martins, e J. L. Afonso, «Renewable Energy in Portugal – Legislation, Incentives and Suggestions», em *Ind. Electron*, 2003, pp. 9–12.
- [11] IEA Wind, *2013 Annual Report*. 2013.
- [12] REN, «REN - Centro de Informação.» [Online]. Disponível em: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/EN/Pages/CIHomePage.aspx>. [Acedido: 10-Jan-2016].
- [13] e2p, «Portal e2p.» [Online]. Disponível em: <http://e2p.inegi.up.pt/>. [Acedido: 20-Jan-2016].
- [14] P. Alexandre, «Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental Portugal Continental», Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, 2004.
- [15] F. Ribeiro, P. Ferreira, M. Araújo, e A. C. Braga, «Public opinion on renewable energy technologies in Portugal», *Energy*, vol. 69, pp. 39–50, 2014.
- [16] B. A. Reeves e F. Beck, «Wind Energy for Electric Power - Technical Report for Renewable Energy Policy Project», 2003.
- [17] N. Cutler, «Characterising the Uncertainty in Potential Large Rapid Changes in Wind Power Generation», The University of New South Wales, School of Electrical Engineering and Telecommunications, 2009.
- [18] L. Soder, H. Abildgaard, A. Estanqueiro, C. Hamon, H. Holttinen, E. Lannoye, E. G. Lazaro, M. O'Malley, e U. Zimmermann, «Experience and Challenges With Short-Term Balancing in European Systems With Large Share of Wind Power», *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 853–861, 2012.

- [19] H. Holttinen, P. Meibom, A. Orths, F. Van Hulle, e B. Lange, «IEA Wind Task 25 - Design and Operation of Power Systems With Large Amounts of Wind Power», IEA Wind.
- [20] S. Linden, B. Myers, e S. E. Haupt, «Observation-Based Wind-Power Ramp Forecast System», em *92nd American Meteorological Society Annual Meeting*, 2012.
- [21] J. Miettinen, H. Holttinen, e M. Piironen, «Wind Power Forecasting at Transmission System Operator's Control Room», *Power Energy Soc. Gen. Meet. 2015 IEEE, Denver*, 2015.
- [22] A. Estanqueiro, «The Future Energy mix Paradigm: How to Embed Large Amounts of Wind Generation While Preserving the Robustness and Quality of the Power Systems», em *Wind Power*, 2010, pp. 499–521.
- [23] C. Gallego-castillo, A. Cuerva-tejero, e O. Lopez-garcia, «A Review on the Recent History of Wind Power Ramp Forecasting», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1148–1157, 2015.
- [24] R. A. Walton, W. A. Gallus, e E. S. Takle, «Wind Ramp Events at Turbine Height-Spatial Consistency and Causes at two Iowa Wind Farms», *Fourth Conf. Weather. Clim. new energy Econ. Austin, TX.*, 2013.
- [25] IEA, «Variability of Wind Power and other Renewables - Management options and strategies», 2005.
- [26] P. L. Barbour, S. Casey, e S. Walker, «Evaluation of BPA Vendors Wind Plant “Wind Ramp Event” Tracking System», *Energy Resour. Res. Lab. Corvallis, OR, Final Summ. Rep.*, 2010.
- [27] Y. Li, P. Musilek, e E. Lozowski, «Identification of Atmospheric Pressure Troughs using Image Processing Techniques», *IFSA World Congr. NAFIPS Annu. Meet. (IFSA/NAFIPS), 2013 Joint.*, pp. 722–726, 2013.
- [28] J. W. Zack, «Optimization of Wind Power Production Forecast Performance During Critical Periods for Grid Management», *Proc. Eur. Wind Energy Conf. EWEC, Milano (IT)*, vol. 8, 2007.
- [29] P. Musilek, «Forecasting of Wind Ramp Events - Analysis of Cold Front Detection», em *31th international symposium on forecasting, Prague, Czech Republic*, 2011, n. June.
- [30] J. Freedman, M. Markus, e R. Penc., «Analysis of West Texas Wind Plant Ramp-Up and Ramp-Down Events», 2008.
- [31] R. A. S. Walton, «Analysis of Ramp Events and Two-Day Persistent Forecast Accuracy at 80m», em *Research Experiences for Undergraduates - Symposium Proceedings*, 2012, vol. 1, pp. 31–41.
- [32] Wetterzentrale, «Surface Map - January 19,2013», *Wetterzentrale*, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxbra.html>. [Acedido: 25-Set-2015].
- [33] T. Ouyang, X. Zha, e L. Qin, «A Survey of Wind Power Ramp Forecasting», *Energy Power Eng.*, vol. 05, n. 04, pp. 368–372, 2013.
- [34] V. Iordanidou, A. G. Koutroulis, e I. K. Tsanis, «A Probabilistic Rain Diagnostic Model Based on Cyclone Statistical Analysis», vol. 2014, p. 11, 2014.
- [35] W. Zhang, Y. Leung, e Y. Wang, «Cluster Analysis of Post-Landfall Tracks of Landfalling Tropical Cyclones Over China», *Clim. Dyn.*, vol. 40, n. 5–6, pp. 1237–1255, 2013.
- [36] P. A. Bosler, E. L. Roesler, M. A. Taylor, e M. Mundt, «Stride Search: a general algorithm for storm detection in high resolution climate data», *Geosci. Model Dev. Discuss.*, vol. 8, n. 9, pp. 7727–7765, 2015.

- [37] E. Flaounas, V. Kotroni, K. Lagouvardos, e I. Flaounas, «Tracking Winter Extra-Tropical Cyclones Cased on Their Relative Vorticity Evolution and Sensitivity to Prior Data Filtering (cycloTRACK v1.0)», *Geosci. Model Dev. Discuss.*, vol. 7, n. 1, pp. 1245–1276, 2014.
- [38] D. Renggli, «Seasonal Predictability of Wintertime Windstorm Climate Over the North Atlantic and Europe», Freien Universitat Berlin, 2011.
- [39] M. A. R. Talaia e R. Fernandes, «Diagnóstico de Vento de uma Região Usando uma Carta Meteorológica de Superfície», em *Congresso Internacional e V Encontro Nacional de Riscos*.
- [40] C. A. F. B. Martins, «A Barra da Laguna de Aveiro no Século XIX : Impactos da Ação Antrópica na Dinâmica Lagunar», Universidade do Porto, 2012.
- [41] U. Neu, M. G. Akperov, N. Bellenbaum, R. Benestad, R. Blender, R. Caballero, A. Coccozza, H. F. Dacre, Y. Feng, K. Fraedrich, J. Grieger, S. Gulev, J. Hanley, T. Hewson, M. Inatsu, K. Keay, S. F. Kew, I. Kindem, G. C. Leckebusch, M. L. R. Liberato, P. Lionello, I. I. Mokhov, J. G. Pinto, C. C. Raible, M. Reale, I. Rudeva, M. Schuster, I. Simmonds, M. Sinclair, M. Sprenger, N. D. Tilinina, I. F. Trigo, S. Ulbrich, U. Ulbrich, X. L. Wang, e H. Wernli, «Imilast: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms», *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 94, n. 4, pp. 529–547, 2013.
- [42] M. Fragoso, «A Tempestade de 23 de Dezembro de 2009 - Causas Meteorológicas e Impactes na Região Oeste de Portugal Continental», *Territ. 19*, pp. 23–31, 2012.
- [43] J. M. H. da Silva, «Avaliação do Efeito de Interferência de Obstáculos no escoamento Atmosférico Sobre o mar: Caso de Estudo da Ilha Berlenga», Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, 2013.
- [44] A. Portela e M. Castro, «Summer Thermal Lows in the Iberian Peninsula: A Three-Dimensional Simulation», *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 122.529 1-22.
- [45] T. F. C. Rodrigues, «Ciclones no Oceano Atlântico Norte - Clima atual e cenário futuro», Universidade de Aveiro, 2011.
- [46] M. D. S. Mesquita, D. E. Atkinson, e K. I. Hodges, «Characteristics and Variability of Storm Tracks in the North Pacific, Bering Sea, and Alaska», *J. Clim.*, vol. 23, n. 2, pp. 294–311, 2010.
- [47] M. D. S. Mesquita, N. Gunnar Kvamstø, A. Sorteberg, e D. E. Atkinson, «Climatological Properties of Summertime Extra-Tropical Storm Tracks in the Northern Hemisphere», *Tellus, Ser. A Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 60 A, n. 3, pp. 557–569, 2008.
- [48] D. E. Atkinson, «Observed Storminess Patterns and Trends in the Circum-Arctic Coastal Regime», *Geo-Marine Lett.*, vol. 25, n. 2–3, pp. 98–109, 2005.
- [49] S. Leonard, T. J, e A. Van Der Wal, «An Assessment of Three Automatic Depression Tracking Schemes», *Meteorol. Appl.*, vol. 183, pp. 173–183, 1999.
- [50] J. Terry e R. Atlas., «Objective Cyclone Tracking and its Applications to ERS-1 Scatterometer Forecast Impact Studies», *Conf. Weather Anal. Forecast. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 15, 1996.
- [51] W. König, R. Sausen, e F. Sielmann., «Objective identification of cyclones in GCM simulations.», *J. Clim.*, vol. 6, n. 12, pp. 22217–2231, 1993.
- [52] R. J. Murray e I. Simmonds, «A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme», *Aust. Meteorol. Mag.*, 1991.

- [53] 2012 The MathWorks Inc., Natick, MA, «MATLAB R2012b.» .
- [54] ECMWF, «ECMWF.» [Online]. Disponível em: <http://www.ecmwf.int/>. [Acedido: 15-Dez-2015].
- [55] ECMWF, «ERA-INTERIM, daily.» [Online]. Disponível em: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>. [Acedido: 14-Dez-2015].
- [56] D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Høllm, L. Isaksen, P. Kllberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J. J. Morcrette, B. K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J. N. Thépaut, e F. Vitart, «The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system», *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 137, n. 656, pp. 553–597, 2011.
- [57] NASA, «BD MERRA-2.» [Online]. Disponível em: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>. [Acedido: 18-Dez-2015].
- [58] T. Hewson e U. Neu, «Cyclones, Windstorms and the IMILAST project», *Tellus A*, vol. 67, n. 0.
- [59] M. L. R. Liberato, «The 19 January 2013 windstorm over the north Atlantic: Large-scale dynamics and impacts on Iberia», *Weather Clim. Extrem.*, vol. 5–6, n. January 2013, pp. 16–28, 2014.
- [60] DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), «DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia).» [Online]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido: 12-Jun-2015].
- [61] R. J. Murray e I. Simmonds, «A Numerical Scheme for Tracking Cyclone Centres From Digital Data. Part II: Application to January and July General Circulation Model Simulations.», *Australian Meteorological Magazine* 39, 1991.
- [62] J. G. Pinto, T. Spanghehl, U. Ulbrich, e P. Speth, «Sensitivities of a Cyclone Detection and Tracking Algorithm: Individual Tracks and Climatology», *Meteorol. Zeitschrift*, vol. 14, n. 6, pp. 823–838, 2005.
- [63] A. Hannachi, I. T. Jolliffe, e D. B. Stephenson, «The Return Period of Wind Storms Over Europe», vol. 459, n. December 2008, pp. 437–459, 2007.
- [64] A. Couto, M. Lacerda, L. Rodrigues, e A. Estanqueiro, «The Underlying Role of the Meteorology in Wind Power - Workshop», em *Apresentação Oral - Workshop on Status and Outlook of IRPWIND WP8*, p. 43.
- [65] M. Paliwal, A. Patwardhan, e N. Sarda, «Analyzing Tropical Cyclone Tracks of North Indian Ocean», *Proc. 2nd Int. Conf. Comput. Geospatial Res. Appl.*, 2011.
- [66] G. Peters, F. Crespo, P. Lingras, e R. Weber, «Soft clustering - Fuzzy and Rough Approaches and Their Extensions and Derivatives», *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 54, n. 2, pp. 307–322, 2013.
- [67] S. J. Gaffney, «Probabilistic Curve-Aligned Clustering and Prediction with Regression Mixture Models», University of California, 2004.
- [68] H. a. Ramsay, S. J. Camargo, e D. Kim, «Cluster analysis of tropical cyclone tracks in the Southern Hemisphere», *Clim. Dyn.*, vol. 39, n. 3, pp. 897–917, 2012.
- [69] L. Makra, T. Sánta, I. Matyasovszky, A. Damialis, K. Karatzas, K. C. Bergmann, e D. Vokou, «Airborne Pollen in Three European Cities: Detection of Atmospheric Circulation Pathways by Applying Three-Dimensional Clustering of Backward Trajectories», *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 115, n. 24, pp. 1–16, 2010.

- [70] H.-S. Kim, J.-H. Kim, C.-H. Ho, e P.-S. Chu, «Pattern Classification of Typhoon Tracks Using the Fuzzy c-Means Clustering Method», *J. Clim.*, vol. 24, n. 2, pp. 488–508, 2011.
- [71] A. Truewind, «AWS Truewind's Final Report for the Alberta Forecasting Pilot Project», *Wind Power Forecast. Pilot Proj.*, p. 66, 2008.
- [72] Davy e J. Robert, «Statistical Downscaling of Wind Variability From Meteorological Fields», *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 135, n. 1, pp. 161–175.
- [73] Y. Li, «Improving Wind Ramp Predictions Using Gabor Filtering and Statistical Scenarios», University of Alberta, 2014.
- [74] A. F. Nerushev, A. E. Barkhatov, e K. Region, «Determination of Atmospheric Characteristics in the Zone of Action of Extra-Tropical Cyclone Xynthia (February 2010) Inferred from Satellite Measurement Data», em *Proc. 2012 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 2012, n. February 2010.
- [75] EUMetrain, «EUMetrain.» [Online]. Disponível em: http://www.eumetrain.org/resources/the_xynthia_storm_by_ascat_2012.html. [Acedido: 05-Jan-2016].
- [76] M. L. R. Liberato, J. G. Pinto, I. F. Trigo, e R. M. Trigo, «Klaus - An Exceptional Winter Storm Over Northern Iberia and Southern France», *Weather*, vol. 66, n. 12, pp. 330–334, 2011.
- [77] M. L. R. Liberato, «The 19 January 2013 Windstorm Over the North Atlantic: Large-Scale Dynamics and Impacts on Iberia», *Weather Clim. Extrem.*, vol. 5–6, pp. 16–28, 2014.
- [78] M. L. R. Liberato, J. G. Pinto, R. M. Trigo, P. Ludwig, P. Ordóñez, D. Yuen, e I. F. Trigo, «Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean», *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 13, n. 9, pp. 2239–2251, 2013.

Anexo A - Análise dos dados das reanálises

De forma a identificar os dados atmosféricos para a aplicação dos algoritmos desenvolvidos nesta tese, procedeu-se: *i*) a uma revisão da literatura para identificar a base de dados mais adequada; e *ii*) a comparação entre dados observados e duas bases de dados de reanálises com resolução temporal de 3h. Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação dos dados observados com os dados das duas reanálises (ERA-I e MERRA-2) para as duas variáveis de interesse nesta tese *i*) pressão reduzida ao nível médio do mar (Figura A 1) e *ii*) velocidade do vento aos 10m (Figura A 2).

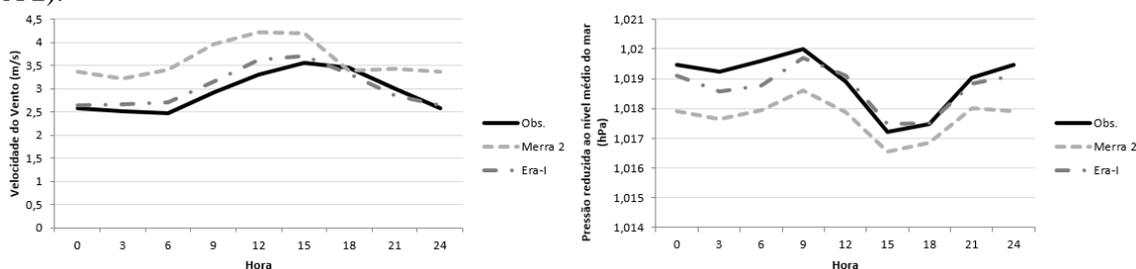


Figura A 1 - Comparação entre os dados observados na estação de Castelo Branco IPMA observados em 2005 e os dados da ERA-I e MERRA-2 para a velocidade do vento 10m (à esquerda) e pressão reduzida ao nível médio do mar (à direita).

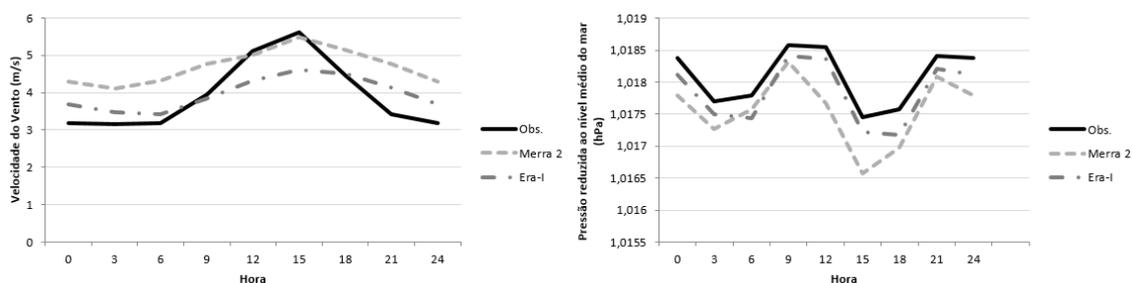


Figura A 2 - Comparação entre os dados observados na estação de Sines SNIRH observados entre 2002 e 2004 e os dados da ERA-I e MERRA-2 para a velocidade do vento aos 10m (à esquerda) e pressão reduzida ao nível médio do mar (à direita).

Com base na Figura A 1 e Figura A 2 verifica-se que os dados da ERA-I apresentam perfis diários mais próximos dos dados observados. Através das figuras anteriores é também possível verificar que os dados de velocidade apresentam maior desvio do comportamento diário, sendo os dados de pressão geralmente melhor reproduzidos pelas reanálises.

Utilizando estes mesmos dados, foi também aplicada a correlação de Pearson, cujo coeficiente é determinado através da seguinte fórmula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X) \times var(Y)}} \quad (22)$$

Onde x_1, x_2, \dots, x_n e y_1, y_2, \dots, y_n são os valores medidos de ambas as variáveis a serem comparadas, neste caso, os dados observados para cada estação e os dados ERA-I e MERRA-2, \bar{x} e \bar{y} são os valores médios destas mesmas variáveis.

Para além da determinação do Coeficiente de correlação de Pearson, foi também determinado o valor da raiz do erro médio quadrático (*Root Mean Squared Error - RMSE*) (Equação 23) [73] e o valor do erro do Viés (Equação 24).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Prev_i - Obs_i)^2}{n}} \quad (23)$$

$$Viés = Prev_i - Obs_i \quad (24)$$

Onde $Prev_i$ é o valor das reanálises da variável em estudo para o instante i , Obs_i é o valor observado da variável em estudo para o instante i e n é o número total de instantes considerados.

Os resultados encontram-se resumidos na Tabela A 1 e na Tabela A 2, para os dados de Castelo Branco e Sines, respetivamente.

Tabela A 1 - Valores para o Coeficiente de Pearson, o RMSE e o Viés para os dados observados na estação meteorológica de Castelo Branco e os dados MERRA-2 e ERA-I para velocidade do vento aos 10m e pressão reduzida ao nível médio do mar.

Parâmetros/Base de dados	Velocidade do vento		Pressão	
	MERRA-2	ERA-I	MERRA-2	ERA-I
Base de Dados	MERRA-2	ERA-I	MERRA-2	ERA-I
Coef. de Pearson (r)	0,686	0,702	0,990	0,990
RMSE	1,420 m/s	1,190 m/s	150,430 hPa	95,660 hPa
Viés	0,670 m/s	0,100 m/s	-118,470 hPa	-22,280 hPa

Tabela A 2 - Valores para o Coeficiente de Pearson, o RMSE e o Viés para os dados observados na estação meteorológica de Sines 2002-2004 e os dados MERRA-2 e ERA-I para velocidade do vento aos 10m e pressão reduzida ao nível médio do mar.

Parâmetros/Base de dados	Velocidade do vento		Pressão	
	MERRA-2	ERA-I	MERRA-2	ERA-I
Base de Dados	MERRA-2	ERA-I	MERRA-2	ERA-I
Coef. de Pearson (r)	0,695	0,685	0,995	0,995
RMSE	1,890 m/s	1,760 m/s	79,900 hPa	64,280 hPa
Viés	0,720 m/s	0,020 m/s	-52,020 hPa	-24,900 hPa

Através da análise da Tabela A 1 e Tabela A 2, é possível verificar que para as duas bases de dados, regra geral, os valores de correlação são semelhantes para os dois parâmetros em análise. Por outro lado, os erros obtidos (RMSE e Viés) com os dados das reanálises ERA-I são manifestamente inferiores. Face ao exposto, e tendo em consideração o comportamento relativamente ao perfil diário optou-se pela utilização dos dados da ERA-I.