

Paulo da Veiga Fernandes

**CARACTERIZAÇÃO DE REGIMES DE VENTO
VISANDO O SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

Orientador:
Álvaro Rodrigues
Professor Auxiliar

Mestrado em Engenharia Mecânica – Novas Tecnologias Energéticas
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Março de 2005

Agradecimentos

A concretização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio incondicional proporcionado pelos meus pais e pela minha irmã. O seu estímulo e confiança revelaram-se fundamentais para ultrapassar os momentos mais difíceis e foram a força que muitas vezes me impeliu a superar as alturas de maior desânimo.

Aqui expresso o meu mais sincero reconhecimento ao Professor Álvaro Rodrigues pela sua orientação neste trabalho. As suas indicações e sugestões permitiram, sem dúvida, que atingisse uma qualidade que de outra forma não conseguiria alcançar. Fica sobretudo o meu agradecimento por todos ensinamentos que partilhou e que possibilitaram o meu crescimento tanto a nível profissional, como pessoal, sendo impossível esconder um sentimento de dívida que não mais será saldado.

Pelas facilidades concedidas em conciliar a minha actividade profissional com os trabalhos de mestrado, agradeço ao INEGI, Instituto Nacional de Engenharia Mecânica. A possibilidade de trabalhar num ambiente profissional directamente relacionado com os assuntos abordados nesta dissertação é motivo de agradecimento verdadeiro.

Resumo

O objectivo deste trabalho foi a análise, selecção e implementação de várias metodologias para a caracterização de regimes de vento visando o seu aproveitamento energético numa plataforma informática fiável e de fácil utilização.

Através de escolhas sustentadas das metodologias empregues, pretendeu-se tornar a caracterização do regime de ventos uma tarefa menos morosa, complexa e permeável a erros, de modo a que decisões relativas ao futuro de um projecto eólico se possam tornar mais céleres e acertadas.

A abordagem do problema incidiu sobre quatro áreas: processamento e validação da informação recolhida nas campanhas de medição das características de vento; caracterização do regime de ventos visando o seu aproveitamento energético; aumento da representatividade do regime de ventos para a vida útil de um projecto eólico e caracterização da severidade do regime de ventos.

Foi desenvolvida, em ambiente MATLAB®, uma aplicação informática a que se atribuiu a designação PAFER e que onde se implementaram várias funcionalidades relacionadas com os temas atrás referidos. Este código foi posteriormente convertido para linguagem C++ para que pudesse ser utilizado em qualquer computador pessoal.

Na fase de processamento e validação da informação foram implementadas rotinas de validação automática de dados, através da consubstanciação de testes para a detecção de anomalias nas séries temporais das características de vento recolhidas nas estações de medição.

Para a determinação das características do regime de ventos nos seus aspectos relevantes para o aproveitamento energético foram construídas ferramentas que processam rapidamente o grande volume de informação envolvido e o exibem resumido sob uma forma tabelar ou gráfica.

Metodologias versáteis e parameterizáveis foram também implementadas para a extensão da representatividade do regime de vento. Entre elas destaca-se o método *MCP* que permite correlacionar simultaneamente a direcção e velocidade do vento em dois pontos de medição.

A caracterização da severidade do regime de ventos, ponto importante na definição da qualidade construtiva dos aerogeradores a instalar num parque, foi alvo de estudo, tendo sido concretizada uma aplicação para a previsão da velocidade máxima do vento, através da adaptação da metodologia clássica de Gumbel às características particulares das séries de vento.

Por fim, foi construída uma ferramenta que permite estimar a produção de energia eléctrica para um local onde se efectuem medições das características do vento a mais que uma altura de medição.

O *software* PAFER faz a união das aplicações descritas, constituindo-se como um todo coerente, que permite caracterizar o regime de ventos de forma célere, eficiente e de fácil utilização.

Summary

This work's purpose was to analyse, select and implement several methodologies into a computer program that should enable the characterization of wind climates under an energetic perspective in a robust, efficient and easy to use manner.

Through the careful selection of methodologies and means it was attempted to convert the task of wind climate description into a less time consuming, complex and error prone assignment. Through this it was intended to decrease the uncertainty levels associated to the final results and so be able to provide the wind energy project managers with clear and precise information on the wind related aspects.

The problem was studied focussing in four main areas: wind data process and validation, wind climate description under an energetic perspective, long-term wind climate description and extreme wind climate classification.

Under MatLab® workspace a software named PAFER was developed in order to implement a number of tools related to the above mentioned topics. The MatLab® code was later converted to C++ language in order to be used in any personal computer.

Several automatic tests were implemented in the PAFER software so that the wind data handling and validation process could be performed in an efficient way, almost error free and with as little human intervention as possible. The tests are to detect possible errors or sensor failure that might occur.

A number of tools, prepared to deal with large amounts of information in a fast way, were built into PAFER in order to obtain a complete description of the wind climate under an energetic perspective and display the summarized results in a graphical or tabular form. This allows the increase of the overall efficiency of the task and decrease the number of possible error sources.

Versatile correlation techniques were put into practice in order to establish long term wind climate descriptions based on data collected at a reference station. Among them a strong attention went to a variation of the MCP methodology, specially adapted to the particular features of the wind time series.

The wind climate severity, an important point in the wind turbine quality definition, was also studied. An application was implemented in PAFER that makes it possible to estimate the extreme wind speed for a given return period using as reference the data collected on site. This application is based on a specially developed variation of the Gumbel's classic methodology of extremes fit to deal with the usually short extension of the wind data sets.

Finally, a tool to estimate the energy output of a wind turbine installed in same spot as a measuring station was also built.

The PAFER software assembles all the developed tools in a coherent fashion, allowing the complete characterization of wind climates under an energetic perspective in a fast, reliable and easy to use way

Índice

1	Introdução.....	1
2	Levantamento do recurso eólico.....	6
3	Séries de vento – Validação da informação.....	14
4	Caracterização do regime de ventos	18
5	Regimes de ventos de longo termo – Metodologias de correlação	36
6	Classificação da severidade do regime de ventos.....	54
7	Aplicação informática para caracterização de regimes de vento.....	65
8	Conclusões.....	83
	Lista de figuras e tabelas	86
	Lista de símbolos.....	87
	Referências	89
	Anexos	

1 Introdução

As fontes energéticas de origem não renovável têm sido desde o século XVIII a base de sustentação do crescimento económico e social dos países industrializados. Porém, a sua utilização em larga escala tem tido repercussões ambientais de proporções globais.

O aquecimento global, consequência das enormes quantidades de CO₂ libertadas pelos sistemas conversores de energia química contida nos produtos associados do petróleo, é causa apontada por muitos especialistas para subida do nível médio dos oceanos, para o aumento de eventos atmosféricos extremos e para a antecipada extinção de muitas espécies.

A um nível estratégico, a concentração de enormes recursos petrolíferos em zonas restritas do planeta conduziu à geração de um fenómeno de monopólio por parte dos países exportadores de petróleo. Adicionalmente, os constantes conflitos armados que se verificam nessas zonas resultam numa maior insegurança no fornecimento desta fonte energética, pondo em risco o contínuo desenvolvimento das sociedades que dela dependem. Estes dois factos associados contribuíram para que no final de 2004 o preço de barril petróleo nos principais mercados internacionais tenha atingido valores históricos, aumentando a pressão sobre a economia global [1.1].

À luz do actual panorama energético é premente o surgimento de um novo paradigma energético. Recorrendo aos recursos energéticos endógenos e renováveis será possível reduzir a dependência do petróleo, diminuindo os custos energéticos e estimulando as economias locais na construção de equipamentos industriais.

Este trajecto foi inicialmente acautelado pelos países europeus com a assinatura do tratado de Quioto para a definição de limiares de produção de gases de efeito estufa para o período 2000/2010. Para a sua concretização, entre outros objectivos, a União Europeia definiu, na “Directiva Europeia de Produção de Origem Renovável – 077/CE/2001” [1.2], como meta para 2010 que 22 % do total da energia eléctrica consumida na União tenha origem em fontes renováveis endógenas. Para Portugal a meta é mais ambiciosa, devendo 39 % dos consumos eléctricos nacionais em 2010 ser de origem renovável. Para a prossecução deste objectivo, à luz do desenvolvimento tecnológico actual, são duas as fontes energéticas que sobressaem: hídrica e eólica.

Há muito que a energia eléctrica é transformada em aproveitamentos hidroeléctricos, sendo esta a fonte energética renovável com claramente maior maturidade. Porém, recentemente a instalação deste tipo de estruturas tem vindo a sofrer grandes limitações devido aos impactos ambientais locais que implicam.

Incluindo o aproveitamento hidroelétrico do Alqueva, revestido de condições muito especiais, nos últimos 10 anos foram instalados em Portugal cerca de 170 MW de potência provenientes da construção de aproveitamentos hidroelétricos [1.3].

Como exemplo das dificuldades de construção de novos aproveitamentos tomem-se as intenções de longa data de construção de barragens nos afluentes do Douro Superior, rio Côa e Sabor. Estes projectos foram continuamente alvo de grandes pressões para o seu abandono por parte de associações de protecção ambiental e patrimonial, tendo no primeiro caso impedido a sua construção e no segundo resultado em sucessivos adiamentos da tomada de decisão sobre a prossecução do projecto.

Por oposição, a energia eólica, uma tecnologia recente, não poluente e de baixo impacto ambiental, é encarada favoravelmente pelas populações locais pelos benefícios económicos e de aumento de qualidade de vida que lhes proporciona. Estas características, associadas aos apoios conferidos a nível financeiro pelo estado Português, têm levado a um crescimento exponencial da potência eólica instalada em Portugal.

Nos últimos 10 anos foram instalados cerca de 520 MW de potência eólica em Portugal [1.4]. Nos últimos dois o sector revelou um forte dinamismo, instalando mais de metade da potência eólica total. As perspectivas para o futuro são ainda mais promissoras, tendo sido estabelecido pelos diferentes elencos governativos como meta para 2010 a instalação de 3750 MW, encontrando-se o objectivo alcançado a 14 %. Para além dos benefícios ambientais e económicos directos, o grande crescimento esperado poderá fazer surgir em Portugal, à semelhança do aconteceu já noutros países europeus, uma nova fileira industrial, geradora de mais valias e empregos.

No entanto, para que a energia eólica seja uma alternativa viável é condição indispensável que o recurso eólico seja suficiente para a rentabilização do investimento associado a este tipo de projectos. A determinação do recurso é pois uma fase fulcral no desenvolvimento do projecto de qualquer parque eólico, devendo para tal ser empregues as metodologias e técnicas que minorem a incerteza associada à sua determinação.

1.1 Enquadramento

A estimativa do potencial eólico de um local é actualmente conseguida por recurso a medições locais das características do vento. Para tal, são instaladas na área em análise estações anemométricas equipadas com sensores de medição da velocidade e direcção do vento.

Por razões que se prendem com a variabilidade temporal do recurso eólico, as campanhas de medição devem prolongar-se por um período tão extenso quanto possível e não inferior a um ano. O volume de informação recolhido no final de uma destas campanhas é enorme e do seu processamento será

extraída a informação relativa à valia eólica do local analisado. Em condições normais e em apenas um ano de medições serão armazenados mais de 100000 registos.

Não raras vezes, pela elevada complexidade orográfica dos locais onde se instalam parques eólicos em Portugal, o recurso a um só mastro de medição não é suficiente para manter os níveis de incerteza dentro dos valores exigidos pelos gestores dos projectos. Nestes casos, a instalação de outros mastros espalhados pela área é a solução geralmente adoptada elevando significativamente o volume de informação envolvida na caracterização do regime de ventos sob uma óptica de aproveitamento energético.

A análise e processamento de tal volume de informação tornam a tarefa de caracterização do regime de ventos complexa, que requer metodologias e procedimentos bem definidos e estruturados. Só desta forma serão evitados possíveis erros que venham a distorcer os resultados finais e que, simultaneamente, a incerteza associada a estes mesmos seja a menor possível. Só assim será providenciada aos gestores do projecto informação fiável sobre as características do regime de ventos sobre uma perspectiva energética, de modo a que as decisões relacionadas com a sua prossecução sejam as mais acertadas.

Adicionalmente, releva-se a necessidade do maior rigor, exactidão e transparência na abordagem dos problemas associados à caracterização do regime de ventos visando o seu aproveitamento eólico, pela razão que estes projectos são, não raras vezes, alvo de auditorias externas, de cujo resultado poderá estar dependente o seu financiamento ou valor final das apólices de seguros.

1.2 Objectivo

Com este trabalho pretende-se construir uma ferramenta informática versátil para processamento e análise de informação de séries temporais das características de vento, de modo a obter uma caracterização do regime de vento sobre uma perspectiva energética completa e tão exacta quanto possível. É simultaneamente objectivo que a ferramenta seja interactiva, de fácil manuseamento pelo utilizador e que se encontre apta a funcionar nos actuais computadores pessoais.

Com a implementação de rotinas de validação automática de dados de vento e metodologias sustentadas e coerentes de caracterização do regime de ventos pretende-se evitar erros humanos na manipulação de tão grandes volumes de informação, diminuir a incerteza associada aos resultados finais e garantir a transparência a todo o processo.

Por recurso a metodologias correlação apropriadas pretende-se aumentar a representatividade da descrição do regime de ventos, diminuindo a incerteza associada às estimativas de produção calculadas posteriormente. A concretização de metodologias de correlação sob a forma de uma

ferramenta informática pretende tornar mais célere e exacta a determinação da descrição de regime de ventos representativa da extensão do período de vida útil de um projecto eólico.

Através da análise cuidada da problemática de caracterização da severidade do regime de ventos deseja-se providenciar uma forma expedita de estimativas da velocidade máxima do vento para períodos de extensão alargada e assim auxiliar a tarefa de selecção da qualidade construtiva de um aerogerador a instalar no local de análise.

Pretende-se que a automatização de processos contribuía para uma maior celeridade na concretização da tarefa de caracterização do regime de ventos visando o seu processamento energético, aumentando a eficiência global do processo. O cariz fechado da ferramenta que se propõe construir contribuirá para a uniformização de procedimentos e processos, tornando possível a detecção de eventuais erros cometidos no passado e a consequente rectificação.

Pretende-se que a ferramenta a desenvolver surja como um todo coerente, implementando as melhores práticas recomendadas na literatura. Adicionalmente, na fase da sua elaboração serão tidos em grande atenção todos os ensinamentos e recomendações que me foi possível extrair durante a minha actividade profissional no sector de Energia Eólica do Instituto Nacional de Engenharia Mecânica, INEGI.

O INEGI foi uma instituição pioneira no desenvolvimento da energia eólica em Portugal e conta já com mais de 15 anos de experiência acumulada na área. Esse enorme volume de conhecimento é sem dúvida uma mais valia para a concretização dos objectivos propostos neste trabalho.

Refere-se, por fim, que à luz das mais recentes tendências para o marcado crescimento da actividade na área da energia eólica até ao final da década se comprova o carácter útil e eminentemente prático da ferramenta que com este trabalho se propõe desenvolver.

1.3 Organização

A presente tese está organizada da forma como se indica. Para além do capítulo 1, onde é feita uma breve descrição do âmbito da dissertação, dos seus objectivos e da sua organização, aborda-se, no capítulo 2, a problemática associada ao levantamento do recurso eólico, incidindo com maior ênfase nas campanhas de medição das características do vento na parte de procedimentos e equipamentos.

No capítulo 3 é abordada a problemática da validação da informação de vento recolhida nas estações de medição, sendo propostos testes automáticos para a detecção de situações anómalas. Já no capítulo 4 são passados em revisão os principais aspectos da caracterização do regime de vento de uma forma coerente e sistemática.

O capítulo 5 debruça-se sobre a necessidade de obtenção de descrições do regime de ventos representativos de situações de longo termo de forma a diminuir a incerteza final associada à variabilidade do recurso eólico. É analisada uma metodologia de correlação entre dados de duas estações baseada no método Measure, Correlate and Predict, especialmente adaptado às condições particulares das séries temporais de vento.

No capítulo 6 propõe-se uma metodologia de caracterização do regime de ventos extremos, tão importante na fase de selecção da qualidade construtiva dos aerogeradores a instalar no parque. Teve por base a metodologia de extremos desenvolvida por Gumbel, ajustada às condições particulares das séries de velocidade do vento.

No capítulo 7 é descrita a forma de funcionamento da ferramenta informática desenvolvida no âmbito da tese e que pretende implementar, de uma forma coerente e versátil, as metodologias e procedimentos definidos nos capítulos 3 a 6, tendo em vista o objectivo final da completa caracterização de regimes de ventos visando o seu aproveitamento energético.

Por fim, no último capítulo são expostas as conclusões decorrentes do presente trabalho e as sugestões para futuros estudos, seguido das referências bibliográficas e de quatro anexos.

2 Levantamento do recurso eólico

A identificação de um local potencialmente interessante para a instalação de um aproveitamento eólico é uma tarefa prolongada e trabalhosa que usualmente se processa em três passos sequenciais.

Numa fase inicial de prospecção, a zona estudada será de grande abrangência, cobrindo uma vasta área de terreno. Nesta primeira instância tem-se por objectivo a determinação, de um modo quase grosseiro, as zonas que exibem níveis interessantes de recurso eólico.

Existem duas formas preferenciais para a execução da primeira fase. Por um lado, a consulta de mapas de recurso eólico de grande escala fornece geralmente boas indicações sobre a área em estudo. Neste domínio destacam-se os trabalhos do Risø National Laboratory, na Dinamarca, que vieram dar origem ao Atlas Europeu de Vento [2.1], onde se resume o potencial eólico de uma grande maioria dos países europeus. Na figura 2.1 encontram-se o mapa de recurso eólico produzido pelo Risø para a Europa.

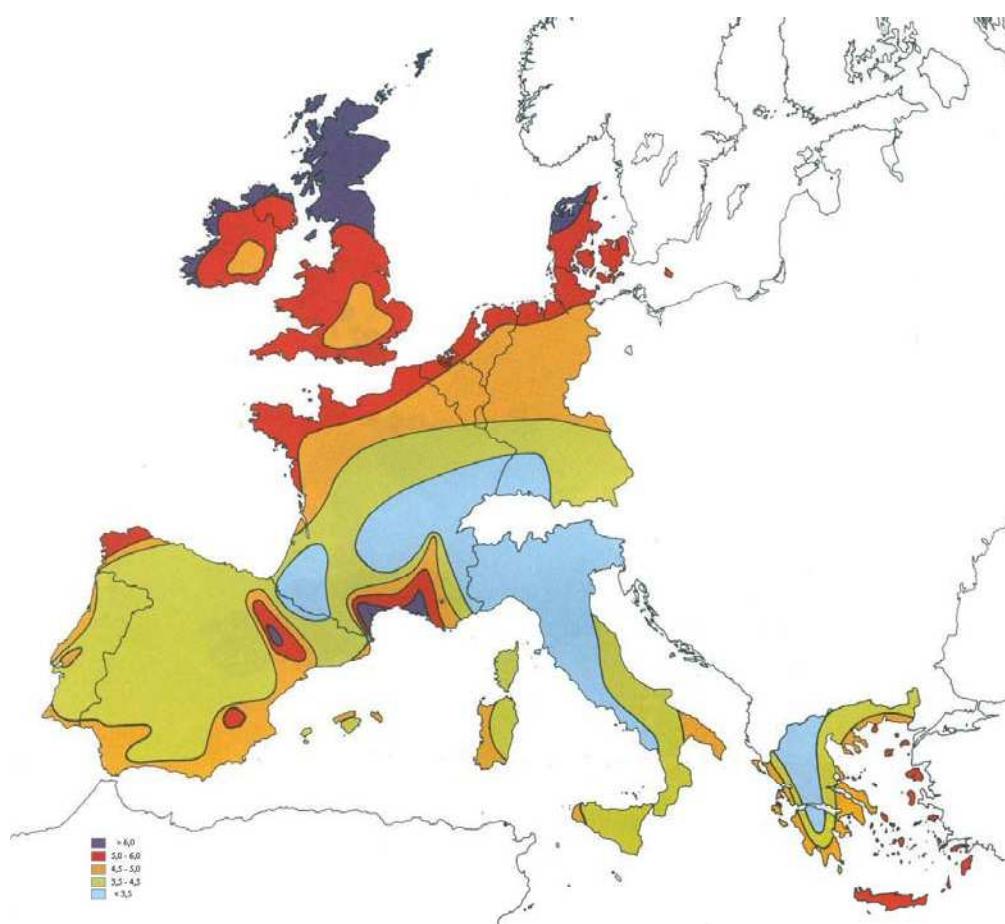


Figura 2.1 - Mapa de recurso eólico europeu. European Wind Atlas, Risø 1989

Por outro lado, recorrendo a dados de vento de fontes diversas será sempre possível realizar uma primeira simulação da distribuição do recurso na área. Em Portugal, o Instituto de Meteorologia dispõe de uma rede estações meteorológicas que cobre praticamente todo o país e que, entre outras grandezas,

registam a velocidade e direcção do vento. Em muito destes observatórios dispõe-se mesmo de informação relativa a períodos dilatados. Outras fontes possíveis são instituições de monitorização e controlo ambiental ou universidades. Comum a todas estas fontes é o facto de geralmente as estações de medida se localizarem em zonas urbanizadas e/ou planas, podendo as suas medições não ser totalmente representativas regime de ventos local. No entanto, como primeira aproximação proporcionarão informações interessantes.

Detectadas as áreas potencialmente interessantes transita-se para fase de identificação das zonas de menor dimensão, na ordem de 5 km², e de maior potencial. Nesta etapa, são já fundamentalmente as características locais do terreno que ditam quais as zonas onde se deverão verificar os maiores níveis de potencial eólico.

Tipicamente, em Portugal, locais situados em elevações com altitudes superiores a 600 m, com vertentes caracterizadas por pendentes acentuadas, são geralmente uma boa indicação. Esta forma do terreno é potenciadora da ocorrência de fenómenos de aceleração, criando condições para o surgimento de locais de elevado recurso.

Por outro lado, locais na orla marítima exibem normalmente um bom potencial. Nestes casos, a presença do mar, uma superfície de rugosidade quase nula, traduz-se em escoamentos pouco alterados, que conservam ainda uma grande quantidade de energia. Esta é, aliás, uma das razões que torna os aproveitamentos *off-shore* tão atractivos [2.2].

Ainda neste estágio a informação recolhida através da deslocação ao terreno, observando as suas características *in loco* e procurando por sinais de vento, seja a existência de moinhos, de vegetação inclinada ou dunas, ou contactando com as populações locais, será de grande utilidade.

Depois de reduzida significativamente a área de interesse é chegada a altura da identificação detalhada dos locais onde o recurso eólico atinge o seu máximo e da sua caracterização ao nível do regime de ventos, para que, posteriormente, se possam tomar decisões relativas ao decurso do projecto. É levada a cabo através da instalação de estações anemométricas para a medição das características do vento, durante um período que, no mínimo, deverá ser de um ano.

A última fase do levantamento do potencial eólico é também conhecida por *micro-siting*. É uma fase terminal do processo e que consiste na determinação dos melhores locais para a instalação dos aerogeradores que comporão o parque.

Com base na informação das características de vento recolhidas nas estações de medição é possível caracterizar o regime de ventos do local de um ponto de vista energético. A informação recolhida é de fundamental importância para um grande número de aspectos relacionados com o projecto. Da sua qualidade depende a incerteza associada à caracterização do regime de ventos local e à estimativa da distribuição do recurso na área de interesse. Posteriormente, com base nos resultados das medições das características do vento, serão tomadas decisões que se prendem com os parâmetros técnicos dos

aerogeradores e com a sua distribuição na área, pelo que em último caso é a própria viabilidade do projecto que está em jogo.

Para a concretização dos objectivos particulares de estimativa do recurso eólico na vizinhança de um ponto de medição e da determinação da produção de um parque eólico existe actualmente uma gama crescente de aplicações informáticas. Por ter sido a primeira a ser comercializada e pela sua quase universalidade, a mais conhecida é talvez a ferramenta WAsP [2.3], desenvolvida pelo Risø National Laboratory. Este *software* implementa, na generalidade, a metodologia preconizada no Atlas Europeu de Vento. Outras aplicações desenvolvidas recentemente em Alemanha, Noruega, e em Inglaterra são já alternativas credíveis à dinamarquesa.

Todas as referidas aplicações informáticas padecem, no entanto, de um mesmo mal. Só conseguem bons desempenhos se a previsão for efectuada para a vizinhança próxima do ponto de medição, sendo que para locais orograficamente complexos esta característica é enfatizada. Sabendo de antemão que a maioria dos projectos eólicos em Portugal estão planeados para locais deste género, fica clara a necessidade de instalação de um número assinalável de estações para colecta de dados em vários pontos, caso se desejem estimativas de boa qualidade.

2.1 Campanhas de medição das características do vento - equipamentos

As campanhas de medição das características do vento visando o seu aproveitamento energético passam obrigatoriamente pela instalação de uma torre para a colocação dos equipamentos de medição das características do escoamento.

A recolha de informação, realizada através dos aparelhos instalados na própria torre, deverá decorrer, pelo menos, durante um ano, para que o conjunto de dados recolhido incorpore correctamente a sazonalidade típica dos regimes de ventos observados em locais de latitude significativamente diferente da do equador. No capítulo 4 será feita uma abordagem mais pormenorizada deste assunto.

Torre de medição

O local previsto para instalação da torre deverá respeitar duas importantes premissas: (1) deverá situar-se longe de qualquer obstáculo que interfira no escoamento; (2) deverá localizar-se num ponto representativo da área em análise. Desta forma garante-se a representatividade das medições. Refere-se porém, que devido às características dos terrenos em estudo, quer da sua natureza orográfica, quer da sua extensão, o respeito pela segunda premissa nem sempre é facilmente atingido.

É norma geral que a altura da torre de medição se situe o mais próximo possível da altura previsível do eixo do rotor dos aerogeradores a instalar no local, minorando assim a incerteza associada a

posteriores cálculos. Actualmente, a altura das torres de medição situa-se entre 40 e 80 m. Na figura 2.2 faz-se a representação esquemática de uma torre típica de medição.

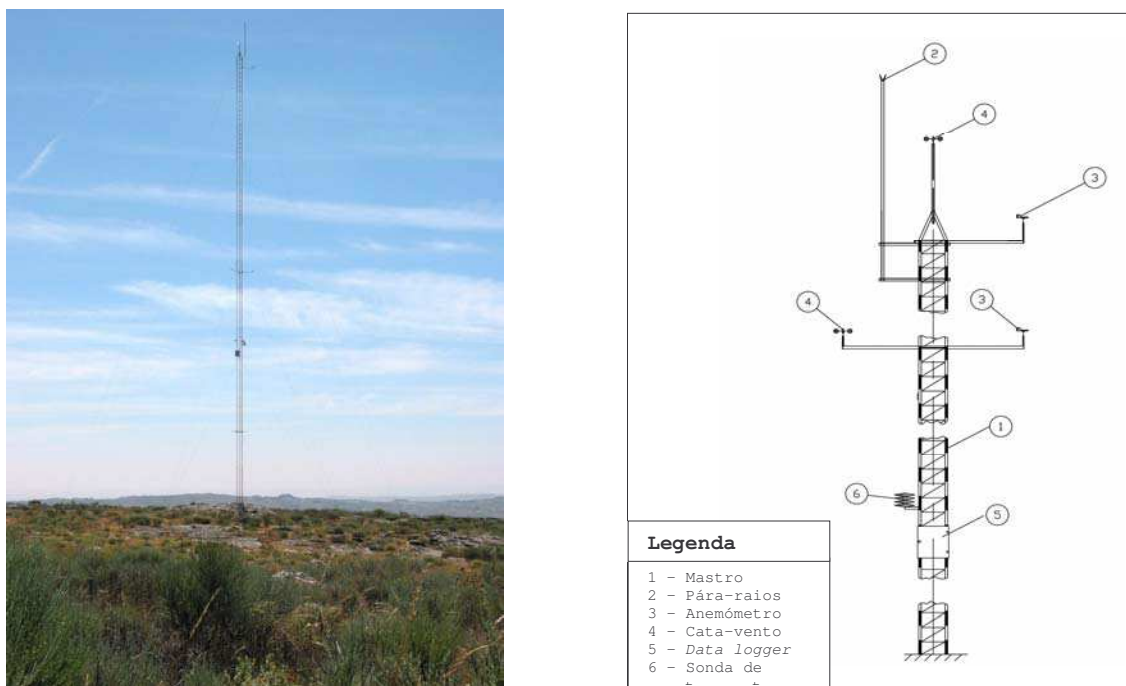


Figura 2.2 - Estação de medição das características do vento

Equipamentos de medição das características do vento

As características de vento alvo de medições numa campanha deste género são fundamentalmente a velocidade e a direcção. Os instrumentos utilizados, para a medição de qualquer uma delas, deverão respeitar um conjunto de parâmetros que assegurem o seu bom funcionamento durante toda a campanha de medição. Deverão ser fiáveis e precisos. Deverão ser seleccionados tendo em conta as condições ambientais em que irão trabalhar, seja de temperatura, de humidade e ventos extremos, seja a presença de sal ou de pó. Por fim, deverão ser de fácil substituição.

Para a medição da velocidade do vento recorre-se na maioria das situações a anemómetros de copos [2.4]. Este instrumento consiste em três superfícies côncavas ligadas por meio de hastes a um eixo perpendicular central. A forma dos copos converte a pressão dinâmica do vento em movimento de rotação. Um transdutor associado a eixo central transforma o movimento de rotação num sinal eléctrico para posteriormente ser processado e armazenado. A figura 2.3 mostra o aspecto de um anemómetro de copos.

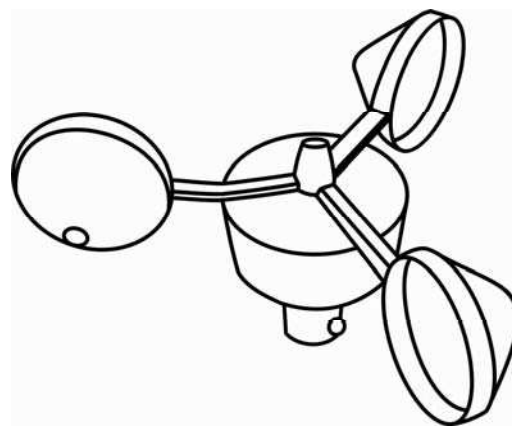


Figura 2.3 - Anemómetro de copos

Embora de utilização universal, os anemómetros de copos exibem alguns pontos fracos para os quais é necessário estar alerta.

Verifica-se que, em situações em que a componente vertical do escoamento é importante, o valor da velocidade medida se afasta do valor real da velocidade do fluxo de ar. Idealmente, o comportamento do anemómetro deveria ser insensível a esta variação, pois o seu propósito é a medição da velocidade do fluxo de ar incidente nas pás de um aerogerador [2.5].

Por outro lado, a massa associada ao sistema de copos e hastes e as fricções internas causam um amortecimento das variações do vento, podendo levar a imprecisões quando se tenta analisar a variação da velocidade do vento em períodos de curta duração. Este comportamento é descrito sob a forma da constante de distância do anemómetro, um parâmetro análogo ao tempo de resposta de um aparelho, mas medido em termos de distância percorrida pelo fluxo de ar até que o anemómetro atinja 63 % da variação da velocidade. A definição deste parâmetro tem por base a aplicação da Lei de Conservação da Quantidade de Movimento ao sistema anemómetro/fluxo de vento e ignorando efeitos de interferência aerodinâmica e de fricção interna [2.6]. Para anemómetros de copos com a forma do exibido na figura 2.2 a constante de distância situa-se tipicamente entre 2,5 e 3,5 m, podendo atingir os 2 m para os anemómetros de melhor desempenho.

Sabe-se também que um anemómetro de copos tem uma resposta mais rápida quando a velocidade aumenta do que quando esta diminui [2.7]. Este fenómeno, conhecido por *overspeeding*, origina uma sobre-estimativa do valor da velocidade medida pelo anemómetro. A sua contabilização é também conseguida pela constante de distância, sendo que esta deverá ser a mais baixa possível de forma a minorar o referido desvio.

Sempre que se suspeite de ventos com elevadas componentes verticais, elevadas turbulências ou se deseje medir a variação do vento em intervalos de tempo reduzidos deverá ser encarada a utilização de outro tipo de instrumentos de medição. Para estas situações, e pela ausência de órgãos mecânicos, uma boa alternativa são os anemómetros ultra sónicos, os SODARES ou os LIDARES [2.8] e [2.9].

A medição da direcção do vento é feita tipicamente por recurso a um cata-vento. A forma mais familiar deste equipamento é caracterizada por uma pequena “barbatana” ligada um eixo vertical. Assim, o cata-vento está constantemente em busca de equilíbrio, procurando o seu alinhamento com a direcção do escoamento. A conversão da posição do cata-vento para um sinal eléctrico é conseguida por um potenciómetro. Na figura 2.4 mostra-se o aspecto típico de um cata-vento.

À semelhança dos anemómetros, também os cata-ventos demonstram um certo grau de resistência na mudança de posição, característica designada por limiar de resposta ou *threshold*. O comportamento descrito está relacionado com o momento de inércia do cata-vento e com a resistência causada internamente pelo movimento de rotação dos rolamentos, e verificando-se com grande ênfase em situações de velocidade do vento é inferior a 1 m/s.

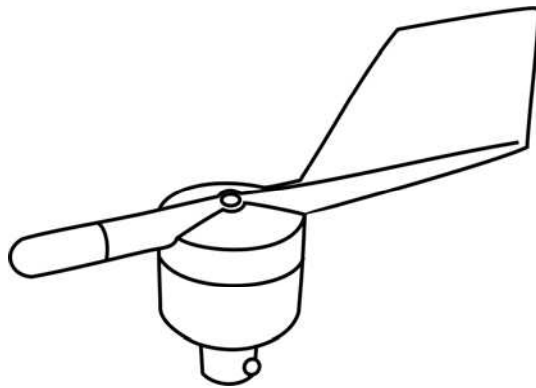


Figura 2.4 - Cata-vento

Nas alturas de quase ausência de vento, o cata-vento assume um comportamento errático, rodando sem tendência aparentemente definida. No entanto, acima deste limiar de velocidade, esta conduta não é novamente observada. Os anemómetros sónicos, SADARES ou LIDARES, poderão surgir de novo como alternativas viáveis, pois possuem também a capacidade de aferição da direcção do vento

De forma a evitar possíveis falhas de medição, com origem na avaria dos sensores, é boa prática a instalação de um par de sensores a uma altura inferior para servirem de apoio aos instalados à altura superior. Se as avarias nos sensores instalados a dois níveis forem desfasadas, será sempre possível reconstruir a série temporal em que a falha ocorre.

Na fase de colocação dos instrumentos na torre é necessário acautelar a sua influência no escoamento, instalando os sensores a uma distância que minore este efeito. Igualmente, a haste horizontal de suporte dos instrumentos de medição é fonte causadora de distorção do escoamento, pelo que todos os instrumentos devem guardar-lhe uma distância mínima.

Distanciamentos mínimos entre os vários instrumentos de medição deverão ser também observados para que não causem interferências entre si. De forma a minorar o efeito da característica sensibilidade dos anemómetros de copos às componentes verticais do vento é importante que a sua instalação seja conseguida em hastes perfeitamente horizontais.

Os vários aspectos relacionados com a instalação de instrumentos de medição na torre exigem uma abordagem metódica e planeada da tarefa, de modo a evitar erros graves que se possam vir a repercutir no futuro. De uma forma expedita, evitando o cálculo do distanciamento mínimo entre instrumentos e estruturas, geralmente de complexidade elevada, associada à dificuldade em modelar o comportamento do vento passando através destes elementos e assegurando a qualidade das medições, a colação dos instrumentos na torre deverá seguir as recomendações MEASNET [2.10].

Não directamente relacionada com a medição das características do vento está a avaliação da temperatura ambiente da pressão atmosférica locais. O seu conhecimento é útil numa fase posterior do projecto, pelo que não raras vezes estas duas grandezas são alvo de medição.

Para tal, no caso da temperatura recorre-se uma sonda temperatura constituída por um termopar, geralmente de Níquel ou Platina, e protegida por escudo de radiação do tipo Gill, passivo e de multi-camadas. Já no caso da pressão ambiente utiliza-se um transdutor piezoeléctrico. Na figura 2.5 mostra-se o aspecto típico de um sensor de temperatura e o respectivo escudo.

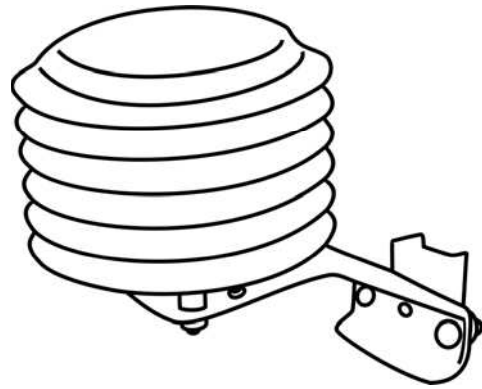


Figura 2.5 - Sonda de temperatura

Para a medição da temperatura ambiente e pressão atmosférica existem outro tipo de sensores, de melhor comportamento, mas também de preço mais elevado, e que por isso são menos utilizados.

Equipamentos de registos de dados

Todos os valores das grandezas medidas nos sensores instalados na torre são encaminhados para uma unidade de memória responsável pelo seu pré-processamento e armazenamento. Estes aparelhos, que tomam a designação anglo-saxónica de *data loggers*, deverão estar habilitados a funcionar nas mesmas condições dos sensores de medição. Deverão ter uma capacidade de armazenamento na ordem dos 40 dias e deverão possibilitar o acesso à informação no local da estação.

Tipicamente, em campanhas destinadas ao levantamento do recurso eólico, a taxa de recolha de informação nos instrumentos de medição situa-se em 0,5 Hz. No entanto, por razões relacionadas com limitações de capacidade das unidades de memória, apenas a média de 10 minutos e respectivo desvio padrão da grandeza medida são armazenados. No capítulo 4 consta uma breve explicação para utilização de períodos com duração igual a 10 minutos.

Tomando o modo de recolha dos dados dos sistemas de armazenamento existem dois grandes grupos de *data loggers*: os de recolha remota e os de recolha manual. Os primeiros têm associado um *modem* que, via GSM, envia a informação contida no *data logger* directamente para o computador situado no local de análise da informação. No segundo tipo, a informação é armazenada em unidades de memória removíveis que periodicamente devem ser substituídas. Os equipamentos de transmissão remota oferecem duas vantagens decisivas face aos de transmissão manual: (1) não necessitam de visitas periódicas para a recolha de dados, evitando os elevados custos em deslocações; (2) permitem um acompanhamento mais eficaz da campanha de medições e a detecção mais célere de avarias. No entanto, as visitas periódicas à estação têm como vantagem a detecção de eventuais problemas não perceptíveis através da análise directa dos dados.

2.2 Campanhas de medição das características do vento - procedimentos

Durante o período de duração da campanha de medição das características locais do vento deverão ser respeitados determinados procedimentos, como forma de evitar situações que possam levar à perda de informação ou pôr em causa a segurança de pessoas e equipamentos.

De forma a detectar possíveis avarias nos equipamentos de medição, com uma periodicidade, pelo menos mensal, deverá ser realizada uma inspecção à informação recolhida. Assim, procura-se detectar potenciais avarias dos aparelhos de medida ou de registo de dados num curto período de tempo, possibilitando a sua reparação com a maior brevidade possível, minorando as perdas de dados que delas podem advir.

O manuseamento da informação recolhida na estação deverá ser realizado a dois níveis de segurança. Num patamar mais elevado de segurança, os dados recolhidos directamente das unidades de memória das estações deverão ser copiados imediatamente para um local seguro para servir de *backup*. Num segundo nível de segurança, durante o processo de tratamento e processamento da informação, os ficheiros com a informação em bruto não deverão ser passíveis de alteração. Todas as alterações deverão ser realizadas em ficheiros de trabalho, criados com base nos brutos. Evita-se assim que alterações em ficheiros em bruto possam posteriormente induzir em erro o analista de dados.

É boa prática que em *stock* existam equipamentos de substituição para que o tempo de paragem da estação devido a uma eventual avaria seja o mais reduzido possível.

Todos os trabalhos de manutenção realizados na torre deverão seguir as boas práticas de segurança no trabalho, recorrendo para tal a equipamentos adequados. Especial ênfase deverá ser prestado nas garantias de segurança nas fases de subida à torre e de trabalhos em altura. A ocorrência de qualquer contratempo durante estes dois momentos poderá ter consequências fatais, pelo que, para evitar qualquer queda deverá ser impreterivelmente usado equipamento de segurança semelhante ao utilizado em escalada.

Por fim, de forma a assegurar a traçabilidade de eventuais avarias dos equipamentos de medição deverá ser efectuado um registo de todas as operações executadas na estação. Neste deverão ser apontadas quaisquer observações que se considerem relevantes para o processo de medição.

3 Séries de vento – Validação da informação

Neste capítulo retoma-se, de forma mais aprofundada, o assunto abordado no capítulo 2, na secção “Campanhas de medição das características do vento – procedimentos”, na parte da detecção de valores anómalos das séries de vento recolhidas nas estações de medição e consequente validação da informação.

A validação periódica da informação recolhida nas estações é de grande importância para a detecção atempada de avarias nos sistemas de medição e armazenamento de dados, de modo a garantir uma disponibilidade¹ de dados da campanha de medições elevada.

Em virtude do grande volume de informação disponibilizado pelas medições de campo, a uniformização de todos os processos envolvidos na fase de análise de validação da informação deverá ser uma característica mandatória. Só deste modo é possível detectar, de uma forma célere, qualquer erro que tenha decorrido no passado.

O processo de validação periódica dos dados das características de vento recolhidos numa estação meteorológica segue geralmente os passos indicados na figura 3.1.

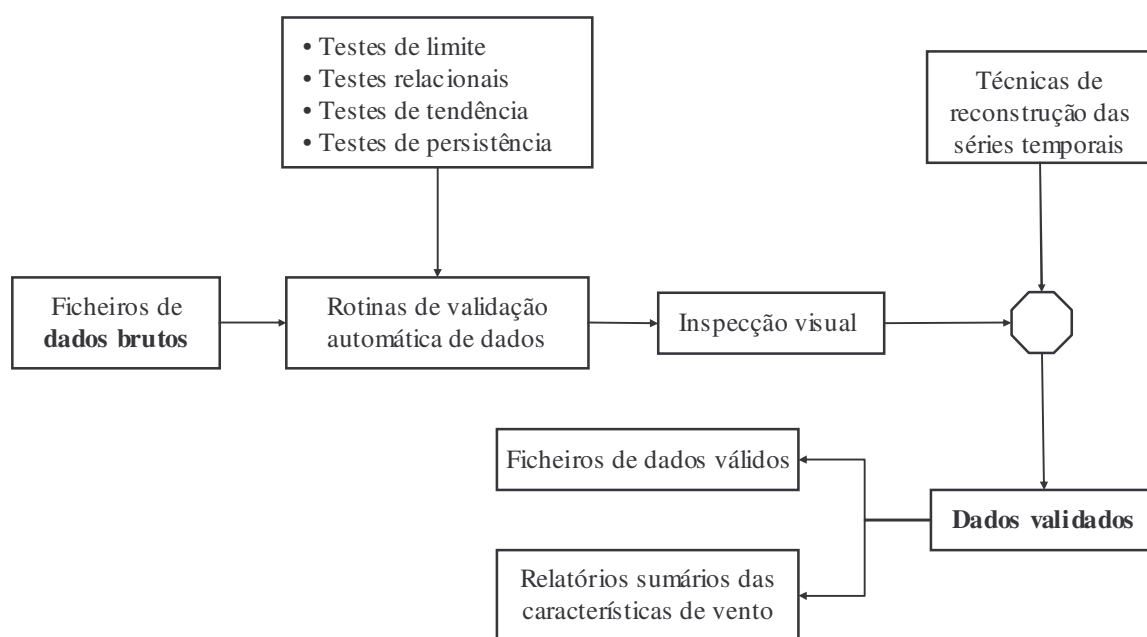


Figura 3.1 - Metodologia para o processamento e validação periódica de dados de vento

A sujeição dos dados brutos a processos de validação automática tem por objectivos a eliminação de erros humanos, frequentes em processos repetitivos e de grande volume de informação e a diminuição do tempo empregue durante a tarefa de validação da informação de vento recolhida.

¹ Razão entre a quantidade de informação válida recolhida durante a campanha de medição e quantidade de informação que seria possível recolher em condições ideais.

Antes da sujeição da informação bruta a elaborados testes de validação deverá ser realizada a simples comparação entre o número de registos disponíveis e o número esperado para o período de medição sob inspecção. Esta elementar tarefa permite rapidamente saber se à partida o processo de recolha de dados decorreu dentro da normalidade.

A detecção de lacunas temporais nas séries de vento deverá ser corrigida pela inserção de códigos de erro. Conseguem-se assim séries contínuas, característica de grande utilidade em fases posteriores, nomeadamente aquando do estabelecimento de correlações com os dados de outros pontos de medição para a obtenção da descrição do regime de ventos de longo termo.

Posteriormente, na fase da detecção automática de falhas [3.1] deverão ser empregues testes com capacidade de identificar os mais frequentes comportamentos anómalos, auxiliando o analista em tarefas morosas e repetitivas. Entre os testes possíveis para a detecção de falhas destacam-se os de limite, os relacionais, de tendência e de persistência.

A implementação destes testes obriga à definição de vários parâmetros, como sejam o tempo máximo consecutivo de paragem dos sensores de velocidade e direcção ou máxima variação de uma grandeza medida entre dois intervalos de tempo consecutivos. Os valores que neste trabalho posteriormente se avançam para estes parâmetros decorrem da experiência e sensibilidade adquirida ao longo de 15 anos no seio do grupo de trabalho de energia eólica do INEGI. Estão associados às condições climáticas observadas em Portugal, sendo que a utilização de informação recolhida noutras regiões, nomeadamente de latitudes e características orográficas distintas da realidade portuguesa, poderão levar ao ajuste dos valores aqui adoptados para estes parâmetros.

A aplicação dos testes automáticos de detecção de anomalias deverá ser obrigatoriamente acompanhada pela inspecção visual das séries temporais. Deste modo é possível verificar as indicações provenientes dos testes automáticos e decidir pela anulação dos registos indicados ou se possível, pela sua rectificação. Para este ponto particular deverá recorrer-se à representação da série temporal através de um gráfico relacionando a grandeza registada e o instante de medição.

Possíveis falhas identificadas anteriormente nas séries temporais poderão ser minoradas através de metodologias de reconstrução. Estas baseiam-se sobretudo na correlação entre os valores medidos às duas alturas de medição. Uma análise pormenorizada deste assunto é feita no capítulo 5.

No final do processo de validação periódica da informação o conjunto de dados analisado deve ser armazenado. Acompanhando a informação validada deverá seguir um pequeno relatório com as suas principais características, notas sobre possíveis anomalias detectadas ou observações dignas de registo.

De seguida faz-se uma descrição de quatro dos mais importantes tipos de testes automáticos para a detecção de registos anómalos.

3.1 Testes de limite

Os testes de limite têm por objectivo a identificação de registos cujos valores se situam claramente fora da gama de valores esperados para as grandezas medidas.

A detecção de velocidades acima de 70 m/s não é esperada, podendo indicar a existência de uma possível avaria do sensor de medição da velocidade. Já no outro extremo da gama de velocidades, a identificação de velocidades inferiores a 0 m/s está associada, com grande probabilidade, ou a uma avaria do sistema de registo de dados, ou a uma programação errada do sistema de conversão do sinal em frequência registado nos anemómetros para o valor em velocidade registado no *data logger*.

Os testes de limite são de igual utilidade no que respeita aos registos de direcção de vento. A detecção de valores fora do intervalo definido por 0° e 359° indicia um mau funcionamento de parte do sistema de medição e armazenamento de dados, merecendo a situação uma inspecção mais atenta.

A implantação de um filtro automático deste género é de baixa complexidade, porém de elevada utilidade para o analisador de dados.

3.2 Testes relacionais

Os testes relacionais assentam na comparação dos valores instantâneos da mesma grandeza registados a alturas distintas do solo. Conhecendo de antemão o comportamento relativo das grandezas medidas, se uma delas registar um comportamento anómalo este será previsivelmente detectado através da comparação com os registos resultantes da medição a uma outra altura.

Para o caso da velocidade, a diferença entre os registos efectuados simultaneamente às alturas superior e inferior de medição deverá conduzir, em situações normais, a um valor positivo. A identificação dos instantes em que tal não sucede pode levar à detecção da avaria de um dos sensores de medição, ou à identificação de um local com características especiais do escoamento.

Um dos aspectos pertinentes deste tipo de teste está em que a detecção de um valor pontual fora do esperado não é indiciador de um problema. No entanto, a detecção de um conjunto de valores anormais que se estenda por um período tipicamente superior a duas horas é um forte sinal que alguma situação anómala terá ocorrido.

Para o caso dos registos de direcção observados a dois níveis do solo não se espera que a diferença seja sempre no mesmo sentido. Antes se antecipa que se deverá situar muito perto dos 0°. A detecção consistente de diferenças significativamente afastadas deste valor poderá indicar um desalinhamento de um dos sensores de direcção ou a forte rotação do escoamento, que não é esperada para alturas do solo habitualmente em causa.

Neste tipo de teste associado às medições de direcção é provável que, para velocidades de vento reduzidas, os resultados possam parecer à primeira vista inesperados. Porém, devido ao menor desempenho dos tradicionais cata-ventos para esta gama de velocidades tal deve ser antecipado.

3.3 Testes de tendência

Os testes de tendência têm por finalidade a detecção de variações bruscas nas grandezas medidas. São de particular utilidade quando associados às medições da velocidade. A detecção de variações entre a velocidade registada em dois instantes consecutivos superior a 7,5 m/s não é esperada, pelo que o seu surgimento poderá ser indicativa de algum problema.

Este tipo de filtro é particularmente útil na detecção de valores pontualmente elevados que são resultado de erros com origem no sistema de armazenamento de dados. A detecção deste problema não é possível se o valor anómalo da velocidade do vento se situar abaixo do limite indicado no teste de limite. Só a sua comparação com o valor registado anteriormente possibilitará a sua detecção de uma forma automática.

O teste de tendência não se aplica aos registos de direcção devido às elevadas amplitudes que geralmente se verificam entre os valores de direcção registados em dois instantes sucessivos.

3.4 Testes de persistência

Os testes de persistência têm raízes comuns com os testes de tendência. Ambos se valem da comparação entre registos consecutivos, porém nos testes de persistência a motivação é a detecção de um número de registos consecutivos de igual valor.

Em zonas onde o clima é mais rigoroso é comum que em certas alturas do ano ocorra o congelamento temporário dos sensores de medição. Os registos relativos a esses períodos não deverão ser tidos conta, pelo que a sua substituição por mensagens de erro é uma necessidade.

O congelamento dos sensores é identificado numa série temporal por uma linha contínua em zero, para o caso da velocidade, correspondendo à paragem do anemómetro, e por linha contínua de valor arbitrário para a direcção, associada à fixação do cata-vento. Os testes de persistência associados à velocidade do vento fazem a detecção de intervalos onde a velocidade se mantém abaixo de 0,1 m/s durante de mais de 2 horas. Para a direcção o possível congelamento do cata-vento é indicado por um conjunto de registos em que a sua variação relativa é inferior a 1°, isto para períodos de duração também superiores a 2 horas.

Por outro lado, se o teste de persistência indicar um período de paragem superior a três dias, a raiz do problema não deverá estar no congelamento do sensor, mas numa avaria do sistema de medição ou aquisição.

4 Caracterização do regime de ventos

As séries temporais de dados de vento contêm um volume de informação muito elevado. Tipicamente, uma série de medições referente a um período anual atingirá cerca 52 000 registos para cada uma das grandezas velocidade e direcção do vento. Só com técnicas adequadas de processamento é possível proceder à análise deste grande volume de informação e à correcta caracterização do regime de ventos do local a que se refere.

Neste capítulo passam-se em revista alguns dos principais parâmetros utilizados na caracterização de regime de ventos, tendo por base a informação recolhida sob a forma de séries temporais e submetida a procedimentos fiáveis de validação.

Embora não directamente relacionada com a caracterização do regime de ventos, mas de grande utilidade quando esta é realizada do ponto de vista do seu aproveitamento energético, surge a estimativa de produção de um aerogerador instalado no local de recolha da informação de vento. No final deste capítulo é feita a exposição de uma metodologia que possibilita a sua determinação.

4.1 Parâmetros estatísticos mais comuns

Apesar da sua elevada simplicidade e facilidade de cálculo, a velocidade média de uma série temporal de vento, $\bar{V}$, é um parâmetro de elevado significado na caracterização do regime de ventos de um dado local.

Embora a velocidade média seja o parâmetro mais comumente utilizado para a caracterização do potencial eólico e ao qual, por isso, se dispõe de maior sensibilidade, é com o parâmetro conhecido por fluxo de potência médio, F_{pot} , que se consegue um maior rigor na caracterização do regime de ventos ao nível do seu conteúdo energético.

O conceito de fluxo de potência tem origem da aplicação na Lei de Conservação de Energia [4.1] ao sistema composto por um mecanismo girando por acção do vento. Admitindo que toda a energia contida no vento será transformada pelo mecanismo em trabalho (situação ideal) a descrição desta situação à luz da Lei de Conservação de Energia será dada por:

$$E_v = E_m \quad (4.1)$$

em que E_v representa a energia contida no vento e E_m a energia transformada pelo mecanismo. Passando a considerar fluxos energéticos por unidade de tempo e sabendo que todo o fluxo de energia do vento incidente no mecanismo está sob a forma cinética a expressão anterior passa a:

$$\dot{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot u^2 = \dot{E}_m \quad (4.2)$$

Em (4.2) $\dot{m}$ representa o caudal mássico de ar e u a velocidade do fluxo de ar. Por fim, tomando $\dot{m}$ igual ao produto entre a velocidade do vento, a massa volúmica do ar, ρ , e a área de incidência, A_{inc} , é possível obter para o fluxo de potência instantâneo a seguinte expressão:

$$\dot{F}_{pot} = \frac{\dot{E}_m}{A_{inc}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^3 \quad (4.3)$$

A determinação do fluxo de potência médio associado a uma série temporal de velocidade do vento passa pela determinação do valor médio de $\dot{F}_{pot}$ através de:

$$F_{pot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n u_i^3 \quad (4.4)$$

Desta forma contabiliza-se, em termos médios, a potência disponibilizada pelo escoamento, observada nas condições do ponto de medição, por unidade de área. Na realidade, a massa volúmica do ar é variável no tempo e, por isso, na expressão (4.4) dever-se-ia encontrar à direita do somatório. Porém, na maioria das situações não se dispõe de informação instantânea sobre a temperatura ambiente ou pressão atmosférica para o local de medição e como aproximação toma-se para a massa volúmica um valor médio.

A determinação do valor da massa volúmica, na situação em que se disponha de informação da pressão e temperatura ambiente, poderá ser efectuada assumindo que o fluxo de ar é composto apenas por ar seco e com o comportamento de um gás perfeito [4.2] através da expressão:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (4.5)$$

onde $R = 287,05 \text{ J/kgK}$ e T e P são, respectivamente, a temperatura e pressão do ar. Se, por outro lado, se dispuser apenas de informação relativa à temperatura do ar e à altitude do local, a aproximação ao conceito de atmosfera isotérmica [4.3] permite a determinação da massa volúmica do ar através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{P_0}{R \cdot T} \cdot e^{\left(\frac{g \cdot z}{R \cdot T} \right)} \quad (4.6)$$

em que P_0 é a pressão atmosférica normal e $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ e z a altitude do local em análise.

Histograma de velocidades

A grande quantidade de informação contida nas séries temporais de velocidade do vento é geralmente condensada sob a forma de um histograma por classes de velocidade, *HIST*. Esta é uma das formas mais práticas e utilizadas para descrever o regime de ventos tendo por base séries temporais de velocidade, e particularmente adaptada à utilização conjunta com as metodologias de estimativa da produção média de um aerogerador.

A construção do histograma passa pela determinação do número de ocorrências de velocidade que caem dentro de várias classes. É prática comum que a dimensão destas classes seja igual a 1 m/s. A sua diminuição não resulta num ganho sensível de exactidão e seu aumento torna a análise demasiado grosseira.

A forma mais versátil de apresentação de histogramas de velocidade é através da sua normalização, conseguida pela divisão do número de ocorrências em cada classe pelo número total de ocorrências. Na figura 4.1 mostra-se o aspecto de um histograma por classes de velocidade de vento tipicamente observado no continente europeu.

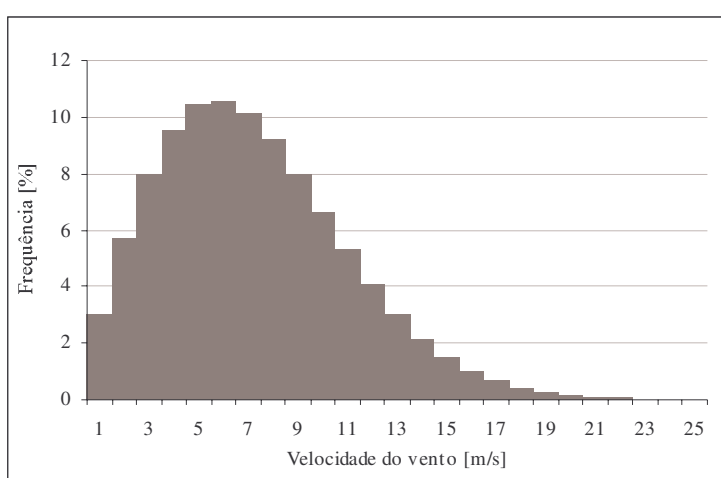


Figura 4.1 - Forma típica de um histograma de velocidade do vento

Rosa-dos-ventos

De forma análoga ao histograma de velocidades é geralmente criada a rosa-dos-ventos através da contabilização do número de ocorrências que se situam dentro dos intervalos predefinidos de direcção e posterior normalização através da divisão pelo número total de ocorrências. Se representada sob a forma de um gráfico polar, a rosa-dos-ventos permite uma percepção quase imediata dos rumos predominantes do vento.

Adicionalmente à rosa-dos-ventos é comum analisar a distribuição do recurso eólico para cada orientação. Tal é obtido através da construção de rosas de velocidades, determinando a velocidade média do vento para cada um dos rumos, e através da rosa de energia, determinando a contribuição energética de cada sector da rosa-dos-ventos para o total medido

Na figura 4.2 mostra-se a forma de uma rosa-dos-ventos registada num local de Portugal continental.

Tipicamente, as rosas de velocidade assumem um carácter mais disperso o que o das rosas-dos-ventos. Tal deve-se ao facto da velocidade média sectorial não variar de forma tão vincada como a direcção do vento.

Por outro lado, as rosas de energia surgem normalmente mais concentradas em determinados sectores, pois estas conjugam sob uma perspectiva energética a informação contida nas rosas-dos-ventos e nas rosas de velocidade.

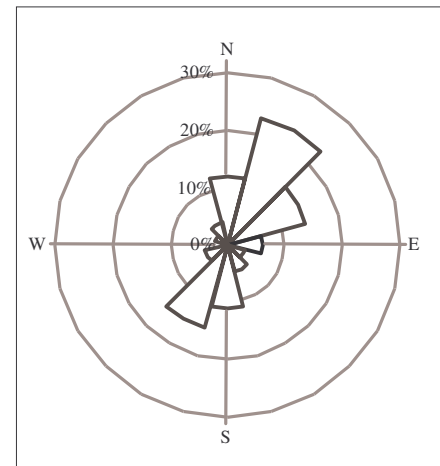


Figura 4.2 - Rosa-dos-ventos

Contudo, o carácter mais concentrada das rosas de energia é um aspecto fortemente dependente do clima de ventos de cada local, sendo natural a existência de casos em que esta consideração não se aplique.

A rosa de energia é de particular importância numa fase posterior do projecto eólico. Se as condições observadas no local de medição se revelarem adequadas para a implementação de um parque eólico será em função da rosa de energia local que, entre outros parâmetros, será determinada a disposição dos aerogeradores no terreno.

Tabelas classificadas de ocorrências

A associação dos conceitos de histograma de velocidade e rosa-dos-ventos dá origem à tabela classificada de ocorrências. Este tipo de tabelas é constituído por um histograma para cada um dos sectores da rosa-dos-ventos e pela rosa-dos-ventos observada.

Na construção da tabela classificada de ocorrências, inicialmente deve ser determinada a rosa-dos-ventos. Posteriormente, para cada um dos sectores da rosa-dos-ventos é construído o respectivo histograma de velocidades. Para que a tabela fique completa deverá estar indicado o número de ocorrências que esteve na base da sua determinação. A figura 4.3 mostra resumidamente a disposição da informação numa tabela classificada de ocorrências.

A forma com se encontra organizada a informação numa tabela classificada de ocorrências permite que se resuma de um modo compacto e sintético algumas das principais características do regime de ventos sob uma perspectiva energética.

	12.24	12.42	6.30	2.76	...
100982	42.88	31.97	50.00	97.49	...
1	81.80	58.84	82.39	127.60	...
2	136.65	90.81	133.96	192.11	...
3	128.40	106.99	140.88	145.16	...
4	123.62	124.85	152.67	160.57	...
5	111.25	121.66	133.81	96.77	...
6	79.05	87.38	109.59	56.99	...
7	57.44	75.34	73.74	35.84	...
8	52.51	75.34	44.50	26.16	...
9	42.31	64.66	27.36	21.15	...
10	34.39	48.31	16.51	22.58	...
11	29.37	36.83	14.15	9.68	...
12	24.27	27.51	8.02	5.02	...
13	17.96	2.15	4.40	2.15	...
14	12.78	0.00	2.83	0.72	...
15	8.66	0.00	1.42	0.00	...
...	...	...	...	...	...

Figura 4.3 - Exemplo de uma tabela classificada de ocorrências

Distribuição de Weibull

O resumo da informação contida no histograma de velocidades, e consequentemente do regime de ventos, pode ser realizado através da sua aproximação a uma função de Weibull. A função de Weibull é a que melhor ajuste consegue à maioria dos histogramas de velocidade do vento observados. Esta função é teoricamente definida por três parâmetros: o factor de escala, A , o factor de forma, k , e o factor de localização. Porém, para a maior parte dos regimes de vento, a tomada apenas dos dois primeiros parâmetros é suficiente para a sua descrição. A função de densidade de Weibull, $w(u)$, segue a expressão descrita em (4.7).

$$w(u) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k} \quad (4.7)$$

O parâmetro A faz o posicionamento da função, enquanto que k é responsável pela definição da sua forma.

A forma da função de Weibull está geralmente associada a regimes de vento tipicamente observados em determinadas zonas. Uma porção significativa dos regimes de vento conhecidos, tanto no continente Europeu, como na América do Norte, são caracterizados por k situados entre 1,8 e 2,5. Como uma aproximação generalista, em muitos casos é tomado o valor de k igual a 2 para descrever o

regime de ventos, ficando apenas livre o parâmetro A . A função de Weibull assim considerada toma a especial designação de distribuição densidade de Rayleigh, $r(u)$, e é dada pela expressão seguinte:

$$r(u) = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{u}{A} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u}{A} \right)^{\frac{2}{k}} \right)} \quad (4.8)$$

Para locais situados sob a influência dos ventos Alísios ou dos ventos das Monções, o factor k crescerá tendencialmente para valores entre 3 e 5. Se o regime de ventos for observado numa zona montanhosa é provável que se verifique uma maior dispersão dos ventos pelas várias classes de velocidade, traduzindo-se este fenómeno por valores de k mais baixos, situados entre 1,2 e 1,8. Na figura 4.4 mostra-se a variação da forma da função de Weibull para vários valores de k .

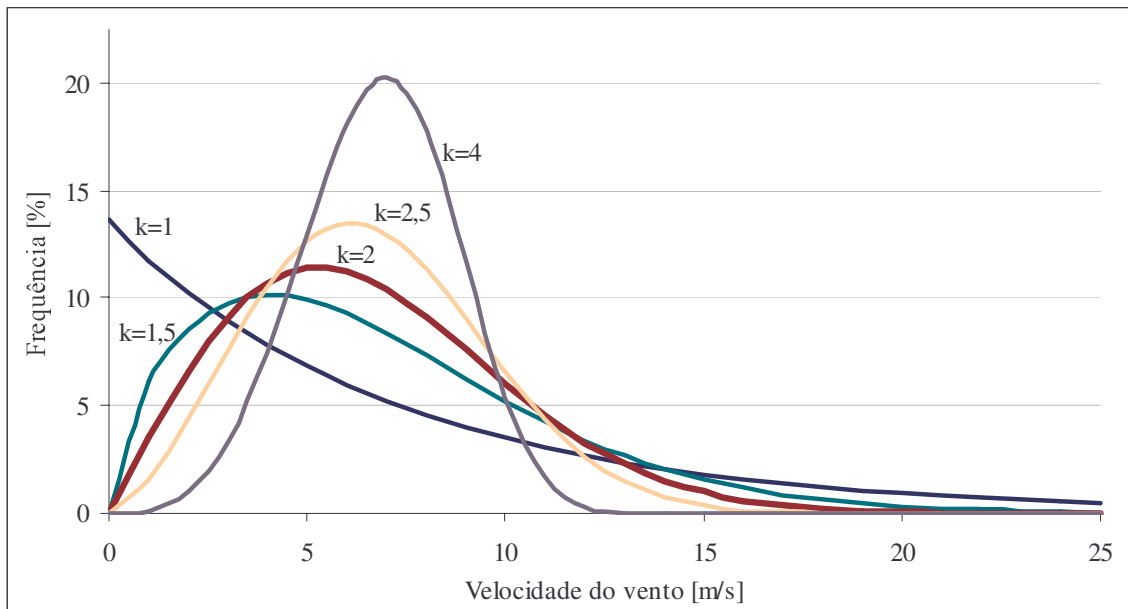


Figura 4.4 - Sensibilidade da forma da função de Weibull à variação de k

Através do conhecimento dos dois parâmetros da função de Weibull, e caso o ajuste conseguido por esta ao histograma de velocidades seja de boa qualidade, é possível determinar a velocidade média, $\overline{V}_W$, e o fluxo de potência médio, F_{potW} , do conjunto de dados que esteve na base da construção do histograma. Desta, forma o grande volume de informação contido na série temporal é eficazmente compactado sobre a forma de apenas duas variáveis, A e k . As expressões que permitem a determinação de $\overline{V}_W$ e de F_{potW} estão directamente relacionadas com os primeiro e terceiro momentos da distribuição teórica de Weibull e são dadas por:

$$\overline{V}_W = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.9)$$

$$F_{potW} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.10)$$

em que Γ é função densidade Gama.

A qualidade da determinação de A e k é de particular importância para a correcta caracterização do regime de ventos. Para a sua determinação existem vários métodos, dependendo das condições de ajuste ao histograma original e da forma com é disponibilizada a informação para o seu cálculo.

Neste trabalho propõem-se dois métodos alternativos para a determinação de A e k . No primeiro, designado por Método do Atlas Europeu do Vento, por se basear nas premissas avançadas nesse documento, a informação é fornecida sob a forma de uma série temporal de velocidade do vento. No segundo, que tomou o nome Método da Regressão Linear, a informação surge já pré-processada na forma de um histograma de velocidades.

Método do Atlas Europeu de Vento

O método preconizado pelo Atlas Europeu de Vento tem por base duas premissas: (1) o fluxo de potência identificado na série de velocidades é igual ao obtido através da função de Weibull ajustada; (2) a frequência de ocorrências superiores à velocidade média é igual tanto na série de velocidades como para a função de Weibull ajustada. Estas duas premissas traduzem-se pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{2 \cdot F_{pot}}{\rho} = A^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \\ Freq_{>\bar{V}} = e^{-\left(\frac{\bar{V}}{A}\right)^k} \end{cases} \quad (4.11)$$

A primeira premissa força o conteúdo energético dado pela função ajuste de Weibull a ser igual ao extraído da série de dados, tentando desta forma não desvirtuar o potencial eólico global constante na informação original. A segunda premissa foca a distribuição das velocidades num patamar superior de intensidade do vento. Na segunda premissa respeita-se o papel desempenhado pelas velocidades situadas numa gama mais elevada, uma vez que tendencialmente a sua contribuição para o potencial eólico observado é elevada.

A resolução do sistema assinalado em (4.11) só é possível por métodos numéricos. Assim, na aplicação informática construída no âmbito deste trabalho, avança-se a implementação do método iterativo das bissecções sucessivas [4.4] para a sua resolução. Como limites iniciais para o valor de k propõe-se 0,2 e 15, tomando-se 15 como primeira solução. Na figura 4.5 mostra-se a aplicação do referido método para a determinação de A e k numa situação real.

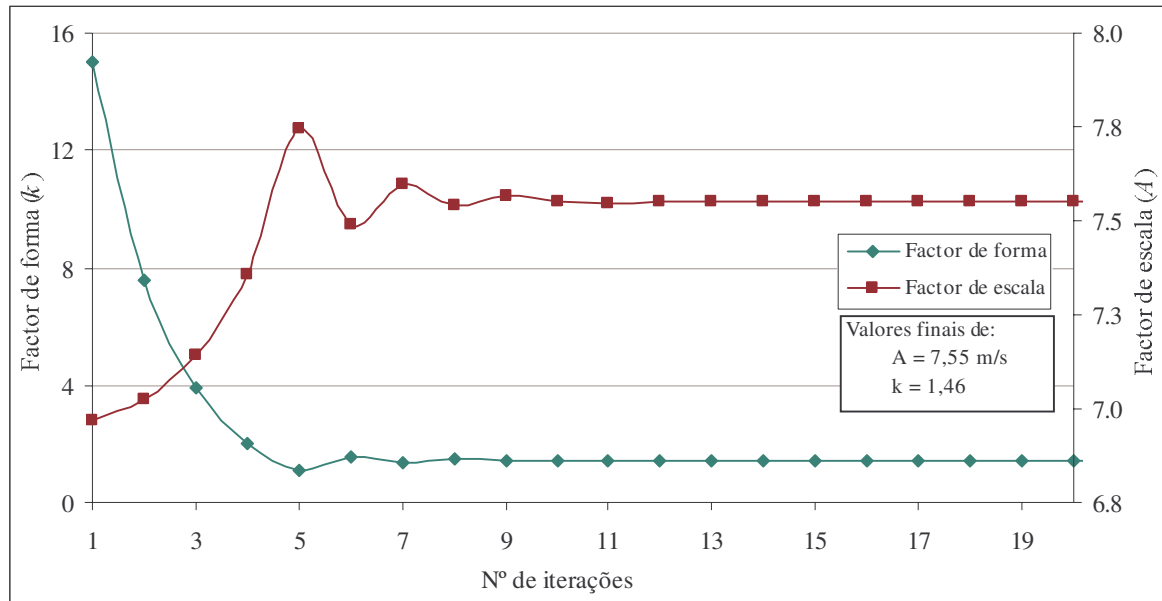


Figura 4.5 - Determinação de A e k – Método do Atlas Europeu de Vento

O método iterativo proposto, embora de grande simplicidade, revela-se eficiente, convergindo para muito perto da solução final, em média, ao fim de apenas 12 iterações.

Método da Regressão Linear

O método da regressão linear destina-se à determinação dos parâmetros A e k da função de Weibull tendo por base a informação da velocidade do vento agrupada sob a forma de um histograma de velocidades. Este método faz uso do carácter linear da distribuição acumulada de Weibull, $W(u)$, quando aplicada uma transformação logarítmica. $W(u)$ é traduzida pela seguinte expressão:

$$W(u) = e^{\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right)} \quad (4.12)$$

A transformada da inversa de $W(u)$, $\psi(u)$, é dada por:

$$\psi(u) = \log\left(\log\left(\frac{1}{1-W(u)}\right)\right) \quad (4.13)$$

e a transformada da velocidade, $\zeta(u)$ é expressa por:

$$\zeta(u) = \log(u) \quad (4.14)$$

Através da substituição de (4.12) e (4.13) em (4.14) procede-se à linearização da distribuição de Weibull:

$$\psi(u) = A1 \cdot (\zeta(u) - \ln(A2)) \quad (4.15)$$

A determinação dos parâmetros da função de aproximação é conseguida pela regressão linear da distribuição real transformada. No processo de obtenção da regressão linear deverão ser apenas consideradas as classes de velocidade superiores a 3 m/s e onde a frequência de ocorrência é superior a 1 %. A consideração do limite inferior em 3 m/s deve-se a que, para gamas de velocidade reduzidas a incerteza associada às medições é sensivelmente maior, e porque, tipicamente, apenas para velocidades superiores a 3 m/s é que os modernos aerogeradores começam a funcionar. Já a condição de frequência superior a 1 % está relacionada com as características particulares associadas à gama final de velocidades. Neste patamar, como se verá no capítulo 6, a distribuição de ocorrências segue com muito maior proximidade outras distribuições teóricas, nomeadamente a distribuição de Gumbel.

A título de exemplo retome-se o caso anterior, em que se determinaram os parâmetros de ajuste da função de Weibull através do Método do Atlas Europeu de Vento. A determinação dos mesmos parâmetros, mas pelo Método da Regressão Linear, para um histograma de resolução igual 1 m/s, conduz a um valor de A de 7,63 m/s e um valor de k de 1,45. Os valores encontrados situam-se muito próximos dos obtidos pelo primeiro método.

Embora de abrangência muito alargada, em situações pontuais a distribuição de Weibull revela grandes dificuldades. Genericamente, são dois os casos que representam maiores problemas ao ajustamento pela função de Weibull: (1) se o histograma for marcadamente concentrado ou (2) se o histograma for bi-modal. Na figura 4.6 representam-se as duas situações e respectivos ajustes através da função de Weibull.

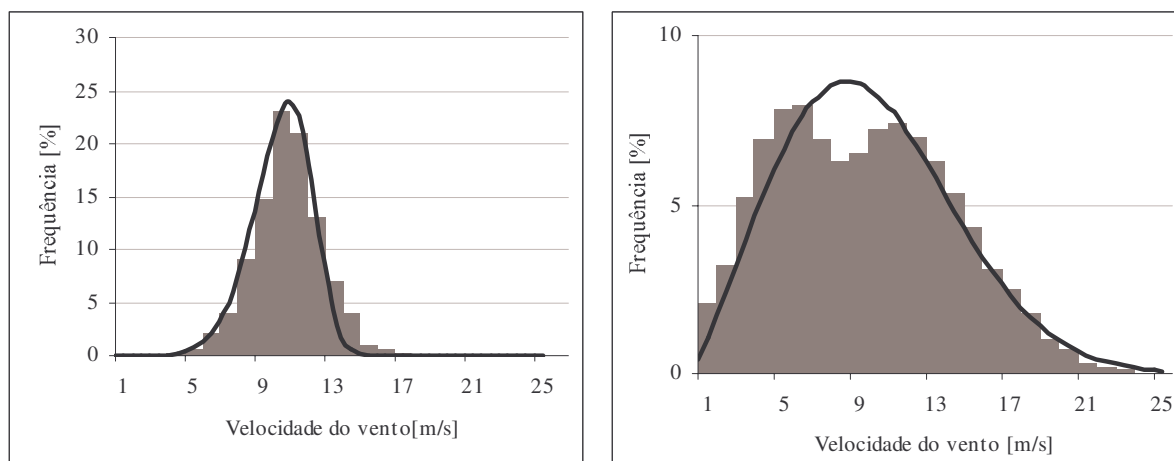


Figura 4.6 - Histogramas de difícil ajuste através da função de Weibull

Histogramas muito concentrados como o assinalado na figura anterior são normalmente observados em zonas da costa Nordeste do Brasil. Para regimes de ventos deste género a forma do histograma afasta-se de uma função de Weibull para se aproximar de uma função Normal, sendo que a última permitiria um ajuste de melhor qualidade.

No entanto, é na situação de histogramas bi-modais que se verificam as maiores dificuldades de ajuste. Nestas situações a aproximação da distribuição de Weibull ao histograma conduz a erros sensíveis. Porém, as alternativas de ajuste não proporcionam resultados melhores.

Os dois casos anteriormente identificados são pontuais, realçando-se a adequação da função de Weibull para o ajustamento a histogramas de velocidade do vento.

4.2 Padrão diário de variação da intensidade do vento

A variação da intensidade do vento ao longo de um dia segue, não raras vezes, padrões bem definidos. É bem conhecido pelas populações do litoral norte português o fenómeno que dá pelo nome de “Nortada”, caracterizado pelo aumento gradual da velocidade vento entre o final da manhã e o final da tarde, durante os meses de Verão.

Na origem do fenómeno “Nortada” estão acontecimentos meteorológicos regionais [4.5]. O surgimento de uma depressão térmica durante o Verão, localizada no centro da península Ibérica com origem no gradiente de temperaturas formado entre a massa terrestre, mais quente, e as massas de água, oceano Atlântico e mar Mediterrâneo, mais frias, tem como consequência o aparecimento de brisas térmicas nas zonas costeiras. Devido à sua duração, de algumas horas, estas brisas acabam sofrer ao efeito da força de Coriolis, transformando uma circulação próxima da perpendicular à costa numa praticamente paralela.

Também na altura do Verão, em algumas zonas montanhosas, de vales cavados e longos, é habitual observar-se uma maior intensidade do vento no início e no final do dia. Porém, ao contrário da situação anterior, a génese deste comportamento do vento assenta em fenómenos locais apenas directamente relacionados com o gradiente térmico definido entre o topo da montanha e o fundo do vale [4.6].

A informação sobre este género de comportamentos do vento encontra-se também incluída nas séries temporais de vento. A sua identificação passa pela determinação do valor médio da velocidade do vento para cada uma das 24 horas do dia. Complementarmente, o calculo de valor médio horário do fluxo de potência conduzirá à identificação do padrão diário de variação da intensidade do vento.

Ao nível da variação diária da velocidade do vento, os meses de Verão² podem demonstrar um comportamento significativamente diferente dos do período de Inverno. Como tal, esta análise deverá ser realizada para os dois períodos separadamente.

² Por período de Verão entende-se os meses compreendidos entre Abril e Setembro e por período de Inverno os restantes.

4.3 Turbulência

A observação da velocidade do vento no mesmo ponto e em vários instantes revela uma elevada variabilidade, com flutuações de alta-frequência. No caso do vento, a amplitude destas flutuações atinge valores que, em não raros casos, são superiores a 50 % da velocidade média do vento [4.7]. O comportamento do vento assim descrito enquadra-o claramente no grupo dos escoamentos turbulentos.

Por se revelar um escoamento turbulento, o vento caracteriza-se por níveis de variância significativamente diferentes para cada frequência. É fácil verificar que a variância numa série temporal de velocidade do vento de longa duração é significativamente maior do que a associada a uma série cobrindo apenas alguns minutos. A determinação da variância associada a cada escala temporal é conseguida aproximando a série de velocidades através de um polinómio de Fourier para posteriormente construir o respectivo espectro de potência [4.8].

A abordagem estatística deste comportamento do vento conseguida através da análise espectral é a que revela maior simplicidade. Outras abordagens do género determinístico são também possíveis, porém, devido aos inúmeros factores que contribuem para a variabilidade do vento, tornam-se muitas vezes irrealizáveis.

Os trabalhos pioneiros nesta área de Van der Hoven [4.9] contribuíram para a identificação das zonas macro-meteorológica, de vazio espectral e de turbulência no espectro do vento, ver figura 4.7. De especial interesse é zona de vazio espectral, compreendida entre 2 horas e 10 minutos e que demonstra que os fenómenos associados a frequências de vento diária e sazonal são claramente distintos dos associados à turbulência.

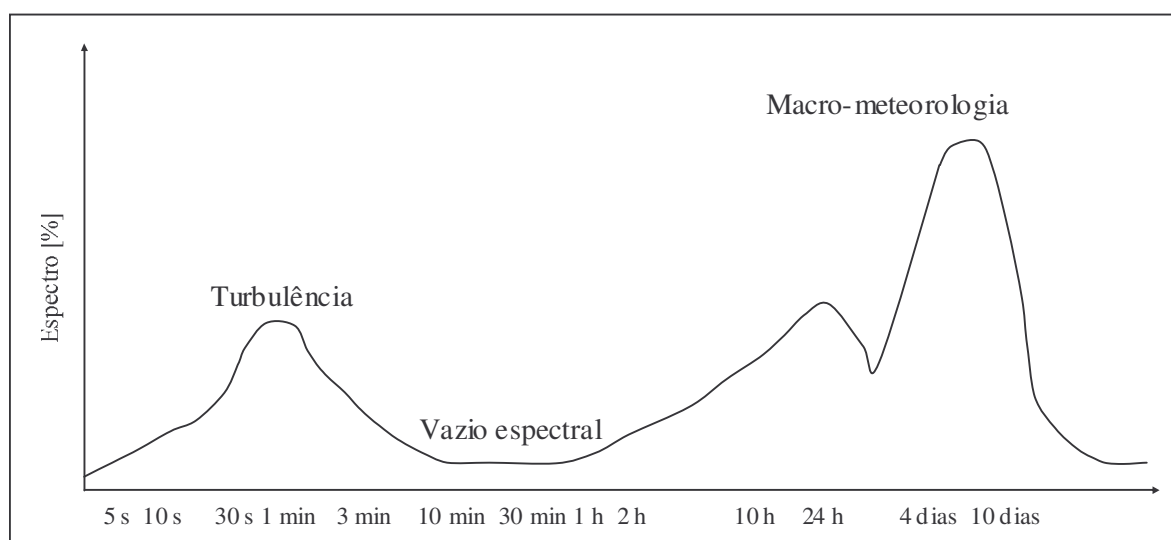


Figura 4.7 – Espectro típico do vento segundo Van der Hoven, 1957

A zona de vazio espectral fundamenta a razão pelo qual se registam os valores da velocidade do vento sob a forma de médias 10 minutos. Com intervalos temporais superiores a análise tornar-se-ia grosseira, “limpado” fenómenos importantes. Intervalos de integração menores exigiriam maiores recursos em unidades de memória extra, tornando os equipamentos de registo de dados muito mais caros, sem ganhos assinaláveis de na qualidade da caracterização do regime de ventos.

Na figura 4.8 mostra-se o espectro de potência associado a uma série de velocidade de vento registada no litoral norte português.

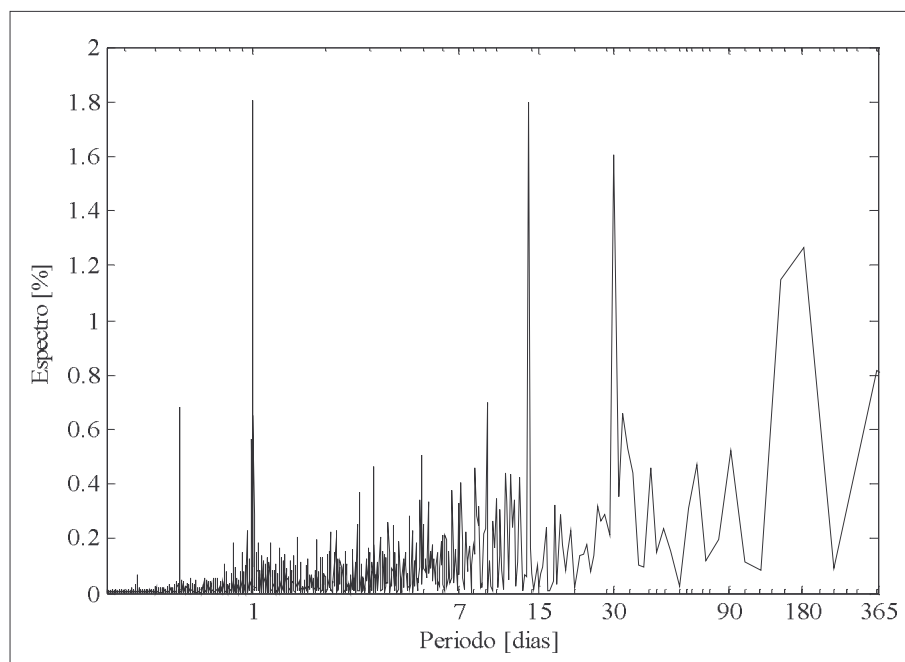


Figura 4.8 - Variação espectral da velocidade do vento num local do litoral Norte português
Dados de Jan02 a Dez03 – 105120 registos de velocidade

Através da análise do espectro de potência do vento é possível identificar, para além de outras situações, os períodos onde a velocidade do vento demonstra uma variação mais marcada. No caso que serve de exemplo verifica-se uma contribuição notável dos períodos diários e quinzenais para a energia disponibilizada pela série de ventos. A variação de períodos de cerca de meio ano, correspondentes aos períodos de Inverno e Verão, é também identificável. Na figura 4.8 não é totalmente identificável a zona de vazio espectral, uma vez que o espectro foi construído com base nos valores de velocidade média de 10 minutos, impossibilitando a determinação da energia associada à zona de turbulência.

A construção do espectro de potência de uma série de ventos reveste-se de alguma complexidade e a sua determinação para uma frequência anual exige um conjunto de dados de extensão elevada. Adicionalmente, a tomada de valores médios de velocidade para períodos de 10 minutos impossibilita a caracterização da zona de turbulência.

Para análise da variabilidade do vento na gama de alta frequência, inferior a 10 minutos, recorre-se ao parâmetro intensidade de turbulência, I_t [4.10]. Sua determinação é dada pela relação entre o desvio padrão da velocidade média do vento, σ_u , e a velocidade média registada no mesmo período:

$$I_t = \frac{\sigma_u}{u} \quad (4.16)$$

Desta forma é possível contabilizar as flutuações do vento dentro do período a que se refere a média das velocidades, uma vez que a distribuição da velocidade do vento para pequenos intervalos de tempo assume tipicamente uma forma Gaussiana.

A intensidade de turbulência está relacionada com a cobertura do solo do local em análise e da altura ao solo desse mesmo local, sendo que será menor para escoamentos desenvolvendo-se sobre superfícies mais lisas e quanto mais elevada for a altura ao solo. Além destes factores, dependem também do relevo envolvente, da presença de obstáculos à passagem do vento e do comportamento térmico da atmosfera.

A determinação da intensidade de turbulência para cada classe de velocidade conduz a uma descrição do regime de ventos na zona de turbulência para diferentes situações de vento. Na figura 4.9 mostra-se a variação deste índice para uma situação típica.

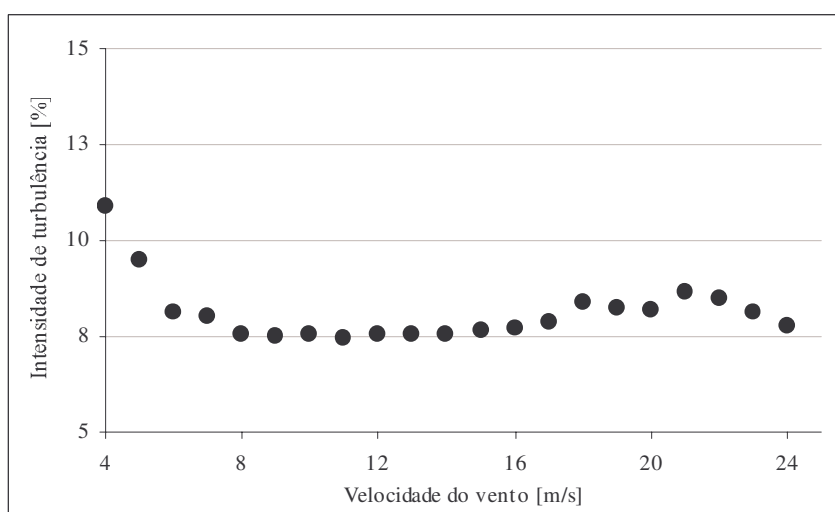


Figura 4.9 - Relação típica entre a I_t e velocidade num local do litoral Norte português
Dados de Jan02 a Dez03 – 105120 registos de velocidade

A informação proveniente desta análise é de grande importância na escolha do tipo de aerogerador, uma vez que sítios com elevados valores de intensidade de turbulência conduzem a esforços suplementares neste tipo de máquinas, aumentando os tempos de paragens devido a manutenções extraordinárias e que, em casos extremos, poderão conduzir à diminuição do seu tempo de vida útil. Este aspecto particular será tratado em maior pormenor no capítulo 6.

4.4 Perfil vertical de velocidade

A análise da variação da velocidade do vento em função da altura ao solo é uma parte de grande relevância quando se caracteriza o regime de ventos num determinado lugar. A sua utilidade reside fundamentalmente em três aspectos:

- 1) o perfil vertical de velocidades é um indicador muito útil na detecção de um eventual mau funcionamento dos sensores de medição da velocidade instalados na torre meteorológica;
- 2) o conhecimento da forma como varia a velocidade do vento com a altura torna possível a identificação de escoamentos com características tais que poderão inviabilizar a instalação de aerogeradores no local de medição;
- 3) a determinação do perfil vertical de velocidades pode permitir ao gestor de um projecto eólico seleccionar a altura das torres dos aerogeradores.

A modelação da variação vertical da velocidade do vento para uma parcela da atmosfera estendendo-se desde o solo a até algumas centenas de metros de altitude foi conseguida de forma simplificada por Prandlt [4.11]. Partindo das premissas que o escoamento atmosférico junto ao solo se desenvolve de forma turbulenta e numa atmosfera neutra, onde os fenómenos de estratificação não favorecem nem impedem o surgimento da mistura vertical do escoamento, foi estabelecido que a variação vertical da velocidade se desenvolve pelo descrito pela Lei Logarítmica do Perfil:

$$u(h) = \frac{v^*}{C_k} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (4.17)$$

onde h é a distância na vertical ao solo, v^* é a viscosidade dinâmica, C_k é a constante de von Karman e z_0 é o parâmetro rugosidade característica.

Embora de utilidade em determinados casos, a Lei logarítmica do Perfil é utilização restrita. Em muitas situações a determinação dos valores de v^* , k e z_0 é difícil e nem sempre com a exactidão exigida, sendo que a sua utilização num largo número de situações levaria a erros inaceitáveis.

O menor desempenho da Lei Logarítmica do Perfil tem origem na complexidade da modelação da variação vertical da velocidade do vento, uma vez que as variáveis que influem na sua forma final são diversas. A forma do terreno e a cobertura do solo são apenas dois dos aspectos que contribuem para a definição do perfil vertical de um determinado local. A adaptação da Lei Logarítmica do Perfil para condições que não a de atmosfera neutra, acarreta dificuldades extras, já implica a modelação da componente térmica da atmosfera.

Numa abordagem alternativa ao problema, Prandtl, tendo por base os trabalhos de J. Nikuradse no estudo de perfis de velocidade em tubos e da lei da fricção e através da assumption de que a distribuição de velocidades dentro da camada limite de um escoamento turbulento que se desenvolva sobre uma placa plana é idêntica à observada dentro de um tubo estabeleceu a Lei de Potência do Perfil [4.12], válida para uma larga gama de valores de Reynolds:

$$u = K \cdot h^p \quad (4.18)$$

Embora a última premissa que esteve da definição da expressão (4.18) seja apenas uma aproximação do problema, foi demonstrado que os seus resultados estão muito próximos do verificado na prática.

Para o caso concreto das medições da velocidade do vento numa torre de medição, a constante K pode ser determinada, fazendo $u(y_1) = u_1$. Desta forma a expressão que descreve a variação da velocidade do vento com a altura de medição é dada por:

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{h}{h_1} \right)^p \quad (4.19)$$

Na situação particular das medições das características do vento visando o seu aproveitamento energético é prática comum a instalação de sensores de velocidade a mais que uma altura do solo. Esta rotina serve para, entre outras coisas, determinar a forma média do perfil vertical de velocidades, através do cálculo do expoente característico de velocidades, p . Assim, através das medições locais das características do vento pretende-se evitar os desvios cometidos pela utilização da Lei Logarítmica do Perfil na determinação da forma de variação da velocidade do vento com a altura do solo.

Nas situações em que se dispõe de registos de velocidade e direcção recolhidos a duas alturas do solo a determinação do expoente característico do perfil poderá ser conseguida da seguinte forma:

- 1) determinação dos registos simultaneamente válidos às duas alturas de medição;
- 2) cálculo dos valores de p instantâneos através da expressão (4.19);
- 3) determinação do valor médio de p tendo por base todos os seus valores instantâneos.

A repetição das tarefas anteriormente mencionadas para cada sector da rosa-dos-ventos conduz à definição da rosa de perfis do local.

Na referida análise há ainda a considerar o comportamento dos sensores de direcção do vento em períodos de velocidade reduzida. Como mencionado anteriormente, para velocidades tipicamente inferiores a 1 m/s os cata-ventos demonstram um comportamento errático. Por esta razão, só as ocorrências em que a velocidade do vento é superior a 1 m/s são contabilizadas na determinação do perfil vertical de velocidades.

J. Nikuradse demonstrou também que o valor de p , em condições controladas, se situava muito próximo de $1/7$, tendo tendência a aumentar ligeiramente com a diminuição do número de Reynolds associado ao escoamento.

Para as condições típicas de um escoamento atmosférico, numa gama de alturas do solo na ordem da dos aerogeradores que actualmente instalados, o valor de p , é regra geral, concordante com o avançado por J. Nikuradse.

No entanto, as características do terreno que rodeia o ponto de medição podem ser responsáveis por fenómenos aerodinâmicos particulares, podendo fazer variar p entre dentro de intervalos relativamente largos, tipicamente situados entre $-0,1$ e $0,4$. Na figura 4.10 mostra-se a forma do perfil vertical de velocidades para vários valores de p .

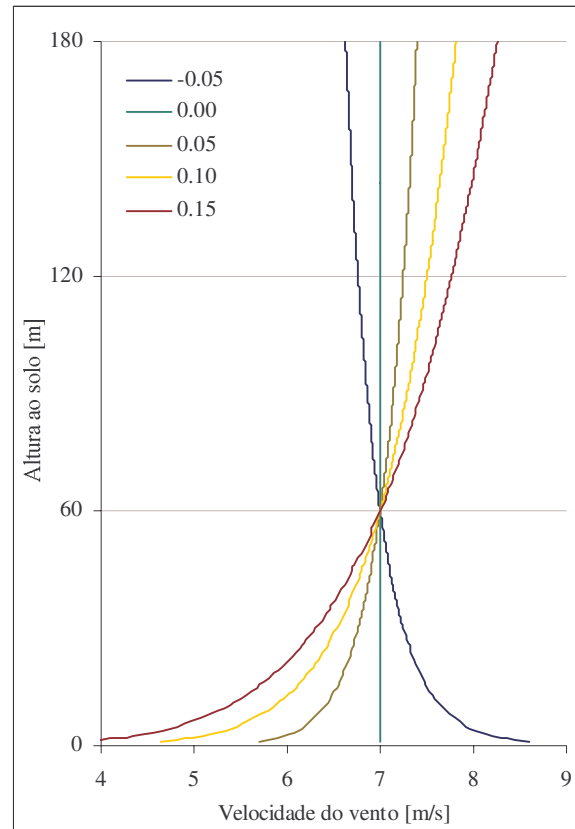


Figura 4.10 - Forma do perfil vertical de velocidades vs expoente p

De uma forma geral, a rugosidade superficial do solo e a complexidade orográfica do terreno têm efeitos opostos na forma do perfil vertical de velocidades. Terrenos planos e de elevada rugosidade, provocada por vegetação de grande porte ou edifícios, tendem a atrasar o escoamento nas camadas junto ao solo, resultando no aumento do valor de p . Por outro lado, terrenos de elevada complexidade orográfica e de baixa rugosidade conduzem à mistura do escoamento e poderão ser eventualmente responsáveis por fenómenos de aceleração do escoamento nas camadas junto ao solo, originando mesmo em certos casos a inversão do perfil vertical de velocidades.

4.5 Produção de um aerogerador de referência

A tomada simples da velocidade média retirada do conjunto de observações recolhidas na estação de medição para a estimativa da produção média anual de aerogerador, $Prod$, conduzirá a erros significativos. A forma altamente não linear da curva de potência do aerogerador moderno não tolera uma abordagem tão simplista do problema.

A curva de potência de um aerogerador, C_A , traduz a relação entre a velocidade do vento à altura do eixo do rotor e a potência debitada. A sua forma não é facilmente aproximada por uma função contínua, pelo que a sua descrição é feita por um conjunto discreto de valores de potência medidos em

intervalos regulares de velocidade, geralmente de dimensão igual a 1 m/s. Na figura 4.11 encontra-se representada a curva de potência de um aerogerador representativo das máquinas actualmente disponíveis no mercado.

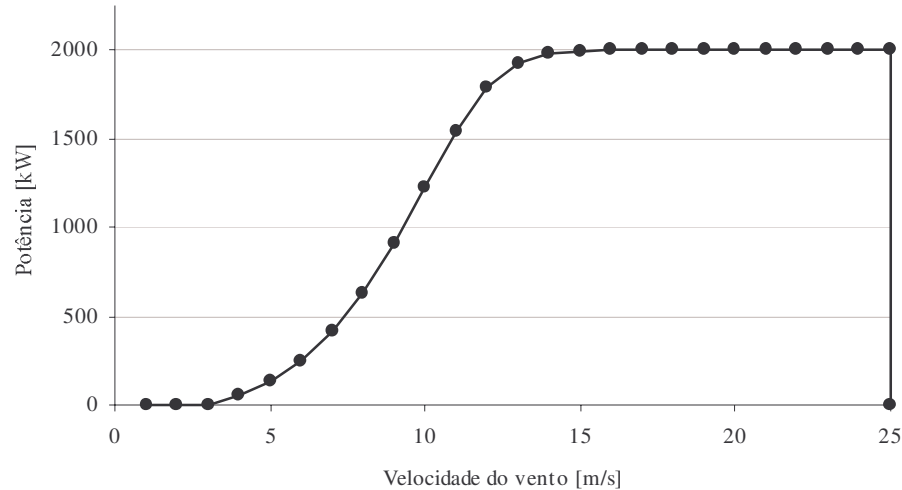


Figura 4.11 - Curva de potência de um aerogerador representativo do mercado actual

Só recorrendo à distribuição de ocorrências de velocidade do vento por classes de velocidade, vulgo histograma de velocidades, tomada à altura do eixo do aerogerador, h_t , é possível calcular correctamente a produção do aerogerador, caso este se situe no mesmo local da estação. Com este intuito, a metodologia proposta neste trabalho segue os seguintes passos:

- 1) extrapolação da série de velocidade para a altura do eixo do rotor do aerogerador;
- 2) construção do histograma de velocidades;
- 3) aplicação do histograma de velocidades à curva de potência do aerogerador considerado.

Para a extrapolação da velocidade do vento para a h_t , em cada instante recorre-se à noção de expoente característico do perfil, definida de acordo com o referido na secção anterior. Tomando os valores de p instantâneos e as respectivas velocidades do vento é possível, aplicando a expressão (4.19), gerar uma série de velocidades do vento para a altura da turbina. Alternativamente, sempre que não se disponha de medições da velocidade do vento a mais de que um nível é possível, assumindo um valor constante para p , construir uma série de velocidades de vento para a altura do aerogerador. Nesta situação, a determinação de p poderá ser obtida por recurso a modelos de simulação de escoamento. No entanto, trata-se sempre de uma aproximação de menor qualidade à solução do problema, visto que nem sempre a simulação do escoamento é de boa qualidade.

Uma vez disponível a série de vento à h_t , a informação deverá ser organizada sob a forma de um histograma de velocidades de vento, em que os intervalos das classes de velocidade têm a mesma dimensão que o intervalo de velocidades em que são fornecidos os valores pontuais da curva de potência.

Genericamente, a produção média do aerogerador pode ser determinada por:

$$Prod = 8760 \cdot \int_0^{\infty} C_A(u) \cdot w(u) \cdot du \quad (4.20)$$

De forma a determinar $Prod$, a curva de potência deverá ser aproximada por uma série de regressões lineares entre os vários valores conhecidos. Escrevendo C_A como:

$$C_A(u) = \frac{C_{A_{i+1}} - C_{A_i}}{u_{i+1} - u_i} \cdot (u - u_i) + C_{A_i} \quad u_i \leq u < u_{i+1} \quad (4.21)$$

e substituindo $w(u)$ por $HIST$, a produção média do aerogerador descrita pela expressão (4.20) poderá ser aproximada pela expressão:

$$Prod = 8760 \cdot \sum_i C_A \left(\frac{u_{i+1} + u_i}{2} \right) \cdot HIST(u) \quad (4.22)$$

A produção do aerogerador deverá vir sempre indexada ao conjunto de dados que esteve na origem da sua determinação. Assim, se a informação corresponder a um período de um ano, $Prod$ será descrita como a produção do aerogerador representativa desse ano. Se se tratar de um conjunto de dados com seis meses, $Prod$ será a produção para um ano com características idênticas às dos seis meses de dados de referência.

5 Regimes de ventos de longo termo – Metodologias de correlação

Tipicamente, as séries temporais de velocidade e direcção do vento, recolhidas com o intuito da avaliação do potencial eólico de um determinado local, têm uma duração que varia entre um e três anos. Devido ao comportamento altamente variável do vento, o período coberto pela série de medições poderá estar muito distante do esperado para uma situação de longo termo³, originando desvios significativos em posteriores estimativas de recurso face à realidade [5.1]. A magnitude destes desvios poderá atingir um nível que, em casos mais desfavoráveis, venha a comprometer a viabilidade do projecto eólico

Para ilustrar as grandes variações do recurso eólico no tempo, tome-se como exemplo o caso de uma estação operada pelo INEGI, situada na Serra de Montemuro. Esta estação entrou em operação em finais de 1993 e tem vindo a funcionar com grande regularidade até à actualidade. O extenso conjunto de informação, de disponibilidade elevada, proporciona óptimas condições para realização de uma análise de longo termo. Na figura 5.1 exhibe-se a velocidade média mensal observada na referida estação.

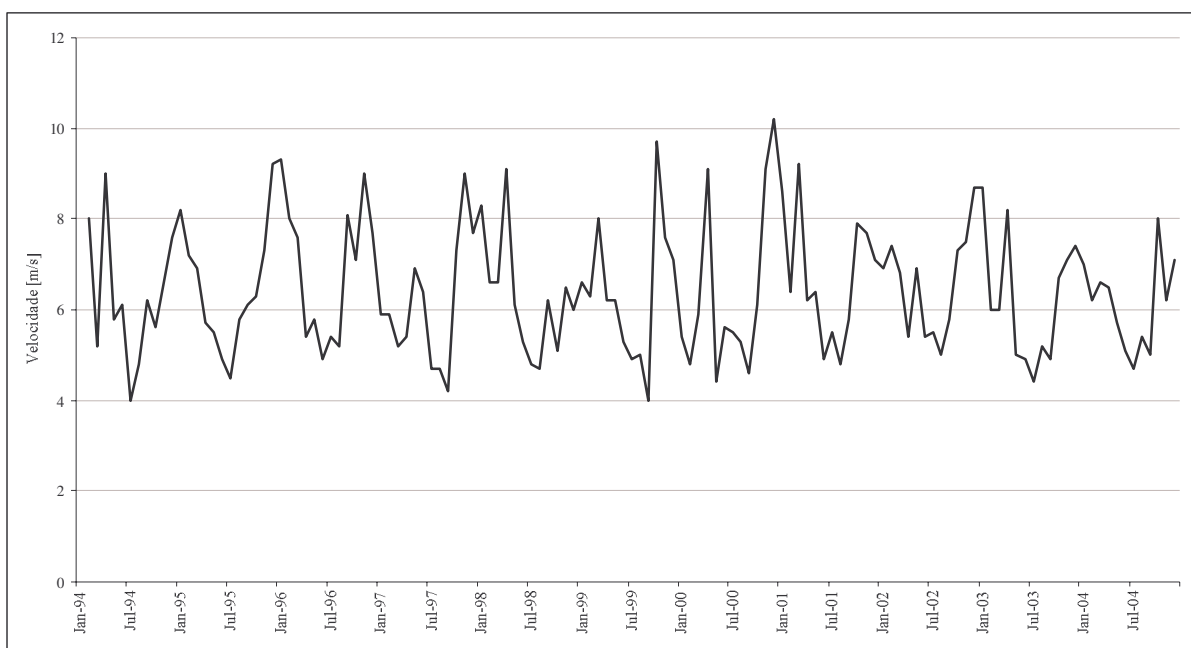


Figura 5.1 - Velocidade média mensal numa estação de referência do INEGI

³ Como regime de ventos de longo termo entende-se aquele que, determinado com base num conjunto de dados de longa duração, reflecte, em termos médios, o que se poderá esperar do potencial eólico do local para a vida útil de um projecto.

Como forma de estimar o recurso eólico da estação considere-se a produção de um aerogerador⁴ instalado no ponto onde se situa a estação, calculada de acordo com o exposto no sub-capítulo 4.5. Para o período compreendido entre 1993 e 2004 a produção do aerogerador terá sido de 5016 MWh/ano. Uma vez que na base da determinação deste valor está um conjunto de informação de 12 anos, considera-se ser o mesmo representativo de uma situação de longo termo.

Imagine-se agora que, para a estimativa de produção, se recorre apenas aos dados recolhidos na mesma estação entre Julho de 2000 e Junho de 2001, incluindo o que os registos meteorológicos apontam para ter sido um dos mais severos Invernos dos últimos 100 anos [5.2]. Nesta conjuntura, a produção estimada seria de 5789 MWh/ano. Relativamente ao valor de longo termo, esta situação está cerca de 15,4 % acima.

Caso o projecto se situasse num patamar reduzido de rentabilidade, a segunda estimativa poderia levar à tomada de decisões que, num futuro próximo, se revelariam funestas no plano económico, uma vez que apontaria para a viabilidade do projecto, quando de facto não deveria acontecer. Os valores apontados referem-se ao caso concreto da estação de referência INEGI e para os horizontes temporais anteriormente definidos, sendo que para outros casos se poderão mesmo vir a registar diferenças maiores do que as assinaladas.

O exemplo descrito anteriormente reflecte com grande clareza a necessidade de se dispor de um conjunto de informação alargado quando se caracteriza o recurso eólico de um determinado local. Porém, as campanhas de medição das características de vento têm uma duração limitada e que não se coaduna com o tempo necessário para uma aferição de longo termo. Para contornar este problema foram desenvolvidos métodos de aumento da representatividade do regime de ventos observado num determinado local, tendo por base um conjunto de informação de maior extensão registado noutros pontos.

Os métodos para aumento da representatividade do regime de ventos podem ser divididos genericamente em dois tipos: métodos determinísticos e métodos estocásticos. Os primeiros assentam na previsão do regime de ventos no local em análise recorrendo a modelos de simulação do escoamento e tendo por base os dados recolhidos numa estação de referência. Os segundos alicerçam-se numa abordagem estatística do problema, através do estabelecimento de correlações entre a informação recolhida em duas estações e posterior extrapolação para o longo termo.

Os métodos estocásticos demonstram vantagens sensíveis face aos métodos determinísticos: o seu carácter puramente estatístico permite a sua implementação num formato computacional de forma simples e com grande versatilidade. Por outro lado, os métodos determinísticos implicam grandes recursos computacionais para a modelação das equações fundamentais do escoamento e, por norma,

⁴ O modelo de aerogerador considerado tem uma potência nominal de 2 MW e é representativo dos actuais modelos disponíveis no mercado.

tempos de cálculo consideráveis. Refere-se ainda que, para zonas de grande complexidade orográfica, como são a maioria das zonas onde se instalaram e onde se prevê a instalação de parques eólicos em Portugal, este tipo de modelos se depara com dificuldades suplementares.

Com intuito de aumentar a representatividade do regime de ventos num determinado ponto de medição neste trabalho prevê-se a implementação de várias estratégias de correlação entre os dados recolhidos localmente e numa estação de referência.

Numa fase preliminar à correlação entre dados de duas estações avança-se com uma metodologia para a reconstrução das séries de dados medidos em sensores instalados a alturas distintas de medição.

Para o aumento da representatividade da série de velocidade tomada na estação local, Est_{Loc} , propõe-se o estabelecimento de correlações sectoriais em entre os registos simultâneos com a estação de longo termo, conhecida doravante como estação de referência, Est_{Ref} .

Para o aumento da representatividade do regime de vento local sugere-se o método “Measure, Correlate and Predict”, vulgo *MCP*. Este método, de adopção universal, foi especialmente adaptado para lidar com regimes de ventos típicos de terrenos complexos [5.3].

A forma em que são estruturados os resultados finais do método *MCP* foi pensada para a sua utilização posterior com *softwares* de simulação do escoamento, nomeadamente a ferramenta WAsP, tornando o processo de estimativa do recurso para uma determinada área numa tarefa mais célere.

5.1 Colmatação da falhas em séries temporais

Para a colmatação das falhas em séries temporais de velocidade propõe-se à adopção de uma metodologia de correlação sectorial entre os registos de velocidade tomados a duas alturas de medição distintas.

De acordo com o sub-capítulo 4.4, a variação em altura da velocidade do vento é bem aproximada por uma lei de potência. Conhecido o valor do expoente característico do perfil e a velocidade do vento a uma das alturas de medição é possível determinar a velocidade do vento à altura complementar.

Partindo da anterior premissa é possível reconstruir séries de velocidade na extensão em que se verificaram ocorrências anómalas, caso existam dados válidos à altura de medição complementar e se a correlação demonstrar qualidade suficiente para ser considerada válida. O estabelecimento da correlação é feito através da determinação dos valores de p médios para cada um dos sectores da rosa-dos-ventos.

Na determinação de p deverão ser considerados apenas os valores de velocidade simultaneamente válidos às duas alturas de medição e agrupados pela direcção observada no sensor instalado à altura de referência. Pelas razões apontadas no sub-capítulo 2.1, apenas as ocorrências em que a velocidade do

vento é superior a 1 m/s serão consideradas no estabelecimento da correlação. De forma a assegurar a correcta representatividade da correlação, sugere-se o emprego da metodologia descrita apenas quando se dispõe de um conjunto de dados simultâneos de extensão considerável, tipicamente superior a três meses, de forma a assegurar a representação temporal das correlações.

A validação da correlação passa pela extrapolação da série de velocidades referente ao período que esteve na base da sua determinação e posterior comparação dos valores dos principais parâmetros do regime de ventos da série extrapolada com a observada.

Se os requisitos de representatividade do conjunto de dados empregues para a determinação da correlação foram cumpridos, a qualidade deste tipo de correlações deverá ser elevada, com os erros a situarem-se até um máximo de 3 % em termos de velocidade média. Caso tal não se verifique a correlação deverá ser descartada.

A reconstrução da série temporal de velocidades será conseguida através do emprego da correlação, enquanto que para a direcção do vento se propõe a substituição directa dos valores em falta pelos tomados a uma outra altura, já que a variação desta grandeza com a altura ao solo é reduzida.

5.2 Correlações lineares sectoriais de velocidades

A metodologia de correlação linear sectorial de velocidades entre duas estações assenta no estabelecimento de uma relação linear entre os dados simultaneamente recolhidos na Est_{Loc} e na Est_{Ref} , para cada um dos sectores da rosa-dos-ventos.

Na presente abordagem, os registos são agrupados por sector de ocorrência segundo a estação Est_{Ref} . Para cada um dos conjuntos de dados é ajustada uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados [5.4]. Pelas razões expressas no sub-capítulo 2.1 para a determinação dos parâmetros da regressão linear apenas se consideram os registos cujas velocidades são superiores a 1 m/s. Habitualmente, os parâmetros da regressão das correlações são agrupados numa matriz, designada Matriz de Parâmetros de Correlação de Velocidades MPC_V , do género:

$$MPC_V(i) = [X_i, Y_i] \quad (5.1)$$

onde X e Y são os parâmetros de ajuste da regressão linear para cada sector.

A validação das correlações estabelecidas poderá ser conseguida através de retro-estimativas para o período de dados que esteve na base da correlação. Se os valores dos parâmetros do regime de ventos previsto para a estação local se afastarem muito dos referentes ao conjunto observado na mesma estação durante o mesmo período, a correlação deverá ser descartada. A análise dos coeficientes de correlação sectoriais poderá constituir indicação da qualidade da correlação. Se, para os sectores dominantes em termos de ocorrências ou de contribuição energética, forem identificados valores de

coeficientes de correlação sistematicamente inferiores a 0,7, a prossecução da análise deverá ser ponderada mediante a qualidade final dos resultados.

De uma forma global, quando duas estações se situam a pouca distância uma da outra, os regimes de vento demonstram uma grande semelhança. A variação da velocidade do vento nos dois pontos de medição tende a seguir o mesmo padrão, como tal a correlação entre as respectivas velocidades resulta geralmente de boa qualidade.

Da aplicação da Matriz de Parâmetros de Correlação de Velocidade ao conjunto dos dados observado na Est_{Ref} , é possível, se validada a correlação, construir uma série de velocidades referente à Est_{Loc} , de longa duração. Este conjunto alargado de informação torna possível, entre outras aplicações, a determinação do regime de ventos extremos na Est_{Loc} , uma vez que, como será visto no capítulo seguinte, uma das premissas para a descrição do regime de ventos extremos é a existência de uma série temporal de velocidades de grande extensão.

Outro ramo de aplicação da estratégia de correlação proposta anteriormente está na confirmação de valores médios de velocidade fora do esperado na Est_{Loc} através da comparação com os dados de uma Est_{Ref} situada nas proximidades da Est_{Loc} .

Sempre que existir a necessidade de confirmação do correcto funcionamento dos sensores de velocidade num dos pontos de medição deverá ser empregue uma estratégia de correlação linear, tendo por base o conjunto de informação até ao momento em que os sensores não parecem indicar qualquer mal funcionamento. A correlação estabelecida, se de boa qualidade, poderá ajudar a detectar potenciais avarias.

5.3 O método MCP

A método MCP utilizado para o aumento da representatividade do regime de ventos num dado ponto, tem na sua base o estabelecimento de correlações entre a informação simultaneamente recolhida na estação local e na estação de referência, de onde se dispõe de um conjunto de dados de grande extensão.

O resultado final da aplicação das correlações estabelecidas entre a Est_{Loc} e a Est_{Ref} à informação de longa duração recolhida na Est_{Ref} é uma descrição do regime de ventos de longa duração para a Est_{Loc} sob a forma de tabela classificada de ocorrências.

A utilização do método MCP é de aplicação abrangente, sendo empregue em diversas áreas onde se verifica a necessidade de correlação entre grandezas. Para o caso particular de correlação de velocidade e direcção do vento registados em dois pontos de medição a sua utilização enfrenta dificuldades acrescidas. A grande variabilidade das características do vento, tanto ao nível espacial, exigem adaptações do método MCP ao carácter particular das séries das características do vento.

A variante à metodologia subjacente ao método *MCP* proposta assenta no estabelecimento de correlações matriciais entre as duas estações ao nível das características da direcção e da velocidade do vento. O método processa-se, essencialmente, em quatro passos distintos: (1) inicialmente são seleccionados os registos simultaneamente válidos nas duas estações para servirem de base ao estabelecimento das correlações; (2) é construída a matriz de correlação entre direcções, *MCD*; (3) posteriormente são estabelecidas as correlações sectoriais de velocidade; (4) e por fim é validada a correlação. Para a concretização do ponto (3) propõe-se duas variantes de correlação de velocidades: a correlação sob uma forma matricial pura que dá origem à matriz de correlação por classes de velocidade, *MCV_{MM}*; e a correlação linear para cada sector da rosa-dos-ventos que conduz à determinação da matriz dos parâmetros de correlação de velocidades, *MCV_{ML}*.

Determinação do conjunto de dados base para a correlação

Os registos que constituirão o conjunto de dados base para o estabelecimento da correlação deverão ser simultaneamente válidos nos dois pontos de medição. Neste passo particular é necessário ter especial atenção ao surgimento de possíveis avarias desfasadas nos instrumentos de medição em cada estação, transformando o que poderia ser a representatividade individual aceitável das duas séries de dados numa baixa representatividade comum quando seleccionados apenas os registos simultaneamente válidos.

Correlação matricial de direcção

Com base nos dados seleccionados no passo anterior é construída a matriz de correlação de direcções, seleccionando os eventos que têm lugar simultaneamente no sector *i*, na *Est_{Loc}* e no sector *j* na *Est_{Ref}*, *D_{i,j}*, e dividindo pelo número total de ocorrências simultâneas observadas em cada um dos sector da *Est_{Ref}*:

$$MCD(i, j) = D_{i,j} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{n_s} D_{i,j}} \quad (5.2)$$

onde *n_s* é o número total de sectores da rosa-dos-ventos.

Na matriz *MCD* assim construída encontra-se a informação respeitante à probabilidade de ocorrência simultânea do vento segundo um determinado sector da rosa-dos-ventos indexada a cada um dos sectores da rosa-dos-ventos da *Est_{Ref}*. A título de exemplo, a posição *MCD(1,2)* representaria a probabilidade de ocorrência do vento soprar simultaneamente do sector 1 da rosa-dos-ventos na *Est_{Loc}* e do sector 2 na *Est_{Ref}*, indexada ao sector 2 da rosa-dos-ventos da *Est_{Ref}*.

Através do afastamento à diagonal da matriz é possível medir a distorção do escoamento ao nível da direcção na Est_{Loc} , face à Est_{Ref} . A figura 5.2 consubstancia MCD para uma situação real. A linha cinzenta representa a situação de não distorção do escoamento ao nível da orientação do vento entre as duas estações.

No caso particular da figura 5.2, a distribuição de ocorrências por sectores da rosa-dos-ventos na Est_{Ref} é muito semelhante à observada na Est_{Loc} . Porém, verifica-se uma ligeira distorção do escoamento quando o vento sopra entre os sectores 7 e 11. A maior dispersão de ocorrências no sector 6 da Est_{Ref} é também notada.

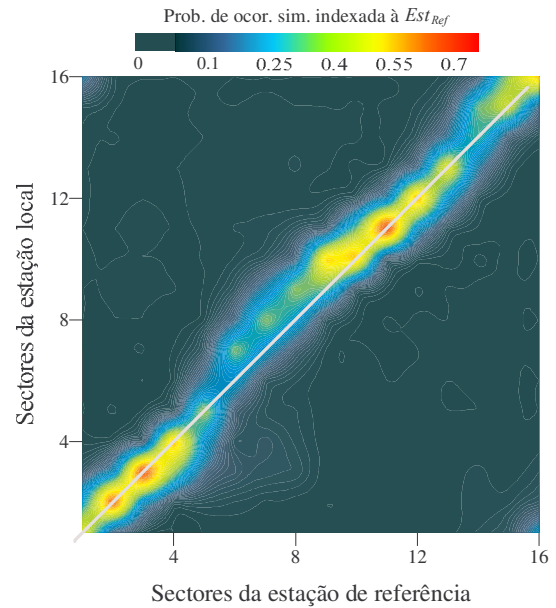


Figura 5.2 - Representação gráfica MCD proveniente de uma situação real

Correlação de classes de velocidade

Para o estabelecimento de uma correlação entre a informação respeitante à velocidade do vento são propostos dois métodos alternativos. O primeiro, aqui designado por Método Matricial de Correlação de Velocidades, $MMCV$, é de utilização mais abrangente e consiste na transposição da metodologia empregue na correlação da direcção para a velocidade. O segundo, designado por Método Linear de Correlação de Velocidades, $MLCV$, recorre a uma série de regressões lineares para proceder à correlação entre velocidades.

Método Matricial de Correlação de Velocidades

O Método Matricial de Correlação de Velocidades assenta na construção de uma matriz tridimensional de correlação de velocidades, $MCV_{MM}(j,m,n)$. Inicialmente, a informação de base para a correlação é agregada em n_s grupos, função do sector de ocorrência dos ventos observado na Est_{Ref} .

Para cada sector é construída uma matriz de probabilidade de ocorrência simultânea por classes de velocidades indexada à respectiva classe velocidade da Est_{Ref} . As sub-matrizes são composta pelos eventos que têm lugar simultaneamente na classe de velocidades de velocidades n e no sector j , na Est_{Ref} , e na classe de velocidades m da Est_{Loc} , $V_{i,m,n}$, posteriormente divididos pelo número total de ocorrências simultâneas verificadas no sector j e na classe de velocidades n da Est_{Ref} .

$$MCV_{MM}(j, m, n) = V_{j, m, n} \cdot \frac{1}{\sum_{n=1}^{n_{v,j}} V_{j, m, n}} \quad (5.3)$$

onde $n_{v,j}$ é o número total de classes de velocidade no sector j . A título de exemplo, em $MCV_{MM}(1, 2, 1)$ encontra-se a probabilidade que uma ocorrência do vento soprando do sector 1 na Est_{Ref} , ter uma velocidade que se situe na classe 2 na Est_{Loc} e na classe 1 na Est_{Ref} indexada à classe de velocidades 1 da Est_{Ref} .

À semelhança de MCD , também a matriz MCV_{MM} traduz a distorção média do escoamento entre os dois pontos, desta feita em termos de velocidade e para cada um dos sectores da rosa-dos-ventos.

A figura 5.3 faz a representação gráfica de MCV_{MM} para um determinado sector resultante da aplicação do método MCP a uma situação real. A linha cinzenta representa o estado onde a distribuição de velocidades nos dois pontos de medição é igual para o sector em causa.

Na situação da figura 5.3 é possível constatar que o regime de ventos na Est_{Ref} exibe uma maior intensidade do que o observado na Est_{Loc} .

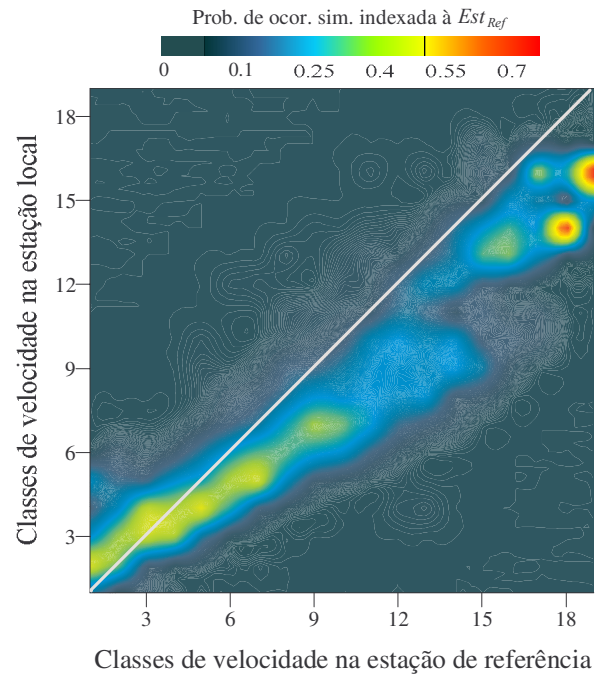


Figura 5.3 - Representação gráfica de MCV_{MM} para um sector de uma situação real

No limite extremo da gama de velocidades, a probabilidade de ocorrência simultânea assume valores elevados, sendo visível a menor severidade do regime de ventos da Est_{Loc} , face à Est_{Ref} .

Método Linear de Correlação de Velocidades

Alternativamente ao método mencionado anteriormente, a correlação entre os dados de velocidade recolhidos em cada estação poderá ser estabelecida por meio de regressões lineares. Esta vertente é também conhecida por Método Linear de Correlação de Velocidades [5.5].

A presente abordagem é em tudo semelhante ao enunciado no sub-capítulo 5.2. Para os registos simultâneos agrupados por sectores de direcção da Est_{Ref} é ajustada uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. Pelas razões apontadas no sub-capítulo 2.1, consideram-se apenas os registos cuja velocidade é superior a 1 m/s.

De uma forma prática, os coeficientes da regressão das correlações são agrupados numa matriz, MCV_{ML} , do género:

$$MCV_{ML}(i) = [X_i, Y_i] \quad (5.4)$$

onde X e Y são os coeficientes de ajuste da regressão linear para cada sector.

Validação da correlação

A validação da correlação é conseguida através da comparação do regime de ventos previsto para o local da Est_{Loc} , obtida com base no conjunto de dados registados na Est_{Ref} e que esteve na origem da correlação, com o efectivamente observado na Est_{Loc} no mesmo período.

A extrapolação da distribuição de ocorrências por sectores da rosa-dos-ventos, $RO_{LocPrev}$, é conseguida através da multiplicação matricial de MCD com a distribuição de ocorrências por sectores da rosa-dos-ventos observada na Est_{Ref} , RO_{Ref} :

$$RO_{LocPrev}(i) = MCD(i, j) \cdot RO_{Ref}(j) \quad (5.5)$$

A previsão da distribuição de ocorrências por classes de velocidade para cada sector, $Perm_{LocPrev}(m, i)$, para a Est_{Loc} , caso se recorra ao Método Matricial de Correlação de Velocidades, resulta de n_s multiplicações matriciais entre MCV_{MM} e a distribuição de ocorrências por classes de velocidade para cada um dos sectores na Est_{Ref} , $Perm_{Ref}$:

$$Perm_{LocPrev}(m, i) = MCV_{MM}(j, m, n) \cdot Perm_{Ref}(n, j) \quad (5.6)$$

A representação do regime de ventos assim obtido para o local da Est_{Loc} tem a forma de uma tabela classificada de ocorrências. Este é um formato eficaz e familiar para resumir as características de vento e do qual muitos programas de simulação do escoamento fazem uso na fase de introdução da informação do regime de ventos nos respectivos modelos. Assim, a forma de disponibilização dos resultados finais do método contribuiu para que o processo de determinação do recurso seja mais rápido e menos propenso a erros por parte do utilizador.

Se, alternativamente, se optar pelo Método Linear de Correlação de Velocidades, a determinação de $Perm_{LocPrev}$ é conseguida através da aplicação de MCV_{MR} a cada um dos registos de velocidade da Est_{Ref} , após estes terem sido enquadrados no respectivo sector. Posteriormente, os valores extrapolados de velocidade para a Est_{Loc} deverão ser agrupados por classes de velocidade para dar origem à tradicional tabela classificada de ocorrências.

Neste trabalho, para a comparação entre o regime de ventos localmente observado e extrapolado propõe-se a análise dos seguintes parâmetros: velocidade média do vento, parâmetros característicos da distribuição de Weibull, fluxo de potência e contribuição de cada sector da rosa-dos-ventos para a energia total disponibilizada pelo escoamento. Os primeiros quatro indicadores revelam o afastamento

da intensidade do regime de ventos previsto face ao observado localmente, enquanto que a contribuição de cada sector da rosa-dos-ventos para a energia disponibilizada pelo escoamento permite analisar o desvio da intensidade do regime de ventos previsto, cometido para cada sector, face ao observado localmente.

Ainda com respeito à validação da correlação sugere-se também a análise da produção de um aerogerador de referência. A comparação entre a estimativa de produção de um aerogerador instalado no local Est_{Loc} , obtida com base no regime de vento observado, e a efectuada por recurso ao regime de ventos extrapolado é de particular interesse para o campo da energia eólica. Esta análise permite a valorização da energia contida no escoamento na gama de velocidades do vento que efectivamente se revela importante para um aproveitamento eólico.

O valor máximo aceitável dos desvios cometidos pelo regime de ventos local obtido por extrapolação face ao observado localmente é sempre deixado ao critério do utilizador do método. Refere-se, no entanto, que é comum este valor situar-se abaixo de 5 %, considerando-se que para situações onde se verifiquem erros superiores a utilização do método *MCP* deverá ser cuidadosamente ponderada.

Condições de aplicabilidade do método *MCP*

Embora o método *MCP* esteja apto a dar resposta a um grande número de situações, estão identificadas algumas condições em que o seu desempenho é claramente insuficiente, pondo de parte a sua aplicação. Para que tal não suceda são duas as principais premissas que deverão ser obedecidas aquando da sua utilização:

- 1) o conjunto de dados de base para a elaboração das correlações deverá ter uma duração múltipla da anual;
- 2) a distribuição de ocorrências por sectores da rosa-dos-ventos nos dois pontos de medição deverá ser semelhante.

*Primeira premissa de aplicabilidade do método *MCP**

A primeira premissa está directamente relacionada com o comportamento tipicamente sazonal do vento em latitudes como as de Portugal. A consideração de um período com duração diferente da múltipla da anual poderá desvirtuar a análise, pois as correlações terão na sua base informação não representativa dos regimes de ventos locais. Assim, caso o método seja levado avante, na fase de extrapolação para o longo termo, o regime de ventos estimado poderá, eventualmente, afastar-se da realidade.

Numa situação limite, a tomada de um período com extensão inferior a um ano, mas onde as componentes de Inverno e Verão estejam presentes em proporções idênticas poderá ser suficiente para a prossecução da análise. Porém, tal situação acarreta um aumento significativo dos níveis de incerteza associados aos resultados, não estando assegurada a sua reprodutibilidade caso sejam seleccionados novos períodos para a realização de uma nova correlação.

Como forma de ilustrar esta problemática tomem-se os resultados dos testes efectuados sobre duas séries temporais das características de vento recolhidas em duas estações situadas no Norte de Portugal, próximas do rio Minho. A estação Est_{Ref} e a estação Est_{Loc} , designadas, respectivamente, neste exercício como REF e LOC, funcionam simultaneamente desde do início de 2002, sendo que a estação REF já se encontra em operação desde 1997.

Para evidenciar a influência da extensão do período de amostragem na qualidade da correlação foram seleccionados vários conjuntos simultâneos de dados variando de duração entre 6 meses e dois anos. Foram estabelecidas várias correlações tendo por base os diversos conjuntos de dados. De seguida, com base nas correlações determinadas e recorrendo aos dados da estação REF recolhidos durante os dois anos de funcionamento simultâneo das duas estações, foi possível obter por extrapolação várias descrições do regime de ventos para a estação LOC. Estas foram posteriormente comparadas com o observado na estação LOC durante o mesmo período. Os resultados do exercício mencionado reportam-se nas tabelas 5.1 a 5.3.

Na tabela 5.1 mostram-se os valores de alguns dos principais parâmetros caracterizadores do regime de ventos observado no local da estação LOC durante o biénio 2002/03. O modelo de aerogerador utilizado no cálculo da produção esperada para o local da estação foi o já mencionado no início deste capítulo.

Tabela 5.1 - Características do regime de ventos observado na estação LOC
Dados de Jan02 a Dez03 – Funcionamento simultâneo com estação REF

Vel. [m/s]	7.3
Dist. Weibull	A [m/s]
	8.1
	k
	1.48
Fluxo de pot. [W/m^2]	662
Produção [MWh/ano]	6080

Na tabela 5.2 resumem-se as características do regime de ventos para a estação LOC referente aos anos 2002/03, obtidos por extrapolação dos dados da estação REF e com base nas diversas correlações estabelecidas.

Tabela 5.2 - Características do regime de ventos extrapolado para estação LOC
Dados de Jan02 a Dez03 – Funcionamento simultâneo com estação REF

Período		N.º de dias	Vel. [m/s]	Dist. Weibull		Fluxo de pot. [W/m ²]	Produção [MWh/ano]
				A [m/s]	k		
Abr03 a Set03	Verão	181	7.83	8.7	1.54	771	6689
Jan02 a Jun02	Inverno/Verão	181	7.62	8.4	1.47	758	6357
Jan02 a Dez02	Ano	361	7.50	8.3	1.47	724	6265
Jun02 a Dez03	Ano e meio	520	7.28	8.0	1.45	676	5971
Jan02 a Dez03	Dois anos	701	7.39	8.2	1.45	700	6159

Finalmente, na tabela 5.3 encontram-se os desvios relativos dos parâmetros do regime de ventos extrapolado e observado na estação LOC durante o período compreendido entre Janeiro 2002 e Dezembro 2003.

Tabela 5.3 – Desvios dos regimes de ventos extrapolados face ao observado em LOC
Dados de Jan02 a Dez03 – Funcionamento simultâneo com estação REF

Período		N.º de dias	Desvio [%]				
			Vel.	Dist. Weibull		Fluxo de pot. [W/m ²]	Produção [MWh/ano]
				A [m/s]	k		
Abr03 a Set03	Verão	181	7.3	7.4	4.1	16.5	10.0
Jan02 a Jun02	Inverno/Verão	181	4.4	3.7	-0.7	14.5	4.6
Jan02 a Dez02	Ano	361	2.7	2.5	-0.7	9.4	3.0
Jun02 a Dez03	Ano e meio	520	-0.3	-1.2	-2.0	2.1	-1.8
Jan02 a Dez03	Dois anos	701	1.2	1.2	-2.0	5.7	1.3

Os resultados da anterior análise demonstram com clareza a influência que a extensão do conjunto de dados utilizado para o estabelecimento da correlação tem na sua qualidade final. O aumento da extensão conduz a uma melhoria sensível na qualidade da correlação. Para o caso particular de um conjunto de dados simultâneos inferior a um ano, verifica-se que a opção por um período que abarque a mesma quantidade de dados de Inverno e Verão é mais favorável do que a que incluiu apenas só dados do período de Verão.

Os resultados aqui expostos referem-se a um caso concreto, não sendo de excluir a existência de situações onde os desvios se comportem de forma ainda mais marcada. No entanto, a análise permite demonstrar a importância do respeito pela primeira premissa de aplicabilidade do método *MCP*.

Segunda premissa de aplicabilidade do método MCP

A segunda premissa tem a sua origem na forma utilizada para a construção de *MCV*, e é válida tanto para o Método Matricial de Correlação de Velocidades como para o Método de Correlação Linear de Velocidades. Na base da construção de qualquer uma das duas matrizes está a selecção das ocorrências que se enquadram dentro dos vários sectores da rosa-dos-ventos da Est_{Ref} . Se as rosas-dos-ventos forem muito díspares estar-se-á a tentar estabelecer correlações ao nível de velocidade tendo por base um reduzido volume de informação, não representativa do sector em questão.

Como forma de ilustração da validade desta premissa de aplicabilidade do método *MCP* tome-se o seguinte exemplo. Na figura 5.4 constam as rosas-dos-ventos observadas durante o período simultâneo para dois casos reais onde se tentará correlacionar o regime de ventos. No primeiro caso, conhecido doravante por situação A, a distribuição de ocorrências pelos sectores da rosa-dos-ventos demonstra alguma semelhança. No segundo caso, designado por situação B, as rosas-dos-ventos exibem formas díspares. Refere-se ainda que na base de qualquer uma das correlações esteve um ano de dados, cumprindo, portanto, a primeira premissa da aplicabilidade do método *MCP*, e que a distância entre a Est_{Loc} e Est_{Ref} de cada uma das situações é de cerca de 3 km.

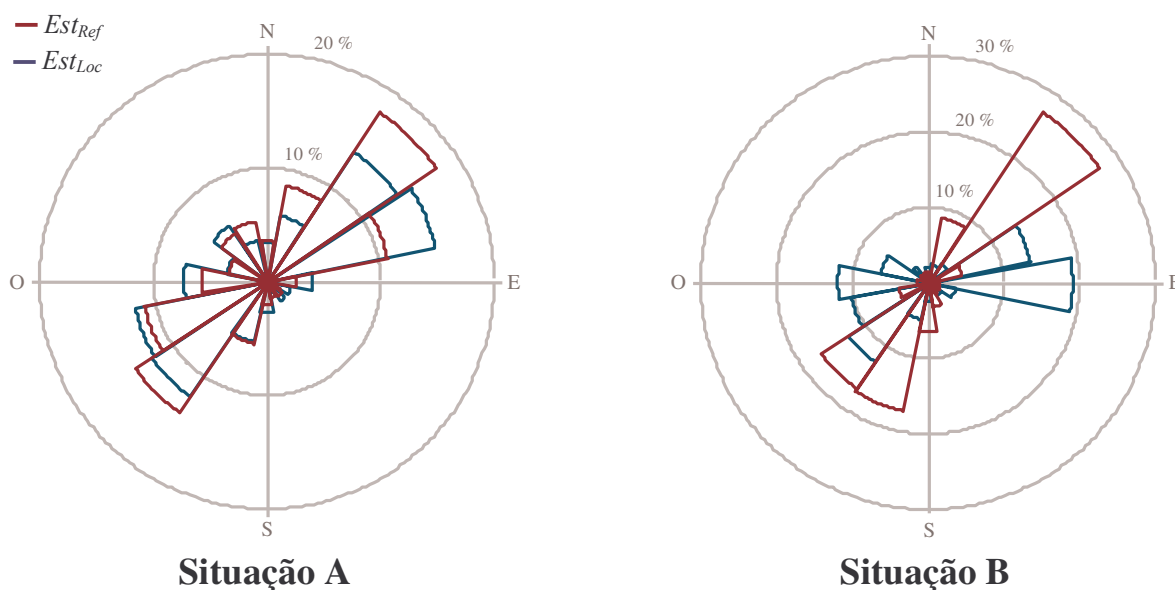


Figura 5.4 - Rosas-dos-ventos simultâneas para duas situações de correlação reais
Dados de Mar03 a Fev04

Espera-se que a reprodução do regime de ventos na situação A seja de boa qualidade, uma vez que se cumprem as condições de aplicabilidade do método *MCP*. As maiores diferenças residem na transferência de ocorrências entre os sectores 3 e 4, podendo tratar-se de situações em que o rumo dominante é próximo do limite entre os dois sectores. Já na situação B, a qualidade da correlação deverá ser reduzida. Na figura 5.5 mostram-se os resultados da aplicação do método através da comparação entre a rosa de energia observadas e previstas para as duas situações.

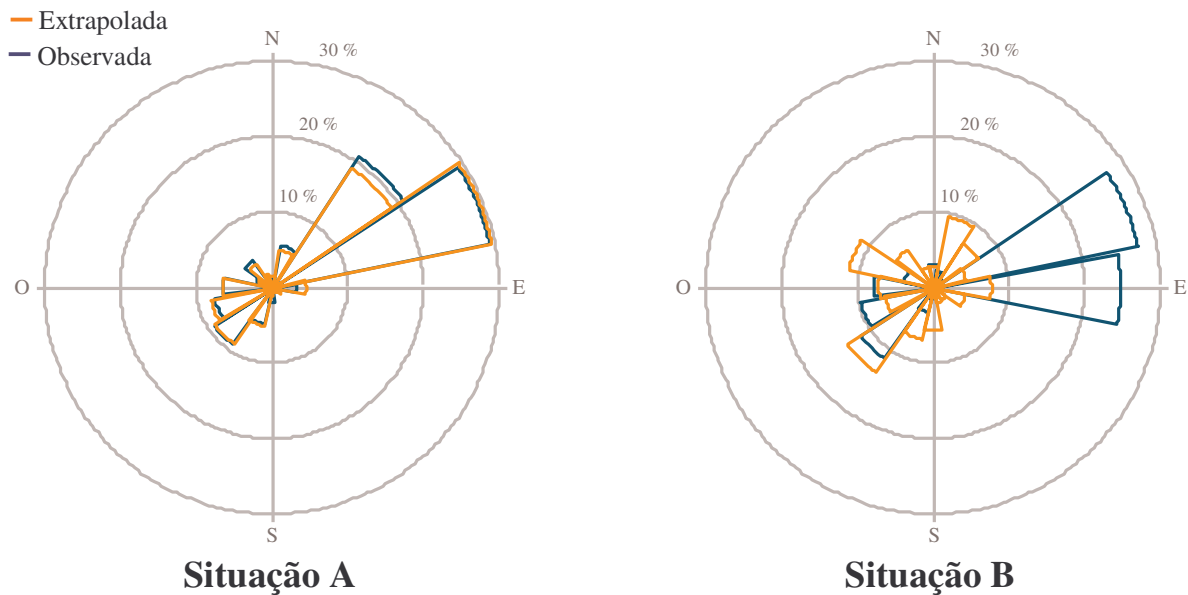


Figura 5.5 - Rosa de energias observadas e extrapoladas para duas situações de correlação reais
Dados de Mai01 a Abr02

Na situação A o desvio entre a velocidade média observada e prevista para o período que serviu de base à correlação é residual, situando-se em cerca de 0,8 %. Já para a situação B, este erro cifra-se em cerca de 25 %, notando-se também grandes dificuldades para a correcta reprodução da rosa de energia. Um dos poucos sectores onde se consegue uma reprodução aceitável é o 11, sendo por sua vez também aquele onde o número de ocorrências é semelhante nas duas estações.

Os grandes desvios obtidos na situação B resultam do estabelecimento de correlações entre informação que não é representativa do regime de ventos do sector em análise, uma vez que a sua selecção é conseguida apenas por recurso à direcção observada em Est_{Ref} . Se as rosas-de-ventos forem muito díspares a correlação estará a ser estabelecida entre dados pertencentes ao sector j na Est_{Ref} e $j+x$ na Est_{Loc} . Uma forma de mitigar esta situação será a redução do número de sectores considerados, diminuindo a probabilidade de considerar sectores diferentes na correlação, mas perdendo qualidade no que toca à descrição do clima de ventos.

Alguns autores [5.6] propõem uma estratégia diferente para ultrapassar o problema acima enunciado. Para a tentativa de correlação do regime de ventos entre estações sugerem a definição de sectores de dimensão variável de forma a assegurar a sua representatividade individual. Porém, os resultados conseguidos não são uma melhoria sensível ao método aqui avançado, sendo que para casos extremos, como o da Situação B, não se espera qualquer tipo de progresso.

Outra alternativa para melhor os resultados da correlação MCP será a selecção de uma base temporal de trabalho mais alargada [5.7]. Usualmente, para estações muito afastadas os mecanismos responsáveis pela variação das características do vento nos dois locais são distintos. Se a base temporal da correlação for muito fina estar-se-á a tentar correlacionar fenómenos que não têm uma

relação directa entre si. Como boa prática, aconselha-se para estações muito afastadas o aumento da base temporal da correlação, através de médias horárias dos valores da direcção e velocidade, devendo ter-se sempre presente que esta operação poderá ser responsável pela “eliminação” de alguns fenómenos contido na série de ventos original, de maior resolução.

Comparação entre os dois métodos de correlação de velocidades

Como análise comparativa entre o desempenho do Método Matricial de Correlação de Velocidades e do Método de Linear Correlação de Velocidades foram realizados testes sobre dados de reais.

Para a análise do comportamento dos dois métodos estabeleceram-se várias correlações. De seguida, foram realizadas diversas previsões do regime de ventos para o período de dados que esteve na base de cada correlação para posterior comparação com o observado localmente no mesmo período.

A análise teve por base os dados das características de vento recolhidas em 17 estações anemométricas situadas nas zonas Norte e Centro de Portugal, em terrenos de complexidade orográfica elevada que, como tal, colocam dificuldades acrescidas à aplicação dos métodos propostos. Na figura 5.6 está representada a sua localização.

Os 15 pares de estações testados localizam-se sempre a uma distância inferior a 50 km entre si, procurando-se assim assegurar que os fenómenos que estão na génese da variação temporal das características instantâneas de vento sejam os mesmos nos dois locais.

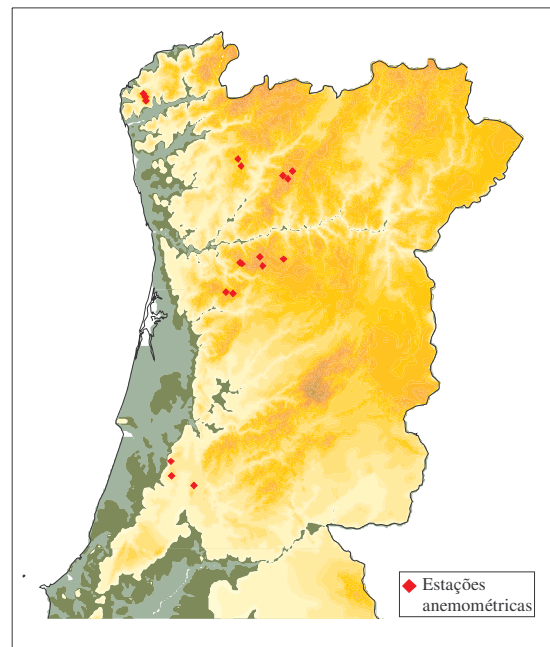


Figura 5.6 - Localização das estações de validação

O horizonte temporal da informação empregue nesta análise estende-se desde Março de 2001 até Dezembro de 2004, sendo que o período que esteve na base de correlação teve sempre a duração de um ano. No total foram processados mais de 28 anos de dados.

Todas as correlações foram realizadas com base em séries de velocidade e direcção do vento medidas em intervalos de 10 minutos. A amplitude das classes de velocidade seleccionada para a realização das correlações foi de 1m/s, enquanto que para os intervalos de direcção se optou por uma amplitude de 30°.

Comparando o desvio entre os valores da velocidade média, A , k e fluxo de potência observados localmente e os previstos através da correlação pelos dois métodos foi possível aferir do seu desempenho.

A figura 5.7 ilustra os resultados do teste à *performance* dos dois métodos sob a forma de desvios relativos das estimativas de velocidade média para as 15 situações analisadas retirados da informação relativa à sobre estimativa ou sub estimativa. No Anexo I mostram-se os resultados detalhados da comparação do desempenho dos dois métodos de correlação de velocidade descritos.

Os dois métodos demonstram um desempenho semelhante quando analisados ao nível da velocidade média, com o desvio médio absoluto obtido para os 15 casos testes com o *MMCV* a situar-se cerca de um ponto percentual acima do calculado para o *MLCV*.

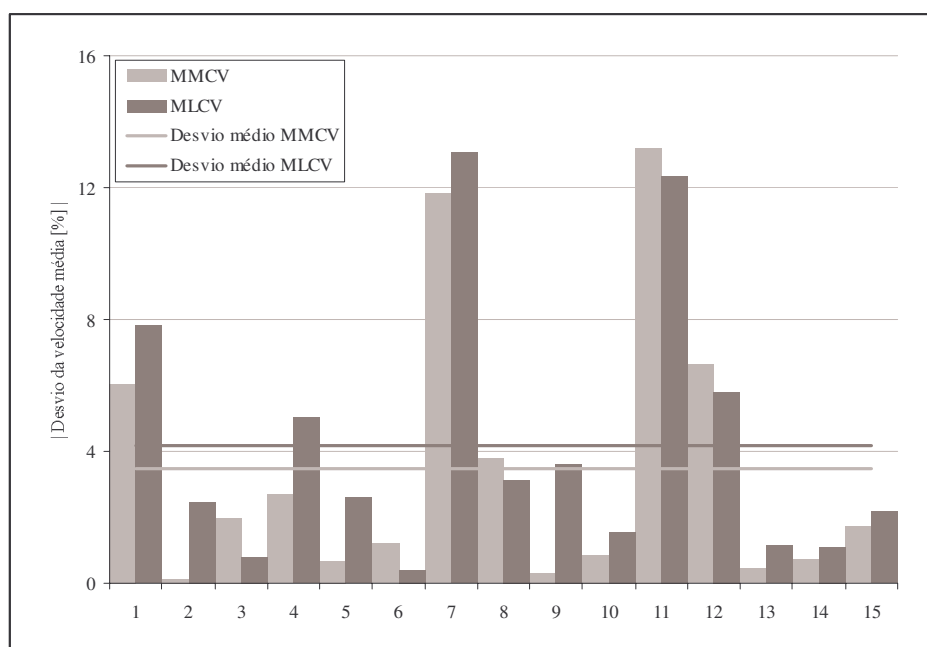


Figura 5.7 - Comparação do desempenho entre os dois métodos de correlação da velocidade
Desvios relativos entre estimativas e observações locais da velocidade média

O parâmetro velocidade média tomado isoladamente não é suficiente para a avaliação do desempenho deste tipo de correlação. A sua análise conjunta com o parâmetro fluxo de potência e, principalmente, com a produção de referência de um aerogerador, permitem uma quantificação muito mais completa da sua qualidade. Nas figuras 5.8 e 5.9 mostra-se o valor do desvio em termos absolutos associado ao regime de ventos extrapolado face ao observado no local sob a forma de, respectivamente, fluxo de potência e produção de um aerogerador, estimado pelos dois métodos.

Para o indicador fluxo de potência os resultados obtidos com o *MMCV* são consistentemente de melhor qualidade que os conseguidos pelo método alternativo. Em termos médios absolutos, o *MMCV* apresentou um desvio de 7,6 % em fluxo de potência para os 15 casos analisados, enquanto que para o *MLCV* este parâmetro se situou em 11,9 %.

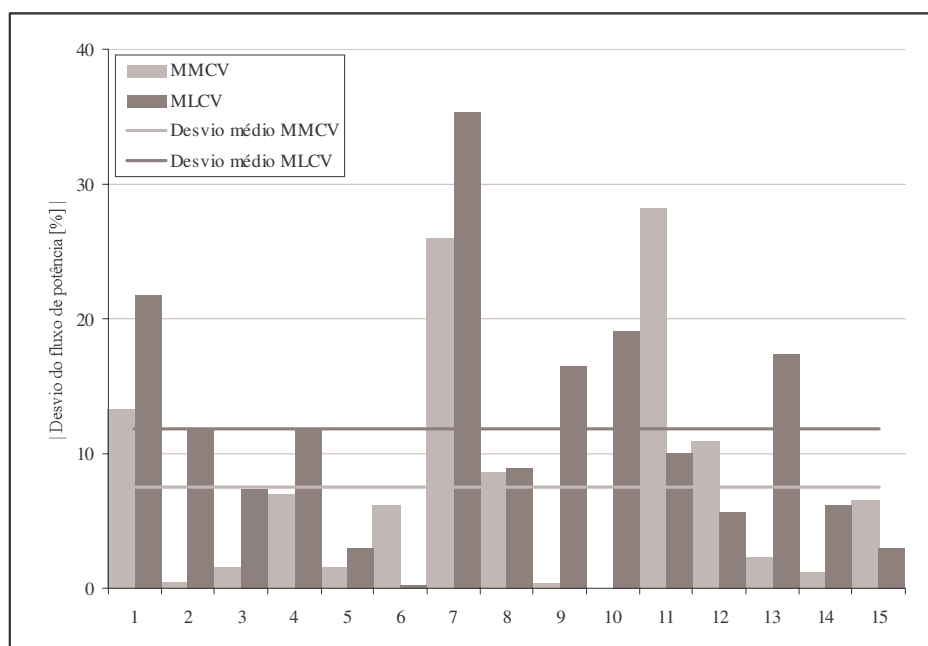


Figura 5.8 - Comparação do desempenho entre os dois métodos de correlação da velocidade
Desvios relativos entre estimativas e observações locais do fluxo de potência

Analisando o desempenho dos dois métodos à luz do indicador produção de um aerogerador, as diferenças esbatem-se. O desvio médio relativo em termos de produção de um aerogerador situa o *MLCV* cerca de 2,5 pontos percentuais abaixo do *MMCV*. Refere-se que, também neste caso, na base do cálculo deste parâmetro estiveram as características do modelo de aerogerador referenciadas no início do presente capítulo.

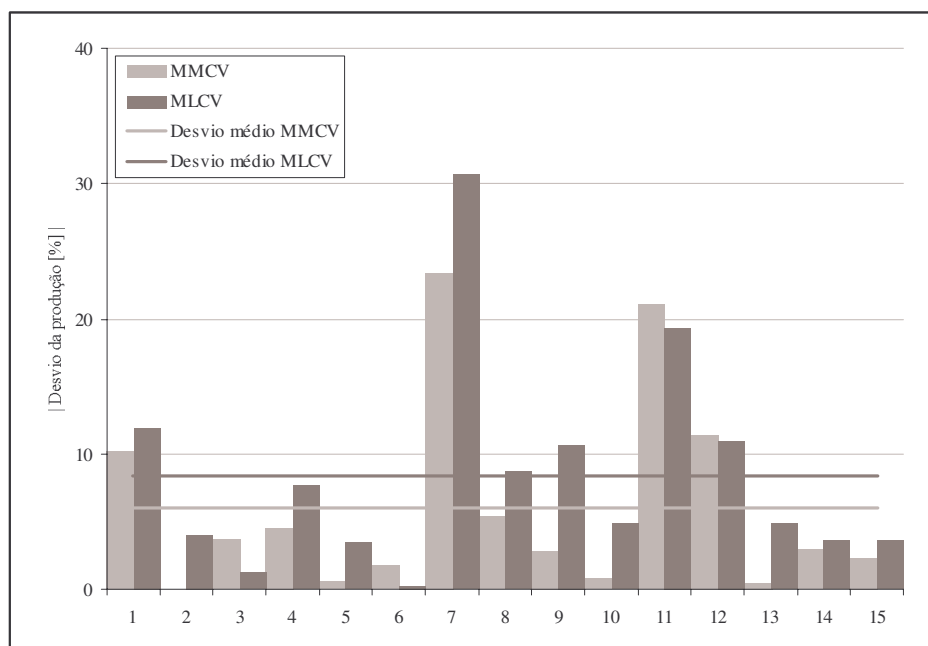


Figura 5.9 - Comparação do desempenho entre os dois métodos de correlação da velocidade
Desvios relativos entre estimativas e observações locais da produção de aerogerador de referência

Numa análise global ressalta o melhor desempenho do *MMCV* face ao *MLCV*. Nota-se que os resultados obtidos pelo *MLCV* são consistentemente mais conservadores quando comparados com os conseguidos pelo *MMCV*.

Os resultados obtidos são apenas indicativos, uma vez que não foi tida em consideração a influência de um grande número de variáveis. A escolha de períodos de base à correlação de maior extensão, uma amplitude diferente dos intervalos da velocidade e sectores de direcção, ou mesmo a opção por uma base temporal de trabalho superior poderia conduzir a resultados diferentes. Porém, parece clara a tendência para o melhor desempenho do Método Matricial de Correlação de Velocidades face Método Linear de Correlação de Velocidades.

6 Classificação da severidade do regime de ventos

A classificação da severidade do regime de ventos de um local para onde se espera a instalação de aerogeradores é de grande importância para a viabilidade de um aproveitamento eólico, pois é com base nos resultados desta análise que será definida a qualidade construtiva dos aerogeradores e fundações que compõem o parque eólico.

A opção por aerogeradores robustos e resistentes implica geralmente uma diminuição do desempenho com origem na diminuição do diâmetro rotórico e da altura de torre. Aerogeradores com estas características implicam também o emprego de uma maior quantidade de matérias-primas na sua construção. Estas duas situações aliadas contribuem para uma diminuição da competitividade da máquina em causa, podendo, no final, por em causa a viabilidade global do projecto.

Em alternativa à selecção de aerogeradores de qualidade construtiva superior, é possível escolher uma máquina de menor resistência mecânica que, por ser menos cara e exibir melhores características ao nível da conversão de energia, poderá permitir a exequibilidade do projecto. No entanto, a seu correcto funcionamento durante a vida útil do parque poderá ser comprometido, já que a previsível maior frequência de paragens para manutenção do aerogerador acarretará um prejuízo significativo. Numa situação limite, poderá mesmo ocorrer o colapso do aerogerador. Tal será ainda mais penalizante caso se verifique nos primeiros anos do projecto, altura onde o investimento ainda estará em fase de amortização. Na figura 6.1 mostra-se o possível resultado da selecção incorrecta do tipo de aerogerador.



Figura 6.1 - Possíveis consequências da incorrecta selecção de aerogeradores

As situações ilustradas na figura 6.1 tiveram lugar Vechta, Noroeste da Alemanha, durante Outubro de 2002 [6.1] e na província de Navarra em Espanha, em Dezembro de 2003 [6.2], e foram resultado de tempestades de intensidade anormalmente alta. Condições atmosféricas extremas, incluindo velocidades do vento elevadas, levaram ao colapso total dos aerogeradores.

Como comprovado pelos dois exemplos anteriores, a acção exterior crítica em todo o processo de dimensionamento da maioria das componentes do aerogerador e suas fundações é, naturalmente, o vento. É com base no regime de ventos no local do parque eólico que será definida a qualidade construtiva dos aerogeradores aí a instalar. De modo a tornar mais expedito o processo de selecção dos aerogeradores foram criadas normas para certificação de estruturas, nas quais se incluem os aerogeradores, dentro de determinados critérios de segurança.

A nível nacional, é no Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes [6.3] que são explicitados o modo de quantificação das acções a ter em conta no dimensionamento das estruturas e os critérios de verificação de segurança. Este documento não é dedicado, nem se adequa, ao caso particular dos aerogeradores. No entanto, é o único português.

A nível internacional, embora existam outra, é de aceitação geral a norma IEC 61400 - Parte 1 [6.4] para certificação da qualidade construtiva de aerogeradores, função das condições exteriores de funcionamento.

6.1 O regulamento português

O Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, RSAEEP, rege a verificação da segurança em estruturas de edifícios e pontes e data de 1983. Embora tenha já mais de 20 anos de existência, este regulamento mantém-se ainda válido. A actualização deste tipo de normas é feita em períodos muito alargados. O regulamento que o actual veio substituir tem a data longínqua de 1929.

Na altura de criação do RSAEEP a segurança de aerogeradores não era ainda uma preocupação. Como tal, este documento não contempla uma parte exclusivamente dedicada a este tipo de estrutura. É apenas possível recorrer ao RSAEEP para, no limite, determinar as acções exteriores exercidas sobre a torre do aerogerador. Contudo, mesmo este exercício se revela improdutivo, pois a consideração da acção do vento pelo RSAEEP sobre as estruturas, factor crítico no projecto de um aerogerador, é de extrema simplicidade, desconsiderando inúmeros aspectos relevantes.

Segundo o RSAEEP os esforços resultantes da acção do vento sobre uma estrutura são função da localização dessa estrutura em Portugal, das características do terreno na sua vizinhança e da sua forma. Embora se consideram aspectos importantes para a definição de esforços com origem no vento sobre estruturas, a seu efeito é encarado de uma forma muito simplificada. São apenas considerados dois níveis de intensidade do vento, função, fundamentalmente, da altitude. Para zonas acima de 900 m a estrutura estaria enquadrada no regime de ventos mais severo; todas as outras instaladas abaixo da cota 900 estariam sob efeito de um regime de ventos menos severo. Esta divisão não serve o propósito específico que é a determinação da qualidade construtiva de um aerogerador pela especificidade local dos regimes de vento.

É também considerada a influência do tipo de superfície que rodeia a estrutura. À semelhança da severidade do regime de ventos apenas se consideram duas situações possíveis. Todas as construções que se inserem num ambiente urbano verão a acção do vento atenuada face a construções situadas fora das cidades. Novamente o rigor deste critério não satisfaz os requisitos para o projecto de um aerogerador pela simplicidade como lida com o efeito da rugosidade do solo na vizinhança da estrutura sujeita à acção do escoamento.

Por fim, a forma estrutura é tomada em consideração pelo RSAEEP através da introdução de coeficientes de forma no resultado final. Estes coeficientes são função do formato da estrutura ou da disposição dos vários elementos que a compõem. Os seus valores encontram-se tabelados para um grande leque de estruturas e dimensões. Porém, para o caso particular de um aerogerador apenas é possível, no limite e desconsiderando o efeito das pás em rotação, determinar o coeficiente de forma da torre. Uma vez mais tal se revela totalmente insuficiente.

Contudo, o RSAEEP reconhece as suas limitações e no Artigo 8, ponto 4, abre caminho a métodos alternativos de verificação de segurança de estruturas, desde que devidamente justificados e “que conduzam a uma quantificação mais objectiva da segurança”.

6.2 A norma IEC 61400 – Parte 1

A nível internacional é de aceitação comum a adopção da norma IEC 61400 – Parte 1 para a certificação da qualidade construtiva de aerogerador, função das acções exteriores.

A IEC (International Electrical Commission) é uma instituição de âmbito mundial, compreendendo um grande número de comités nacionais. O principal objectivo da IEC é a promoção da cooperação internacional em todas as questões relacionadas com a normalização nos campos da electricidade e electrónica. Com vista a este fim, entre outras actividades, a IEC publica regularmente normas internacionais.

A norma IEC 61400 – Parte 1, publicada em 1994 e revista em 1999, lida com a problemática da segurança de instalação e operação dos aerogeradores. Especifica os requisitos de segurança dos aerogeradores no que toca a aspectos relacionados com o seu projecto, instalação, manutenção e operação, tendo como referência as condições exteriores. O seu propósito é a promoção de um nível de protecção elevado de todo o sistema contra situações catastróficas que possam vir a ocorrer durante a sua vida útil. Todos os aerogeradores com uma área de varrimento superior a 40 m² deverão estar de acordo com a referida norma.

A norma IEC 61400 – Parte 1 faz o enquadramento em classes de robustez para definir a qualidade construtiva dos aerogeradores. São propostas quatro classes, função da severidade do regime de ventos local. Os parâmetros utilizados na definição do regime de ventos são: a velocidade média anual do

vento, V_{ave} ; a velocidade máxima expectável do vento para um período de retorno de 50 anos, V_{ref} , e a intensidade de turbulência para a gama de velocidades dos 15 m/s, It_{15} , todos determinados para o local de instalação do aerogerador e para a altura ao solo a que se encontra instalado o eixo do rotor. Na tabela 6.1 encontram-se representados os valores definidores das várias classes.

Tabela 6.1 - Classes de aerogeradores segundo IEC 61400 – Parte 1

Classes		I	II	III	IV	S
V_{ref} [m/s]		50.0	42.5	37.5	30.0	
V_{ave} [m/s]		10.0	8.5	7.5	6.0	Valores a definir
It_{15}	A	0.18	0.18	0.18	0.18	
	B	0.16	0.16	0.16	0.16	

A existência da classe S de aerogeradores destina-se às situações onde o regime de ventos do local de instalação não se enquadra em numa das restantes classes. Nesta situação os parâmetros utilizados no projecto do aerogerador serão responsabilidade do projectista e deverão reflectir a severidade das condições a que irá ser sujeito o aerogerador.

Para a determinação de cada um dos parâmetros definidores da classe do aerogerador é prática comum recorrer-se aos dados provenientes das medições das características do vento num local próximo do sítio onde se prevê a instalação do aerogerador e recolhidos a uma altura próxima da altura de h_r .

Com base nos dados de vento recolhidos localmente e recorrendo a *software* de simulação do escoamento é relativamente acessível a determinação do parâmetro V_{ave} . Do mesmo modo é geralmente possível determinar o valor de It_{15} .

No entanto, o cálculo do valor de V_{ref} reveste-se de uma dificuldade adicional, uma vez que se trata da previsão do valor máximo de uma grandeza para uma período temporal alargado, tendo por base um conjunto de dados de curta duração.

Determinação de velocidades extremas

Para o cálculo de V_{ref} sugere-se aqui a utilização do método de Gumbel, especialmente adaptado às características particulares das séries temporais da velocidade e direcção do vento. Este método, proposto por Gumbel [6.5], foi desenvolvido inicialmente como forma de previsão dos caudais máximos de rios, visando o correcto dimensionamento de aproveitamentos hidroeléctricos.

No método de Gumbel tradicional a distribuição de eventos extremos é composta pelo valor máximo anual da grandeza em análise. Tal é exequível pois o método foi desenvolvido para a aplicação a séries hidrológicas, caracterizadas pela sua longa duração, geralmente superior a dez anos. Porém, no caso particular das séries de vento, usualmente não se dispõe de informação de extensão muito superior a

dois anos, resultando a aplicação directa do método na selecção de uma amostra não representativa da distribuição de eventos extremos.

A variante ao método de Gumbel aqui proposta para a determinação de V_{ref} é composta por em três fases sequenciais. Na primeira fase é definida a distribuição de eventos extremos. Na segunda fase essa distribuição é caracterizada. Por fim, caracterizada a distribuição de eventos extremos e recorrendo à noção de tempo de retorno, é possível determinar V_{ref} .

Para a definição da amostra de eventos extremos propõe-se uma nova abordagem. A definição de evento extremo toma em consideração o limite superior da gama de funcionamento dos actuais aerogeradores. Assim, o limiar inferior da distribuição de ventos, u_0 , é definido da forma que se segue: considera-se evento extremo todo aquele cuja velocidade, à altura do eixo da turbina corresponda a velocidades do vento superiores a 25 m/s.

Para a determinação da série de velocidade do vento à altura do eixo do rotor da turbina recorre-se à noção de perfil vertical de velocidades enunciada no sub-capítulo 4.4. Através da aplicação do perfil de velocidades instantâneo aos dados recolhidos localmente obtém-se uma série de velocidade de vento à altura do eixo do rotor do aerogerador. No caso em que não existam registos de velocidade que cumpram o critério enunciado, poderá o mesmo ser alterado, baixando o limite da velocidade mínima da distribuição de eventos extremos.

Ultrapassada a primeira fase da metodologia é necessário caracterizar a distribuição de eventos extremos. Segundo Castillo [6.6] a distribuição de ventos extremos aproxima-se sistematicamente de uma distribuição de Gumbel⁵, $G(u)$:

$$G(u) = e^{-e^{-\left(\frac{u-\lambda}{\delta}\right)}} \quad (6.1)$$

onde λ e δ são, respectivamente, o parâmetro de escala e de forma da distribuição. Estes dois parâmetros poderão ser interpretados de uma forma análoga aos factores de escala e de forma da função de Weibull. Para a sua determinação propõe-se a utilização de dois métodos alternativos: o tradicional Método da Regressão Linear e o Método dos Momentos.

O *MRL* faz uso da característica linear da função de Gumbel, quando aplicada uma transformação logarítmica. A variável transformada de $G(u)$, $\eta(u)$, é dada pela seguinte expressão:

$$\eta(u) = -\ln \left[\ln \left(\frac{1}{G(u)} \right) \right] \quad (6.2)$$

⁵ Para outros fenómenos que não as ocorrências extremas de vento, a distribuição de ocorrências extremas poderá ser melhor aproximada por outras distribuições, tais como as de Weibull ou Frechet.

Substituindo a expressão (6.1) em (6.2) tem-se que $\eta(u)$ é igual a:

$$\eta(u) = \frac{u - \lambda}{\delta} \quad (6.3)$$

A determinação dos parâmetros da função de aproximação é conseguida pela regressão linear da distribuição real transformada.

Na utilização do *MM*, para a determinação dos parâmetros característicos da distribuição de ventos extremos, recorre-se ao estabelecimento da igualdade entre os momentos de primeira e segunda ordem da distribuição real e da distribuição aproximada. Tal é traduzido por:

$$\bar{v} = \lambda - \xi \cdot \delta \quad (6.4)$$

$$\omega_v^2 = \frac{\pi^2 \delta^2}{6} \quad (6.5)$$

em que $\bar{v}$ é a velocidade média da distribuição de extremos e ω é a sua variância. O parâmetro ξ é a constante de Euler e igual 0,5772.

Como forma de selecção do método a utilizar sugere-se a auto-previsão da velocidade máxima expectável para o período de dados que serve de base à análise e posterior comparação do seu valor com o efectivamente observado. O método que permitir um erro menor deverá ser o preferido.

Por fim, recorrendo à definição de tempo de retorno, t_r , é possível determinar a relação entre a velocidade máxima expectável e o tempo necessário para que ela ocorra. No método clássico de Gumbel, o tempo de retorno para que o valor da grandeza em análise exceda um determinado valor é função de $G(u)$, determinada tendo por base os seus valores máximos anuais:

$$t_r(u) = \frac{1}{1 - G(u)} \quad (6.6)$$

Na variante à metodologia de Gumbel proposta, a equação (6.6) deverá ser afectada pela razão entre o número de eventos extremos, m_{ext} , e o número de anos que estiveram na base da análise, M_{ext} :

$$t_r(u) = \frac{1}{1 - G(u)} \cdot \frac{M_{ext}}{m_{ext}} \quad (6.7)$$

É neste ponto que reside a principal diferença entre o método de Gumbel clássico e a metodologia aqui empregue. No método de Gumbel clássico, a selecção dos valores máximos anuais implica a suposição que a sua ocorrência é de periodicidade anual. Na metodologia aqui proposta, a selecção de um conjunto de valores extremos, implica a suposição que estes ocorrem com uma periodicidade regular dada pela razão entre o número de eventos extremos e o número total de eventos do conjunto que está na base da análise. Tal implica a correcção da expressão 6.6 na forma indicada pela expressão 6.7.

Na figura 6.2 mostra-se a variação típica da velocidade máxima expectável do vento com tempo de retorno, prevista para um local onde se espera instalar um aproveitamento eólico.

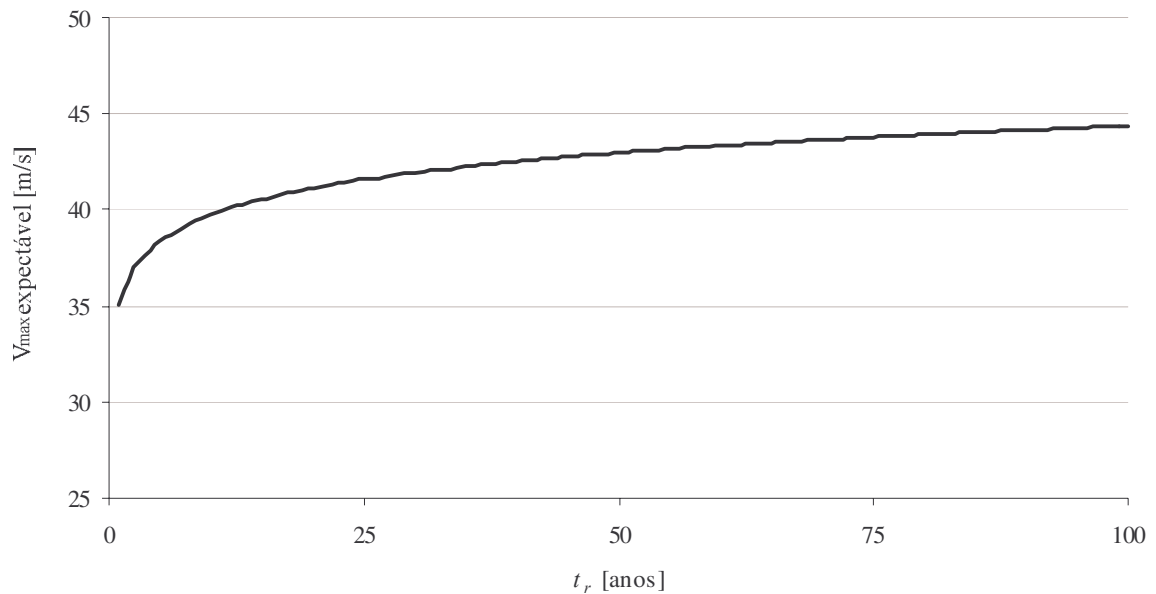


Figura 6.2 - Variação típica da velocidade máxima expectável com t_r .

Âmbito de aplicação e limitações da metodologia de estimativa de velocidade extrema

A utilização da metodologia avançada não deverá ser arbitrária, devendo obedecer a duas condições fundamentais:

- O conjunto de dados que serve de base à análise deverá ter a maior extensão possível, de forma a diminuir o nível de incerteza associado aos resultados finais. Aconselha-se que a sua duração seja sempre superior a dois anos.
- A informação utilizada na análise deverá sempre referir-se a períodos múltiplos do anual, de modo a incorporar correctamente os efeitos relacionados com a sazonalidade da intensidade do vento típica de Portugal continental.

Mais se refere que o não cumprimento destas duas condições poderá levar a desvios significativos das estimativas de velocidade máxima expectável, face ao eventualmente observado.

As limitações desta metodologia assentam principalmente nos seguintes aspectos:

- A estimativa do valor máximo de uma determinada grandeza para um período tão alargado como são 50 anos, tendo por base um conjunto de dados geralmente muito restrito, leva indubitavelmente a um acréscimo sensível da incerteza associada à previsão.
- Devido à forma peculiar da distribuição de extremos, nem sempre a qualidade de ajuste da função de Gumbel é a desejada. Tenta-se limitar esta situação disponibilizando dois métodos alternativos para conseguir este desiderato.
- A definição do limiar inferior da distribuição de extremos baseou-se, fundamentalmente, no limite superior da gama de velocidades dos modernos aerogeradores. Contudo, este ponto não é consensual, pois em casos limite, poderão ser consideradas ocorrências que não têm um carácter extremo.

Contudo, a observância das condições enumeradas anteriormente minora significativamente desvios que possam ocorrer aquando da determinação de V_{ref} .

Comparação entre o método de Gumbel clássico e a variante apresentada

Para a aferição do desempenho do método de Gumbel e a variante aqui proposta foram efectuados vários testes em três séries de velocidade do vento recolhidas em três locais situados no Norte de Portugal. As três séries de dados serviram também para elaboração de uma análise comparativa à performance obtida com a variante ao método de Gumbel clássico associado alternadamente ao Método da Regressão Linear e ao Método dos Momentos.

Testou-se a metodologia proposta em séries das características de vento recolhidas na Serra d'Arga, na Serra do Alvão e na Serra de Montemuro. A escolha destes locais assentou em dois argumentos principais:

- 1) Dispõe-se aí de séries relativamente extensas de dados de vento,
- 2) os seus regimes de vento são distintos, cobrindo as zonas mais representativas do Norte de Portugal.

As medições conduzidas em cada um dos sítios foram realizadas sob uma óptica inicial de caracterização do recurso eólico local. No entanto, devido à sua localização e ao conjunto de dados de que dispunham optou-se por mantê-las em funcionamento para que servissem de referência a posteriores estudos. As principais características dos regimes de vento dos três locais são indicadas na tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Características do regime de ventos

Estação	Arga	Montemuro	Alvão
Altura de medição [m]	30	30	10
Duração da série [anos]	4	10	8
Disponibilidade [%]	92	96	84
Velocidade média [m/s]	6,9	6,3	6,2
Dist. Weibull	A [m/s]	7,4	7,0
	k	1,51	1,93
Velocidade máxima [m/s]	34,4	24,6	28,7
Rajada máxima [m/s]	45	36	39
Fluxo de potência [W/m ²]	453	287	263

A extensão das séries de dados seleccionadas proporciona boas condições para o teste ao desempenho do *MM* e do *MRL*. Refere-se que a definição de u_0 foi alvo, neste local, de simplificação, considerando-se evento extremo todo aquele cuja velocidade é superior a 20 m/s à altura a que foram conduzidas as medições.

Na tabela 6.3 encontram-se as previsões da velocidade máxima do vento para a extensão total de cada série, realizadas recorrendo ao método de Gumbel clássico e à variante aqui proposta segundo o *MM* e o *MRL*, tendo por base toda a informação de vento disponível.

Tabela 6.3 - Desempenho dos métodos de determinação de velocidades máximas

Estação	Arga	Montemuro	Alvão
Duração [anos]	4	10	8
Disponibilidade [%]	92	96	84
Vel _{máx} [m/s]	34,4	24,6	28,7
Vel _{máx} prevista e Erro [m/s; (%)]	Gumbel clássico	36,5 (6,0)	27,7 (9,5)
	Variante <i>MM</i>	35,1 (1,9)	26,3 (6,5)
	Variante <i>MRL</i>	33,6 (2,4)	25,0 (1,6)
Vel _{Ref} [m/s]	Gumbel clássico	41,7	30,6
	Variante <i>MM</i>	39,3	27,5
	Variante <i>MRL</i>	38,0	26,4

O desempenho do método de Gumbel clássico é claramente insuficiente, com os desvios na estimativa de velocidade máxima para os casos estudados a atingirem valores na ordem dos 10 %, mesmo trabalhando com séries temporais de grande extensão.

Numa situação de grande volume de informação, o Método da Regressão Linear parece exibir um comportamento de qualidade superior ao do Método dos Momentos. Porém, mais interessante do que avaliar o comportamento dos dois métodos tendo por base períodos de referência, *PR*, dilatados, é analisar o seu desempenho para *PR* da ordem de um ou dois anos, visto ser esta, tipicamente, a duração das campanhas de medição das características de vento visando o seu aproveitamento energético.

Com este objectivo, seleccionaram-se diversos *PR* dentro da série original e, da aplicação da metodologia, previu-se a velocidade máxima do vento para a duração completa da série original. Desta feita, o erro de previsão é o erro médio relativo entre a velocidade máxima estimada para a extensão total da série original e a velocidade máxima registada na série original para os diversos *PR* seleccionados com a mesma duração. Pela baixa qualidade dos resultados obtidos com o método de Gumbel clássico, a presente análise foi prosseguida apenas para a variante aqui proposta, e teve por objectivo avaliação comparativa dos métodos *MRL* e *MM*. Na figura 6.3 mostram-se os resultados desta análise.

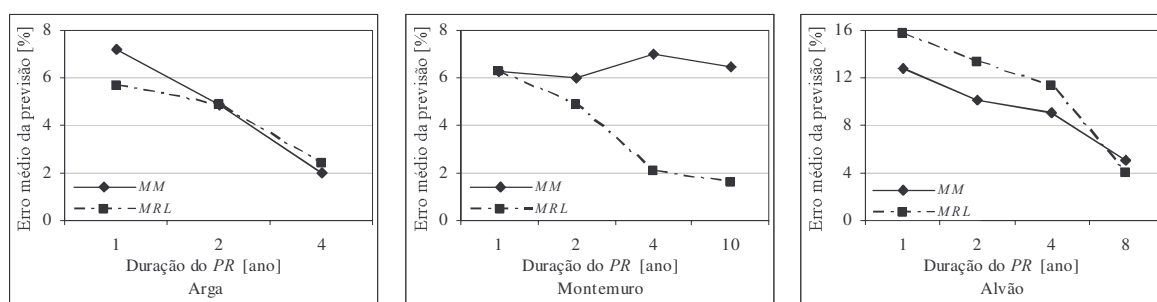


Figura 6.3 - Influência da extensão de *PR* na qualidade das estimativas da velocidade máxima

A investigação da influência do *PR* na variabilidade dos resultados dos dois métodos foi também merecedora de atenção. Para tal analisou-se o desvio padrão das estimativas de velocidade máxima para 50 anos, σ_{50} , partindo de vários *PR* com a mesma duração. Na figura 6.4 encontram-se os resultados deste exercício.

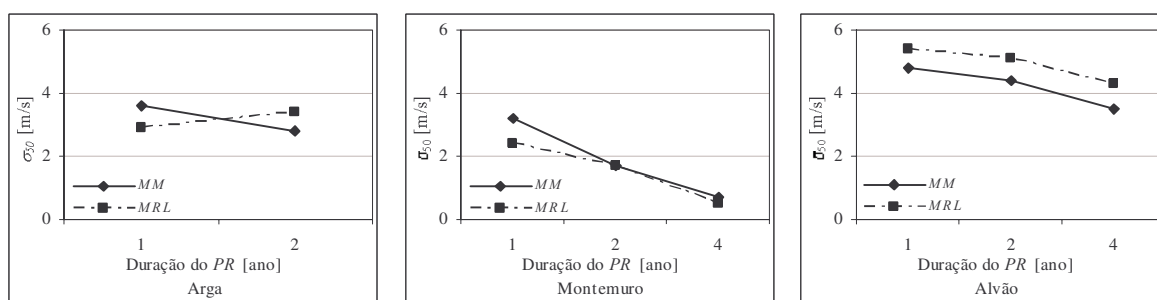


Figura 6.4 - Influência da extensão de *PR* na variabilidade das estimativas da velocidade máxima

O encurtamento do *PR*, tanto para o *MM* como para o *MRL*, leva a uma diminuição sensível da qualidade das estimativas. Excepção a esta regra é o caso da série de ventos de Montemuro, onde o *MM* conduz a um erro praticamente independentemente da duração do período de referência. O erro médio, para os dois métodos, quando se consideram períodos de 2 anos, duração típica das campanhas de medição, situa-se nos 7 %. Este valor vem influenciado pelas estimativas realizadas para a Serra do Alvão. Para este caso, devido à grande variabilidade inter anual da velocidade máxima registada, os resultados obtidos pelos dois métodos revelam-se mais distantes da realidade.

Da comparação dos dois métodos verifica-se que o *MRL* apresenta resultados em maior concordância com as medições, nomeadamente em períodos de retorno mais dilatados. Porém, a diferença relativamente aos resultados do outro método é marginal.

Da aplicação da metodologia avançada, para vários *PR* das séries originais, conclui-se que o *MM* demonstra uma menor variabilidade dos valores estimados para um período de retorno de 50 anos, relativamente ao *MRL*.

Pela variabilidade dos resultados da análise efectuada verifica-se que a opção por um dos métodos propostos deverá ser sempre tomada em função dos resultados particulares à situação em análise.

7 Aplicação informática para caracterização de regimes de vento

Tendo por objectivos a implementação das metodologias anteriormente descritas para o processamento de informação de vento, a caracterização do regime de ventos sob o ponto de vista energético e o aumento da representatividade da sua descrição foi construída uma aplicação informática.

A utilização de um sistema de análise computacional fechado é de grande utilidade em situações que envolvem o processamento de grandes volumes de informação. Por um lado, permite a uniformização de procedimentos, tornando mais rápida a restreabilidade das acções realizadas sobre toda a informação. Por outro, minora a intervenção humana em tarefas repetitivas, evitando possíveis erros por desatenção causada por fadiga do utilizador.

Um sistema deste tipo, se bem planeado e dirigido às necessidades do utilizador, terá por vantagem a diminuição do tempo necessário para a realização de processos intermédios, contribuindo significativamente para a eficiência global da tarefa de caracterização do regime de ventos.

A aplicação desenvolvida foi baptizada com o nome de PAFER. Trata-se de um interface gráfico consubstanciado sob a forma de um ficheiro executável capaz de correr em qualquer computador com um sistema operativo Windows98®, ou superior.

O desenvolvimento da aplicação foi efectuado em ambiente MATLAB® [7.1]. O *software* MATLAB® é caracterizado por uma linguagem de alta *performance*, especialmente dedicada à computação técnica. Integra aplicações de cálculo, programação e visualização de resultados num ambiente amigável, onde os problemas e as soluções são expressas de uma forma matemática. Estas foram as principais razões para a escolha desta linguagem para o desenvolvimento do programa PAFER. O ficheiro final, *PAFER.exe*, resulta da compilação do código MATLAB® criado na fase de desenvolvimento da aplicação PAFER para linguagem C++.

Neste capítulo será abordado detalhadamente o modo do funcionamento do programa PAFER e a forma como foram implementadas as diversas metodologias anteriormente referidas para a caracterização do regime de ventos. No Anexo INFORMÁTICO, consta um CD com a ferramenta informática PAFER, bem como todos os ficheiros de dados que serão posteriormente utilizados na exemplificação do seu funcionamento.

7.1 Aplicação PAFER

A aplicação informática desenvolvida é composta por uma janela principal através da qual é possível aceder os utilitários disponibilizados. Estes foram agrupados por menus, em três grandes grupos, consoante o seu ramo de acção. Existe ainda um quarto menu ligado às definições internas do *software*. Na figura 7.1 mostra-se o aspecto da janela principal da aplicação PAFER, com as entradas para os quatro menus que a compõe.

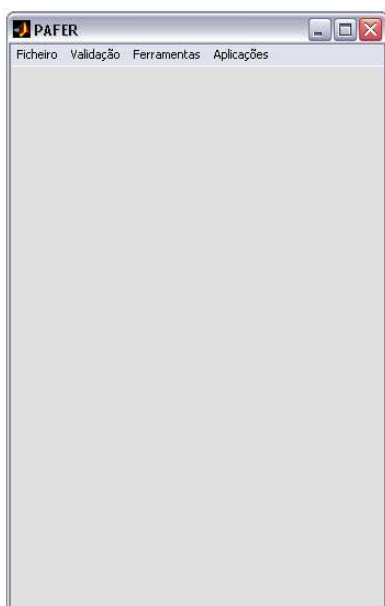


Figura 7.1 - Janela principal da aplicação PAFER

O menu **Ficheiro** compreende os utilitários de importação da informação de vento para o ambiente PAFER, e a interface de definição dos valores de referência do *software*.

No menu **Validação** estão agrupadas as rotinas de detecção automática de falhas em séries temporais e sua validação.

O menu **Ferramentas** disponibiliza os utilitários para a caracterização detalhada do regime de ventos sob um ponto de vista energético. Entre eles destacam-se o que permite a determinação de um grande número de parâmetros caracterizadores do regime de ventos, os que possibilitam a construção das diferentes distribuições de ocorrências, tanto por sectores da rosa-dos-ventos como por classes de velocidade, e os construídas para a determinação do perfil vertical de velocidades e do padrão diário da variação do vento.

Por fim, no menu **Aplicações** estão concentrados os utilitários para a correlação de dados de vento visando o aumento da representatividade das séries de medições. Foi implementada, tanto a correlação entre dados medidos a duas alturas do solo, como o método *MCP*. Neste menu é possível também encontrar o utilitário de previsão da velocidade extrema do vento e de estimativa da produção de um aerogerador mediante as condições de vento medidas localmente.

Menu Ficheiro

No menu **Ficheiro** estão agrupados os utilitários que permitem ao utilizador carregar a informação de ventos para ser processada dentro das várias funcionalidades de PAFER, que facultam o acesso às definições base do programa e que possibilitam o respectivo encerramento.

O utilitário **Abrir** do menu **Ficheiro** importa a informação de ventos contida em suporte informático. Se a informação estiver na forma de uma série temporal de registos das características de vento, esta deverá ser providenciada no tradicional código ASCII, e disposta de acordo com o indicado no Anexo II. A este tipo de ficheiro está associada a extensão *.dat. O utilitário **Abrir** tem também capacidade

para ler também tabelas classificadas de ocorrências. A informação deverá novamente estar em formato ASCII e organizada conforme o disposto no Anexo III. Aos ficheiros associados às tabelas de ocorrências classificadas está associada a extensão *.tab.

Através do utilitário **Valores de Referência** do menu **Ficheiro** é possível aceder a diferentes parâmetros que irão ser utilizados em posteriores análises. Na figura 7.2 está representada a janela que permite a alteração do seu valor.

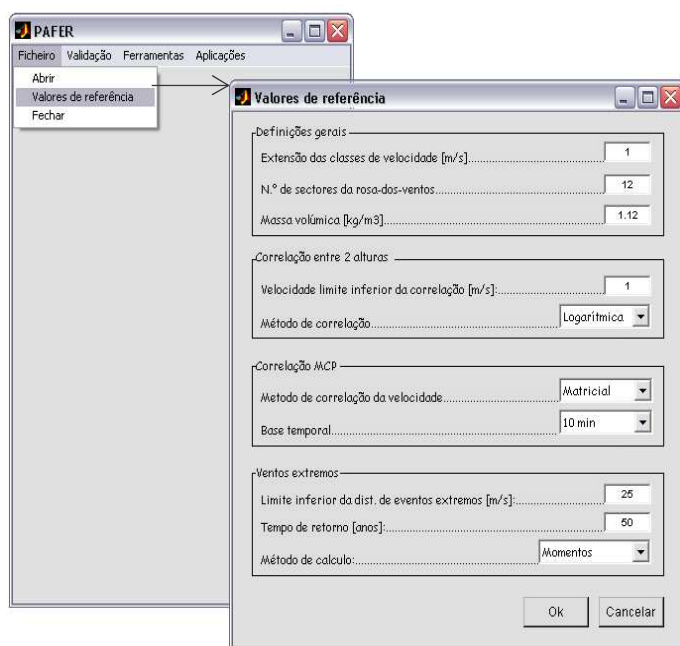


Figura 7.2 - Valores de referência

Através desta janela, na secção das definições gerais, é possível definir a extensão das classes de velocidade a utilizar, na construção dos histogramas de velocidade, no estabelecimento da correlação entre dados de duas estações ou na definição da distribuição de eventos extremos. O número de sectores da rosa-dos-ventos influenciará a distribuição de ocorrências por sectores ou a estabelecimento de correlações. O valor seleccionado da massa volúmica influenciará o valor final calculado para o fluxo de potência.

Na área associada aos parâmetros da correlação entre duas alturas de medições é possível definir a velocidade limite inferior da correlação. Por definição, este valor situa-se em 1 m/s, de acordo com o referido no sub-capítulo 5.1. Porém, é deixado ao critério do utilizador a opção por outro valor.

As definições directamente associadas à metodologia de correlação *MCP* prendem-se com o método de estabelecimento de correlação das velocidades e com a base temporal empregue. No seguimento do avançado no sub-capítulo 5.3 estão disponíveis para correlação de velocidades o Método Matricial e o Método Linear. No que toca à base temporal, é possível a definição por um de cinco estados: 10 minutos, horário, diário, semanal e mensal.

Por fim, para a determinação dos valores extremos da velocidade do vento é deixado ao critério do utilizador a selecção do limite inferior da distribuição de eventos extremos, o horizonte temporal de previsão e o método de determinação dos parâmetros característicos da distribuição de Gumbel. Neste último ponto surge a possibilidade de opção pelo método dos Momentos ou da Regressão Linear, de acordo com o descrito no sub-capítulo 6.2.

Menu Validação

No menu **Validação** estão disponíveis os utilitários destinados à inspeção de séries temporais de características do vento e à colmatação de eventuais lacunas nas mesmas.

O utilitário **Validação mensal** do menu **Validação** é composto por uma janela para carregamento da informação. Esta funcionalidade permite a inspeção visual das séries temporais [7.2] da direcção e velocidade do vento em simultâneo com os resultados dos testes automáticos de validação indicados no capítulo 3.

A forma de funcionamento do utilitário **Validação mensal** é melhor ilustrado através da figura 7.3. Para servir de exemplo recorreu-se aos dados reais recolhidos numa estação de medição das características de vento durante o período de um mês.

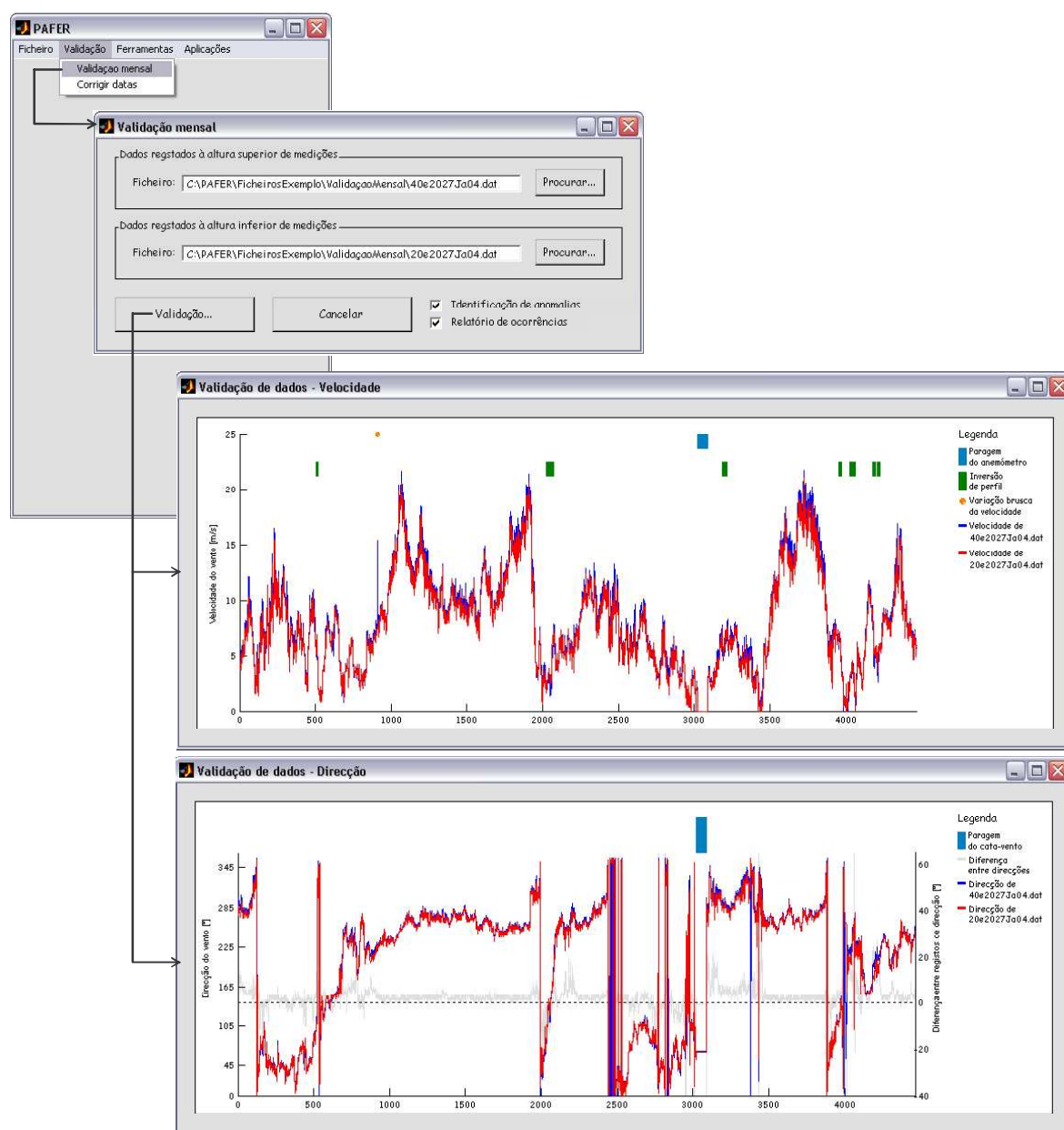


Figura 7.3 - Validação mensal de dados

A activação do sub-menu **Validação Mensal** do menu principal **Validação** dá origem à janela Validação Mensal que se destina ao carregamento dos ficheiros contendo as séries temporais a analisar. Estas poderão ser carregadas para o programa escrevendo a sua localização e designação ou através de uma procura realizada por recurso a um interface gráfico activado pelo botão *Procurar*.... O utilitário **Validação Mensal** foi pensado para processar ficheiros ASCII referentes a séries temporais das características de vento organizadas segundo o formato constante no Anexo II.

A activação do botão *Validação*... dá origem ao processamento da informação contida em duas séries temporais registadas simultaneamente na mesma estação. São inicialmente desencadeados testes de baixa ordem: é conferido se se tratam de ficheiros mensais, com o mesmo número de registos e simultâneos. Caso uma destas premissas não seja cumprida a aplicação é abortada, surgindo um aviso referente ao teste falhado.

Posteriormente, são implementados os testes de validação automática de dados constantes nos sub-capítulos 3.1 a 3.4. Os seus resultados vêm indicados no relatório de ocorrências, ou nas janelas Validação de dados – Velocidade e Validação de dados – Direcção por meio de um código de cores, caso tal tenha sido seleccionado pelo utilizador na janela Validação Mensal. Se a opção pela identificação dos resultados dos testes automáticos não for activada, simplesmente se procede à representação das séries de velocidade e direcção.

No exemplo constante na figura 7.3 foi identificado um período de paragem dos anemómetros e dos cata-ventos no final do mês. Tratando-se de registos recolhidos na Serra do Alvão, durante o mês de Janeiro de 2004, este facto ficar-se-á a dever, com grande probabilidade, a um congelamento temporário dos sensores. Esta situação surge assinalada a azul nas duas janelas que fazem a representação das séries temporais. No mesmo exemplo foram também identificados períodos pontuais de inversão do perfil de velocidades do escoamento. Estes períodos estão marcados a verde.

Nota-se também a identificação de um registo extemporâneo de velocidade, fora do padrão de variação de velocidade. Ter-se-á tratado de um problema de registo de dados que a não ser por via visual seria identificado. Esta ocorrência é assinalada por um ponto amarelo.

Por fim, a averiguação da diferença entre as leituras dos cata-ventos permite detectar um possível desalinhamento relativo dos sensores. No presente caso, a diferença média é da ordem dos 5°, valor dentro do previsto. Salienta-se o esperado comportamento de cariz aleatório dos cata-ventos para gamas baixas de velocidade.

No que respeita ao utilitário **Corrigir datas** do menu **Validação**, este deverá ser utilizado sempre que se detectem lacunas temporais nas séries de dados. A este aspecto deverá ser prestada particular atenção, uma vez que é de extrema importância para o estabelecimento de correlações visando a caracterização de longo termo do regime de ventos.

Menu Ferramentas

O menu **Ferramentas** agrupa os utilitários desenvolvidos para a caracterização do regime de ventos de um determinado local. Entre eles destacam-se o que permite a determinação extensiva dos diferentes parâmetros estatísticos caracterizadores do regime de ventos, os que possibilitam o agrupamento das ocorrências por classes de velocidade e sector e aquele em que efectuado o cálculo do perfil vertical de velocidades.

Para melhor ilustrar as potencialidades da aplicação PAFER, no que respeita à caracterização do regime de ventos do ponto de vista energético recorre-se novamente a um exemplo. A informação que servirá de base a este exercício é composta pelos dados recolhidos durante um ano, a 40 m do solo, numa estação meteorológica situada na Beira Interior. Nas figuras 7.4 a 7.6 mostra-se o modo de operação dos diferentes utilitários disponibilizados no menu **Ferramentas**.

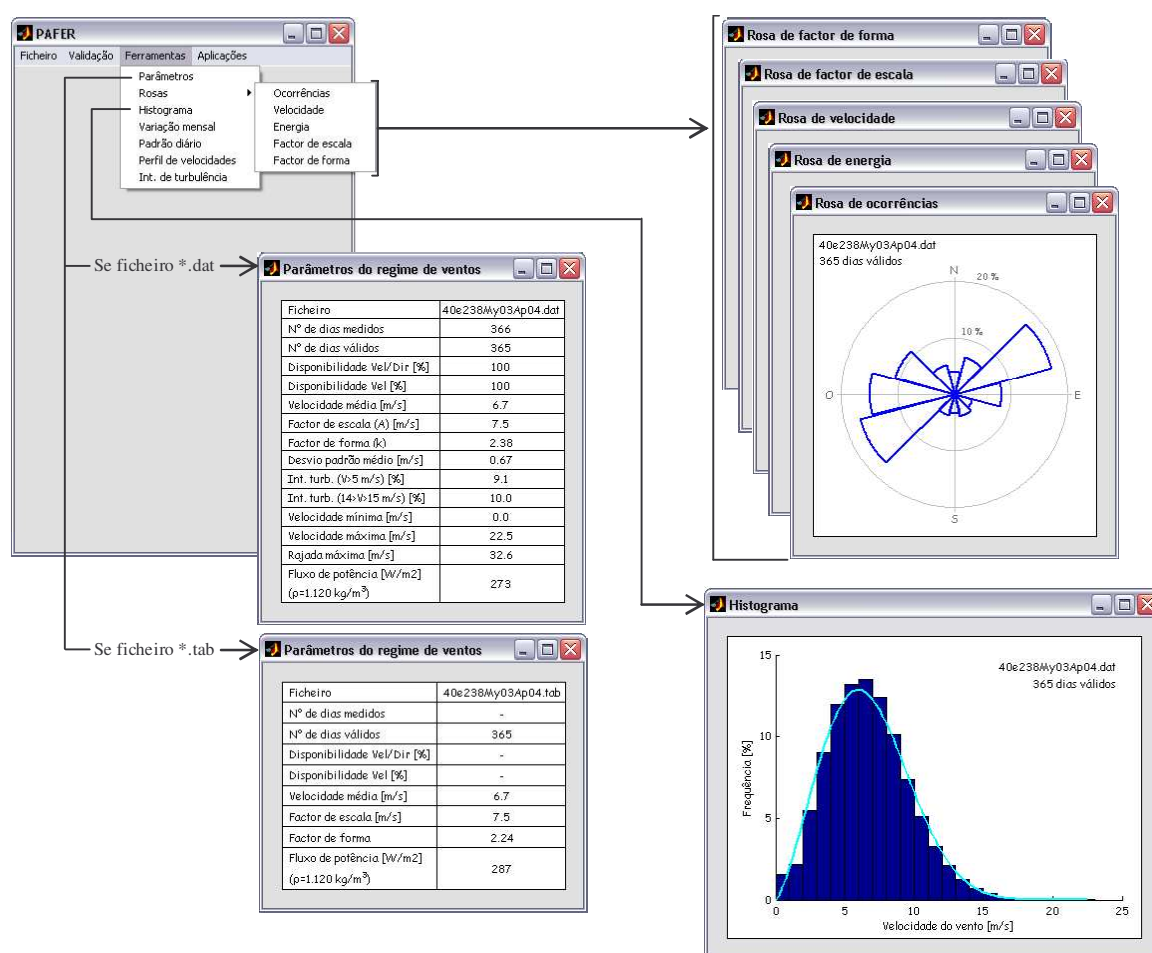


Figura 7.4 - Caracterização do regime de ventos

Numa primeira fase é possível, através do utilitário **Parâmetros**, do menu **Ferramentas**, é possível proceder à caracterização do regime de ventos de uma forma estatística. Na janela Parâmetros do regime de ventos são apresentados, entre outros, os valores da velocidade média, dos parâmetros de ajuste de Weibull, da intensidade de turbulência e do fluxo de potência, isto se o ficheiro de entrada

for uma série temporal. Caso se trate de uma tabela de ocorrências, a descrição não será tão completa, mas ainda assim transmitindo o valor dos principais parâmetros caracterizadores do regime de ventos. A forma de cálculo dos valores destes parâmetros está de acordo com o descrito no capítulo 4.

Através do utilitário **Rosas** do menu **Ferramentas** é possível verificar a distribuição do recurso eólico pelos sectores da rosa-dos-ventos. Tendo por base a informação disponibilizada sob a forma de uma série temporal ou de uma tabela classificada de ocorrências são retirados e processados os elementos necessários para a construção das tradicionais rosas-dos-ventos, velocidade e energia. Adicionalmente, a visualização das rosas dos factores de forma e de escala da função ajuste de Weibull poderá ser conseguida.

No utilitário **Rosas**, sempre que o ficheiro de origem esteja sob a forma de uma série temporal, a construção das diferentes distribuições por sectores passa pela selecção das ocorrências que se situam em cada um dos sectores e posterior análise das suas características para se proceder ao cálculo dos parâmetros necessários para a caracterização de cada um dos sub-conjuntos definidos anteriormente. Já no caso das tabelas classificadas de ocorrências, uma vez que apenas se dispõe da distribuição de ocorrências por sectores e respectivo histograma sectorial, a determinação do recurso eólico por sectores é realizada através do cálculo dos parâmetros de Weibull sectoriais. Com base nos seus valores são então construídas as restantes distribuições sectoriais.

Por fim, a representação do histograma de velocidades associado um determinado conjunto de dados é de obtenção simples através do utilitário **Histograma** do menu **Ferramentas**. Na janela Histograma, para além do histograma é também assinalada a função de Weibull que melhor ajuste consegue ao conjunto de dados em análise, de acordo com o enunciado no sub-capítulo 4.1.

Alerta-se para o facto de que a determinação de alguns parâmetros e distribuições atrás indicadas é função dos valores de referência definidos na janela Valores de referência do menu **Abrir**. O valor da massa volúmica utilizada para a determinação do fluxo de potência é concordante com o definido nessa janela. Também, no caso das séries temporais, o número de sectores a considerar na distribuição do recurso por sectores da rosa-dos-ventos e a dimensão do intervalo das classes de velocidade respeita o definido nessa mesma janela. Desejando uma análise mais fina, o utilizador poderá aumentar o número de sectores a considerar, bem como diminuir a extensão das classes de velocidade. Da mesma forma, e em função da localização do ponto de medição, o valor da massa volúmica poderá ser ajustado para que a análise seja mais exacta. No caso do ficheiro se tratar de uma tabela classificada de ocorrências a definição pelo utilizador do número de sectores e extensão das classes de velocidade não é possível, já que estas são características inerentes e imutáveis da tabela.

De seguida, na figura 7.5, estão indicados os resultados associados à análise da variação temporal do recurso eólico, implementados através dos utilitários **Variação mensal** e **Padrão diário** do menu **Ferramentas**. Estes utilitários apenas são utilizáveis se a informação estiver sob a forma de séries temporais.

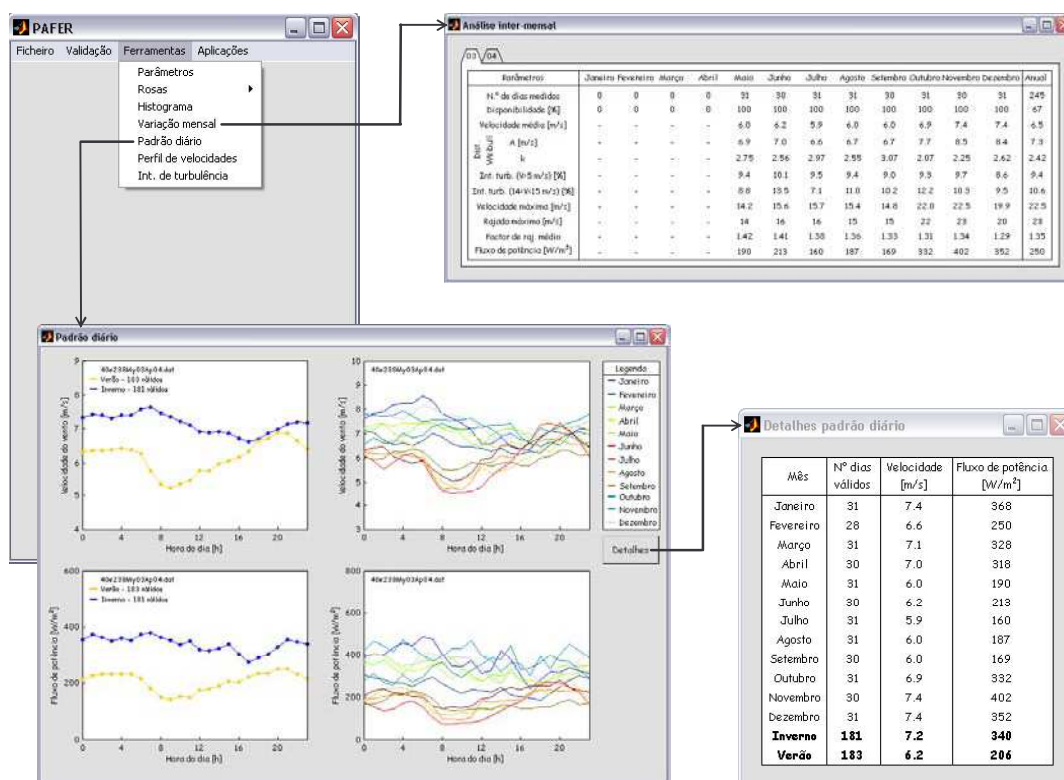


Figura 7.5 - Variação temporal do recurso

O utilitário **Variação mensal** do menu **Ferramentas** faz a determinação dos valores mensais dos principais parâmetros do regime de ventos. A sua determinação tem por base a informação carregada para o ambiente PAFER através do utilitário **Abrir** do menu **Ficheiro** e de acordo com o referido no sub capítulo 4.1.

Na janela Análise inter-mensal, para além dos valores mensais dos parâmetros caracterizadores do regime de ventos, estão também registados os valores anuais dos mesmos parâmetros. O agrupamento da informação ao nível anual é realizado através de períodos referentes a anos civis.

O utilitário **Variação mensal** surge em contraponto ao **Parâmetros**, já que confere ao utilizador uma percepção da evolução das características do vento ao longo do período de medições, e não apenas dos valores finais acumulados.

O utilitário **Padrão diário** é responsável pela determinação da variação da intensidade média horária do vento ao longo do dia. A análise é conduzida inicialmente num base temporal alargada, sendo calculada o padrão diário do vento para os períodos de Inverno e Verão, de acordo com o estabelecido

no sub-capítulo 4.2. Posteriormente, o estudo é refinado para uma base temporal mensal, sendo determinado o padrão diário para os vários meses constantes na série de dados.

De forma a tornar a fase de análise dos resultados do padrão diário numa base mensal mais rápida foi adoptado um esquema de cores de fácil percepção. Assim, aos meses de Inverno foram atribuídas cores “frias” enquanto que aos de Verão estão associadas cores “quentes”.

A informação respeitante à representatividade dos dados que estão na origem da determinação do padrão diário poderá ser acedida através do botão *Detalhes* da janela Padrão diário. Este dará origem à janela Detalhes padrão diário, contendo o número de dias de cada mês utilizado para a determinação do padrão diário, a respectiva velocidade média e fluxo de potência médio.

A determinação da variação vertical da velocidade do vento está disponível na aplicação PAFER através do utilitário **Perfil de velocidades** do menu **Ferramentas**. De forma a explicitar o funcionamento deste utilitário toma-se como exemplo, para além da série de dados de um ano de extensão recolhida a 40 m do solo anteriormente referida, a observada a 20 m do solo na mesma estação e no mesmo período. A figura 7.6 faz a ilustração do modo de operação deste utilitário e os resultados que dele podem ser extraídos.

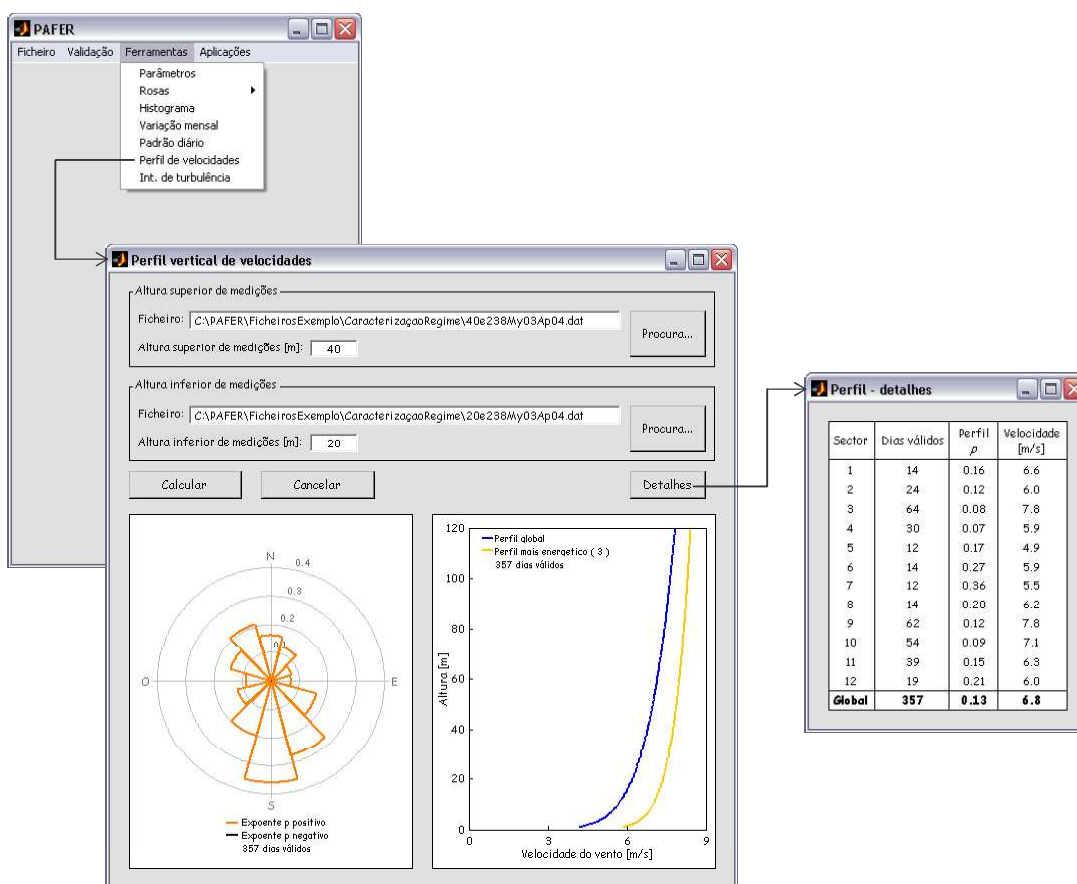


Figura 7.6 - Perfil vertical de velocidades

Através da secção superior da janela Perfil vertical de velocidades é possível fazer o carregamento das séries temporais que estarão na base da análise. Estas deverão ser coincidentes, caso contrário a análise não prosseguirá, sendo apresentado um aviso desta situação ao utilizador.

Após importada a informação de vento para o ambiente PAFER esta é processada e valor do expoente p é calculado de acordo com o indicado no sub-capítulo 4.4. Os resultados são indicados sob a forma de uma distribuição angular dos valores de p . Adicionalmente, é também mostrada a forma da variação da velocidade do vento com a altura ao solo. Esta é caracterizada pelo expoente p médio global, determinado através da pesagem dos valores de p sectoriais pelo número de ocorrências sectoriais. Pela sua importância, na mesma figura está indicado a forma da variação vertical da velocidade do vento prevista para o sector energeticamente dominante.

Através do botão Detalhes... presente na figura Perfil vertical de velocidades é posta à disposição do utilizador a informação sobre os valores de p sectoriais, a dimensão da informação que esteve na base da sua determinação e a velocidade média da amostra para cada sector. Refere-se ainda que o número de sectores a considerar é função do definido na janela Valores de referência, do menu **Ficheiro**.

Por fim, ainda no menu **Ferramentas**, está disponível o utilitário **Int. de turbulência**, através da qual é possível determinar a variação do índice It por classes de velocidade. Na figura 7.7 mostra-se, considerando a informação referente a ano na estação que serviu de exemplo às restantes aplicações deste menu, as potencialidades do utilitário **Int. de turbulência**.

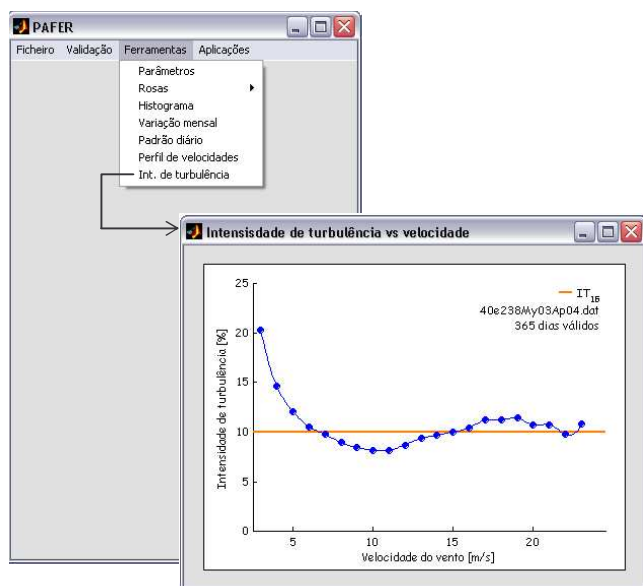


Figura 7.7 - It vs velocidade do vento

A determinação da intensidade de turbulência por classes de velocidade é realizada seleccionando inicialmente os registos de velocidade e desvio padrão correspondentes. Posteriormente, It é determinada de acordo com o estabelecido no sub-capítulo 4.3. Na janela Intensidade de turbulência vs velocidade é destacado o valor de It para a classe de velocidade 15 m/s, pelo papel que esta representa na fase de enquadramento do local em estudo nas classes da norma IEC61400-1 (ver sub-capítulo 6.2).

Refere-se ainda que a informação de ventos suportada por este utilitário deverá estar sob a forma de uma série temporal de características de vento e com o formato descrito no Anexo II para poder ser carregada pelo utilitário **Abrir** do menu **Ficheiro**. A extensão da classe de velocidade a considerar nesta análise é aquela definida na janela Valores de referência do menu **Ficheiro**.

Menu Aplicações

No menu **Aplicações** surgem reunidos os utilitários de maior complexidade. Através deste menu é possível aceder aos utilitários relacionados com a correlação de dados de vento, dentro das quais se destaca o método *MCP*, às aplicações para a previsão de ventos extremos e de estimativa de produção de um aerogerador.

O primeiro utilitário associado ao menu **Aplicações** toma a designação de **Correlação a 2 alturas** e tem como finalidade a colmatação de falhas em séries temporais das características do vento. De modo a exemplificar a forma de actuação deste utilitário imagine-se a situação em que as medições a 40 m do solo durante o mês de Maio de 2004 tomadas na estação situada na Beira Interior que serviu de exemplo na secção anterior eram consideradas inválidas devido a uma avaria do anemómetro. Através das metodologias de correlação entre registos de velocidade e dos dados recolhidos na estação a dois níveis do solo durante um período alargado é possível reconstruir a série temporal a 40 m.

O utilitário **Correlação a 2 alturas** consubstancia as metodologias de correlação entre registos de velocidade tomados a duas alturas de medição propostas no sub-capítulo 5.1, destinando-se à reconstrução de séries temporais de uma forma eficaz e de fácil percepção. Na figura 7.8 surge resumida a forma de processamento do utilitário **Correlação a 2 alturas** para o exemplo assinalado no parágrafo anterior em que os dados de base para a correlação são os recolhidos durante um ano, registados a 40 e 20 m do solo na estação situada na Beira Interior.

Na área superior da janela Correlação entre 2 alturas de medição estão disponíveis as ferramentas para o carregamento da informação de ventos que servirá de base à correlação para o interior do ambiente PAFER. Esta deverá estar sob a forma de séries temporais no formato descrito no Anexo II. Caso as duas séries temporais não sejam simultâneas o utilitário não avançará, sendo o utilizador alertado para o facto. A altura do solo a que a informação foi recolhida deverá ser também indicada.

Por concordância com a aplicação PAFER, adoptam-se as expressões “altura superior” e “altura inferior” de medições para exemplificar o funcionamento deste utilitário, tendo presente o objectivo final de extrapolação de uma série de velocidades para a altura superior de medições. Porém, o utilitário funcionará se se desejar extrapolar a série de velocidades para a altura inferior de medições. Para tal, basta inverter os papéis da informação interveniente no processo.

Depois de inserida a informação de trabalho o utilizador terá que impreterivelmente verificar a qualidade da correlação antes que qualquer extrapolação seja efectuada. Para tal deverá ser activado o botão *Qualidade da correlação*. Este dará início ao processo de estabelecimento das correlações.

As correlações sectoriais são estabelecidas de acordo com o descrito no sub-capítulo 5.1. Para a avaliação da qualidade da correlação é realizada de uma forma automática a extrapolação da série de velocidades para a altura superior de medições, tendo por base os dados recolhidos à altura inferior.

Posteriormente, as características da série extrapolada para altura superior são comparadas com as da série observada também à altura superior. Os resultados desta análise estão indicados na tabela situada no canto inferior direito da janela Correlação entre 2 alturas de medição. Para completar a análise é disponibilizada ao utilizador a hipótese de visualização da distribuição polar dos valores dos coeficientes sectoriais de correlação.

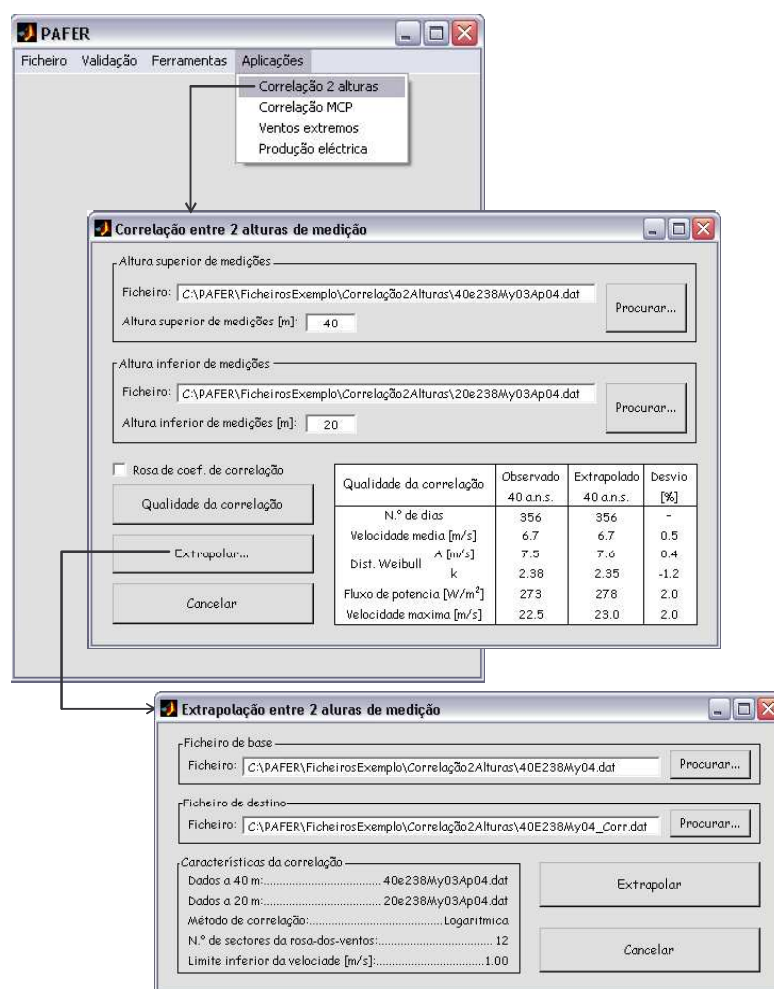


Figura 7.8 - Correlação entre 2 alturas de medição

Mediante os resultados de análise da qualidade da correlação é possível decidir sobre a extrapolção de uma série temporal registada na altura inferior de medições para a altura superior. Para tal deverá ser activado o botão *Extrapolção*. Este dá origem a uma interface para carregamento do ficheiro base de extrapolção e para a atribuição da designação do ficheiro de destino da extrapolção. Nesta nova janela constam também as principais características da correlação estabelecida.

No menu **Aplicações** está também disponível o utilitário **Correlação MCP** que implementa a metodologia de aumento da representatividade do regime de ventos medido num determinado ponto. De acordo com o descrito no sub-capítulo 5.3 é possível construir uma descrição do regime de longo termo numa determinada estação caso a correlação entre os dados dessa estação e da estação de

referência, da qual se dispõe de um largo conjunto de informação, for de boa qualidade. No mesmo sub-capítulo, foi proposto o método *MCP* segundo duas variantes de correlação para a velocidade do vento. De uma forma geral, o utilitário **Correlação MCP** do menu **Aplicações** implementa a metodologia *MCP* proposta nesse sub-capítulo, para as duas variantes referidas.

De forma a melhor ilustrar o modo de funcionamento do utilitário **Correlação MCP** recorre-se aqui a um caso prático. Tome-se a informação recolhida durante um ano numa determinada estação. Imagine-se que na sua vizinhança existe a intenção de construção de um parque eólico. De acordo com o avançado no capítulo 5, a estimativa de produção para o parque efectuada com base num conjunto de dados com duração anual poderá conduzir a desvios significativos em relação ao esperado para o longo termo, ficando patente a necessidade de aumento da representatividade do regime de ventos local.

Na figura 7.9 mostra-se a forma de processamento do utilitário **Correlação MCP** do menu **Aplicações**, onde se tenta estabelecer uma correlação entre os dados de uma estação situada na Beira Litoral, referentes a um ano, e os dados da estação de referência PORT014, utilizada previamente no capítulo 5, da qual se possui uma grande quantidade de informação.

A activação do utilitário **Correlação MCP** dá origem a uma janela com o mesmo nome destinada à importação das séries simultâneas das características do vento para o ambiente PAFER. Para estabelecer e verificar a qualidade da correlação deverá ser accionado o botão *Qualidade da correlação* da mesma janela.

A qualidade da correlação é exibida de modo distinto numa nova janela, Validação da correlação MCP, sob a forma de distribuições de energia por sectores da rosa-dos-ventos, de histogramas de velocidade e dos valores dos principais parâmetros do regime de ventos, incluindo a produção estimada de um aerogerador de referência instalado no mesmo ponto que a estação local, tanto para a previsão, como para o efectivamente observado. Enfatiza-se que as descrições do regime de ventos exibidas nesta janela se referem ao período em que os registos na estação local e referência são simultaneamente válidos.

Através da janela Validação da correlação MCP é também implementada a hipótese de exportação dos ficheiros correspondentes às tabelas classificadas de ocorrências referente à previsão, ao observado na estação local e na estação de referência, durante o período simultâneo. A extracção das séries temporais das características de vento simultâneas na estação local e de referência é também possível.

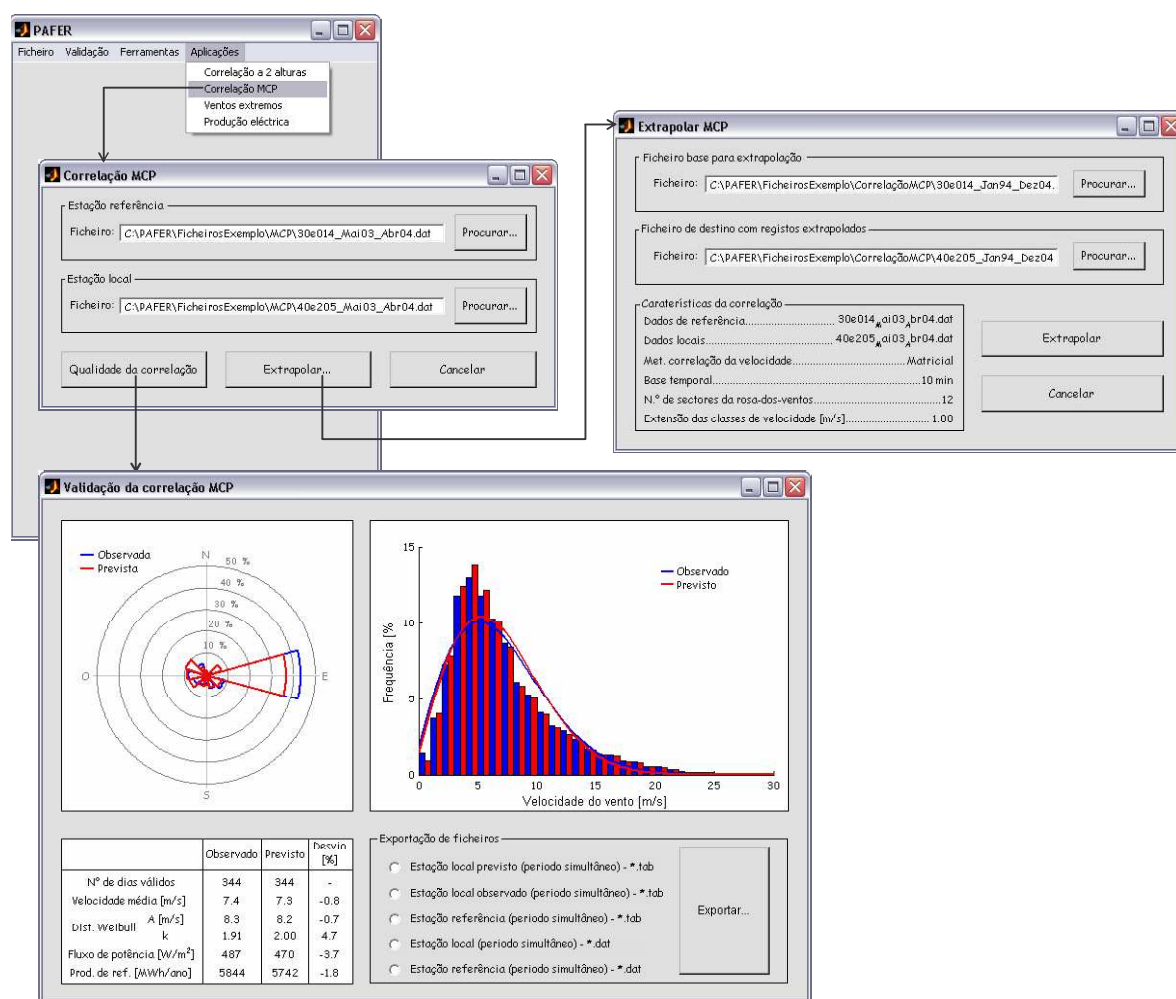


Figura 7.9 - Correlação MCP

Se se entender que a qualidade da correlação é suficiente para servir de base à criação de uma descrição de longo termo local, a análise deverá ser prosseguida através da activação do botão *Extrapol*, da janela Correlação MCP. Esta dará origem a uma outra que permite o carregamento do ficheiro de longo termo da estação de referência de modo a que a este se possa aplicar a correlação anteriormente obtida e assim construir a descrição de longo termo do regime de ventos na estação local. Nesta janela encontra-se a funcionalidade que permite atribuir a designação do ficheiro que conterà a informação extrapolada.

A construção do utilitário **Correlação MCP** foi pensada de forma a torná-lo parametrizável. Através do menu **Ficheiro** na janela do utilitário **Valores de referência** é possível definir o número de sectores da rosa-dos-ventos que deverão ser considerados na correlação. O mesmo acontece com a extensão das classes de velocidade e da base temporal em que se irá posteriormente trabalhar. Nesta janela é também possível optar por um de dois métodos de correlação da velocidade. Esta faceta versátil da aplicação permite que se adapte ao maior número de situações possíveis.

Refere-se que, se for feita a opção pelo Método Linear de Correlação de Velocidades, o ficheiro de base para extrapolação só poderá estar sob a forma de uma série temporal. Se se escolher o método Matricial de Correlação de Velocidades a informação poderá estar também sob a forma de uma tabela classificada de ocorrências, desde que com as mesmas dimensões ao nível do número de sectores e extensão de classes de velocidade que as seleccionadas para a construção da correlação.

Por fim, alerta-se que durante o emprego do utilitário **Correlação MCP** deverá ser sempre tido em consideração as limitações da metodologia enunciadas no sub-capítulo 5.3.

No menu **Aplicações** está também disponível a ferramenta que permite realizar a estimativa do valor máximo do vento para períodos de grande extensão. Para a determinação deste valor o utilitário **Ventos extremos** implementa a metodologia descrita no sub-capítulo 6.2.

Para a exemplificação da forma de funcionamento do utilitário **Ventos extremos** recorre-se a um caso concreto onde são utilizados os dados recolhidos numa estação situada na margem esquerda do rio Douro durante três anos. A figura 7.10 faz a ilustração da aplicação do utilitário **Ventos extremos** para esse caso concreto.

A activação do utilitário **Ventos extremos** convoca a janela com o mesmo nome, onde é possível importar para o ambiente PAFER as séries das características de vento que servirão de base à estimativa de valor máximo da velocidade do vento. Nesta janela é também definida a altura ao solo a que deverá ser realizada a previsão.

A activação do botão *Calcular* da janela Ventos extremos inicia o processo de estimativa do valor máximo da velocidade ao vento para o período definido na janela Valores referência do menu **Ficheiro** e para a altura do solo definida anteriormente. Os resultados são posteriormente expressos na mesma janela, conjuntamente com os parâmetros de cálculo. A variação da velocidade máxima do vento em função do tempo de retorno para a altura máxima de medições e para a altura de cálculo é também exibida na janela ventos extremos. Todos os cálculos são realizados segundo os preceitos enunciados no sub-capítulo 6.2.

A qualidade de ajuste da função de Gumbel à distribuição real de eventos extremos poderá ser avaliada através da auto-previsão da velocidade máxima do vento para o período que serve de base à análise. Caso o resultado não seja satisfatório, o método de ajuste poderá ser alterado na janela Valores de referência. Para tal e de acordo com o sub-capítulo 6.2 são postos à disposição o Método dos Momentos ou Método da Regressão Linear.

Uma caracterização mais completa do regime de ventos extremos pode ser obtida mediante o accionamento do botão *Detalhes do regime de ventos...* da janela Ventos extremos. Na nova janela, para além da descrição resumida da informação que esteve na base da presente caracterização do regime de ventos extremos, consta a distribuição de ocorrências extremas ao longo do ano, pelos diferentes sectores da rosa-dos-ventos e por classes de velocidade.

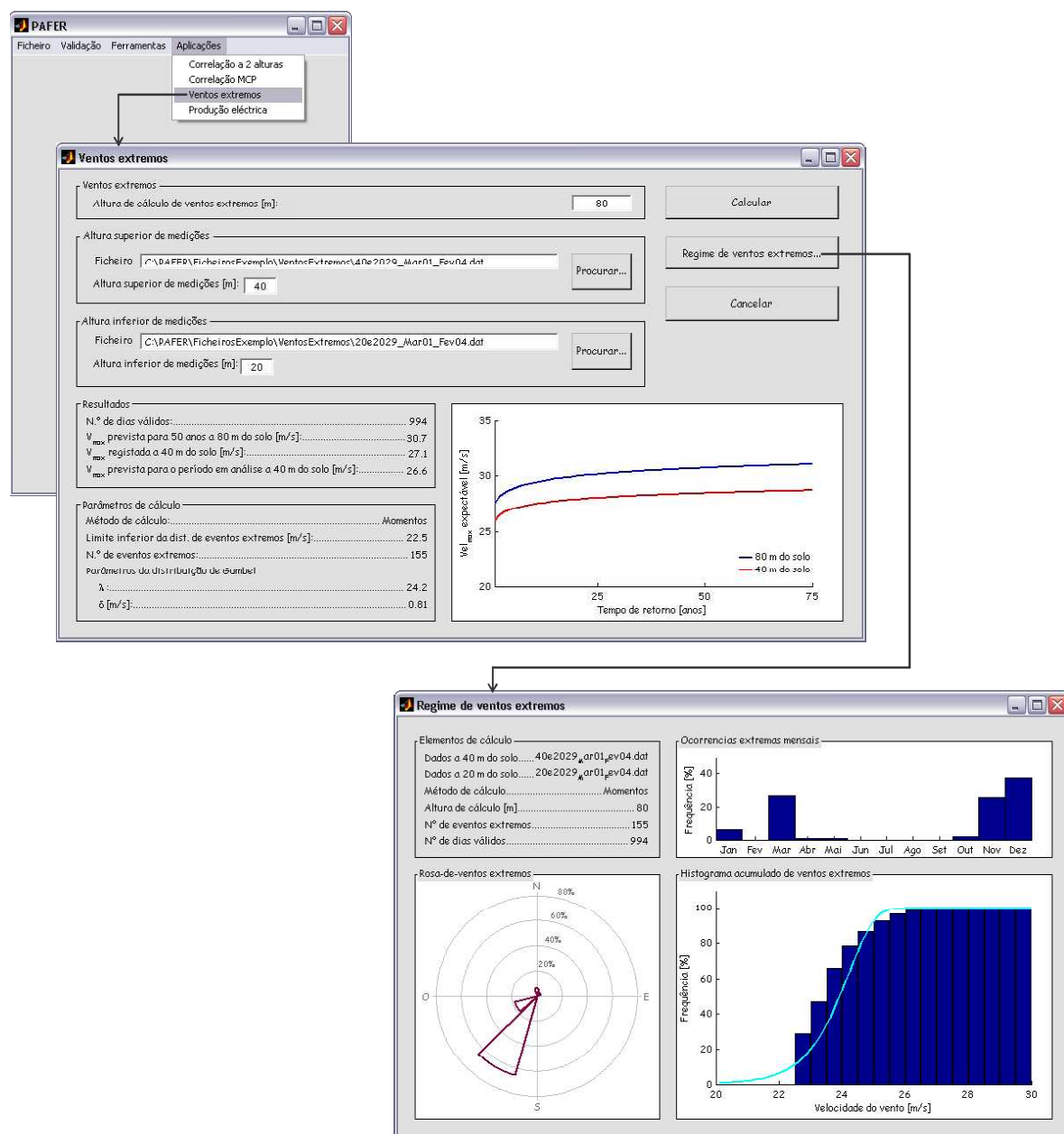


Figura 7.10 - Ventos extremos

Refere-se ainda que, à semelhança do utilitário **Correlação MCP**, também o utilitário **Ventos extremos** foi parameterizado para o período de retorno, para o método de ajuste da função de Gumbel, para o limite inferior da distribuição de extremos, para o número de sectores de direcção e para a extensão das classes de velocidade. A manipulação destes parâmetros deverá ter em conta as considerações tecidas no sub-capítulo 6.2, assim como as limitações da metodologia utilizada.

Por fim, no menu **Aplicações** está presente o utilitário **Produção eléctrica** que tem por objectivo a estimativa da produção eléctrica esperada para um determinado ponto, função das medições das características do vento aí observadas e da tecnologia empregue para a conversão da energia contida no vento.

Para a estimativa de produção de energia eléctrica o utilitário **Produção eléctrica** faz a implementação da metodologia descrita no sub-capítulo 4.5. Através das medições efectuadas a duas alturas do solo extrapola-se a série de velocidades para altura do eixo do rotor do aerogerador. Posteriormente, esta informação é agrupada sob a forma de uma histograma de velocidades para ser aplicada à curva característica do aerogerador, de modo a calcular a produção de energia eléctrica. Para ilustrar a forma de processamento deste utilitário recorre-se a um caso real seleccionando a informação recolhida na estação situada na Beira Interior durante um ano e que serviu de exemplo na secção em que se demonstraram as potencialidades do menu **Ferramentas**. A figura 7.11 mostra os resultam desta análise.

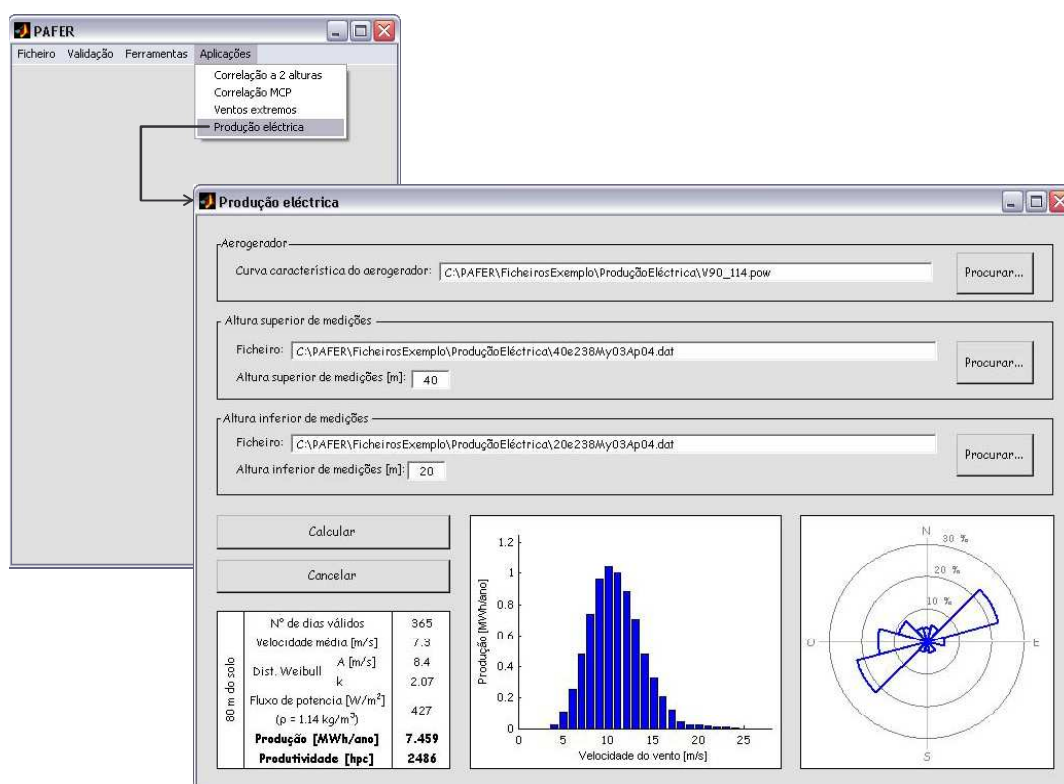


Figura 7.11 - Produção eléctrica

A activação do utilitário **Produção eléctrica** do menu **Aplicações** conduz ao surgimento da janela com o mesmo nome onde, depois de inserida a informação que estará na base de todos os cálculos efectuados, serão apresentados os resultados desses mesmos cálculos.

A informação de vento a considerar na aplicação deverá estar sob a forma de séries temporais de características de vento, de acordo com o formato especificado no Anexo II. A informação respeitante à curva de potência do aerogerador deverá ser inserida segundo uma listagem de valores contendo a velocidade do vento e os valores correspondentes da potência debitada e o coeficiente de impulso axial. No Anexo IV constam todas as especificações exigidas ao nível do formato deste tipo de ficheiros. Aos ficheiros com a informação relativa às curvas características dos aerogeradores está associada a extensão *.pow.

Os resultados dos cálculos efectuados em **Produção eléctrica** surgem sobre a forma da produção e produtividade, esta expressa em horas anuais equivalentes de funcionamento a plena carga, *hpc*. Mostra-se também a produção estimada para cada classe de velocidade, bem como para cada sector da rosa-dos-ventos. Os valores de produção avançados não estão afectados de qualquer outro tipo de perdas que não os incluídos na curva de potência.

8 Conclusões

Neste trabalho pretendeu-se implementar, sob a forma de uma aplicação informática, um conjunto de metodologias que permitissem a caracterização de regimes de ventos visando o seu aproveitamento energético de uma forma coerente, versátil e eficiente.

A aplicação informática foi construída em ambiente MATLAB®, posteriormente convertida para linguagem C++, que agrupa todas as aplicações desenvolvidas para a caracterização regime de ventos sob uma perspectiva energética. Esta ferramenta tomou a designação de PAFER.

Inicialmente, foi abordada a problemática do processamento e validação da informação das características de vento recolhida nas estações meteorológicas. Foi desenvolvida uma série de testes automáticos para a detecção de registos potencialmente anómalos, de forma a assessorar o responsável pela validação da informação e tornar a tarefa menos morosa. Entre estes testes destacam-se os relacionais e os de persistência, pelo auxílio que disponibilizam na detecção de potenciais avarias mais frequentes nos instrumentos de medição que equipam as estações.

Foi posteriormente seleccionado um conjunto de parâmetros para servirem de base à caracterização do regime de ventos sob uma perspectiva energética. Estes parâmetros são fundamentalmente de cariz estatístico, porém úteis para resumir as características das séries temporais de velocidade e direcção do vento. Foi implementado o conceito de tabela classificada de ocorrências como forma eficaz e sumária de agrupar a informação contida nas séries temporais das características de vento.

O estudo da variação do recurso eólico ao longo do tempo é disponibilizado em diferentes escalas temporais que vão desde as variações de alta-frequência, através da implantação de uma aplicação para a determinação da intensidade de turbulência em função da velocidade do vento, até ao extremo oposto da escala, com a possibilidade da caracterização do regime de ventos observado numa base mensal ou anual.

Ainda no domínio da análise da variação temporal do regime de ventos foi desenvolvido e implementado o conceito de padrão diário da velocidade do vento como forma de estudo da variação média horária do vento ao longo do dia. Os resultados desta análise são exibidos para os períodos de Verão de Inverno, e para cada mês do ano, sob a forma de velocidade média e fluxo de potência do vento.

Pelas vantagens associadas, para descrição da variação vertical da velocidade do vento tendo por base séries temporais de características do vento optou-se pela utilização da lei de potência. Como tal, foi implementada uma aplicação que permite a determinação da expoente característico do perfil médio para cada rumo, possibilitando a detecção de uma das mais importantes características do escoamento ao nível do seu aproveitamento energético: a variação da velocidade do vento com a altura ao solo.

Com o objectivo de colmatar falhas nas séries de velocidades registadas em estações meteorológicas com origem em avarias dos sensores de medições foi implementado um método de correlação sectorial de velocidades. Deste modo será, eventualmente, possível aumentar significativamente a disponibilidade global da série temporal.

De forma a minorar a incerteza associada à caracterização de regimes de ventos de menor representatividade, foi desenvolvido e implementado uma variante da metodologia Measure, Correlate and Predict a utilizar quando se disponham de dados de mais que uma estação. A variante proposta permite, caso esteja assegurada a qualidade da correlação e exista um grande volume de informação na estação referência, obter uma descrição de “longo termo” para a estação local.

Para a fase de estabelecimento da correlação ao nível da velocidade na metodologia *MCP* foram estudados dois métodos alternativos: o Método Matricial de Correlação da Velocidade e o Método Linear de Correlação da Velocidade. Uma análise ao seu desempenho indica que o *MMCV* é preferível ao *MCLV*. A influência da extensão temporal do período de base à correlação foi também brevemente analisada, tendo-se concluído que a qualidade final da correlação tende a melhorar com o aumento da extensão do período que serve para o estabelecimento da correlação.

O utilitário *MCP* implementado no ambiente PAFER foi desenvolvido de modo a ser versátil, adaptando-se às características do maior número de regimes de ventos. Assim, é deixado ao critério do utilizador a definição de vários parâmetros da correlação com sejam o número de sectores da rosa-dos-ventos, a extensão das classes de velocidade, a base temporal, método de correlação de velocidades, etc..

A caracterização do regime de ventos na parte relativa à sua severidade foi também alvo de estudo, nomeadamente a nível da determinação das velocidades máximas do vento para períodos de retorno alargados. Para tal, foi proposta uma variante à metodologia de Gumbel especialmente adaptada às características particulares das séries temporais das características do vento. Para uso conjunto com a variante à metodologia clássica são avançados dois métodos alternativos de ajuste da distribuição de Gumbel à distribuição de eventos extremos observada: o Método dos Momentos e Método da Regressão Linear.

O desempenho da variante à metodologia de Gumbel proposta foi comparado com o método clássico, concluindo da sua melhor *performance* quando empregue para a determinação da velocidade máxima do vento. Posteriormente, foi efectuada uma análise ao desempenho dos dois métodos de ajuste, concluindo-se que o *MRL* conduz a uma ligeira melhoria dos resultados face ao *MM*. Porém este último apresenta uma maior concordância entre previsões tendo por base períodos de referência de diferentes extensões. Na ferramenta PAFER foram implementados os dois métodos, cabendo ao utilizador optar por um dos dois.

Por fim, foi criada uma ferramenta para a estimativa da produção eléctrica para o sítio de uma estação, função das medições das características do vento locais e das características técnicas do aerogerador seleccionado. Esta ferramenta faz uso de conceitos como o da variação da velocidade do vento com altura ao solo, traduzida pela lei de potência, e histograma de ocorrências por classes de velocidade.

A ferramenta PAFER encerra dentro de si todas as aplicações anteriormente descritas de forma coerente e de fácil utilização. Porém, é certamente um *software* susceptível de muitas melhorias tanto a nível metodológico, como ao nível de interacção com o utilizador.

Ao nível metodológico, um maior desenvolvimento da análise da variação temporal em curtos períodos por recurso à análise espectral, será um dos aspectos que merecerá novos estudos. Também a análise da severidade do regime de ventos, na parte da estimativa da velocidade do vento, aquando da definição de ocorrências extremas é um aspecto sobre o qual deverão incidir posteriores trabalhos. Foi ainda identificado espaço para desenvolvimento de novas metodologias de correlação.

Na parte associada à interface gráfica que consubstancia o *software* PAFER uma evolução no modo de interacção entre o utilizador o programa é claramente possível, de forma a tornar a sua utilização mais amigável e intuitiva.

Lista de figuras e tabelas

- Figura 2.1 - Mapa de recurso eólico europeu. European Wind Atlas, Risø 1989
Figura 2.2 - Estação de medição das características do vento
Figura 2.3 - Anemómetro de copos
Figura 2.4 - Cata-vento
Figura 2.5 - Sonda de temperatura
Figura 3.1 - Metodologia para o processamento e validação periódica de dados de vento
Figura 4.1 - Forma típica de um histograma de velocidade do vento
Figura 4.2 - Rosa-dos-ventos
Figura 4.3 - Exemplo de uma tabela classificada de ocorrências
Figura 4.4 - Sensibilidade da forma da função de Weibull à variação de k
Figura 4.5 - Determinação de A e k – Método do Atlas Europeu de Vento
Figura 4.6 - Histogramas de difícil ajuste através da função de Weibull
Figura 4.7 - Espectro típico do vento segundo Van der Hoven
Figura 4.8 - Variação espectral da velocidade do vento num local do litoral Norte português
Figura 4.9 - Relação típica entre a I_t e velocidade num local do litoral Norte português
Figura 4.10 - Forma do perfil vertical de velocidades vs expoente p
Figura 4.11 - Curva de potência de um aerogerador representativo do mercado actual
Figura 5.1 - Velocidade média mensal numa estação de referência do INEGI
Figura 5.2 - Representação gráfica MCD
Figura 5.3 - Representação gráfica de MCV_{MM}
Figura 5.4 - Rosas-dos-ventos simultâneas para duas situações de correlação reais
Figura 5.5 - Rosa de energias observadas e extrapoladas para duas situações de correlação reais
Figura 5.6 - Localização das estações de validação
Figura 5.7 - Comparação do desempenho entre os dois métodos de correlação da velocidade
Figura 5.8 - Comparação do desempenho entre os dois métodos de correlação da velocidade
Figura 5.9 - Comparação do desempenho entre os dois métodos de correlação da velocidade
Figura 6.1 - Possíveis consequências da incorrecta selecção de aerogeradores
Figura 6.2 - Variação típica da velocidade máxima expectável com t_r .
Figura 6.3 - Influência da extensão de PR na qualidade das estimativas da velocidade máxima
Figura 6.4 - Influência da extensão de PR na variabilidade das estimativas da velocidade máxima
Figura 7.1 - Janela principal da aplicação PAFER
Figura 7.2 - Valores de referência
Figura 7.3 - Validação mensal de dados
Figura 7.4 - Caracterização do regime de ventos
Figura 7.5 - Variação temporal do recurso
Figura 7.6 - Perfil vertical de velocidades
Figura 7.7 - I_t vs velocidade do vento
Figura 7.8 - Correlação entre 2 alturas de medição
Figura 7.9 - Correlação MCP
Figura 7.10 - Ventos extremos
Figura 7.11 - Produção eléctrica
- Tabela 5.1 - Características do regime de ventos observado na estação LOC
Tabela 5.2 - Características do regime de ventos extrapolado para estação LOC
Tabela 5.3 - Desvios dos regimes de ventos extrapolados face ao observado em LOC
Tabela 6.1 - Classes de aerogeradores segundo IEC 61400 – Parte 1
Tabela 6.2 - Características do regime de ventos
Tabela 6.3 - Desempenho dos métodos de determinação de velocidades máximas

Lista de símbolos

A	Factor de escala da função de Weibull	[m/s]
A_{inc}	Área de incidência	[m ²]
C_A	Curva característica de potência do aerogerador	
C_k	Constante de von Karman	
E_m	Energia transformada pelo mecanismo ideal de aproveitamento do vento	[J]
Est_{Loc}	Estação local	
Est_{Ref}	Estação de referência	
E_v	Energia contida no vento	[J]
F_{pot}	Fluxo de potência instantâneo	[W/m ²]
F_{pot}	Fluxo de potência médio	[W/m ²]
F_{potW}	Fluxo de potência médio determinado por $w(u)$	[W/m ²]
$Freq_{>\bar{V}}$	Frequência de ocorrência superior de velocidades superiores a $\bar{V}$	
g	Aceleração gravítica	[m/s ²]
$G(u)$	Distribuição de Gumbel acumulada	
h	Distância na vertical ao solo	[m]
hpc	Horas anuais de funcionamento a plena carga	[h/ano]
h_t	Altura ao solo do eixo do rotor do aerogerador	[m]
$HIST$	Histograma de velocidade	
It	Intensidade de turbulência	
It_{15}	Intensidade de turbulência para a gama dos 15 m/s à h_t	
k	Factor de forma da função de Weibull	
m	Caudal mássico de ar	[kg/s]
MCD	Matriz de correlação entre direcções	
MCV_{MM}	Matriz de correlação de velocidades – Método matricial	
MCV_{ML}	Matriz de correlação de velocidades – Método de correlação linear	
M_{ext}	Período de referência para a determinação de eventos extremos	[anos]
m_{ext}	Número de eventos extremos	
MPC_V	Matriz de parâmetros de Correlação de velocidades	
P	Pressão atmosférica	[Pa]
p	Expoente característico do perfil	
P_0	Pressão atmosférica normal - T=15°C e z = 0 m	[Pa]
$Perm_{LocPrev}$	Permilagem de ocorrências por classes de velocidade prevista para Est_{Loc}	
$Perm_{Ref}$	Permilagem de ocorrências por classes de velocidade observada na Est_{Ref}	
PR	Período de referência	[anos]
$Prod$	Produção média anual de energia eléctrica por aerogerador	[MWh/ano]
R	Constante universal de gases perfeitos	[J/(°K.kg)]
$r(u)$	Função densidade de Rayleigh	
RO_{Ref}	Rosa-dos-ventos observada na Est_{Ref}	
$RO_{LocPrev}$	Rosa-dos-ventos Prevista para a Est_{Loc}	
T	Temperatura do ar	[°C]
t_r	Tempo de retorno	[anos]
u	velocidade do vento	[m/s]
$\bar{V}$	Velocidade média do vento	[m/s]
V_{ave}	Velocidade média anual à h_t	[m/s]
V_{max}	Velocidade máxima prevista	[m/s]
V_{ref}	Velocidade máxima prevista para um período de retorno de 50 anos à h_t	[m/s]
$\bar{V}_W$	Velocidade média do vento determinada por $w(u)$	[m/s]

$W(u)$	Função acumulada de Weibull	
$w(u)$	Função densidade de Weibull	
z	Altitude	[m]
z_0	Rugosidade característica	[m]
Γ	Função densidade de Gama	
δ	Parâmetro de forma da função $G(u)$	
$\eta(u)$	Transformada logarítmica de $G(u)$	
λ	Parâmetro de escala da função de $G(u)$	[m/s]
$\bar{v}$	Velocidade média da distribuição de extremos	[m/s]
ζ	Constante de Euler	
ρ	Massa volúmica do ar	[kg/m ³]
σ_{50}	Desvio padrão das estimativas de Vel_{max} para 50 anos	[m/s]
σ_u	Desvio padrão das velocidade média	[m/s]
$\zeta(u)$	Transformada da velocidade	
ν^*	Viscosidade dinâmica	[kg/(m.s)]
$\psi(u)$	Transformada inversa de $W(u)$	
ω	Variância da distribuição de extremos	[(m/s) ²]

Referências

- 1.1 Nonnenberg, M. J. B., 'Evolução Recente dos Preços do Petróleo', 2005, Instituto de Pesquisa Económica Aplicada, Brasília, Brasil
- 1.2 Vários, 'FORUM Energias Renováveis em Portugal - Uma Contribuição para os Objectivos de Política Energética e Ambiental', 2002, ADENE / INETI, Lisboa, Portugal
- 1.3 www.dge, 'Conhecer o Sector – A Energia em Números'
- 1.4 Rodrigues, A., 'Parques Eólicos em Portugal', Dezembro 2004, INEGI, Porto, Portugal
- 2.1 'European Wind Atlas', 1989, Risø National Laboratory, Dinamarca, Copenhaga
- 2.2 'The Future for Renewable Energy 2', 2002, James & James, Ltd, Londres, Reino Unido
- 2.3 'WASP 8 Help Facility and On-line Documentation', 2003, Risø National Laboratory, Dinamarca, Copenhaga
- 2.4 Ower, E. et Pankhurst, R. C., 'The Measurement of Air Flow', 1997, Pergamon Press Ltd., Oxford, Reino Unido
- 2.5 Gasch, R. et Tiele, J., 'Wind Power Plants', 2002, James & James Ltd, Reino Unido
- 2.6 'Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation – 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry', 1999, Renewable Energy Systems, Ltd, Glasgow, Reino Unido
- 2.7 Kristensen, L et al, 'Distance Constant of the Risø Cup Anemometer', 2002, Copenhaga, Dinamarca
- 2.8 Antoniou I, 'Comparison of Wind Speed and Power Curve Measurements Using a Cup Anemometer, a Lidar and a Sodar', 2004, EWEC'04 Scientific Proceedings, EWEA, Londres, Reino Unido
- 2.9 Smith D., 'Wind LIDAR Evaluation at the Danish Wind Test Site in Høvsøre', 2004, EWEC'04 Scientific Proceedings, EWEA, Londres, Reino Unido
- 2.10 'Power Performance Measurement Procedure – Version 3'. 2000, MEASNET – Network of Measuring Institutes
- 3.1 'Wind Resource Assessment Book', 1997, AWS Scientific, Inc. – National Renewable Laboratory, Colorado, Estados Unidos da América
- 4.1 Potter, M. C. et Wiggert, D. C., 'Mechanics of Fluids', Prentice-Hall, Inc., Estados Unidos da América
- 4.2 Gomes de Azevedo, 'Termodinâmica Aplicada', 2000, Escolar Editora, Lisboa, Portugal
- 4.3 Grimm, A. M., 'Meteorologia Básica – Notas de Aula', 1999, Universidade do Paraná, Brasil
- 4.4 Valença, M. R., 'Métodos Numéricos', 1993, Livraria Minho, Braga, Portugal
- 4.5 Miranda, P., 'Meteorologia e Ambiente', 2001, Universidade Aberta, Lisboa, Portugal

- 4.6 Vários, 'Atmospheric Processes Over Complex Terrain', 1990, American Meteorological Society, Pensilvânia, Estado Unidos da América
- 4.7 Pope, S. B., 'Turbulent Flows', 2000, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido
- 4.8 Shumway, R. H. et Stoffen, D. S., 'Time Series and Its Applications', 2000, Springer-Verlag New York, Inc., Nova Iorque, Estados Unidos da América
- 4.9 Van der Hoven, I., 'Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range Form 0.0007 to 900 Cycles Per Hour', 1957, Journal of Meteorology, Vol. 14, No. 2
- 4.10 Burton, T. et al, 'Handbook of Wind Energy', 2001, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, Reino Unido
- 4.11 Geiger, R., 'Manual de Microclimatologia – O Clima de Ar Junto ao Solo', 1961, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal
- 4.12 Schlichting, H., 'Boundary-layer Theory – Seventh Edition', 1979, McGraw-Hill, Inc., Nova Iorque, Estados Unidos da América
- 5.1 Johanson C., 'Variability in the Energy content of the Wind over Scandinavia – a 101-year Perspective', 2004, EWEC'04 Scientific Proceedings, EWEA, Londres, Reino Unido
- 5.2 'Portuguese Report to the World Meteorological Organization on the Abnormal Weather and Unusual Climate in 2001' 2002, Instituto de Meteorologia, Lisboa, Portugal
- 5.3 Bunn, J. C. et Watson, S. J., 'Development of a New Matrix Method for MCP With Particular Applicability to Complex Terrain', 1996, EU Wind Energy Conference, Göteborg, Suécia
- 5.4 Meyer, P. L., 'Probabilidade: Aplicações à Estatística', 1974, Livros Técnicos e Científicos, S.A., Rio de Janeiro, Brasil
- 5.5 Woods, J. C., et al, 'A variation on the MCP methodology' 1997, Journal of Wind Eng. And Ind. Aerodynamics, Amesterdão, Holanda
- 5.6 Riedel, V. et al., 'Robust Approximation of Functional Relationships Between Meteorological Data: Alternative Measure-Correlate-Predict Algorithms', 2001, EWEC01, Copenhaga, Dinamarca
- 5.7 Nielsen, M. et al, 'Application of the Measure-Correlate-Predict Approach for Wind Resource Assessment', 2001, EWEC01, Copenhaga, Dinamarca
- 6.1 Wind Energy, 06/2002
- 6.2 www.noticiasdenavarra.com, 19/12/2003
- 6.3 International Electric Commission, 'International Standard IEC 61400 – Part 1', 1999, IEC, Genebra, Suíça.
- 6.4 'Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes', 2000, Porto Editora, Lda., Porto, Portugal.
- 6.5 Gumbel, E.J., 'Statistics of Extremes', 1967, Columbia University Press, New York, USA.
- 6.6 Castillo, E., 'Extreme Value Theory in Engineering', 1987, Academic, Press Inc., San Diego, USA.

- 7.1 'MatLab, Language of Technical Computing, Help Browser', 2002, The MathWorks, Inc., Estados Unidos da América
- 7.2 Rao, C. I., 'Computational Statistics', 1993, Elsevier Science Publishers B. V., Amesterdão, Holanda

Anexo I

Qualidade de desempenho dos métodos de correlação de velocidade

Tabela I.1 – Qualidade de desempenho dos dois métodos de correlação da velocidade

Correlação	Estações		Local	Período	N.º de dias de correlação	Erro [%]				Erro [%]						
	Referência	Local				Método Matricial de Correlação da Velocidade				Método Linear de Correlação da Velocidade						
						Velocidade	A	k	Fluxo potência	Produção	Velocidade	A	k	Fluxo potência	Produção	
1	E2027	E2028	Serra do Alvão	Mar01 a Fev02	325	-6.03	-6.82	-3.35	-13.20	-10.15	-7.83	-7.95	0.56	-21.74	-11.91	
2	E2027	E2046		Out01 a Set02	354	-0.14	0.00	-1.07	0.40	-0.03	-2.46	-2.44	4.28	-11.74	-4.02	
3	E2028	E2046		Mar01 a Fev02	326	1.96	2.33	3.47	1.47	3.68	-0.78	-1.16	4.62	-7.33	-1.13	
4	PORT059	PORT114	Serra d'Arga	Jan02 a Dez02	365	-2.70	-3.26	-0.56	-7.03	-4.47	-5.03	-5.43	-1.68	-11.81	-7.60	
5	PORT059	PORT140		Jan02 a Dez02	360	-0.65	0.00	-2.65	1.46	-0.48	-2.59	-2.35	-3.31	-3.04	-3.40	
6	PORT114	PORT140		Jan02 a Dez02	361	1.17	1.18	1.32	6.08	1.67	-0.39	0.00	-1.32	0.26	-0.23	
7	E2018	E2052	Fafe	Jun03 a Mai04	342	-11.85	-10.91	-2.99	-25.88	-23.39	-13.03	-12.73	1.20	-35.29	-30.69	
8	PORT014	PORT238		Mai03 a Abr04	361	3.77	2.63	3.83	8.58	5.37	-3.14	-3.95	-0.43	-8.91	-8.71	
9	PORT079	PORT238		Mai03 a Abr04	363	-0.30	-1.32	-0.85	-0.33	-2.78	-3.59	-3.59	-3.95	9.79	-16.50	-10.66
10	PORT014	PORT079	Trancoso	Mai03 a Abr04	360	0.86	0.00	2.31	0.00	-0.74	1.54	1.52	28.90	-19.05	-4.88	
11	PORT005	PORT120		Mar01 a Fev02	298	13.18	13.75	10.91	28.17	21.00	12.34	12.50	25.45	10.02	19.25	
12	PORT014	PORT120		Mar02 a Fev03	349	6.64	7.41	7.27	10.91	11.31	5.81	6.17	22.42	-5.64	10.91	
13	PORT014	PORT015	Serra de Montemuro	Jun03 a Mai04	359	0.43	0.00	3.28	-2.28	-0.46	-1.14	-1.27	16.39	-17.31	-4.86	
14	PORT218	PORT230		Serra do Sicó	Jan04 a Dez04	366	0.69	1.23	1.71	1.17	2.85	-1.10	-1.23	4.45	-6.16	-3.59
15	PORT100	PORT102		Serra de Arada	Jan03 a Dez03	234	1.69	1.39	-0.67	6.52	2.24	2.15	2.78	7.38	-3.04	3.56
Erro médio [%]						3.47	3.48	3.08	7.57	6.04	4.20	4.36	8.81	11.86	8.36	

Anexo II

Configuração dos ficheiros *.dat

As séries temporais das características de vento deverão ser disponibilizadas sob a forma de um ficheiro em formato ASCII com extensão *.dat para que possam ser interpretadas pelo programa PAFER.

As primeiras quatro linhas deverão conter a informação relativa à estação de medição, ao período de medições coberto, ao número de registos disponível na série e à organização das grandezas medidas. De seguida deverá surgir a listagem com os valores relativos à velocidade e direcção do vento para cada instante de medição organizada de acordo com o explicitado na figura II.1.

ESTAÇÃO PORT238 <—————	Nome da estação
Maio de 2003 a Abril de 2004 <—————	Período de dados
52704 registos <—————	Número de registos
Est, dir, Vmed, raj, Vmin, desv. padrão, AAAAMMDDhhmm, <—————	Cabeçalho


```

238,252,5.3,6.8,4.1,0.5,200305010000,
238,253,5.4,6.4,4.1,0.5,200305010010,
238,252,5.7,6.4,4.5,0.3,200305010020,
238,250,6.6,4.5,6.0,2,200305010030,
238,255,6.1,6.4,4.9,0.2,200305010040,
238,256,6.2,6.8,5.3,0.2,200305010050,
238,254,5.9,6.4,5.6,0.2,200305010100,
238,250,6.6,4.5,6.0,1,200305010110,
238,247,6.2,6.4,5.6,0.2,200305010120,
238,247,6.1,6.4,5.6,0.1,200305010130,
238,245,6.6,4.5,6.0,1,200305010140,
238,244,5.9,6.4,5.6,0.2,200305010150,
238,243,5.5,6.5,3.0,1,200305010200,
238,241,5.3,5.6,4.9,0.1,200305010210,
238,238,5.1,5.6,4.5,0.2,200305010220,
238,237,4.8,5.3,3.8,0.2,200305010230,
238,241,4.8,5.3,4.5,0.2,200305010240,
238,235,4.6,4.9,4.1,0.2,200305010250,
238,234,4.6,4.9,4.1,0.1,200305010300,

```

Designação da estação

Direcção média do vento [°]

Velocidade média do vento [m/s]

Velocidade máxima do vento [m/s]

Velocidade mínima do vento [m/s]

Desvio padrão da velocidade do vento [m/s]

Data [AAAAMMDDHHMM]

Figura II.1 – Configuração dos ficheiros *.dat

Anexo III
Configuração dos ficheiros *.tab

De forma a poderem ser interpretadas pelo programa PAFER os ficheiros contendo as tabelas classificadas de ocorrências deverão estar no formato ASCII e com a extensão *.tab e de acordo com a o disposto na figura III.1

Na primeira linha deverá constar a informação relativa à designação da estação, ao número de registos válidos que esteve na base da construção da tabela classificada de ocorrência, à velocidade média e ao fluxo de potência médio do vento calculados com base na série temporal.

Na segunda linha deverá estar indicada a altura a que se refere a tabela classificada de ocorrências. Nesta linha estão reservadas duas posições para inserção das coordenadas referentes à localização da estação.

Na terceira linha está assinalado o número de sectores da rosa-dos-ventos e a extensão das classes de velocidade considerados.

Na quarta linha consta a distribuição de ocorrências por sectores da rosa-dos-ventos. Nas restantes linhas deverá estar presente a listagem com a permilagem relativa ao número de ocorrências para uma dada velocidade do vento, num determinado sector. Deverá ainda surgir no lado esquerdo uma coluna com as classes de velocidade.

ESTACÃO PORT23 Norm= 52492 TRUE Vmean= 6.66 Pmean= 273									
0	0	40							
12	1	0							
	4.08	6.9	17.93	---	17.4	14.73	10.76	5.28	
1	28.8	19.32	7.7	---	7.41	9.59	12.6	27.87	
2	30.94	25.42	10.71	---	9.8	14.45	26.08	27.45	
3	52.66	74.87	31.94	---	20.5	30.71	64.24	75.65	
4	106.02	108.5	66.9	---	48.52	63.56	102.4	125.04	
5	122.95	151.46	83.37	---	75.75	120.56	141	156.64	
6	122.71	152.09	105.02	---	124.13	148.2	169.64	154.11	
7	116.17	125.84	114.16	---	151.03	148.85	164.6	147.34	
8	132.87	152.43	117.22	---	152.18	136.24	119.22	89.65	
9	115.94	96.69	117.72	---	125.2	126.25	75.3	63.92	
10	67.6	51.52	107.76	---	97.58	78.56	39.8	45.41	
11	43.55	31.08	90.23	---	67.04	44.45	29.71	29.52	
12	29.42	8.56	69.56	---	40.88	23.86	18.55	21.85	
13	17.75	2.07	41.1	---	28.43	17.07	16.34	11.38	
14	4.67	0.14	21.84	---	21.32	12.87	7.7	10.65	
15	4.44	0	10.84	---	13.66	8.15	4.43	4.33	
16	2.34	0	3.29	---	7.44	6.6	2.92	3.97	
17	1.17	0	0.53	---	3.06	3.17	1.95	3.07	
18	0	0	0.11	---	1.45	2.33	1.15	1.08	
19	0	0	0	---	1.61	1.52	1.73	0.36	
20	0	0	0	---	1.48	1.39	0.49	0.72	
21	0	0	0	---	1.04	0.84	0.18	0	
22	0	0	0	---	0.44	0.65	0	0	
23	0	0	0	---	0.05	0.13	0	0	
24	0	0	0	---	0	0	0	0	
25	0	0	0	---	0	0	0	0	

Figura III.2 – Configuração dos ficheiros *.tab

Anexo IV
Configuração dos ficheiros *.pow

A informação respeitante às características técnicas, curvas de potência e coeficiente axial de potência dos aerogeradores deverão estar sob a forma de um ficheiro em formato ASCII e com a extensão *.pow e de acordo com o disposto na figura IV.1 para que possam ser interpretadas pelo *software* PAFER.

Na primeira linha constará a designação da estação. Na segunda a altura de instalação do eixo do rotor ao solo e o diâmetro do mesmo. Na terceira linha estará assinalada a extensão das classes de velocidade, das unidades dos valores de potência indicados posteriormente e da massa volúmica a que estes respeitam.

Posteriormente surgirá a listagem com os valores das classes de velocidade, respectiva potência debitada e coeficiente de impulso axial.

Turbina exemplo			Designação do aerogerador
67	87		Altura do eixo e diâmetro do rotor [m]
1	1000	1.09	Extensão das classes de velocidade
4	55.2	0.797	Unidade dos valores de potência: 1-W, 1000-kW ...
5	132.1	0.786	Massa volúmica [kg/m³]
6	250.4	0.784	
7	415.5	0.784	
8	633.7	0.779	
9	906.8	0.76	
10	1224.2	0.711	
11	1542.0	0.615	
12	1785.0	0.491	
13	1919.2	0.378	
14	1974.4	0.293	
15	1992.8	0.233	
16	1998.1	0.189	
17	1999.5	0.157	
18	1999.9	0.132	
19	2000.0	0.112	
20	2000.0	0.096	
21	2000.0	0.084	
22	2000.0	0.073	
23	2000.0	0.065	
24	2000.0	0.058	
25	2000.0	0.052	
			Coeficiente de impulso axial
			Potência
			Classes de velocidade [m/s]

Figura IV.1 – Configuração dos ficheiros *.pow

Anexo INFORAMÁTICO
Aplicação PAFER e ficheiros exemplo

CD contendo a ferramenta PAFER e os todos os ficheiros de dados utilizados neste trabalho na sua descrição.