

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## Detecção de Mudança da Característica de Produção de Parques Eólicos

Rui Filipe Martins dos Santos

Dissertação no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Monteiro

Junho de 2008

© Rui Santos, 2008

# Resumo

Com este trabalho pretende-se avaliar o desempenho de um parque eólico localizado no centro de Portugal Continental, de modo a permitir numa fase posterior, o desenvolvimento de uma ferramenta, que permita visualizar todos os parâmetros que se revelem importantes na caracterização do modo de funcionamento do parque e das respectivas máquinas que o constituem em tempo real.

Dentro do processo de avaliação do desempenho do parque, pretende-se identificar a existência de desvios, no que diz respeito à produção do parque e perceber quais os motivos deste comportamento atípico que se pretende que seja uniforme.

Para a execução deste trabalho foram utilizadas Redes Neurais para obtenção da curva de potência do parque e de cada um dos 12 aerogeradores que constituem o parque eólico.

Na análise do parque considera-se uma amostra de 37192 valores, registados em *scada*, o que equivale aos registos de onze meses de produção, no caso da avaliação dos aerogeradores considera-se uma amostra de cerca de 8500 valores para cada um.

Verifica-se que efectivamente existe uma degradação na produção do parque ao longo do tempo, representando cerca de 3% da potência nominal, o que equivale aproximadamente às perdas existentes.



# Abstract

*The main objective of this work is to evaluate the performance of an wind farm located in the centre of Portugal, which allows us in the near future to develop a tool that will help us to visualize the most important parameters in the functional method of the wind farm and it's respective machines in real time.*

*Within the wind farm evaluation process, the main objective is to identify variations in the production of the wind park and understand the reasons for such abnormal behaviour that's intend to be constant.*

*In the realization of this project, to obtain a power curve from the wind farm and each one of the 12 wind-turbines it was used a Neural Network.*

*In the analysis of the wind farm it was used a sample of 37.192 values, that were registered in SCADA, which is the equivalent to the records from 11 months of production, in particularly, for the evaluation of the wind-turbines was considered a sample from about 8500 to one.*

*It was able to verify that effectively exists a degradation in the production of the park over time, representing about 3% of the nominal power, which represents, approximately, the existent loses.*



# Agradecimentos

Ao terminar este trabalho, gostaria de agradecer a todas as pessoas que directa ou indirectamente colaboraram e me ajudaram neste projecto, em especial:

- ao Eng.º. Cláudio Monteiro, que aceitou orientar o trabalho de elaboração desta dissertação, pela paciência e amizade com que acompanhou essa elaboração e pelo constante estímulo com a sua palavra inteligente, com as suas observações e ensinamentos oportunos e, em geral, com a sua atitude de optimismo e compreensão intelectual e humana;
- ao Eng. Ricardo Bessa, pelo apoio prestado, nomeadamente a disponibilização de meios bibliográficos importantes à realização deste trabalho;
- ao Eng.º João Sousa, Eng.º Carlos Oliveira e Eng.º Élio Mota, pela disponibilidade que demonstram para desenvolver este trabalho e pela forma como colaboram nas diversas trocas de impressões;
- aos meus pais, pelo conceito de vida que me transmitiram;
- à Vânia - a quem exprimo de forma muito especial o meu reconhecimento - pela presença activa que teve em todo o meu percurso universitário, estando sempre ao meu lado nos bons e nos maus momentos, celebrando comigo a medida que cada etapa era superada, desta enorme caminhada que é a vida académica; e rejubilando-me todos os dias com o seu carinho e amor;
- a todos aqueles que comigo convivem dia a dia, pelo contributo que deram para a realização desta dissertação.





# Índice

Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice .....	ix
Lista de figuras .....	xi
Lista de tabelas .....	xiii
Abreviaturas e Símbolos .....	xv
Capítulo 1 .....	1
Considerações iniciais.....	1
1.1 - Contextualização do Sector Eólico Nacional.....	1
1.2 - Motivação .....	3
1.3 - Objectivos.....	4
1.4 - Apresentação sumária.....	4
1.5 - Organização do trabalho.....	5
Capítulo 2 .....	7
Estado da Arte .....	7
2.1 Introdução .....	7
2.2 Domínios de aplicação .....	7
2.3 Sistemas de apoio de monitorização de parques eólicos .....	8
Capítulo 3 .....	9
Caracterização do Parque Eólico.....	9
3.1 Introdução .....	9
3.2 Caracterização dos aerogeradores .....	10
3.3 Caracterização das estações de medida .....	12
Capítulo 4 .....	15
Análise de velocidades de vento .....	15
4.1 Introdução .....	15
4.2 Caracterização da velocidade do vento medida .....	18
4.2.1 Caracterização da velocidade de vento por sector.....	19

<b>Capítulo 5</b> .....	<b>23</b>
Análise do Desempenho do Parque .....	23
5.1 Introdução .....	23
5.2 Rede Neuronal .....	23
5.3 Curva da Potência do Parque .....	25
5.3.1 Curvas de potência por sector.....	26
5.3.2 Curvas de potência por sector.....	29
5.4 Desempenho do parque eólico .....	33
5.4.1 Factor de capacidade de parque.....	33
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>37</b>
Análise do desempenho do parque por aerogerador .....	37
6.1. Introdução .....	37
6.2. Curvas de potência por aerogerador .....	38
6.3. Índice de energia produzida por Aerogerador .....	40
<b>Capítulo 7</b> .....	<b>45</b>
Conclusões.....	45
Futuros desenvolvimentos .....	46
<b>Anexos</b> .....	<b>47</b>
<b>Referências</b> .....	<b>83</b>
<b>Bibliografia consultada</b> .....	<b>85</b>

## Lista de figuras

Figura 1.1 - Evolução da energia produzida a partir de FER (TWh) [1]. .....	1
Figura 1.2 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental [1].....	2
Figura 1.3 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental (nota: os valores em percentagem correspondem a variação relativamente ao mês homólogo do ano anterior) [1]. .....	2
Figura 1.4 - Evolução da produção eólica em Portugal Continental - Ano Móvel (GWh) [1]. ....	3
Figura 3.1 - Mapa da localização dos aerogeradores[3]. .....	9
Figura 3.2 - Potência garantida e respectiva curva de confiança ( $\rho_0=1,10 \text{ Kg/m}^3$ ). .....	12
Figura 3.3 - Mapa identificativo das estações de meteorológicas [3]. .....	13
Figura 4.1 - Registo da “PORT071” para um dia. ....	16
Figura 4.2 - Registo da “PORT071” para uma semana. ....	16
Figura 4.3 - Registo da “PORT071” para um mês. ....	17
Figura 4.4 - Duração de uma campanha experimental vs precisão nas estimativas [7]. ....	18
Figura 4.5 - Histograma da frequência de ocorrência da velocidade do vento, obtida a partir dos dados de “SCADA”.....	19
Figura 4.6 - Número de ocorrências registadas, por sector.....	20
Figura 4.7 - Número de ocorrências registadas por sector, em função da velocidade de vento.....	20
Figura 4.8 - Evolução dos parâmetros de A e K. ....	21
Figura 5.1 - Representação gráfica da função <i>Tansig</i> [9] .....	24
Figura 5.2 - Gráfico representativo da adaptação da rede neuronal ao objectivo pretendido .....	25
Figura 5.3 - Gráfico de adaptação da curva de potência do parque aos pontos de treino.....	26
Figura 5.4 - Gráfico da matriz de potência <i>WFPA</i> . .....	27

Figura 5.5 - Adaptação da resposta da rede neuronal aos respectivos pontos de treino. ....	28
Figura 5.6 - Resposta da rede neuronal do parque, aos dados da matriz de potência. ....	28
Figura 5.7 - Respostas das redes neuronais para os diversos meses, sendo que a rede possui unicamente a velocidade como entrada. ....	29
Figura 5.8 - Curvas de potência do sector 7. ....	30
Figura 5.9 - Curvas de potência do sector 12. ....	31
Figura 5.10 - Curvas de potências referentes aos meses de Março - Abril. ....	32
Figura 5.11 - Curvas de potências referentes aos meses de Novembro - Dezembro. ....	32
Figura 5.12 - Evolução do factor de capacidade do parque, não considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais. ....	34
Figura 5.13 - - Evolução da performance do parque, considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais. ....	35
Figura 5.14 - Comparação do factor de capacidade do parque, entre os dados que constam na matriz <i>WFP</i> A e os dados gerados pela rede neuronal. ....	36
Figura 6.1 - Curvas de potências correspondentes aos meses de Novembro - Dezembro. ....	38
Figura 6.2 - Curvas de potência correspondentes aos meses de Agosto - Setembro. ....	39
Figura 6.3 - Evolução do factor de capacidade total para cada aerogerador, sem a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais. ....	41
Figura 6.4 - - Evolução da performance do aerogerador 10 por sector, considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais. ....	42
Figura 6.5 - - Evolução da performance do aerogerador 2 por sector, considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais. ....	43

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Alturas de instalação dos aerogeradores, do parque[3]. .....	10
Tabela 3.2 - Curva de potência e de confiança dos aerogeradores instalados no parque[4]. ..	11
Tabela 3.3 - Configuração da <i>PORT071</i> [3]. .....	12
Tabela 4.1 - Caracterização dos sectores.....	19
Tabela 4.2 - Parâmetros A e K calculados .....	21
Tabela 6.1 - Evolução das curvas de potência. ....	40



# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

À medida que vão surgindo, as referências utilizadas no texto são definidas de forma a que os respectivos significados não suscitem dúvidas. De qualquer modo considera-se conveniente apresentar uma listagem dos mais importantes.

FER	Fontes de energia renováveis.
MAPE	Medida de apoio ao aproveitamento do potencial energético e racionalização de consumos.
Net Train	Treino de rede neuronal.
Player	Interveniente.
PORT071	Estação meteorológica 071.
PORT214	Estação meteorológica 214.
Target	Objectivo atingido.
WFPA	<i>Wind farm power array.</i>

## Lista de símbolos

À medida que vão surgindo, os símbolos utilizados no texto são definidos de forma a que os respectivos significados não suscitem dúvidas. De qualquer modo considera-se conveniente apresentar uma listagem dos mais importantes.

$f(\bar{u})$	Função densidade da probabilidade de <i>Weibull</i> .
$\bar{u}$	Velocidade média de vento (m/s).
A	Parâmetro de escala (adimensional).
K	Parâmetro de forma (adimensional).
$V_{Z_1}$	Velocidade à altura $Z_1$ (m/s).
$Z_1$	Altura (m).

$V_{Z_{ref}}$	Velocidade à altura de referência $Z_{ref}$ (m/s). .
$Z_{ref}$	Altura de referência (m).
$\alpha$	Coeficiente de rugosidade do local (adimensional).
$P_{(A,K)}$	Potência calculada a partir da distribuição de Weibull(kW).
$P_{medida}$	Potência gerada pela rede neuronal (kW).
$P_{máximo}$	Potência máxima do parque(kW).



# Capítulo 1

## Considerações iniciais

### 1.1 - Contextualização do Sector Eólico Nacional

Na contextualização do sector eólico nacional, verifica-se que a energia eléctrica produzida a partir da energia eólica está a sofrer um aumento considerável, tal como se verifica na Figura 1.1.

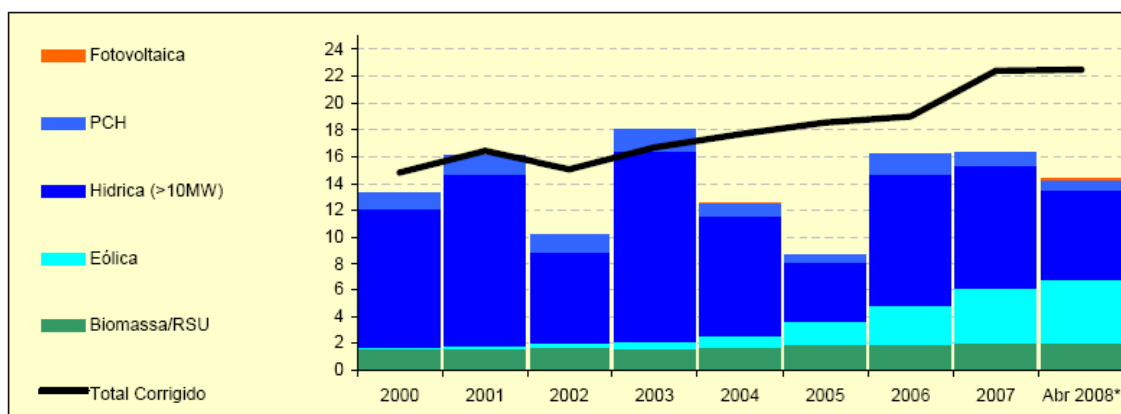


Figura 1.1 - Evolução da energia produzida a partir de FER (TWh) [1].

Com base nos dados apresentados na Figura 1.1, constata-se que a explosão do investimento no sector eólico em Portugal iniciou-se no ano de 2001, como resultado das directivas internacionais iniciadas com o Protocolo de Quioto, conduzindo a que a União Europeia tomasse medidas de carácter urgente no que diz respeito à redução dos índices referentes às emissões de gases poluentes, traduzindo-se assim, num conjunto de metas a cumprir pelos países que integram a U.E.. Este facto torna-se explícito na Figura 1.2, isto é, é possível verificar-se que a partir da data referida no parágrafo anterior, o crescimento deste sector tem vindo a ser exponencial.

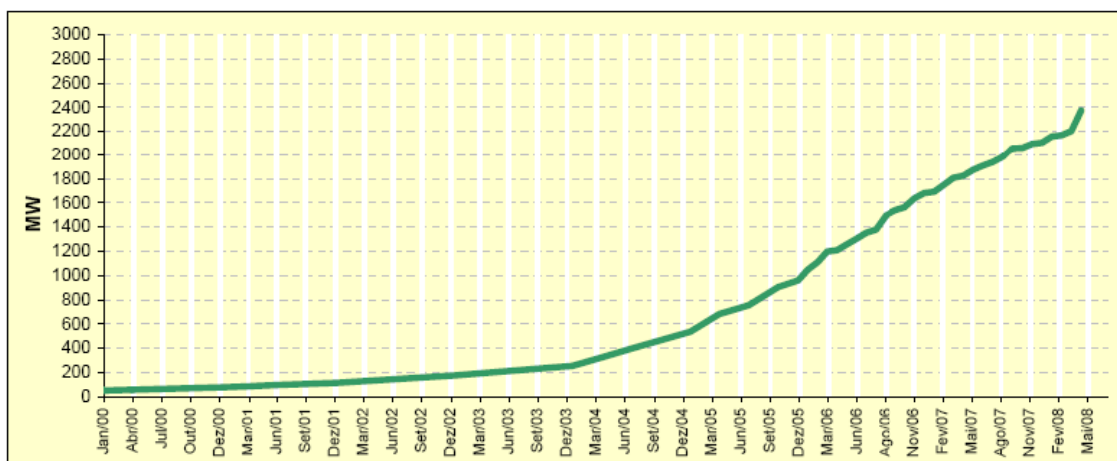


Figura 1.2 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental [1].

Os dados actuais relatam que a potência eólica instalada no final de Abril de 2008 ascendia a 2375 MW, distribuída por 157 parques, com um total de 1271 aerogeradores ao longo de todo o território Continental. Sabe-se que 42% da potência instalada situa-se em parques com potência igual ou inferior a 25 MW .

O investimento médio por MW declarado ao programa MAPE foi de €1,18 M/MW. No total do programa MAPE foram aprovadas candidaturas para 1533 MW de eólicas, num total de investimento de € 1815mM [1].

Os distritos com maior potência instalada, em Abril de 2008, são Viseu, Castelo Branco, Coimbra, Viana do Castelo, Lisboa, Vila Real, Santarém, Leiria e Braga (405, 321, 277, 273, 193, 169, 150, 149 e 121 MW). Os distritos com maior recurso vento, em 2007, foram Bragança, Guarda, Lisboa, Vila Real, Santarém, Porto, Viana do Castelo e Aveiro (2633, 2462, 2412, 2288, 2277, 2257, 2070 e 2019 horas equivalentes).

A produção eólica, de Janeiro a Abril de 2008, cresceu 57% relativamente a igual período de 2007. Em Abril a produção foi 136% superior à registada no mês homólogo do ano anterior, verificando-se um decréscimo da produção entre Março e Abril de acordo aspectos relativos à sazonalidade, como é possível verificar na Figura 1.3. Tal como está representado na Gráfico 1.4, a evolução da produção de energia eólica desde Dezembro de 2003 até a data teve um crescimento de aproximadamente 960%.



Figura 1.3 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental (nota: os valores em percentagem correspondem a variação relativamente ao mês homólogo do ano anterior) [1].

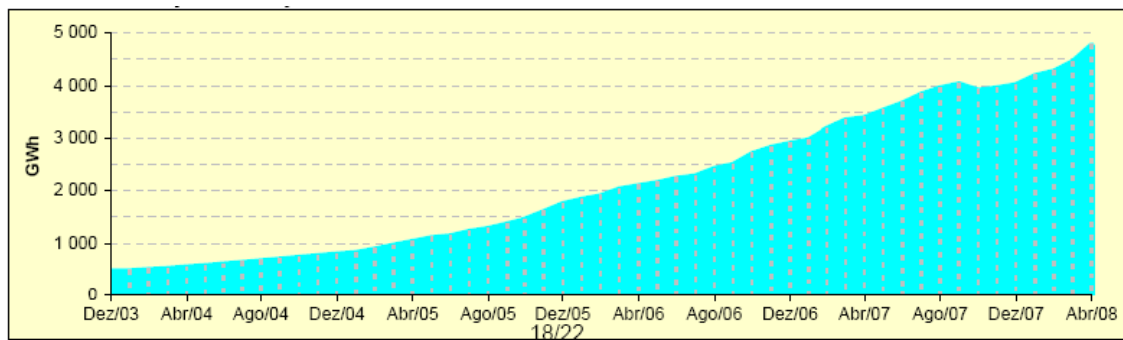


Figura 1.4 - Evolução da produção eólica em Portugal Continental - Ano Móvel (GWh) [1].

Para além das razões ambientais referidas anteriormente e atendendo a aspectos referentes à escalada do preço dos combustíveis, torna-se imperativo dar continuidade ao esforço, no que concerne ao aumento da produção de energia com base em fontes renováveis.

## 1.2 - Motivação

Este documento pretende verificar a existência de variações da curva de potência de um parque eólico e dos próprios aerogeradores ao longo do tempo, variações estas, que não estão somente relacionadas com a variabilidade das velocidades do vento, mas também com outros aspectos. Os cálculos e dimensionamentos que são desenvolvidos para projectar os parques eólicos; pressupõem que a curva de potência se mantém constante ao longo do tempo. A metodologia apresentada neste documento pressupõe que as características de produção das máquinas variam ao longo do tempo devido a anomalias de funcionamento ou devido a alterações das condições envolventes. O objectivo da metodologia é detectar estas alterações em tempo real e criar indicadores que caracterizem o desempenho dos sistemas de produção eólica.

O objectivo final deste trabalho, passa por desenvolver uma metodologia e ferramentas de software de inteligência computacional para monitorização de desempenho de parques eólicos em tempo real, focalizando a determinação de desfasamentos do desempenho de parques eólicos e respectivos aerogeradores ao longo do tempo.

O desenvolvimento do trabalho apresentado nesta dissertação, foi sugerido como resultado da inexistência de ferramentas de análise e detecção de mudanças de conceito para sistemas de produção de energia eólica.

Tendo como objectivo a criação de uma ferramenta para análise do desempenho da produção em parques eólicos, houve necessidade de perceber qual o impacto das diferentes variáveis que intervêm na produção de energia através do vento. As ferramentas, implementadas com técnicas de inteligência computacional, permitem inferir, de forma automatizada, a resposta de produção do parque eólico função das características do recurso eólico. Esta análise permitiu compreender qual a implicação das diversas variáveis, tais como: direcção do vento, efeitos sazonais, orografia do terreno, efeitos de esteira, degradação dos equipamentos, possui na oscilação da produção de energia em parques eólicos.

Estas ferramentas, aplicadas ao longo de período temporal, permitem detectar mudanças de comportamento do sistema eólico de produção. Numa perspectiva das técnicas de inteligência computacional existe uma alteração de funções a que designamos por mudança de conceito.

### 1.3 - Objectivos

Os principais objectivos delineados são:

- Análise de desvios das velocidades de vento.
- Avaliação de desvios na curva de potência de um parque eólico, ao longo do tempo.
- Avaliação de desvios na curva de potência dos aerogeradores que integram o parque eólico, ao longo do tempo.

### 1.4 - Apresentação sumária

Neste trabalho, foram analisadas diversas curvas de potência do parque e respectivos aerogeradores, comprovando-se que a diminuição de desempenho não é apenas consequência de menores valores médios de recursos eólicos mas também consequência de alterações da envolvente dos aerogeradores e funcionamento desadequado dos sistemas.

Desenvolveu-se também uma ferramenta de apoio, especificamente dedicada à análise de mudanças de conceito na característica de produção de parques eólicos em tempo real.

#### *Análise e Simulação de Curvas de Potência*

Uma das ideias-chaves foi a utilização do ambiente *Matlab| Simulink* [Mat 7.1], visto que se trata de um ambiente aberto, e que possui uma vasta gama de potencialidades ao nível da programação, análise de dados, visualização de resultados e simulação (entre outras). Esse ambiente, por outro lado, disponibiliza uma biblioteca de funções para o *Matlab*, específicas para criação de redes neuronais: a *Neural Network Toolbox*.

A análise efectuada foi desenvolvida sobre esse ambiente, em detrimento do uso de outros métodos (por exemplo: método dos mínimos quadrados), pelo facto das redes neuronais permitirem caracterizar sistemas em função de mais que uma variável independente. Este ambiente possibilita assim a modelação e simulação do parque eólico *off-line*, tendo sensivelmente como base um ano de medições, realizadas pelos sistemas *Scada* do parque. Foram criadas e treinadas diversas redes neuronais em função da data e direcção do vento.

Os dados usados para criar as redes neuronais referidas, foram divididos em conjuntos de dois em dois meses intercalados, ou seja, corresponde a aproximadamente 8500 pontos de treino para cada uma das redes neuronais criadas.

Como resultado da análise foram criados inúmeros gráficos que permitem identificar oscilações na produção, sendo importante referir que este facto não está directamente ligado às variações da velocidade do vento, factos estes que serão apresentados com maior detalhe nos capítulos 4 e 5 desta dissertação.

## 1.5 - Organização do trabalho

O presente trabalho, consagrado ao estudo da monitorização do desempenho de produção de parques eólicos usando redes neuronais, encontra-se dividido em 7 capítulos.

No Capítulo 1 tecem-se algumas considerações referentes ao âmbito, justificação e organização do trabalho.

No Capítulo 2 é efectuada uma breve abordagem ao estado de arte em que se insere este documento. Justifica-se a necessidade de elaboração da metodologia apresentada.

No Capítulo 3 é feita a caracterização do parque eólico em estudo e dos dados utilizados.

O Capítulo 4 consta da análise de velocidades de vento medidas em parque e identificação de desvios relativamente a valores previstos na fase de projecto do parque. Esta análise será feita por sector de direcção.

No Capítulo 5 procede-se à construção de uma rede neuronal para modelação da curva de produção  $P(v,d)$ , do parque. Estudando-se esta evolução ao longo de um ano de operação. Os resultados são comparados com as curvas de potência previstas em fase de projecto. Cálculo do factor de capacidade do parque tendo como base os dados gerados pela rede neuronal.

No Capítulo 6, para cada aerogerador, é abordado a construção de múltiplas curvas de produção  $P(v,d)$ , ao longo do horizonte de exploração histórica do parque de forma a identificar a evolução temporal do desempenho de cada aerogerador, e comparando-o com o desempenho dos restantes aerogeradores do parque.

No Capítulo 7, tecem-se as conclusões que foram retiradas da execução do trabalho.

## Considerações iniciais

# Capítulo 2

## Estado da Arte

### 2.1 Introdução

A caracterização do estado de arte em que se insere o trabalho desenvolvido envolve três domínios:

- A área de aplicação;
- As tecnologias existentes e a tecnologia utilizada;
- O modelo de avaliação

Neste capítulo, apresenta-se uma breve abordagem a esses três domínios, com destaque para a apresentação e comparação com outras ferramentas existentes, justificando-se também a necessidade de desenvolvimento da ferramenta elaborada.

Devido à inexistência de ferramentas de análise e detecção de mudanças de conceito para sistemas de produção de energia eólica, houve necessidade de perceber qual o impacto das diferentes variáveis que intervêm na produção de energia através do vento.

### 2.2 Domínios de aplicação

Como é possível constatar, existe uma grande proliferação dos sistemas de produção de energia apoiados na força do vento. Na sociedade da investigação é possível constatar duas correntes diferentes, uma que coloca grandes reticências no que respeita à energia eólica, alegando que esta, não irá ser uma alternativa viável às restantes formas de produção de energia. Por outro lado, existe uma corrente que revê na energia eólica fortes capacidades de crescimento e ocupa o seu tempo em compreender os fenómenos e características associados a um recurso natural - o vento, procurando otimizar e inovar os procedimentos que se relacionam com a produção de energia eólica.

A análise efectuada e a metodologia apresentada é de aplicação específica à visualização e caracterização do desempenho de parques eólicos, com o objectivo de aumentar a fiabilidade das tecnologias que lhe estão associadas.

## 2.3 Sistemas de apoio de monitorização de parques eólicos

É possível constatar que durante os últimos vinte e cinco anos, assistimos a um aumento significativo no número de problemas reais relacionados com perguntas como:

- Detecção e diagnóstico de falhas (monitorização);
- Condições de manutenção de processos industriais;
- Segurança de sistemas complexos (aviões, barcos, foguetes, processos, etc.);
- Controle da qualidade;
- Previsão de catástrofes naturais (sismos, *tsunamis*, etc.);
- Monitorização na biomedicina.

Estes problemas resultam da crescente complexidade da maior parte dos processos tecnológicos; da disponibilidade de sofisticada instrumentação; bem como de sistemas de processamento da informação. As soluções para estes problemas possuem elevado interesse por razões de segurança, ecológicas e económicas. Devido à disponibilidade dos sistemas de processamento da informação acima mencionados, os algoritmos complexos de monitorização podem ser considerados e executados.[2]

O objectivo desta dissertação insere-se na abordagem efectuada, na medida em que, os promotores dos parques eólicos sentem necessidade de proceder à monitorização e detecção de possíveis desvios (avarias) da produção de energia nos parques, relativamente ao previsto em fase de projecto.

No seguimento do exposto, é na fase de projecto que são solicitadas às entidades competentes, estudos de produção para os locais onde se vão instalar os parques. De acordo com o referido, as respectivas entidades procedem à realização de uma campanha de prospecção no que diz respeito à recolha de informação associada a características orográficas, climáticas e disponibilidades de vento.

Numa fase posterior, estas entidades procedem à elaboração de relatórios preliminares de previsão dos níveis de produção espectáveis, seguindo-se a análise criteriosa por parte dos promotores, para a elaboração de um plano de investimento. Por conseguinte, já numa fase de plena produção, os promotores não têm forma de identificar quais os desvios de produção relativamente ao espectável, em que numa primeira instância os promotores pretendem saber quais as variações de produção relativamente ao que foi delineado em fase de projecto. Acresce o facto, de os promotores na fase de celebração de contractos de fornecimento de aerogeradores, imporem cláusulas referentes à qualidade de serviço dos equipamentos, dado que, na eventualidade dos aerogeradores não produzirem o esperado existirá lugar a indemnizações por parte das entidades responsáveis pela comercialização das “máquinas”.

Numa segunda instância há necessidade de criar sistemas de processamento de informação em tempo real, criando ferramentas que detectem desvios da produção numa fase embrionária, cujo objectivo será o despoletar de uma série de acções para correcção de avarias de forma simples e rápida, para que estas não cresçam em termos de complexidade. Deste modo garante-se reduções no que concerne:

- “*Downtime*” dos aerogeradores/parque eólico;
- Custos de exploração do parque eólico.



## Capítulo 3

# Caracterização do Parque Eólico

### 3.1 Introdução

O parque eólico em estudo, localizado em Portugal Continental, foi o parque alvo para este estudo. Este parque tem uma capacidade instalada de 21,6 MW, distribuída por 12 aerogeradores com uma potência nominal de 1,8 MW. A Figura 3.1 mostra a localização dos aerogeradores.

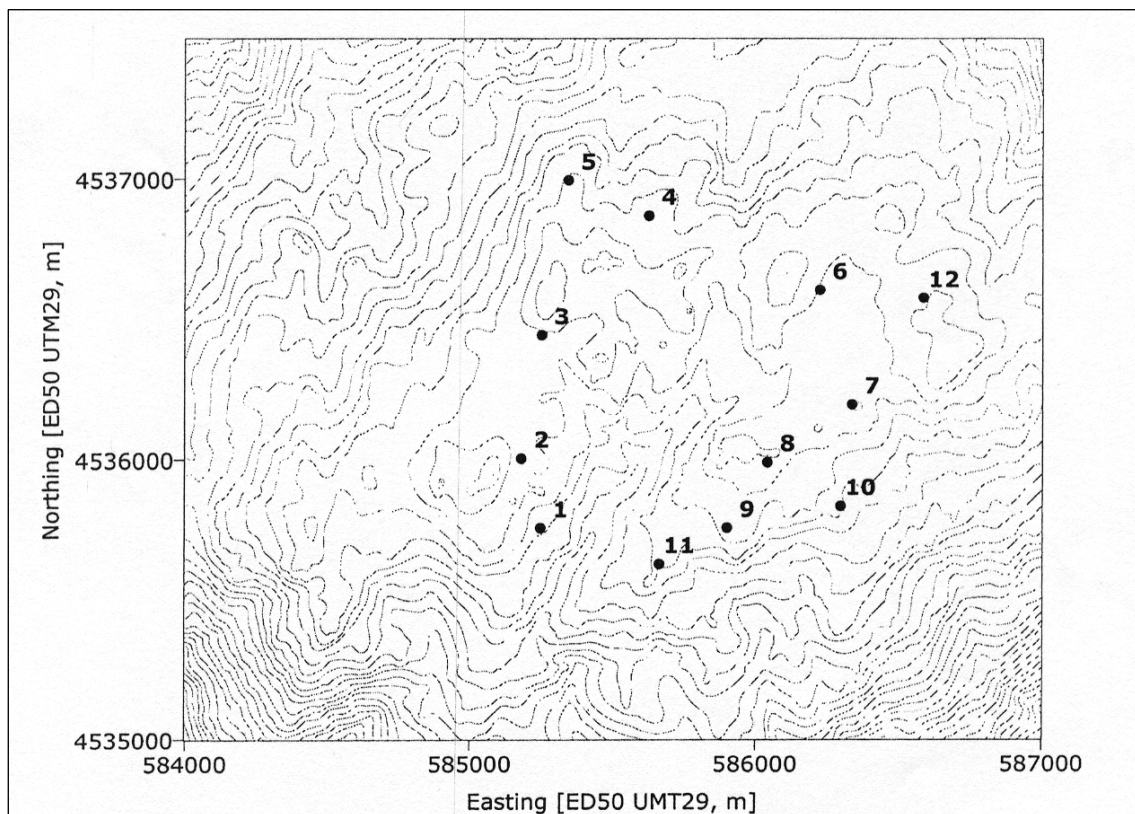


Figura 3.1 - Mapa da localização dos aerogeradores[3].

Tabela 3.1 - Alturas de instalação dos aerogeradores, do parque[3].

<u>Aerogerador</u>	<u>Altitude [m]</u>
1°	1323
2°	1345
3°	1349
4°	1343
5°	1340
6°	1350
7°	1349
8°	1347
9°	1331
10°	1321
11°	1320
12°	1358

Os dados de *SCADA* utilizados neste estudo, foram registados pela entidade responsável no momento em que foi efectuada uma avaliação da potência total produzida no parque. Esta análise teve a duração de 12 meses e foi realizada em 2005.

### 3.2 Caracterização dos aerogeradores

O parque em estudo está equipado com 12 aerogeradores *E-66*, com uma potência nominal de 1,8 MW. A altura da coluna é de 65 m e o diâmetro do rotor é de 70 m. A *Enercon*, empresa fornecedora dos aerogeradores e todo o equipamento associado, elaborou para o aerogerador em questão a Tabela 3.2 na qual, está representada a potência produzida e o respectivo nível de confiança( $c_t$ ), para as diversas velocidades de tempo.

Tabela 3.2 - Curva de potência e de confiança dos aerogeradores instalados no parque[4].

Aerogerador	
Potência Nominal [kW]	1323
Altura da Torre [m]	1345
Diâmetro do rotor [m]	1349
IEC classe	1343
Densidade do ar [kg/m <sup>3</sup> ]	1340

Velocidade do vento [m/s]	<i>Enercon E-66</i>	
	Potência [kW]	$c_t$
3°	1,5	0,10
4°	22,7	0,80
5°	82,9	0,82
6°	169,6	0,84
7°	291,8	0,79
8°	446,2	0,72
9°	642,6	0,66
10°	885,6	0,59
11°	1179,4	0,53
12°	1489,1	0,46
13°	1718,6	0,40
14°	1809,1	0,33
15°	1820,0	0,28
16°	1820,0	0,23
17°	1820,0	0,20
18°	1820,0	0,16
19°	1820,0	0,14
20°	1820,0	0,12
21°	1820,0	0,12
22°	1820,0	0,11
23°	1820,0	0,11
24°	1820,0	0,10
25°	1820,0	0,10

Com base nestes valores, foi dimensionado o respectivo gráfico (ver Figura 3.2), no qual se pode verificar a evolução da potência e conseqüente nível de confiança para os diferentes valores de velocidade de vento

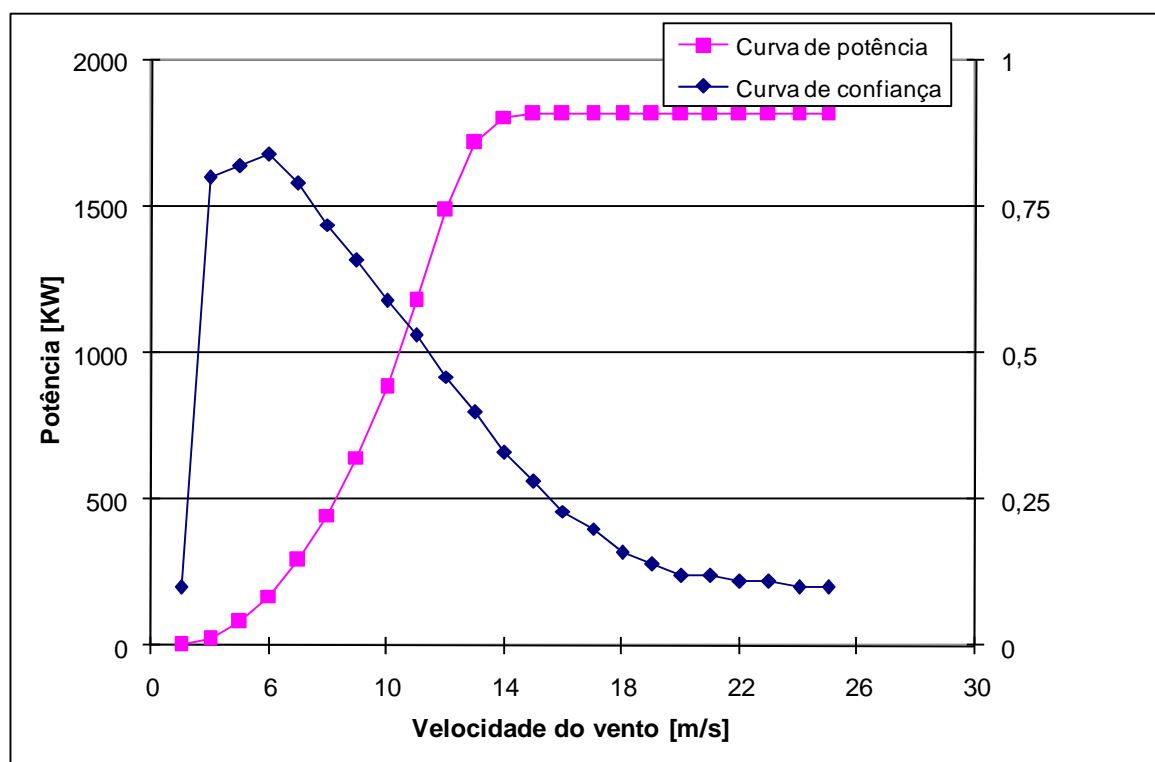


Figura 3.2 - Potência garantida e respectiva curva de confiança ( $\rho=1,10 \text{ Kg/m}^3$ ).

### 3.3 Caracterização das estações de medida

Nesta verificação, foram instaladas duas estações de monitorização atmosférica localizadas no interior da área do parque. A estação oeste e a estação nordeste, designadas por "PORT071" e "PORT214", respectivamente. Nesta análise foram utilizados os valores registados na estação "PORT071".

Ambas as estações estão equipadas com dois anemómetros instalados a 65 e 30 m relativamente ao solo. O barómetro e o sensor de temperatura/humidade estão também posicionados na "PORT071". Na Tabela 3.3, estão indicadas todas as características técnicas dos equipamentos instalados na torre da "PORT071", dado que se trata da torre em estudo.

Tabela 3.3 - Configuração da PORT071 [3].

Equipamento	Altura de Instalação [m]
Anemómetro	65
Anemómetro	30
"Wind Vane"	63,5
"Wind Vane"	30
Barómetro	12
Sensor de temperatura/Humidade	12
"Data logger"	12

Na Figura 3.3 estão identificadas a localização das duas estações de medição, na planta topográfica da instalação.

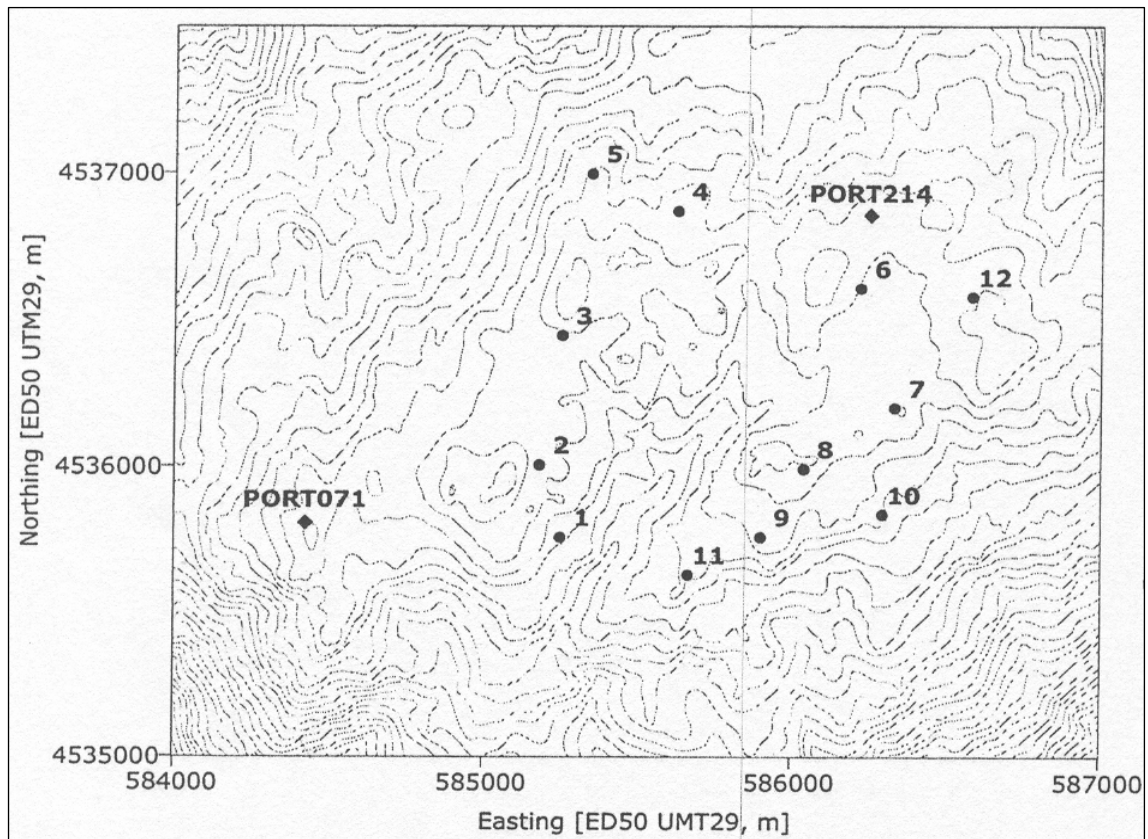


Figura 3.3 - Mapa identificativo das estações de meteorológicas [3].

A aquisição de dados é efectuada em intervalos de 10 minutos, onde são registados os valores da velocidade, direcção do vento e respectiva potência gerada. Foram abordados dois tipos de conjunto de valores, isto é, foram tratados os registos de produção do parque e também a produção para cada um dos 12 aerogeradores que o constituem. Na abordagem efectuada ao parque, os valores de velocidade e direcção do vento foram registados na "PORT071" e para os aerogeradores, os registos foram adquiridos no próprio aerogerador.



# Capítulo 4

## Análise de velocidades de vento

### 4.1 Introdução

O parque eólico em questão, localizado em Portugal Continental, foi o parque alvo para este estudo. Este parque tem uma capacidade instalada de 21,6 MW, distribuída por 12 aerogeradores com uma potência nominal de 1,8 MW. A Figura 3.1 mostra a localização dos aerogeradores.

A caracterização do vento assume uma elevada importância, no processo eólico, visto este apresentar uma acentuada variabilidade espacial. Em Portugal verifica-se que a média anual da velocidade, a direcção, a intensidade de turbulência, os padrões sazonais e o perfil diário da velocidade média do vento podem alterar-se substancialmente para distâncias reduzidas e características orográficas relativamente suaves.

O recurso eólico num dado local, depende de diversos parâmetros que condicionam de forma, mais ou menos determinante, o escoamento atmosférico de um dado local ou de uma da região [5], sendo os seguintes os mais relevantes neste tipo de estudos:

- velocidade e direcção do vento;
- orografia local;
- obstáculos e rugosidade - vegetação e uso do solo.

Neste capítulo, apenas será efectuada uma caracterização da velocidade e direcção do vento a partir das medidas registadas no local, Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, sendo possível verificar a elevada variação das velocidades de vento medidas na “PORT071” no dia 1 de Abril de 2005, na 1ª semana de Abril de 2005 e em Abril de 2005, respectivamente.

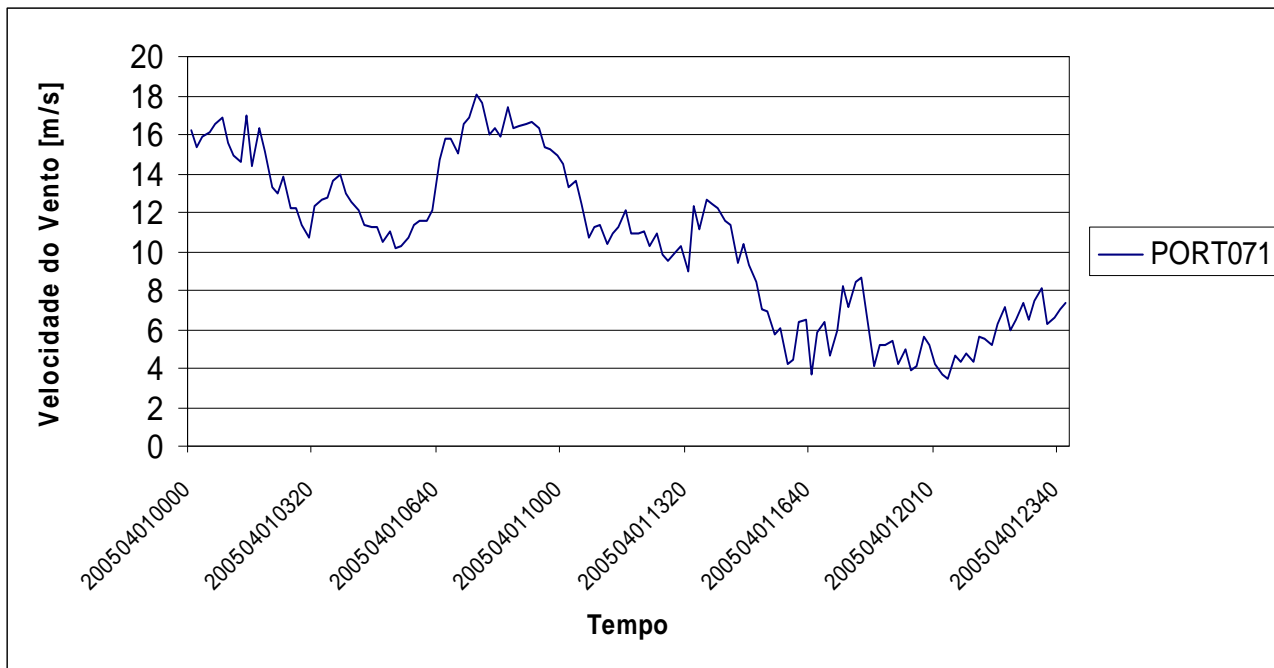


Figura 4.1 - Registo da “PORT071” para um dia.

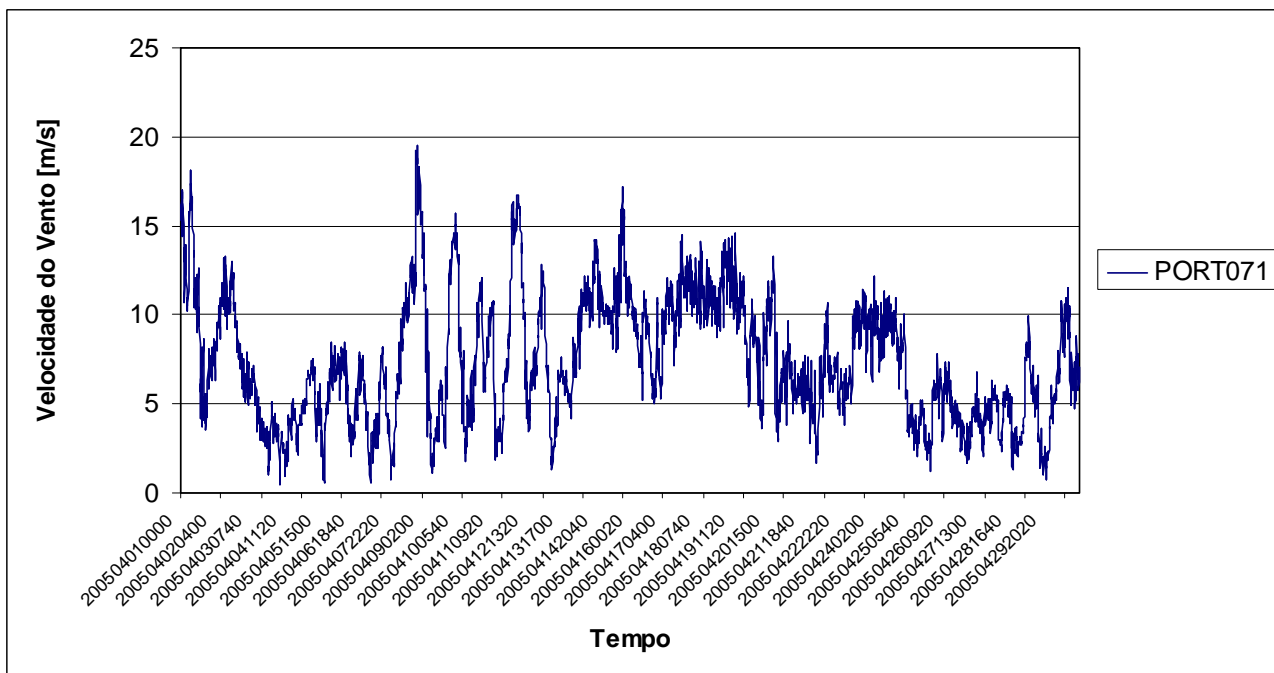


Figura 4.2 - Registo da “PORT071” para uma semana.



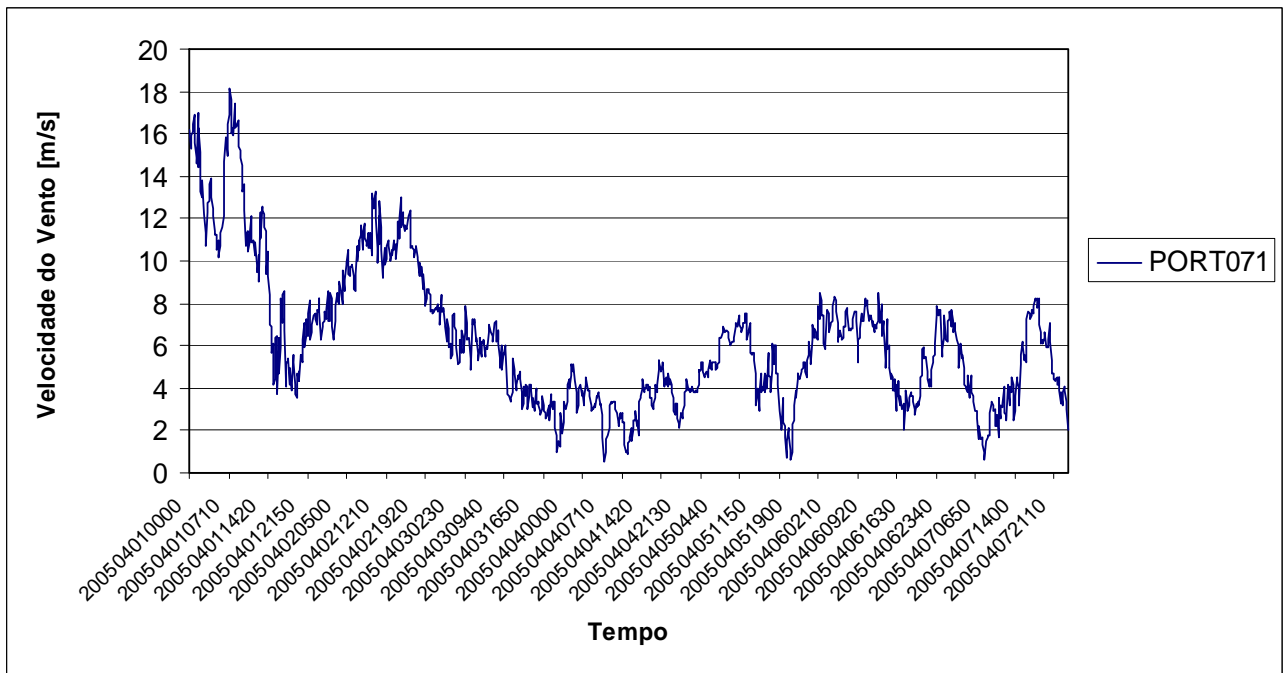


Figura 4.3 - Registo da “PORT071” para um mês.

A variação do vento é traduzida também na instabilidade da potência eléctrica produzida, este carácter aleatório impõe o uso de processos que descrevam estatisticamente essa variação, do tipo densidade de probabilidade, isto é, a probabilidade do vento ser igual a um determinado valor.

Com o objectivo de descrever os registos da densidade de probabilidade por expressões analíticas, foram sugeridas várias distribuições probabilísticas para descrever o regime de ventos, mas a distribuição de *Weibull* é normalmente considerada como a mais adequada [6]. A função densidade de probabilidade de *Weibull*,  $f(\bar{u})$ , é descrita pela seguinte expressão matemática:

$$f(\bar{u}) = \frac{K}{A} \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right] \right\}, \quad (4.1)$$

onde  $\bar{u}$  representa a velocidade média do vento, A é um parâmetro de escala, com as dimensões de velocidade, e K é um parâmetro de forma, adimensional.

As campanhas experimentais de medida, são na maioria das situações efectuadas no local onde se pretende instalar os parques eólicos durante pelo menos doze meses consecutivos embora, sempre que possível, esta data deva ser prolongada por períodos superiores, de forma a reduzir as incertezas associadas à variabilidade interanual do escoamento atmosférico, como é possível verificar na Figura 4.4.

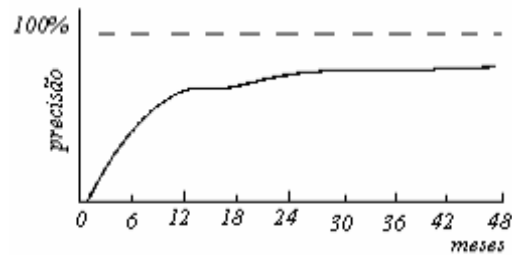


Figura 4.4 - Duração de uma campanha experimental vs precisão nas estimativas [7].

Geralmente as medidas são obtidas a alturas que podem ir desde a meteorológica de referência, 10m e 80m, sendo aconselhável, que estas sejam obtidas tão próximo quanto possível do rotor das turbinas a instalar. Caso exista necessidade de transportar verticalmente os valores de velocidade do vento, usam-se métodos estatísticos (4.2).

$$V_{Z_1} = V_{Z_{ref}} \times \left( \frac{Z_1}{Z_{ref}} \right)^\alpha, \quad (4.2)$$

onde  $V_{Z_1}$  é a velocidade que se pretende conhecer à altura  $Z_1$ ,  $V_{Z_{ref}}$  é a velocidade conhecida à altura de referência  $Z_{ref}$ , e  $\alpha$  é o coeficiente de rugosidade do local, que está tabelado, ou é experimentalmente determinado.

## 4.2 Caracterização da velocidade do vento medida

Pretende-se determinar os parâmetros  $A$  e  $K$  da distribuição de probabilidade de *Weibull*, para desta forma caracterizar a distribuição do vento do parque. Para isto, foi definida uma série discreta de velocidades de vento em classes de 1 m/s, compreendida no intervalo de 1 e 35 m/s. De seguida, procedeu-se à determinação da frequência de ocorrência da série de velocidades definida, nos registos medidos para o parque (Figura 4.5).

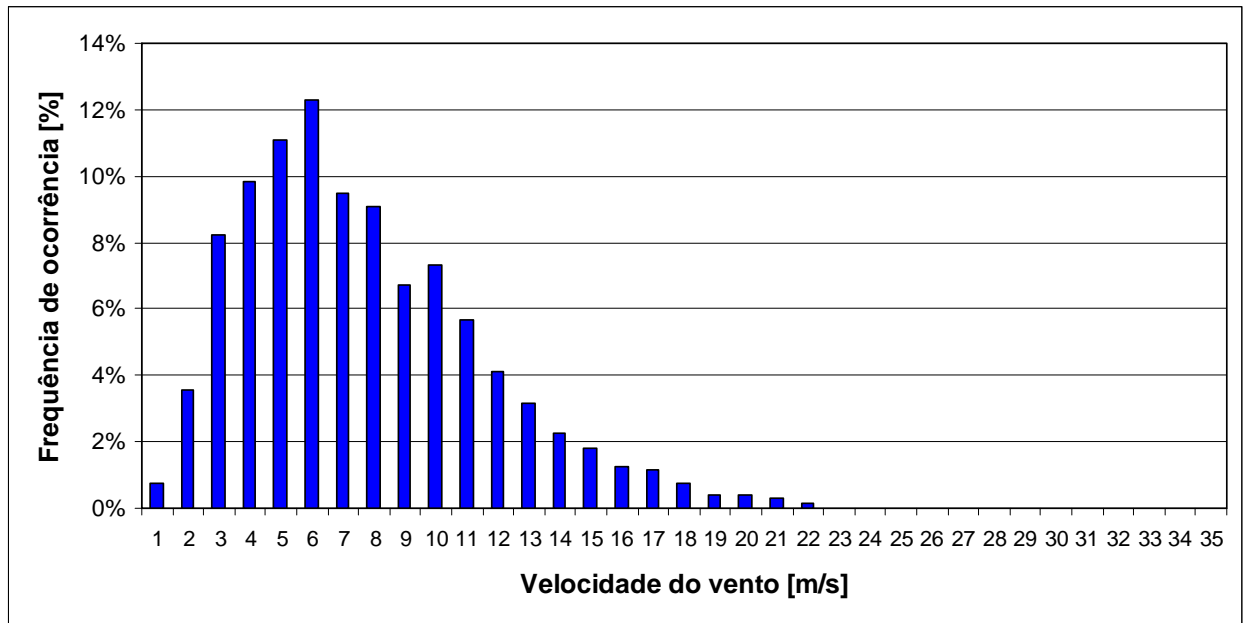


Figura 4.5 - Histograma da frequência de ocorrência da velocidade do vento, obtida a partir dos dados de “SCADA”

É possível verificar que a velocidade de 6 m/s é aquela que possui um maior número de registos. Aproximadamente 60% dos registos estão situados no intervalo de velocidades de vento entre 3 e 8 m/s, já para velocidades de vento superiores a 20 m/s, os registos são meramente residuais.

#### 4.2.1 Caracterização da velocidade de vento por sector

Nesta fase pretende-se efectuar a caracterização da velocidade de vento por sector, para isto foi efectuada uma divisão dos registos de SCADA por 12 sectores, sendo que cada um destes sectores tem associado uma determinada direcção do vento, tal como se pode visualizar na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Caracterização dos sectores

Sector	Direcção[°]	Intervalo[°]
1	0	[345;15]
2	30	[15;45]
3	60	[45;75]
4	90	[75;105]
5	120	[105;135]
6	150	[135;165]
7	180	[165;195]
8	210	[195;225]
9	240	[225;255]
10	270	[255;285]
11	300	[285;315]
12	320	[315;345]

À semelhança do que foi dito anteriormente, pretende-se determinar os parâmetros de  $A$  e  $K$  da distribuição de probabilidade de *Weibull*, por sector. Na Figura 4.6 verifica-se o número de ocorrências que foram registadas, para cada um dos 12 sectores.

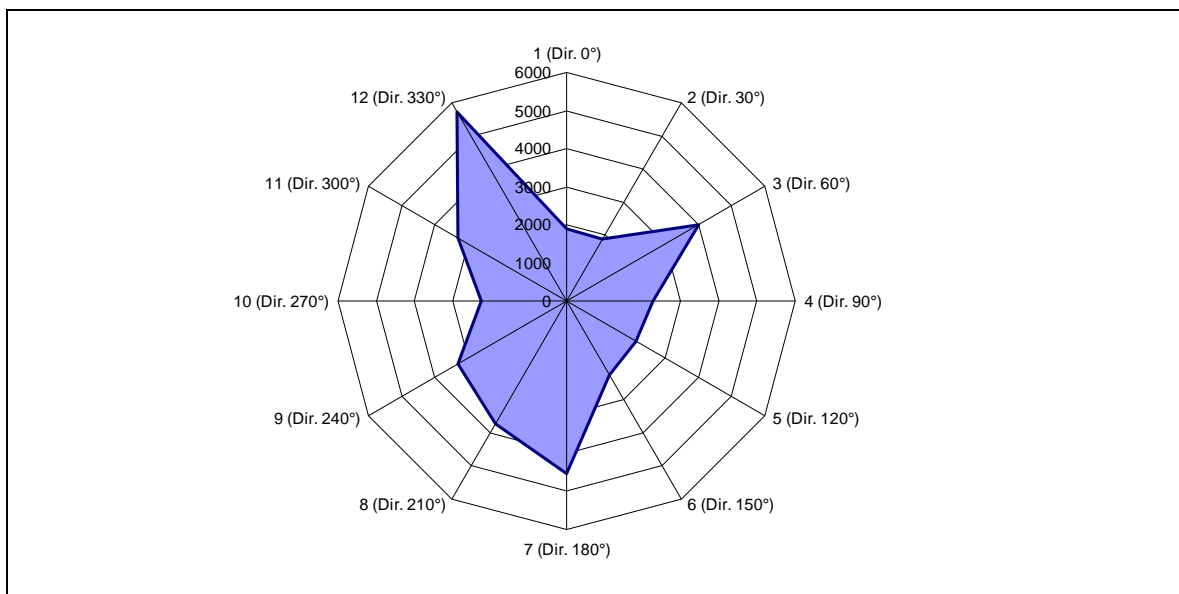


Figura 4.6 - Número de ocorrências registadas, por sector

O sector 12, é aquele que possui o maior número de registos, ou seja, neste parque é o sector mais favorável para a produção de energia eléctrica, sendo seguido pelos sectores 7 e 3, o que é bastante curioso, dado as direcções de cada um dos sectores estarem totalmente desfasadas.

Na Figura 4.7, é apresentada a frequência de ocorrência (unitária) da série de velocidades definida, para cada um dos 12 sectores.

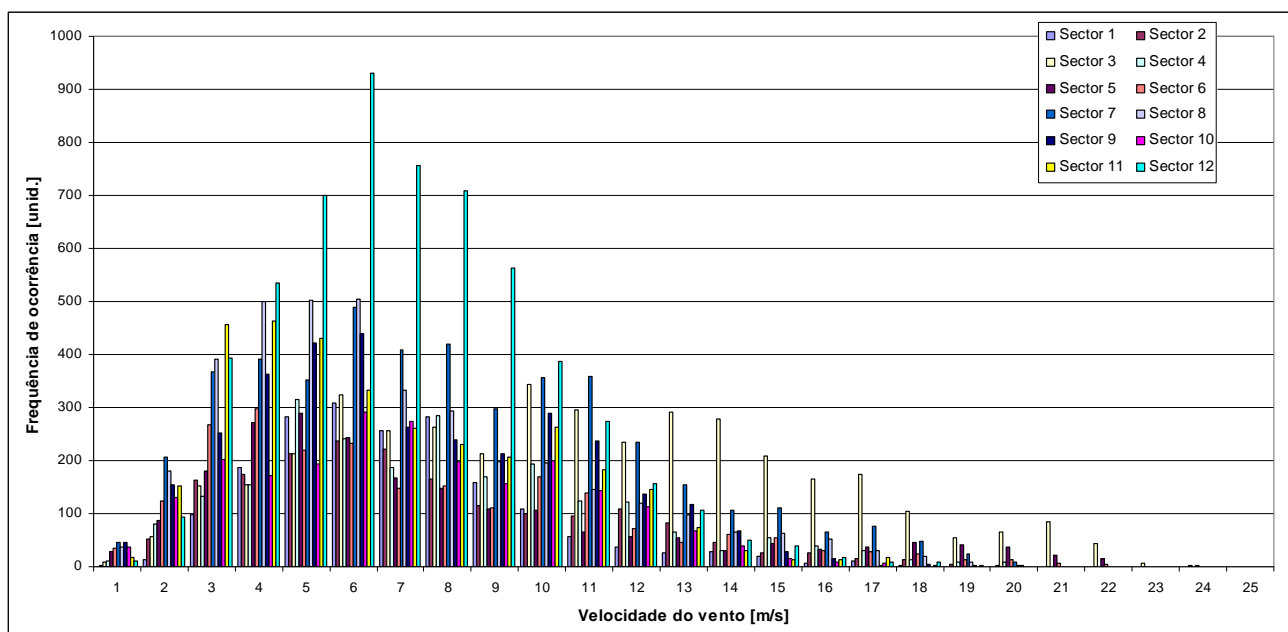


Figura 4.7 - Número de ocorrências registadas por sector, em função da velocidade de vento

As velocidades de vento de 5 e 6 m/s, são as velocidades onde estão concentradas o maior número de ocorrências, com cerca de 11% e 12% do total dos registos do parque, respectivamente. Para as velocidades referidas, o sector 12 é aquele onde o número de ocorrências é superior, vindo isto complementar o que já havia sido dito anteriormente para este sector.

Após se ter verificado que as velocidades de vento observadas seguem uma distribuição de *Weibull* como se pode verificar na Figura 4.5, foi aplicada esta distribuição estatística para a determinação dos parâmetros  $A$  e  $K$  dos 12 sectores em estudo. Na Tabela 4.2, estão indicados os respectivos valores de  $A$  e  $K$ , assim como o somatório do erro associado a cada uma das distribuições de vento calculadas.

Tabela 4.2 - Parâmetros A e K calculados

Sector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dir.[°]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	320
A	6,874	7,655	11,939	8,095	6,900	7,284	8,491	6,528	7,492	7,778	6,646	7,179
K	2,865	2,020	2,146	2,137	1,829	1,645	1,882	1,944	1,935	2,013	1,825	2,606
Erro	0,0019	0,0026	0,0019	0,0038	0,0050	0,0044	0,0015	0,0025	0,0035	0,0026	0,0056	0,0009

No gráfico da Figura 4.8, encontra-se representada a evolução do parâmetro de escala  $A$  e do parâmetro de forma  $K$ , da distribuição estatística das velocidades de vento, para cada um dos 12 sectores.

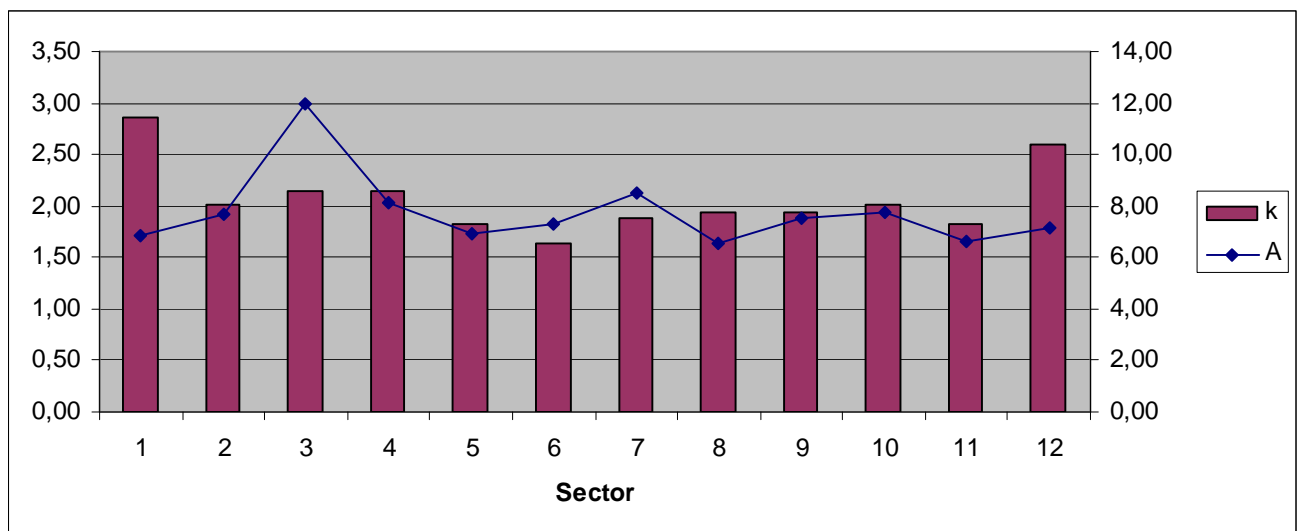


Figura 4.8 - Evolução dos parâmetros de A e K.

No Anexo B, são apresentados todos os gráficos representativos das aproximações da distribuição de *Weibull* aos valores de velocidade de vento observadas, para cada um dos sectores.



# Capítulo 5

## Análise do Desempenho do Parque

### 5.1 Introdução

Nesta fase efectuou-se uma análise temporal da curva de potência do parque eólico, recorrendo ao uso de redes neuronais, permitindo desta forma à determinação do desempenho do parque para o horizonte temporal de 10 meses. O objectivo passa por verificar se existem desfasamentos da curva de potência para as diversas direcções de vento durante os 10 meses, os quais foram alvo de estudo. Para poder avaliar o respectivo desempenho do parque, existe um aspecto que foi crucial, o facto de as questões relacionados com a invariabilidade das velocidades de vento não influenciarem o desenvolvimento da curva.

### 5.2 Rede Neuronal

Para construir a curva de potência do parque com os valores da velocidade, direcção do vento e respectiva potência do parque, tal como acima referido, foram usadas Redes Neuronais, com recurso ao *Matlab*, nomeadamente a *Neural Network Toolbox*.

A rede neuronal criada possui três sinais de entrada e o sinal pretendido (*target*), o que corresponde a dois neurónios à entrada, um neurónio à saída e cinco neurónios na camada intermédia. Os sinais de entrada são a velocidade vento (m/s) e direcção segundo seno e co-seno (graus), o sinal de saída será a potência do parque (KW).

Os valores de entrada e o valor pretendido, acima referidos, foram normalizados pelo método *Min. - Máx.* para o intervalo de valores de [-1,1] para posteriormente poderem ser introduzidos na rede neuronal. A normalização dos mesmos foi efectuada através da equação (5.1), de entre muitos outros métodos de normalização, o método *Min. - Máx.* foi o método escolhido após a consulta do artigo [8], que identifica este método como sendo o método mais preciso, rápido e aquele que introduz menos “ruído” no conjunto de dados.

$$y' = \frac{(y - \text{mín}_1)}{(\text{máx}_1 - \text{mín}_1)} \times (\text{máx}_2 - \text{mín}_2) + \text{mín}_2 \quad (5.1)$$

A função de transferência que melhor se adaptou a esta estrutura é a tangente hiperbólica (denominada no *Malab* de *Tansig*) (Figura 5.1), sendo esta à escolhida [9].

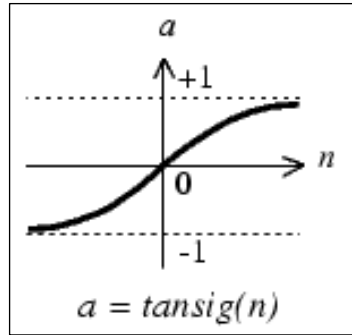


Figura 5.1 - Representação gráfica da função *Tansig* [9]

A configuração da rede, acima referida, revelou ser a mais adequada visto terem sido efectuadas várias tentativas de configuração e consequentes medições do erro associado, através da equação (5.2) e foi com esta configuração que obteve o erro mais baixo, valor este, medido entre o valor da potência do *SCADA* e o valor da potência gerada pela rede neuronal, com um valor de 0,0157601314%, sendo que quando comparado este valor com as outras configurações é em média  $2,784 \times 10^{-2}$  % mais baixo.

$$MAPE = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) \times \sum_{i=1}^n |P_{Scada} - P_{Rede}|}{\left(\frac{1}{n}\right) \times \sum_{i=1}^n P_{Scada}} \quad (5.2)$$

Na Figura 5.2 é possível verificar a adaptação da rede neuronal para o conjunto total dos valores do parque eólico, em função do tempo.



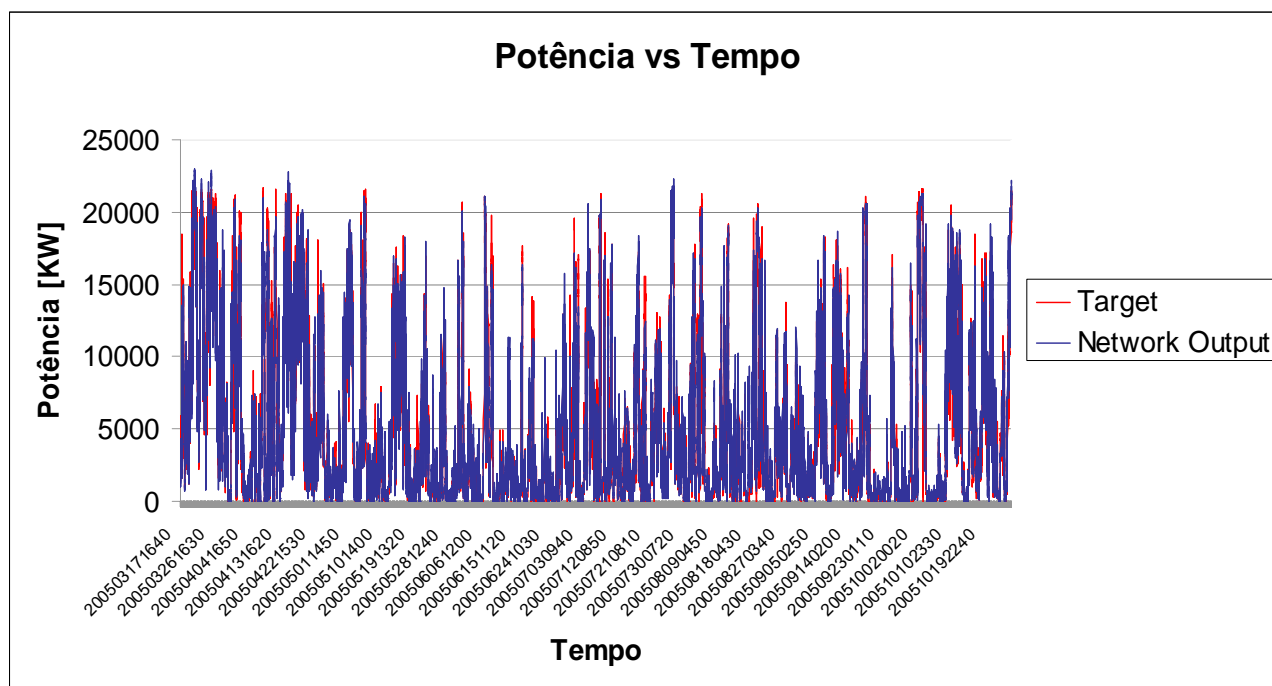


Figura 5.2 - Gráfico representativo da adaptação da rede neuronal ao objectivo pretendido

### 5.3 Curva da Potência do Parque

Para a análise temporal desta curva efectuou-se várias dissecções dos dados de *SCADA* do parque, ou seja, dividiu-se os 37192 valores, que representam 10 meses de registos, em conjuntos de dois em dois meses intercalados. Foi efectuada também a divisão dos valores de *SCADA* por 12 sectores, como se pode verificar na Tabela 4.1, anteriormente apresentada.

Para a construção das diversas curvas de potência, tal como foi referido, recorreu-se às redes neuronais, com a configuração já indicada. Foram criadas para cada tipo de avaliação rede neuronais específicas, ou seja, para a avaliação bimensal foram criadas 9 redes neuronais, o que representa os 10 meses de registos obtidos. Todas as redes tiveram um conjunto de dois treinos, cada um deles com 1000 épocas.

Na Figura 5.3 é possível verificar a curva de potência do parque, através da resposta da rede neuronal e também neste gráfico é perceptível visualizar a completa adaptação da rede.

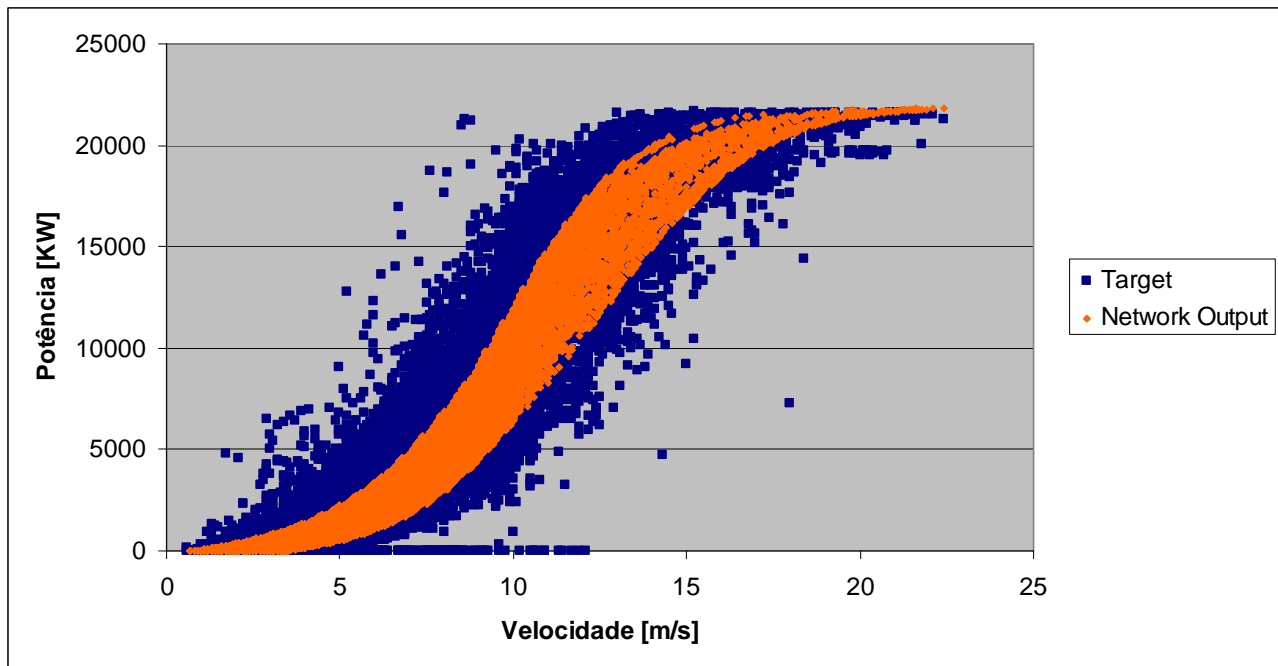


Figura 5.3 - Gráfico de adaptação da curva de potência do parque aos pontos de treino

### 5.3.1 Curvas de potência por sector

Recorrendo à rede neuronal que tinha sido criada para o parque eólico e a um conjunto de valores que constavam da matriz de potência *WFPA* (Tabela 1A, Anexo A), que foi criada pela entidade responsável pelo projecto do parque eólico em questão, nomeadamente os valores da velocidade e direcção do vento, foi efectuada uma simulação da rede neuronal tendo agora como entradas os valores da respectiva série normalizada. A matriz de potência acima indicada foi criada com base nas medições efectuadas a partir da *PORT071*. De seguida, na Figura 5.4 é possível visualizar o comportamento das curvas de potência para os diversos sectores, mediante o que se encontra referido na matriz *WFPA*.

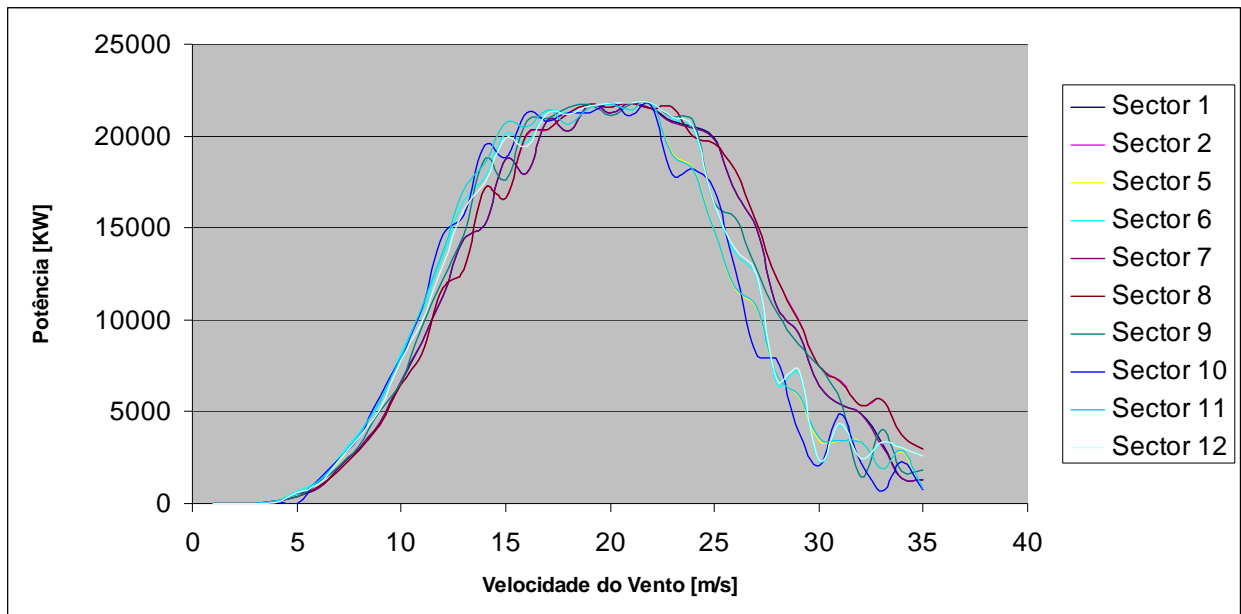


Figura 5.4 - Gráfico da matriz de potência *WPPA*.

Na Figura 5.4, é possível verificar as variações da produção do parque consoante o sector, ou seja, a direcção do vento em questão. Como era de esperar, para velocidades de vento superiores a 22 m/s a potência produzida começa a descer progressivamente, visto que são velocidades bastante elevadas, que não é normal existirem no nosso país, podem colocar a estabilidade dos próprios aerogeradores em risco, sendo normal para estas situações, efectuar-se a paragem total das pás.

Na simulação da rede neuronal criada para o parque eólico, com recurso à série de dados da matriz de potência da entidade responsável pelo projecto do parque, figuram valores de potência para os sectores 3 e 4, visto que a rede neuronal foi treinada usando um conjunto de dados que dispõem de valores referentes a estes dois sectores, existindo assim, uma resposta da rede neuronal. Na Figura 5.5, é possível verificar a resposta de rede neuronal para a simulação referida e também os pontos usados para o seu treino (*Net Train*)

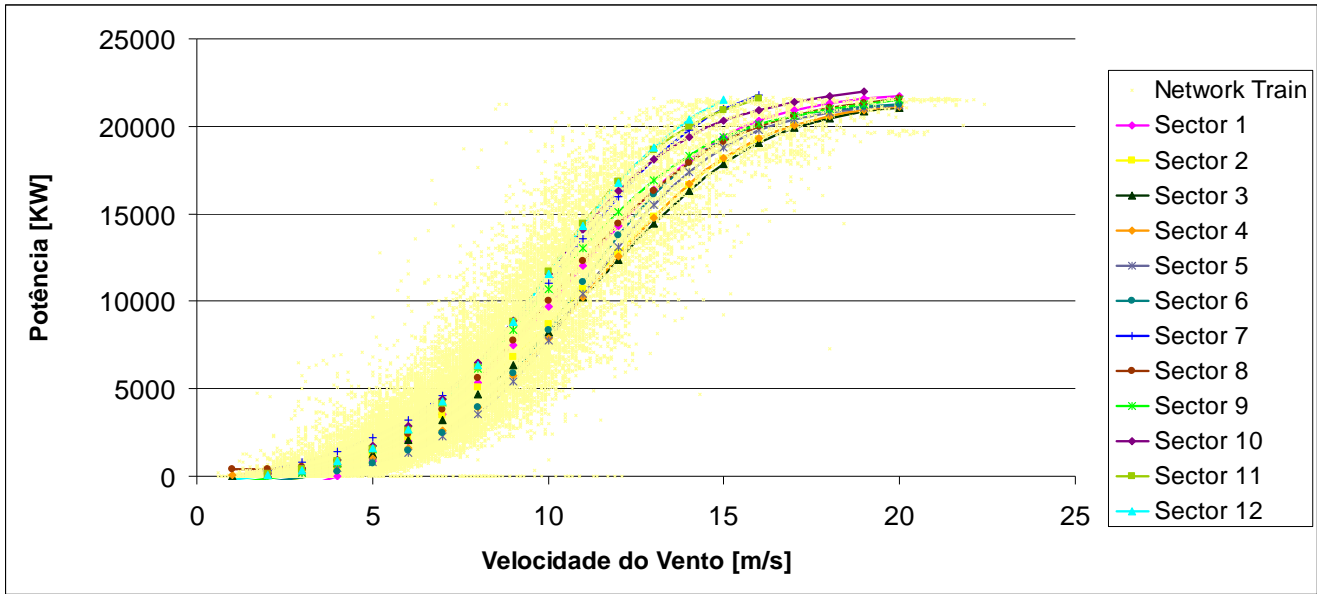


Figura 5.5 - Adaptação da resposta da rede neuronal aos respectivos pontos de treino.

Na Figura 5.5, é possível verificar que para valores de velocidade de vento e potência superiores a 20 m/s e 22 MW, respectivamente, não existem pontos de treino, daí a resposta da rede neuronal para valores superiores aos referidos não ser correcta, não sendo considerada. Pelo contrário para valores inferiores aos indicados existem uma quantidade suficiente de pontos de treino, sendo possível afirmar que a rede está perfeitamente adaptada.

Na Figura 5.6, é de novo apresentada a resposta da rede para que seja possível visualizar de uma forma mais precisa, as variações da curva de potência do parque.

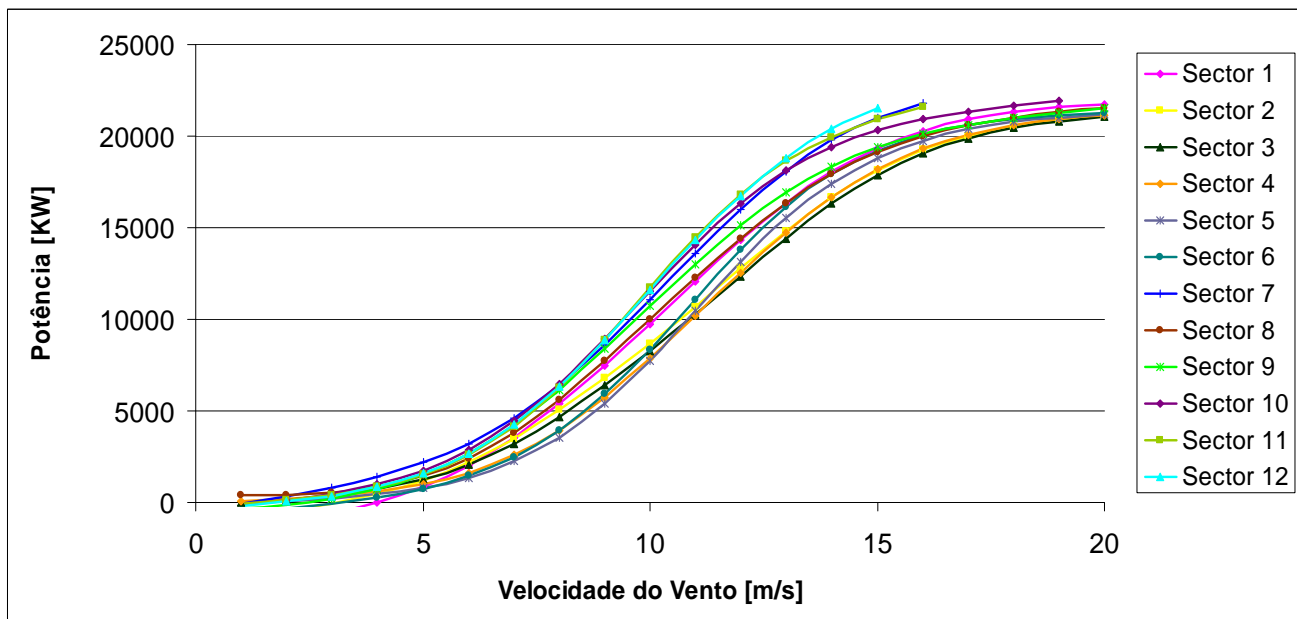


Figura 5.6 - Resposta da rede neuronal do parque, aos dados da matriz de potência.

Como se visualiza na Figura 5.6, existem efectivamente diferenças entre as curvas de potência dos diversos sectores. Verifica-se que a melhor curva de potência é proveniente do sector 12 e a pior curva de potência deriva do sector 4, que correspondem a direcções de vento  $330^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

É de realçar a evolução das curvas de potência do sector 2 e 6, onde se verifica uma completa variação para as diversas velocidades. No caso da curva do sector 2 verifica-se que esta possui um desenvolvimento coincidente com as demais curvas para velocidades inferiores a 10 m/s, e para velocidades superiores a esta, nota-se uma clara queda do desempenho. Pelo contrário, a curva de potência do sector 6 está bastante abaixo das demais curvas até aos 10 m/s, e para velocidades superiores existe um claro aumento de potência gerada. Estes aspectos denotam a existência de uma constante alternância das curvas de potência e consequente abaixamento do desempenho do parque, que não se deve a aspectos relacionados com a velocidade do vento.

### 5.3.2 Curvas de potência por sector

Nesta fase foi efectuada uma avaliação bimensal, para um horizonte temporal de 10 meses, foram criadas e treinadas 9 redes neuronais, sendo que nesta simulação a entrada da rede foi unicamente a velocidade do vento, sendo assim excluída a influência da direcção do vento (Figura 5.6), desta forma obtêm-se as curvas de potência totais do parque.

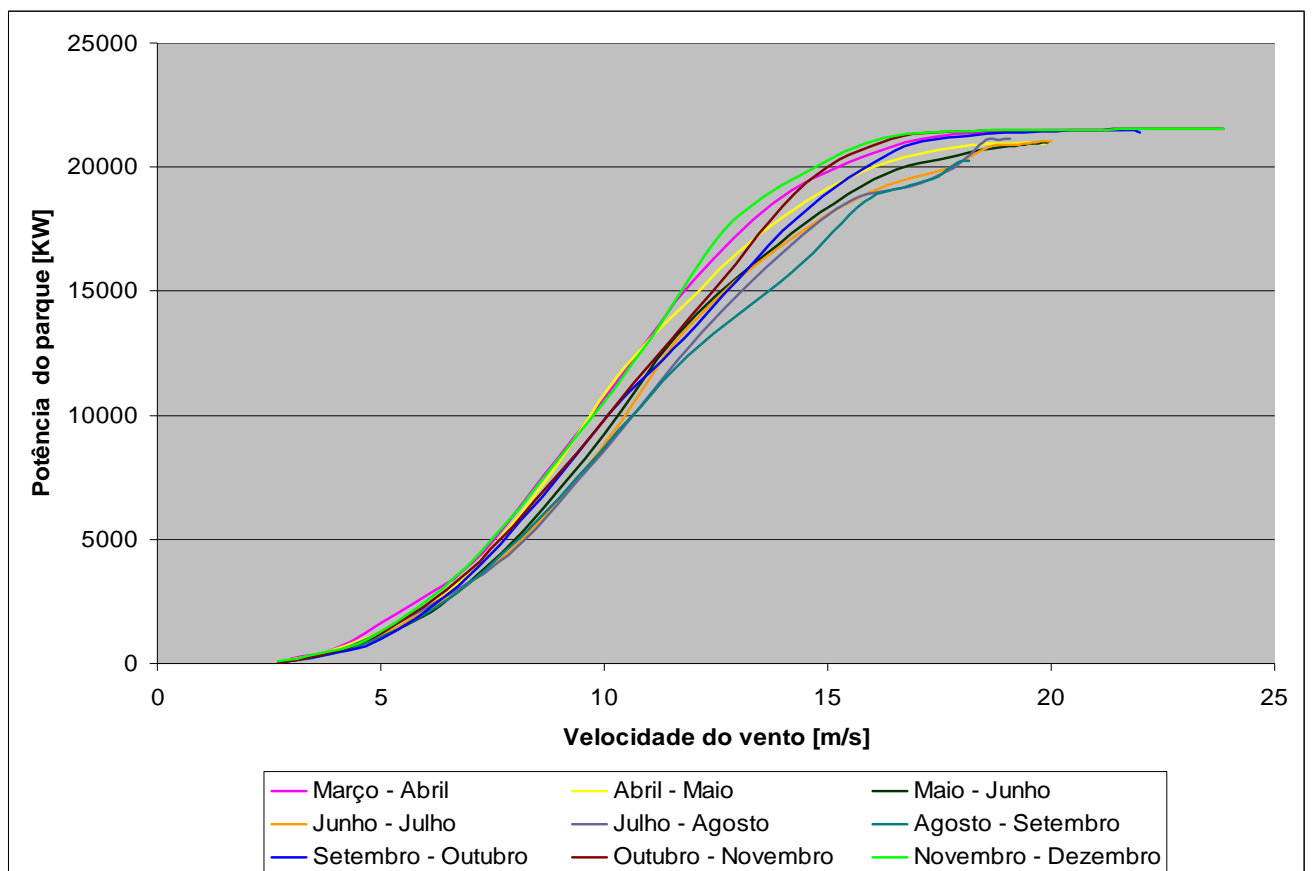


Figura 5.7 - Respostas das redes neuronais para os diversos meses, sendo que a rede possui unicamente a velocidade como entrada.

Como se verifica no desenvolvimento das curvas de potência apresentadas, os meses de Março - Abril, Abril - Maio e Novembro - Dezembro foram os melhores meses para a produção de energia. Os meses menos favoráveis são os meses de Junho - Julho, Julho - Agosto e Agosto - Setembro. É de realçar o comportamento da curva de potência de Abril - Maio que para velocidades inferiores a 10,5 m/s, possui um comportamento semelhante ao das curvas dos meses de Março - Abril e Novembro - Dezembro e para velocidades superiores a 10,5 m/s a curva tem um declínio bastante considerável. É possível verificar também uma degradação da curva de potência de Agosto - Setembro, claramente evidenciada entre o intervalo de velocidades de 11,5 m/s e 16,5 m/s.

No seguimento do estudo anterior, foi efectuada uma nova simulação para perceber qual era a influência da inclusão da direcção do vento na análise. Para efectuar este estudo foram criadas e treinadas 9 redes neuronais, sendo que as entradas são direcção segundo seno e cosseno e velocidade do vento. De seguida e de acordo com o que já foi mencionado, são apresentadas as Figuras 5.8 e 5.9 referentes aos sectores 7 e 12, respectivamente. Nestes gráficos é ainda apresentada a curva de potência que consta na matriz *WFPA*, para cada um dos sectores em questão. Todos os restantes gráficos resultantes desta simulação, são apresentados no Anexo C, sendo assim possível, verificar o comportamento das curvas de potência em cada um dos sectores

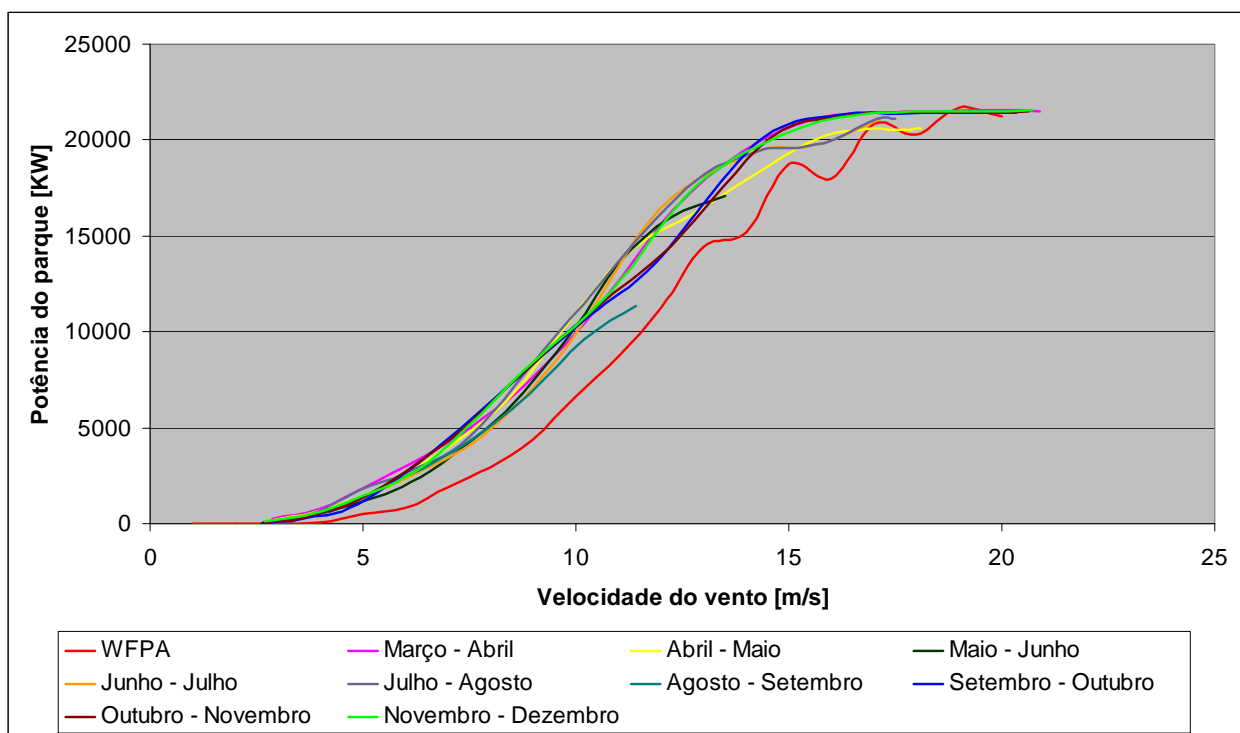


Figura 5.8 - Curvas de potência do sector 7.

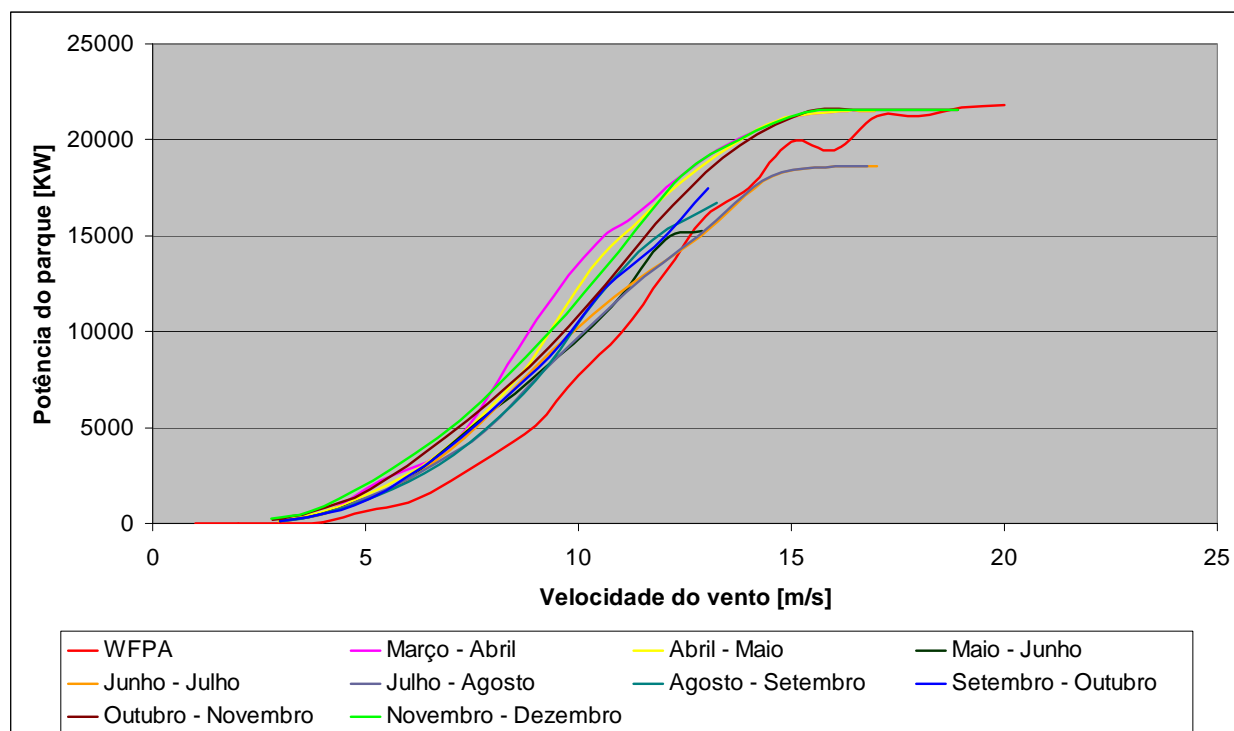


Figura 5.9 - Curvas de potência do sector 12.

Na Figura 5.8, verifica-se uma constante alternância entre as curvas de potência dos diversos meses, o que revela uma certa instabilidade nas velocidades de vento do sector 7. Comparando as diversas curvas de potência dos diversos meses com a curva de potência da matriz *WFFPA*, conclui-se que o parque está a produzir mais do que era esperado. Ainda neste gráfico, verifica-se que as curvas de Abril - Maio têm um decréscimo do desempenho partir de valores de velocidade correspondentes a 11 m/s. É de realçar o caso da curva de potência de Agosto - Setembro, que não vai além dos 11,4 MW, pelo facto de a rede neuronal no sector 7 não possuir pontos de treino superiores ao referido.

Na Figura 5.9, tal como se verificou na análise das curvas de potência sem influência da direcção, também aqui se verifica que nos meses de Março -Abril, Abril - Maio e Novembro - Dezembro, isto é, o sector 12 proporcionou uma boa produção de energia para os meses referidos. As curvas de Junho -Julho e Julho - Agosto possuem os piores registos, sendo bastante visível a queda progressiva do desempenho nestes meses.

Foi também efectuada a manipulação dos dados obtidos na simulação anterior, com influência da direcção do vento, para se observar as curvas de potência para cada um dos meses, em função dos sectores. Os gráficos indicados nas Figuras 5.10 e 5.11, representam as curvas de Março - Abril e Novembro - Dezembro, respectivamente. Todas os gráficos, referentes aos restantes meses, são expostos Anexo D.

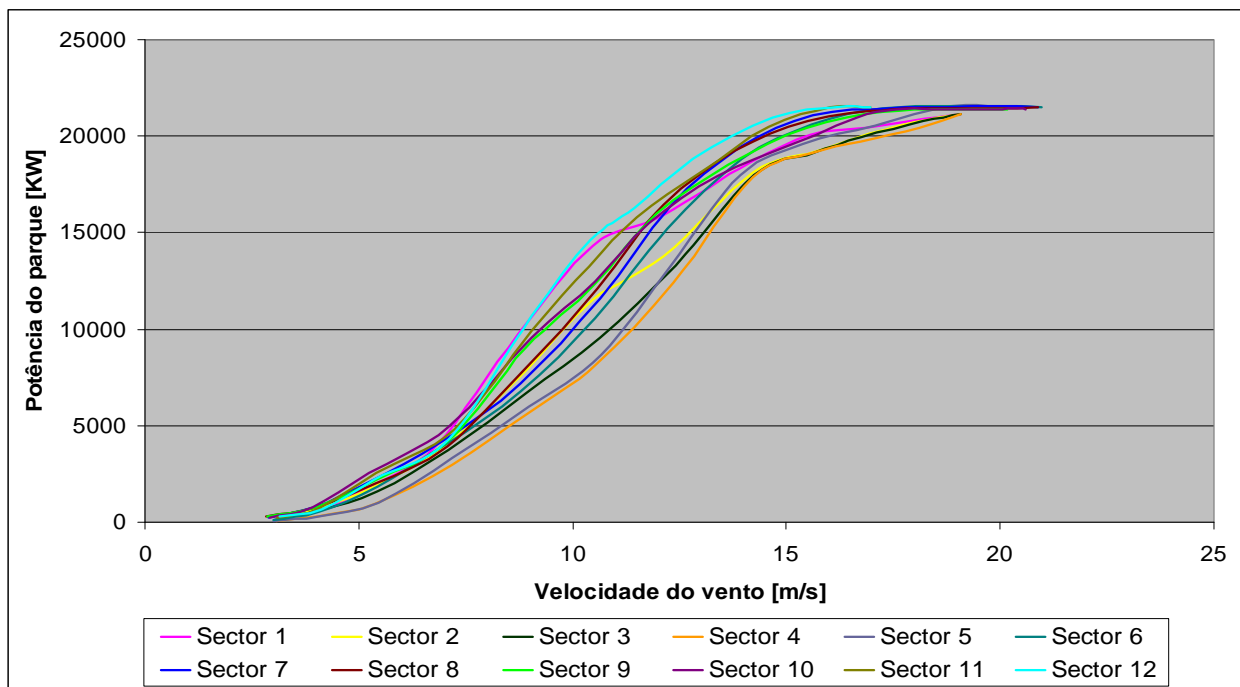


Figura 5.10 - Curvas de potências referentes aos meses de Março - Abril.

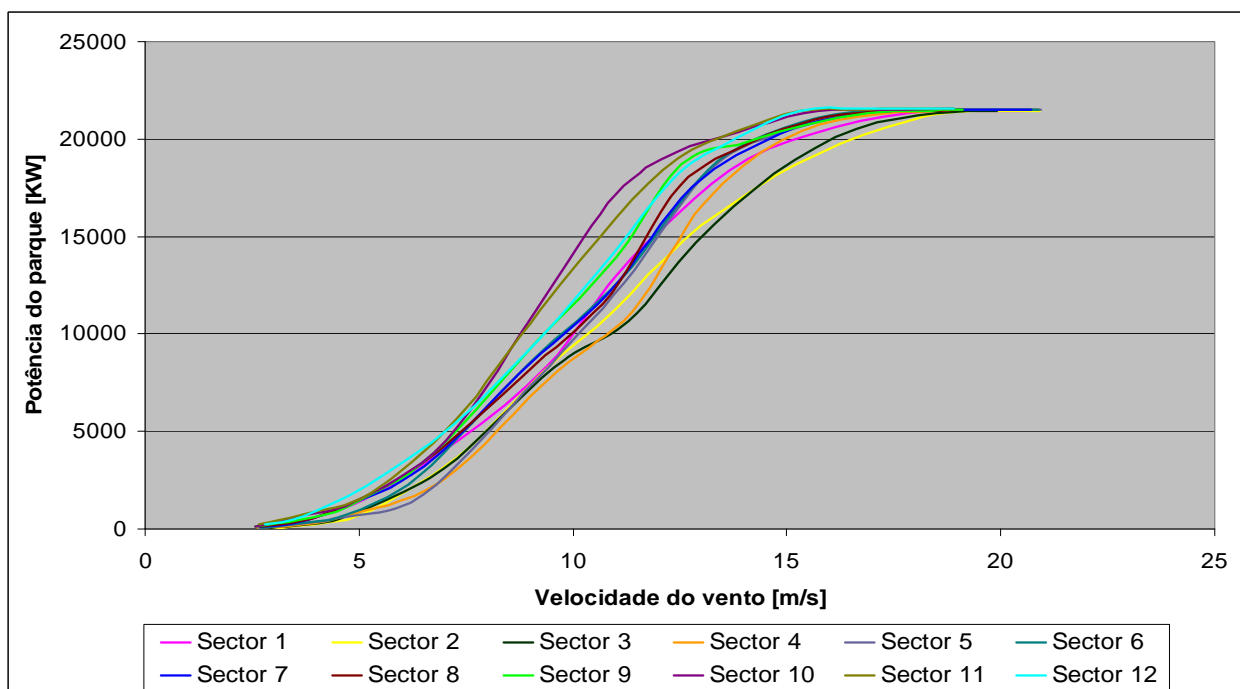


Figura 5.11 - Curvas de potências referentes aos meses de Novembro - Dezembro.

Na Figura 5.10, verifica-se que nos meses de Março - Abril, tal como era de esperar, o sector 12 possui óptimas condições para a produção de energia, pelo contrário o sector 4 é o menos favorável. É importante visualizar as diferenças consideráveis entre estes dois sectores, ou seja, quando se compara as curvas dos sectores 12 e 4 para a mesma velocidade de 10 m/s, verifica-se uma variação aproximada de 6500 KW, representando cerca de 29 % da potência nominal do parque.



Também nos meses de Novembro - Dezembro o sector 12, possuiu boas condições para a produção de energia, apesar de neste mês os sectores 10 e 11 possuírem as melhores condições, sendo o sector 4, o sector com pior produção. Comparando a variação entre estes dois sectores para a velocidade de 10 m/s, verifica-se que a diferença ronda os 5000 KW, cerca de 22% da potência nominal.

Em média, a variação entre as curvas com maior e menor produção para uma velocidade correspondente a 10 m/s nos respectivos sectores, ao longo dos diversos meses em estudo, é aproximadamente 18% da potência nominal do parque. No caso da avaliação por sector, a variação média para os meses com maior e menor produção, corresponde a cerca de 12% da potência nominal. Deste modo, é possível concluir que existe uma maior variação da potência por sector do que ao longo dos meses, apesar de ambas ser muito significativas.

## 5.4 Desempenho do parque eólico

Neste ponto foi efectuado o cálculo do factor de capacidade do parque, isto é, um índice do desempenho do parque para cada conjunto de meses, que já foram previamente indicados. Com este índice caracteriza-se a potência produzida no parque, sendo possível visualizar a evolução temporal do desempenho do parque.

Foram efectuadas duas avaliações, que correspondem aos valores gerados pelas redes neuronais considerando a influência da direcção do vento e não considerando a influência da direcção do vento.

O factor de capacidade foi calculado recorrendo os valores que foram gerados pelas respectivas redes neuronais, nomeadamente, aos valores da velocidade de vento e respectiva potência gerada. Recorreu-se também aos parâmetros de  $A$  e  $K$ , que foram calculados quando foi efectuada a caracterização das velocidades de vento. Com estes dados foi criada uma folha de cálculo para retirar um índice que caracteriza a potência média produzida no parque, a fórmula que efectua esse cálculo é:

$$Factor\ de\ Capacidade = \int_{i=1} \frac{P_{(A,K)} \times P_{medida}}{P_{máximo}} , \quad (5.3)$$

onde  $P_{(A,K)}$  representa a potência calculada a partir da distribuição de Weibull,  $P_{medida}$  é a potência gerada pela rede neuronal e  $P_{máximo}$  representa a potência máxima do parque.

Para excluir a influência do vento foi escolhida uma das características de vento que haviam sido calculadas, para ser aplicada em todos os cálculos de  $P_{(A,K)}$ , para desta forma, ser possível uma comparação efectiva entre a energia produzida em cada um dos meses em questão.

### 5.4.1 Factor de capacidade de parque

De seguida, são apresentadas na Figura 5.12 a conjugação das diversas curvas que caracterizam o factor de capacidade total do parque. Os dados usados nesta simulação são gerados a partir das redes neuronais, que não usaram a direcção do vento como entrada.

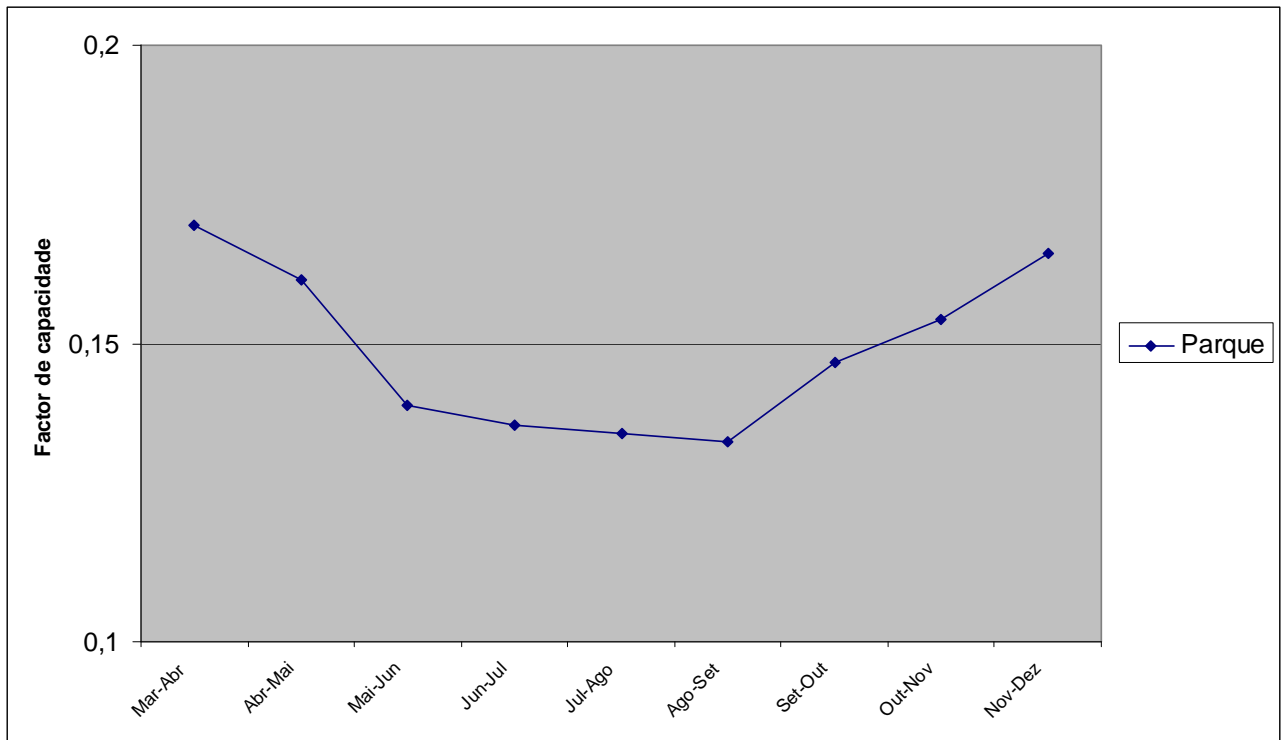


Figura 5.12 - Evolução do factor de capacidade do parque, não considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais.

Através da análise temporal efectuada, verifica-se que existe uma variação da produção, que não se deve aos aspectos da velocidade de vento, visto que, se considerou sempre a mesma distribuição de ventos para todos os meses. Tal como se esperava, os melhores meses para a produção de energia são Março - Abril, Abril - Maio e Novembro - Dezembro, os meses menos favoráveis são Junho - Julho, Julho - Agosto e Agosto - Setembro. A variação entre os meses com maior produção e menor produção, corresponde a cerca de 4% da potência nominal do parque, ou seja, aproximadamente 880 KW.

Na Figura 5.13, está indicada a evolução da produção, para a situação em que foi considerada a direcção do vento na construção das respectivas redes neuronais. Nesta simulação também foram considerados os mesmos A e K da distribuição de vento, para todos os sectores e conseqüentemente para todos os meses o que conduz mais uma vez, à exclusão dos aspectos relacionados com as questões de vento que caracterizam cada um dos sectores.

A série designada como Total representa o factor de capacidade total do parque, calculado anteriormente e apresentado na Figura 5.13.

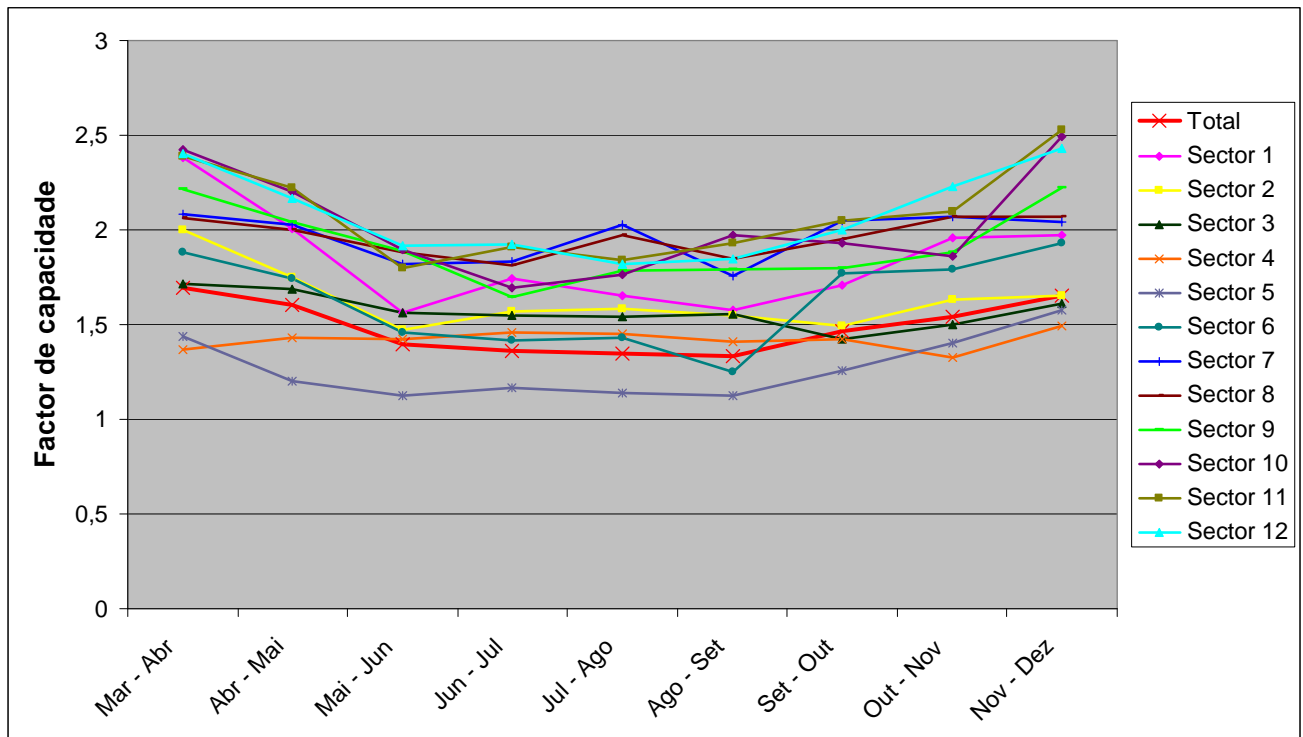


Figura 5.13 - - Evolução da performance do parque, considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais

Com a introdução da direcção do vento na análise, é possível visualizar a evolução do desempenho do parque para cada sector e verifica-se que existem discrepâncias de produção entre os diversos sectores, como sendo o caso menos favorável pertencente ao sector 5 e o caso mais favorável pertencente ao sector 12. É de realçar certas incongruências, como sejam, as verificadas entre os conjuntos de meses de Maio - Junho e Junho - Julho nas curvas dos sectores 1, 4, 5, 11 e 12 que sofrem um acréscimo, e para os mesmos meses as curvas dos sectores 8, 9 e 10 que se encontram a decrescer. Outro caso verifica-se entre o conjunto de meses de Julho - Agosto e Agosto - Setembro, nas curvas dos sectores 10, 11 e 12 que se observa uma subida e as curvas dos sectores 1, 6, 7 e 8 que se encontram em descida. Temos ainda, as curvas entre os meses Setembro - Outubro e Outubro - Novembro, para os sectores 1, 8, 2 e 12 onde se verifica uma subida e nos sectores 4 e 10 já se observa um decréscimo.

Aparentemente, tudo isto seria explicado pelo facto de o vento ser instável ao longo do tempo, mas como já foi referido, neste cálculo foi considerada sempre a mesma distribuição de vento, logo dado que não foi considerada a influência do vento o parque deveria apresentar um gráfico estável, onde todas as curvas estivessem aproximadamente estáveis e solidárias e o facto é que existem variados desfasamentos, dependendo do conjunto de meses em questão e também do sector.

Na Figura 5.14, são apresentados os índices de capacidade calculados a partir dos dados que constam na matriz *WFPA* que foi elaborada na fase de projecto e os dados que foram disponibilizados na simulação da rede neuronal. Os dados com os quais a rede neuronal foi simulada, correspondem aos valores de velocidade e direcção do vento que foram indicados na matriz *WFPA*, para existir uma base coerente de comparação.

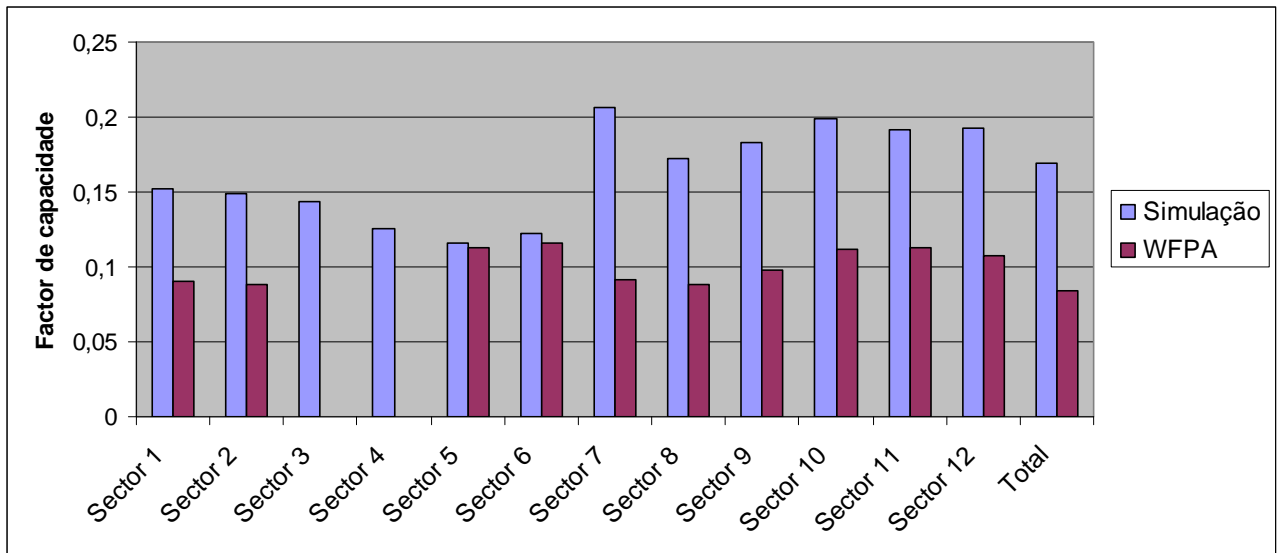


Figura 5.14 - Comparação do factor de capacidade do parque, entre os dados que constam na matriz *WFPA* e os dados gerados pela rede neuronal.

Tal como já se tinha verificado nas curvas de potência, existe uma lacuna entre o que foi indicado na fase do projecto e o que na realidade está a acontecer.

## Capítulo 6

# Análise do desempenho do parque por aerogerador

### 6.1. Introdução

Dada a falta de explicações para as diversas variações da curva de potência do parque no decorrer do tempo, foi necessário avançar nas investigações e realizar uma análise criteriosa a cada um dos 12 aerogeradores que constituem o parque em estudo.

Nesta fase e à semelhança da avaliação efectuada para o parque, foram analisadas as diversas curvas de potência totais e as curvas do desempenho de cada um dos aerogeradores, para o horizonte temporal de 12 meses. Os dados utilizados nesta simulação, são os registos de *SCADA* do parque para cada um dos aerogeradores, sendo que os valores da velocidade de vento são aqueles que efectivamente foram medidos no anemómetro instalado no próprio aerogerador. Foram criadas 132 redes neuronais correspondentes aos 12 aerogeradores e aos 11 conjuntos de meses, que correspondem ao horizonte temporal de um ano em estudo. As redes neuronais criadas possuem como *target* a potência medida e como entrada a velocidade do vento, logo, nesta fase não foi incluída a direcção do vento na análise, sendo assim possível obter as curvas de potência totais de cada um dos aerogeradores.

Foram calculados os factores de capacidade totais de cada um dos aerogeradores e também cada um dos factores de capacidade referentes a cada sector para os 12 aerogeradores em análise. Esta análise sectorial permite perceber qual a influência das diversas direcções de vento na produção de cada um dos aerogeradores. Para esta avaliação por sector foram criadas 144 redes neuronais.

Para efectuar os cálculos do factor de capacidade, foi usada a equação (5.2), sendo que o valor de  $P_{máximo}$ , representa a potência máxima de cada aerogerador, ou seja, 1800 KW.

## 6.2. Curvas de potência por aerogerador

De seguida são apresentados os gráficos das curvas de potência totais dos vários aerogeradores, para os meses de Novembro - Dezembro e Agosto - Setembro, Figuras 6.1 e 6.2 respectivamente. No Anexo E, são apresentados os 11 gráficos das curvas de potência dos aerogeradores, correspondentes aos 12 meses em estudo.

Nesta simulação não foi considerada a influência da direcção do vento, para a criação das respectivas redes neuronais. Nos gráficos apresentados existe uma série de dados designada por *ENERCON E-66*, que corresponde à curva de potência indicada pelo fornecedor do equipamento, Tabela 3.2.

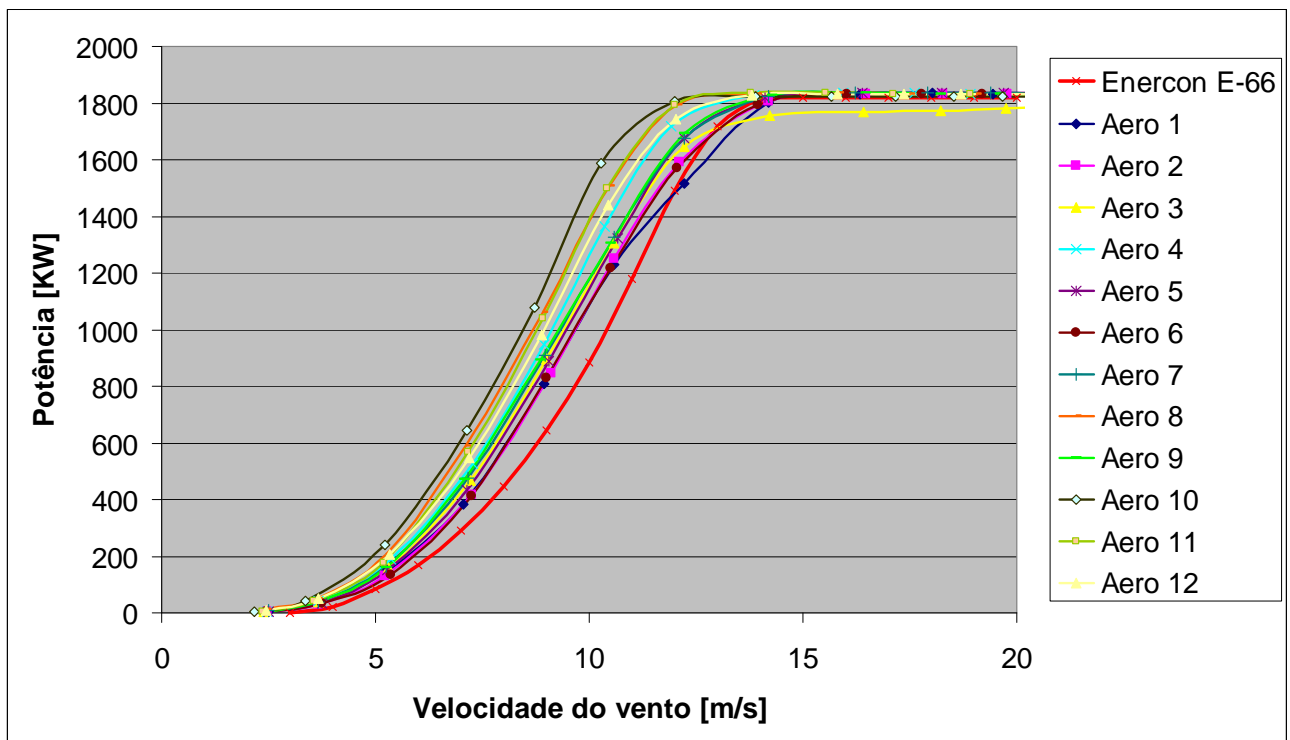


Figura 6.1 - Curvas de potências correspondentes aos meses de Novembro - Dezembro.

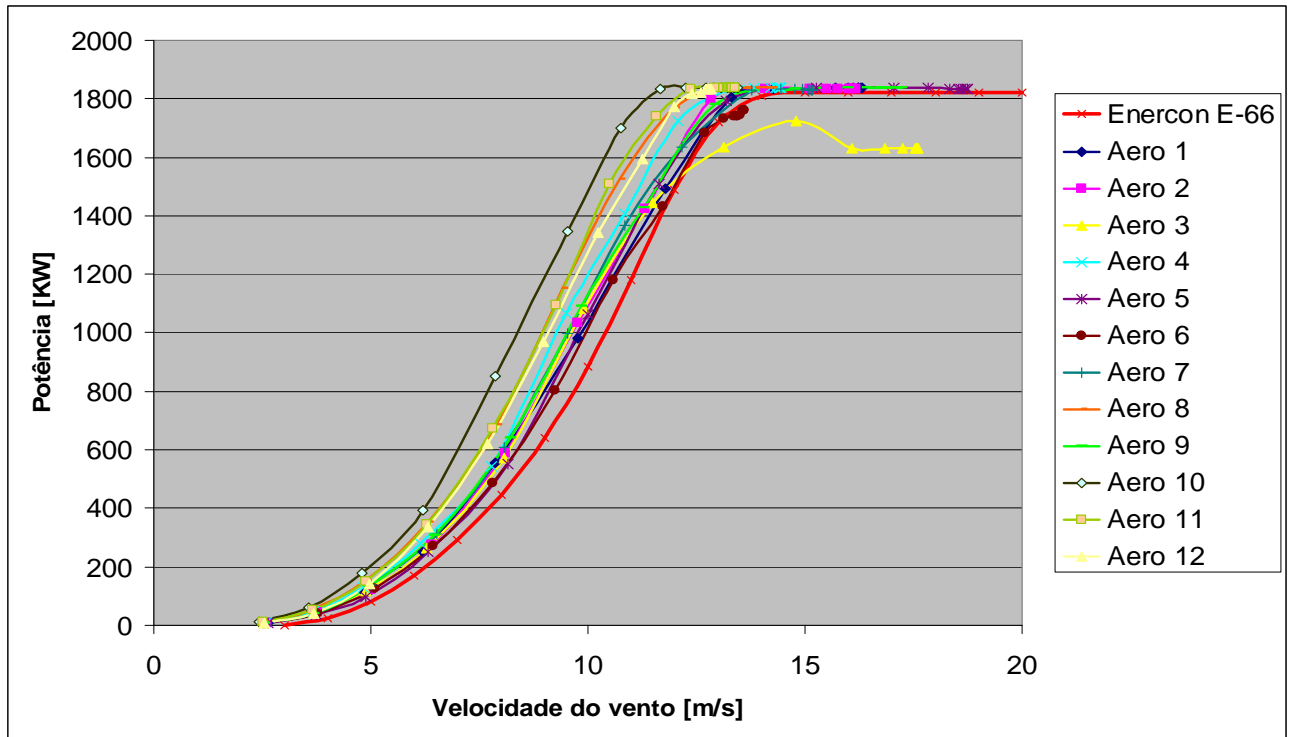


Figura 6.2 - Curvas de potência correspondentes aos meses de Agosto - Setembro

Em ambos os gráficos é possível verificar que existe um desvio entre a curva de potência de referência e a curva de potência medida, sendo que a curva de potência de referência se encontra abaixo do que na realidade está a ser registado, em que o desvio ronda em média os 500 KW. Esta variação pode ser explicada pelo facto do anemómetro, neste caso, estar instalado no próprio aerogerador, sofrendo assim com a turbulência das velocidades de vento geradas pelo movimento das pás do aerogerador.

Nos 11 gráficos elaborados, verifica-se que o aerogerador 10 possui um nível de produção superior relativamente aos demais aerogeradores, em toda a amplitude da curva. Pelo contrário, no nível mais baixo encontram-se os aerogeradores 1 e 6. A diferença média entre os aerogeradores com maior e menor produção, acima referidos, ronda os 400 KW.

Fazendo uma primeira apreciação visual aos 11 gráficos elaborados, foi construída a Tabela 6.1 que pretende representar a maior ou menor produção de cada um dos 12 aerogeradores. Os diversos aerogeradores estão ordenados por ordem decrescente de produção de energia.

Tabela 6.1 - Evolução das curvas de potência.

	Jan- Feb	Fev- Mar	Mar- Abr	Abr- Mai	Mai- Jun	Jun- Jul	Jul- Ago	Ago- Set	Set- Out	Out- Nov	Nov- Dez
Aerogeradores	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	8	11	11	8	8	11	11	11	8	8	8
	11	8	8	11	11	8	8	8	11	11	11
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	9	9	9	2	7	9	9	7	7	9	9
	7	2	2	9	5	2	7	9	9	7	7
	2	7	7	7	9	7	2	3	2	5	3
	1	3	5	3	2	3	3	2	5	3	5
	3	5	3	5	3	5	5	5	3	6	2
	5	1	1	1	6	6	6	1	6	2	6
	6	6	6	6	1	1	1	6	1	1	1

Através da visualização do acompanhamento das cores que se encontram na tabela, é possível verificar que existem determinados aerogeradores que detêm uma produção superior e possuem um desempenho extremamente estável, ao longo do tempo, tal como o aerogerador 10 que já havia sido referido.

### 6.3. Índice de energia produzida por Aerogerador

Por conseguinte, tal como foi efectuado no Capítulo 5 para o parque, procedeu-se ao cálculo do factor de capacidade para cada aerogerador. Usando o Excel e seguindo o mesmo método de cálculo que foi adoptado nesse capítulo, com a excepção de que nesta abordagem a potência nominal considerada para a normalização dos valores de potência calculada passa de 22000 KW, a qual correspondia à potência nominal do parque, para 1800 KW correspondendo à potência nominal do aerogerador.

A Figura 6.3, caracteriza a evolução do índice de capacidade total para cada um dos 12 aerogeradores, durante os 12 meses em estudo. Nesta simulação não foi considerada a influência da direcção do vento para a construção da rede neuronal, assumindo a mesma distribuição de vento para todos os conjuntos de meses considerados, colocando de parte, os aspectos que possam estar relacionados com instabilidade inerente às velocidades do vento.



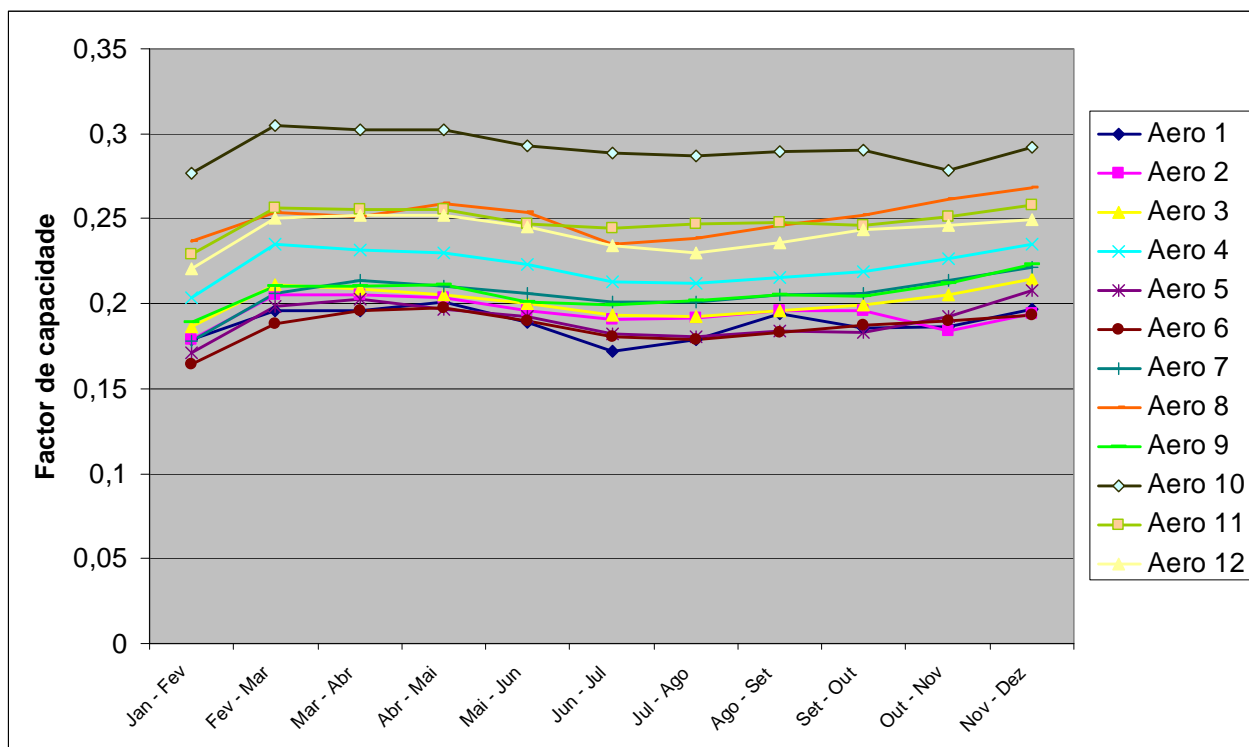


Figura 6.3 - Evolução do factor de capacidade total para cada aerogerador, sem a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais

Tal como se esperava, o aerogerador 10 em termos índice de capacidade gerada encontra-se claramente destacado pela positiva quando comparado com os restantes, sendo que o aerogerador 10 apesar de possuir um índice de capacidade maior, não é o aerogerador mais estável em termos de variação do desempenho ao longo do tempo, ou seja, não considerando a variação existente entre os meses de Janeiro - Fevereiro e Fevereiro - Março que se reflectiu em todas as máquinas, o aerogerador 10 detém uma variação entre a produção de Fevereiro - Março, sendo o melhor registo e a de Outubro - Novembro o pior, cerca de 2,65 %. O aerogerador 11 com uma produção efectiva mais baixa, possui uma variação entre o melhor e o pior registo, de 1,37 %, ou seja, sensivelmente metade da variação apontada para o aerogerador 10.

Dada a vasta extensão do número de gráficos, serão apresentados apenas os gráficos correspondentes às Figuras 6.4 e 6.5, referentes aos aerogeradores 10 e 2, os restantes gráficos são apresentados no Anexo F. Esta escolha foi realizada tendo como base as avaliações que foram efectuadas anteriormente, que indicam o aerogerador 10 como sendo o aerogerador com maior produção e o aerogerador 2, um dos que possui maior oscilação em termos de produção.

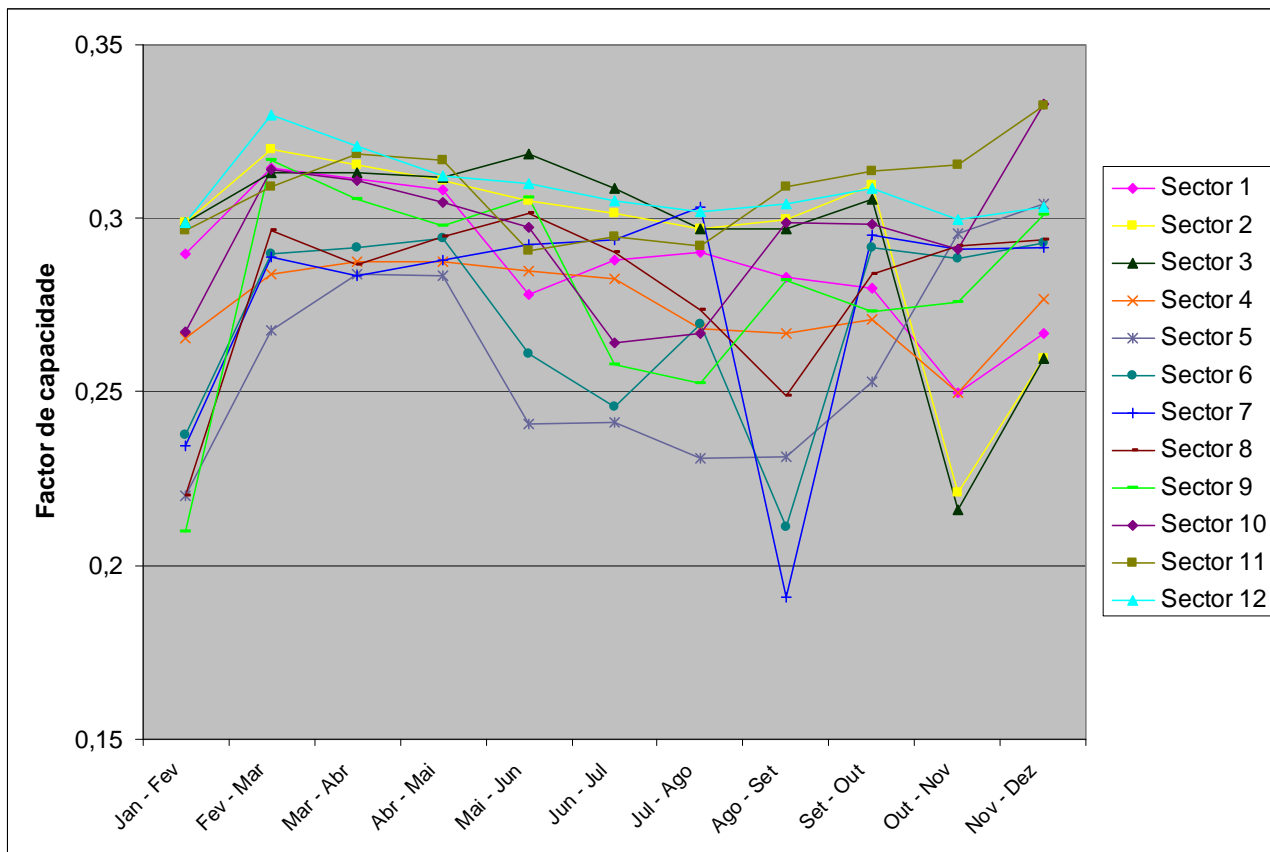


Figura 6.4 - - Evolução da performance do aerogerador 10 por sector, considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais.

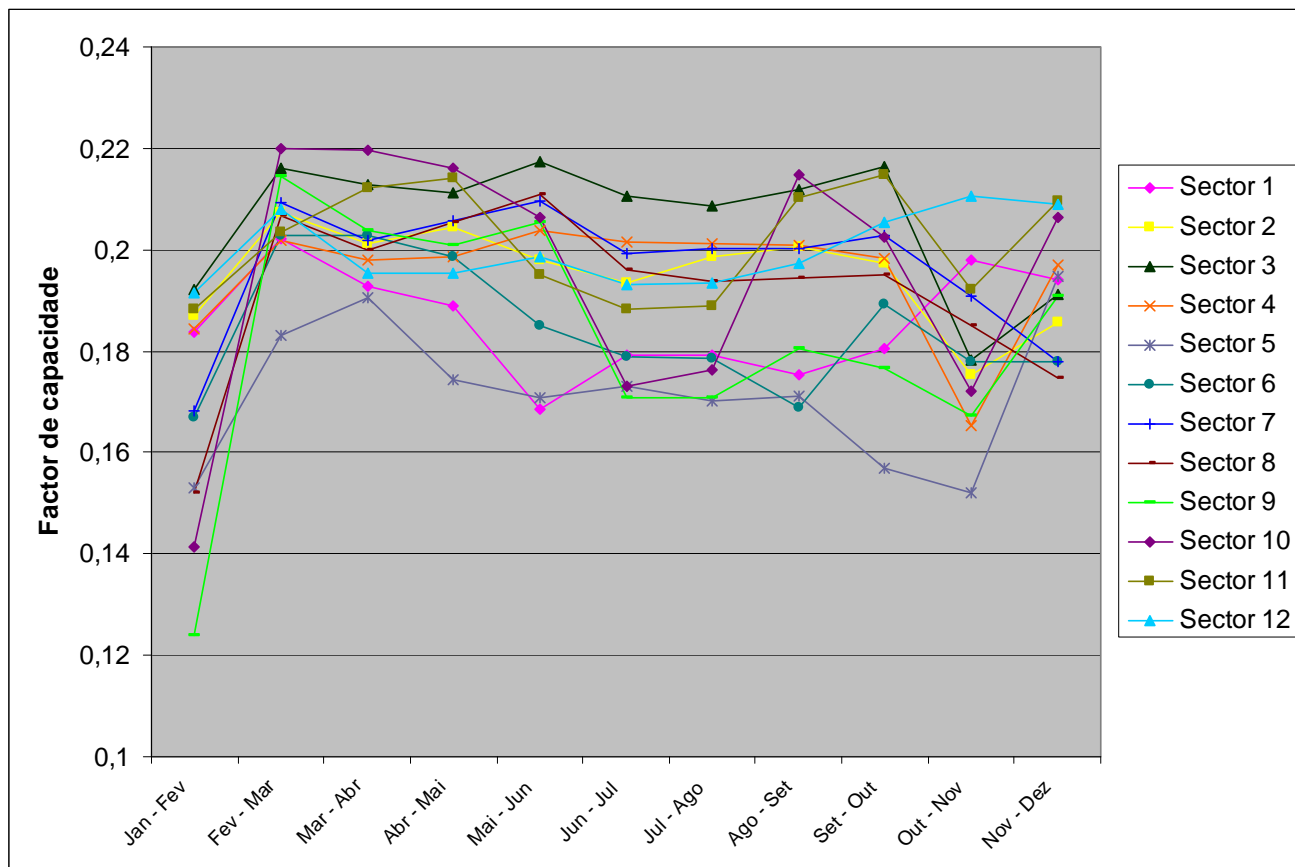


Figura 6.5 - - Evolução da performance do aerogerador 2 por sector, considerando a influência da direcção do vento e considerando A e K todos iguais.

Como era de esperar, o aerogerador 10 possui um índice de produção de energia superior ao aerogerador 2, tal como já havia sido demonstrado nos factores de capacidade totais. Como se verifica, as variações são constantes e apesar de toda esta instabilidade verifica-se que para o aerogerador 10, os sectores 3 e 12 possuem um comportamento bastante estável, logo o vento segundo estes sectores tem condições muito favoráveis para a produção de energia, já o contrário se verifica para os sectores 5 e 6. No caso do aerogerador 2 temos como mais e menos favorável os sectores 3 e 5, respectivamente.

Como se pode verificar, através dos gráficos apresentados, existem inúmeros desfasamentos entre a produção dos diversos aerogeradores e variações da produção dos próprios aerogeradores, que não são explicáveis pela variabilidade do vento.



# Capítulo 7

## Conclusões

O presente trabalho provou ser possível uma automatização da identificação das curvas de potência dos aerogeradores usando redes neuronais. Esta automatização permite identificar variações das curvas ao longo do tempo e segundo as diversas direcções. Aproveitamos esta capacidade para detectar alterações do desempenho da produção do parque, o que foi conseguido com sucesso. Com esta metodologia é possível isolar a avaliação do desempenho do aerogerador, de forma independente da variabilidade de regimes de vento ao longo do tempo, e de local para local.

Numa primeira fase, fez-se uma análise do desempenho de todo o parque eólico. Concluiu-se que havia variação da curva de potência para as diversas direcções de vento, constatando-se melhores curvas de potência para as direcções 330°, e piores para as direcções 90°, ou seja, sector 12 e 4 respectivamente. Ao longo dos vários meses também se observou variações, com melhores curvas nos meses de Março e Abril e piores nos meses de Junho, Julho e Agosto. A metodologia garante que estas variações não se devem a variações dos regimes de vento, no entanto, podem dever-se a variações da densidade do ar (menores nos meses mais quentes) e variações das turbulências que é característica da orografia e das condições atmosféricas. Estes dois aspectos explicam as variações ao longo dos meses e variações com a direcção.

Para confirmar estas conclusões estende-se a metodologia a uma análise por aerogerador. Nesta fase do estudo observaram-se variabilidades semelhantes nos diversos aerogeradores, mas a variação da curva de potência é muito pouco significativa ao longo do tempo, o que revela alguma, mas pouca influência da densidade do ar. Para as direcções nota-se uma maior variabilidade da curva o que indica uma maior importância da turbulência na produção.

Comparando as curvas dos diversos aerogeradores, tiraram-se conclusões interessantes sobre a importância da orografia e dos efeitos de esteira na produção.

O grande objectivo da metodologia seria detectar alterações anormais do desempenho nos aerogeradores. Isto também foi conseguido detectando-se um caso em que foi limitada a produção máxima de um dos aerogeradores durante um determinado período de tempo.

Como conclusão final, a metodologia apresentada neste trabalho abre um conjunto de possibilidades para novas técnicas de avaliação do desempenho que poderão ser de grande utilidade para promotores e auditores de parques eólicos. Estes sistemas poderão ser

melhorados de forma a fazer uma avaliação em tempo real do desempenho dos aerogeradores.

## Futuros desenvolvimentos

Na sequência do exposto, seria interessante abordar a continuidade desta metodologia no sentido de a automatizar, para que detecte variações da curva característica do parque em tempo real

Pressupõem-se que uma abordagem pertinente seria a criação de um modelo dinâmico que detecte mudanças de conceito na curva de potência do parque, integrando um factor de esquecimento adaptativo. Este factor teria em consideração o tempo, em que as medições mais recentes detêm maior nível de significância. Tendo em consideração a frequência de ocorrência de valores anteriores mais relevantes da velocidade de vento do parque, de forma a consolidar a futura metodologia

# Anexos





## Anexo A - Capítulo 3

Power [KW]		Sector											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind Speed Bin [m/s]	1	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	16,52	3,79	-	-	10,40	26,39	16,44	3,73	0,82	1,65	10,62	23,86
	4	54,25	86,40	-	-	132,33	99,86	53,99	86,22	131,30	185,73	132,32	88,62
	5	506,04	400,18	-	-	557,48	697,29	506,33	399,01	371,37	0,37	560,34	623,81
	6	852,36	896,19	-	-	1188,24	1200,68	853,19	893,79	1110,62	1331,16	1191,44	1083,35
	7	1890,30	1772,15	-	-	2247,72	2467,35	1893,95	1768,04	1995,89	2365,87	2254,00	2262,44
	8	2956,96	2926,14	-	-	3714,73	3823,63	2963,36	2919,63	3088,58	3599,20	3725,23	3546,69
	9	4375,11	4261,53	-	-	5543,95	5461,76	4385,16	4252,05	5020,21	5829,68	5558,56	5106,16
	10	6590,41	6486,07	-	-	7942,47	8177,85	6602,85	6472,95	6579,68	7941,44	7963,36	7747,03
	11	8743,95	8189,04	-	-	10683,45	10435,62	8761,30	8176,03	9572,95	10602,05	10693,95	9937,56
	12	11284,47	11757,19	-	-	13690,18	13465,98	11288,81	11748,86	12201,03	14659,70	13696,58	12989,04
	13	14390,75	12738,24	-	-	17074,32	16444,29	14387,90	12736,19	14653,42	15689,95	17053,42	15988,13
	14	15156,51	17148,17	-	-	18525,57	17775,80	15147,95	17160,62	18726,83	19532,65	18502,40	17447,60
	15	18752,63	16604,45	-	-	20757,42	20090,18	18723,97	16610,16	17581,62	18845,55	20725,34	19893,26
	16	17988,01	20079,22	-	-	20503,88	19641,32	17985,96	20092,01	20810,73	21262,10	20487,44	19464,84
	17	20894,41	20360,27	-	-	21423,74	21310,84	20881,96	20369,29	20983,45	20814,04	21415,07	21241,21
	18	20309,02	21244,98	-	-	20627,40	21275,91	20301,94	21251,14	21534,02	21240,30	20619,06	21207,08
	19	21701,60	21732,76	-	-	21600,80	21678,20	21696,58	21734,93	21752,05	21240,30	21597,03	21654,22
	20	21256,85	21543,49	-	-	21688,70	21790,41	21251,83	21545,21	21147,95	21788,81	21684,70	21780,02
	21	21771,00	21773,17	-	-	21427,51	21770,78	21768,95	21774,32	21732,31	21100,57	21413,01	21767,81
	22	21506,51	21476,71	-	-	21793,61	21835,96	21500,80	21485,73	21831,28	21632,65	21787,67	21835,84
	23	20772,26	21560,27	-	-	19033,45	20972,26	20758,45	21571,92	21045,32	17882,99	19013,93	21025,34
	24	20469,86	19975,11	-	-	18200,68	20372,49	20447,26	19986,07	20778,88	18221,00	18152,40	20495,66
	25	19870,32	19568,26	-	-	14847,15	16210,96	19842,58	19585,96	16388,01	17075,00	14863,58	16321,35
	26	17024,54	18161,42	-	-	11697,26	13625,80	16987,44	18174,54	15544,63	12758,79	11721,80	13879,00
	27	15013,81	15307,65	-	-	10705,59	12356,05	14992,01	15302,85	12839,95	8182,42	10714,27	12513,81
	28	10705,82	12201,83	-	-	6910,84	6503,31	10679,79	12168,04	10393,26	7800,23	6944,29	6686,64
	29	9281,05	10034,70	-	-	5899,43	7176,71	9293,26	10018,26	8709,47	3992,81	5920,66	7320,66
	30	6397,37	7453,08	-	-	3433,56	2274,54	6420,66	7438,36	7441,21	2036,53	3551,03	2362,79
	31	5375,91	6670,78	-	-	3433,56	4238,93	5397,37	6659,36	5626,71	4871,92	3452,28	4328,20
	32	4868,38	5365,30	-	-	3324,89	2415,98	4883,11	5357,42	1451,71	2221,92	3337,79	2476,14
	33	3262,90	5608,79	-	-	1912,79	3312,79	3144,24	5602,63	4042,35	652,55	1924,43	3370,66
	34	1389,73	3741,32	-	-	2849,54	3024,66	1405,37	3734,70	1745,89	2288,13	2858,33	3073,97
	35	1307,08	2969,29	-	-	867,47	2557,08	1317,92	2963,70	1810,05	748,83	874,09	2596,35

Tabela 1A - Matriz de potência elaborada pela entidade que projectou o parque.

## Anexo B - Capítulo 4

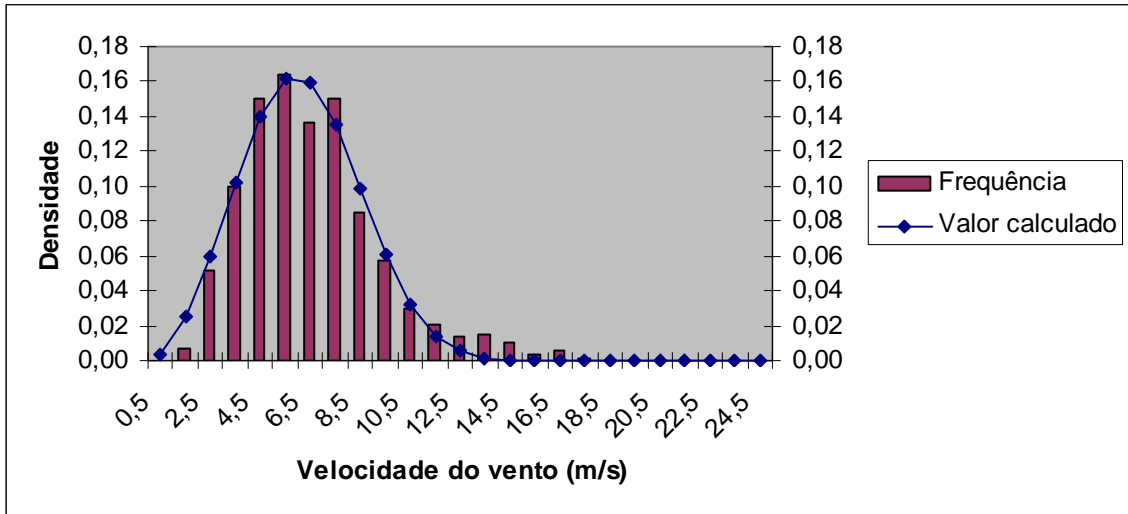


Figura 1B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 1.

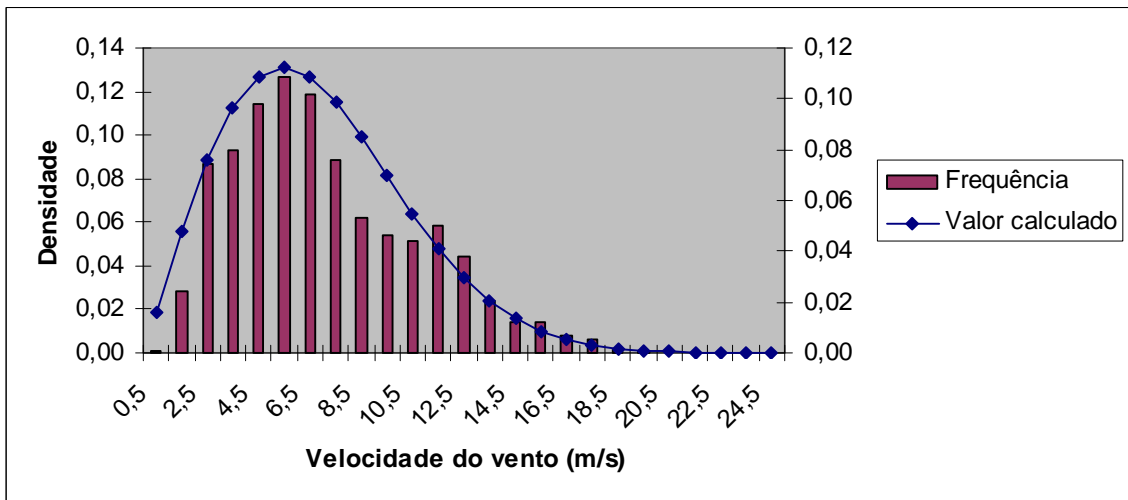


Figura 2B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 2.

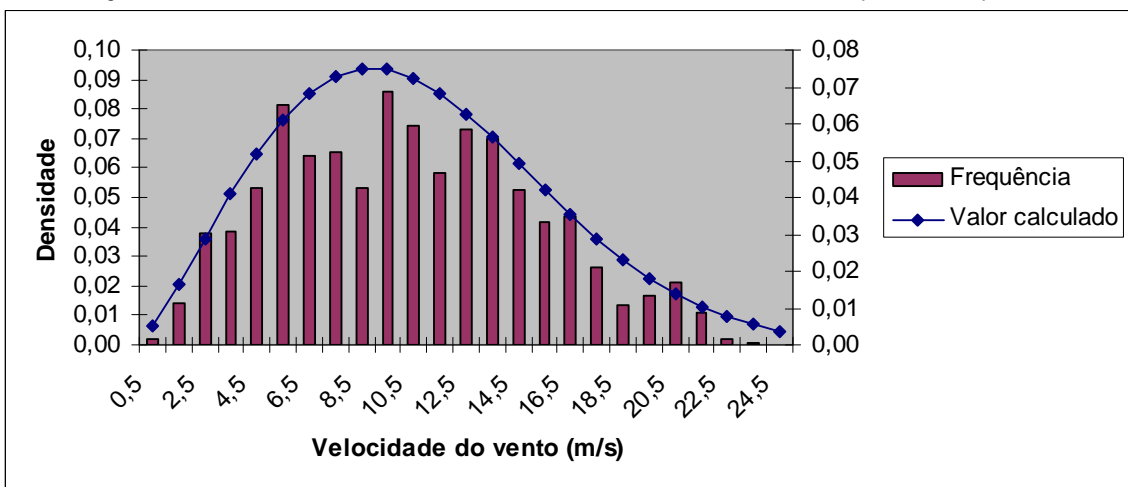


Figura 3B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 3.

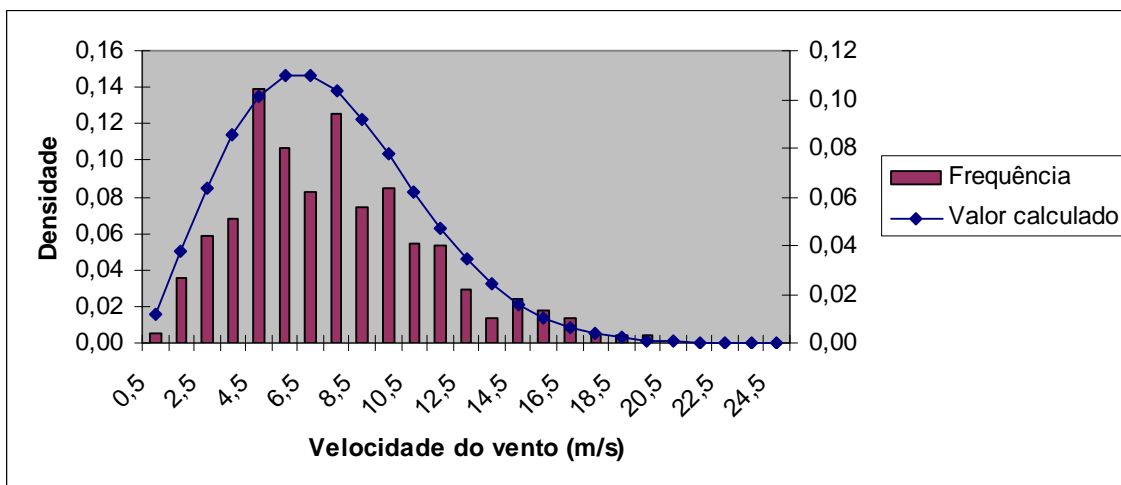


Figura 4B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 4.

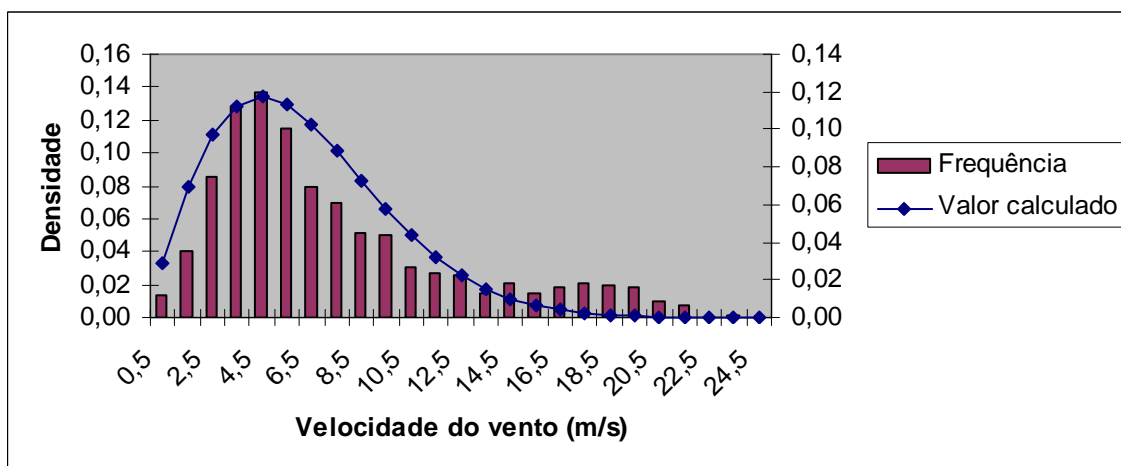


Figura 5B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 5.

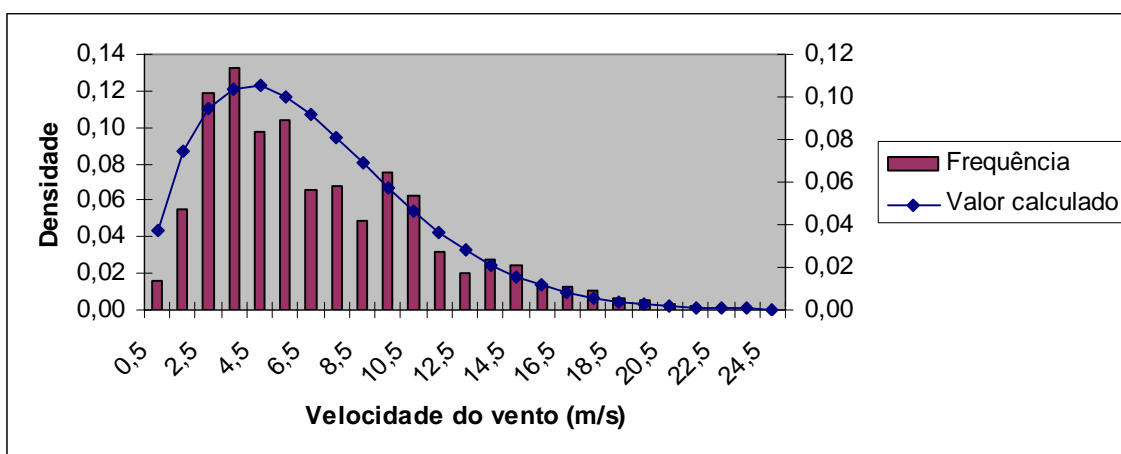


Figura 6B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 6.

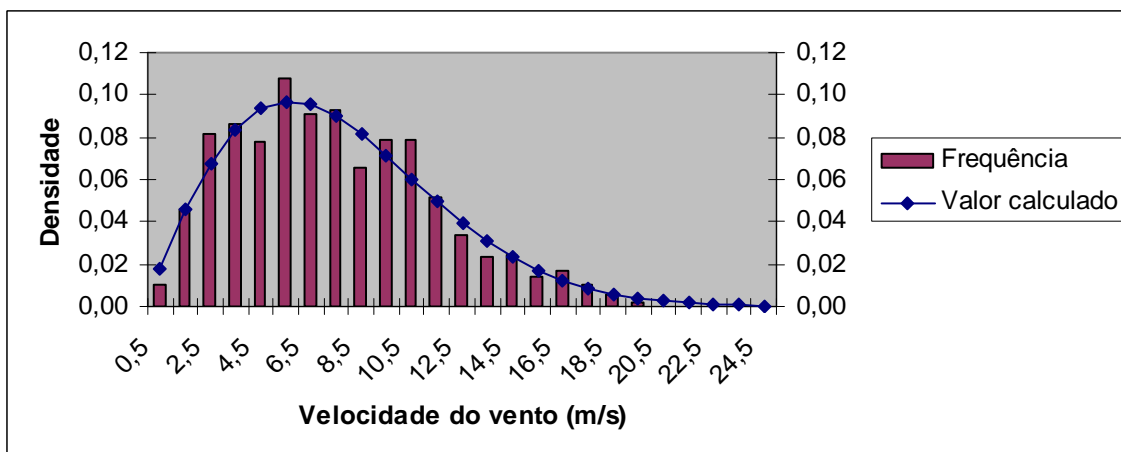


Figura 7B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 7.

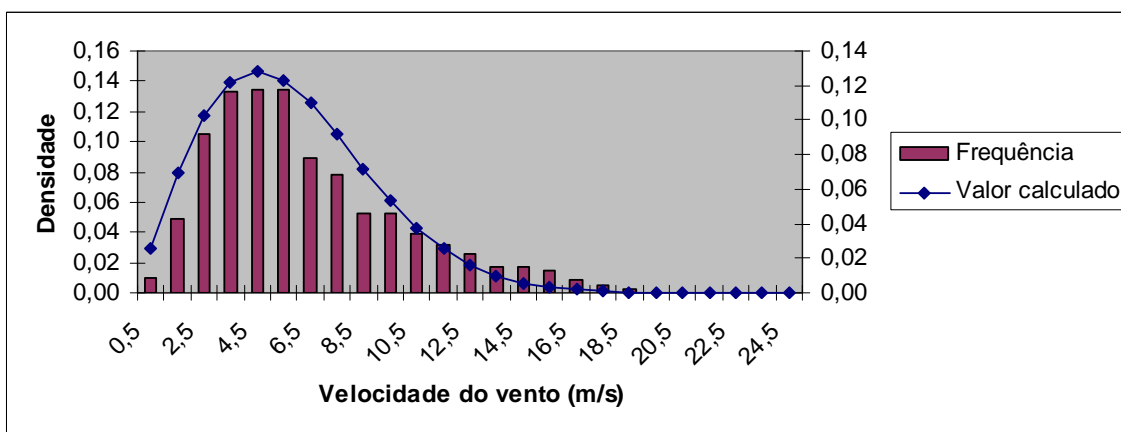


Figura 8B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 8.

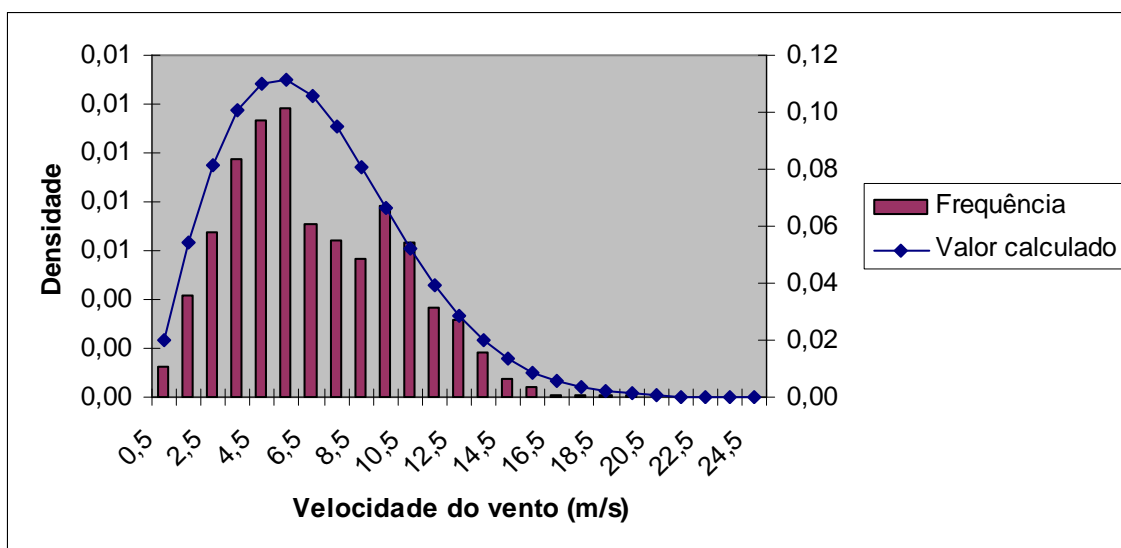


Figura 9B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 9.

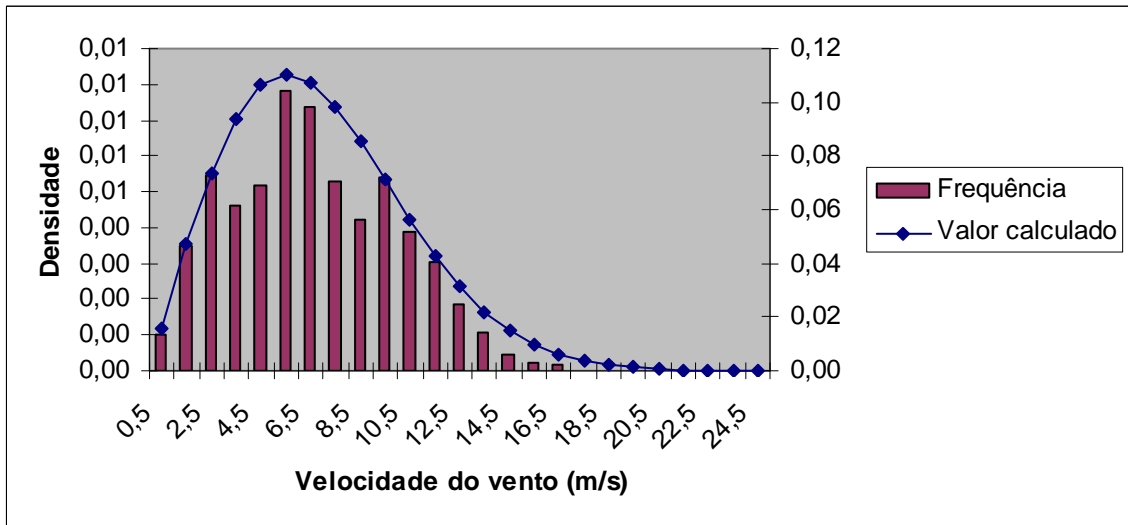


Figura 10B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 10.

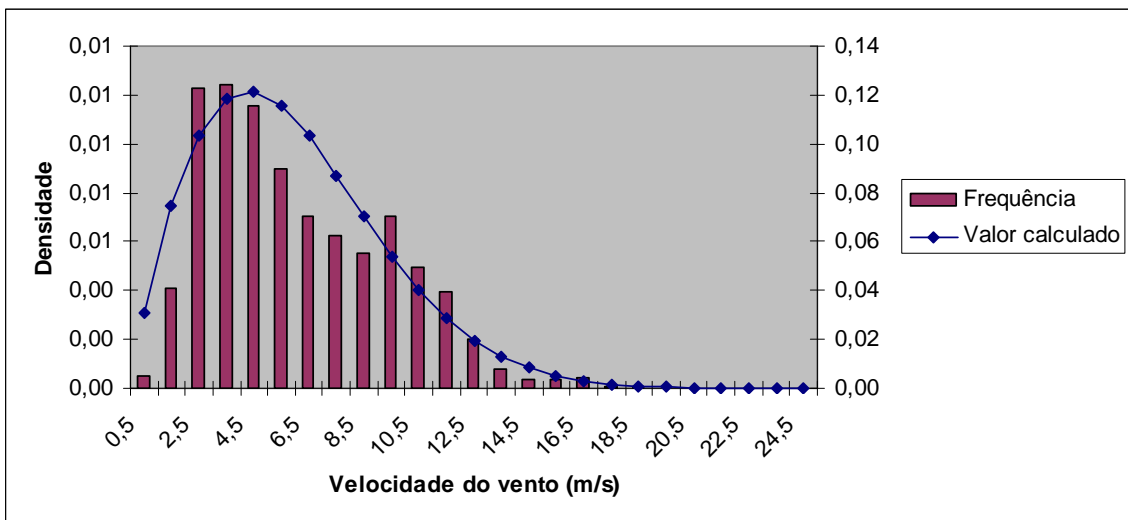


Figura 11B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 11.

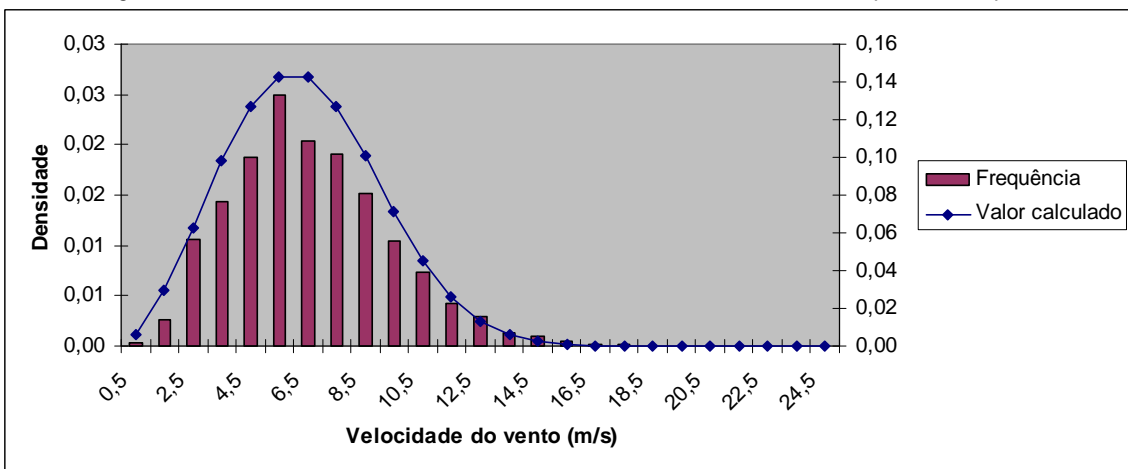


Figura 12B - Histograma da velocidade do vento observada e a distribuição de Weibull aproximada para o sector 12.





## Anexo C - Capítulo 5

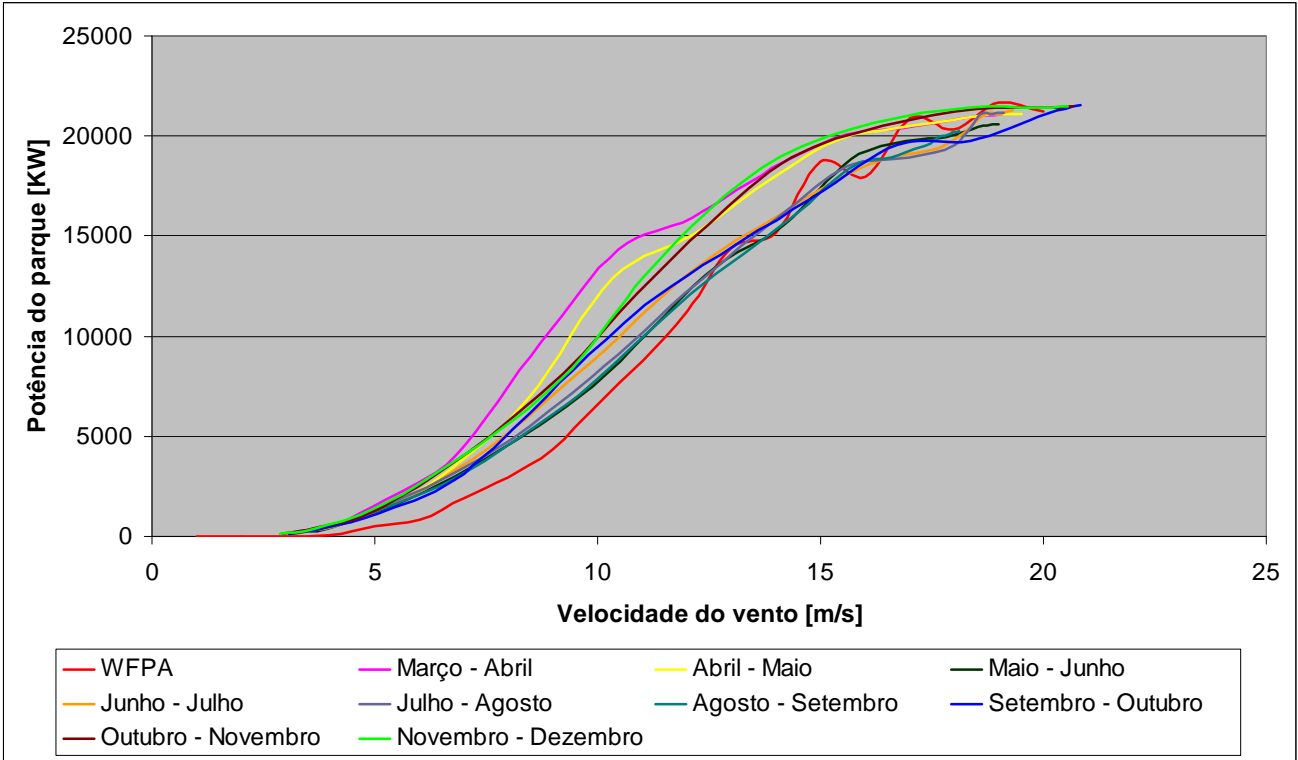


Figura 1C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 1.

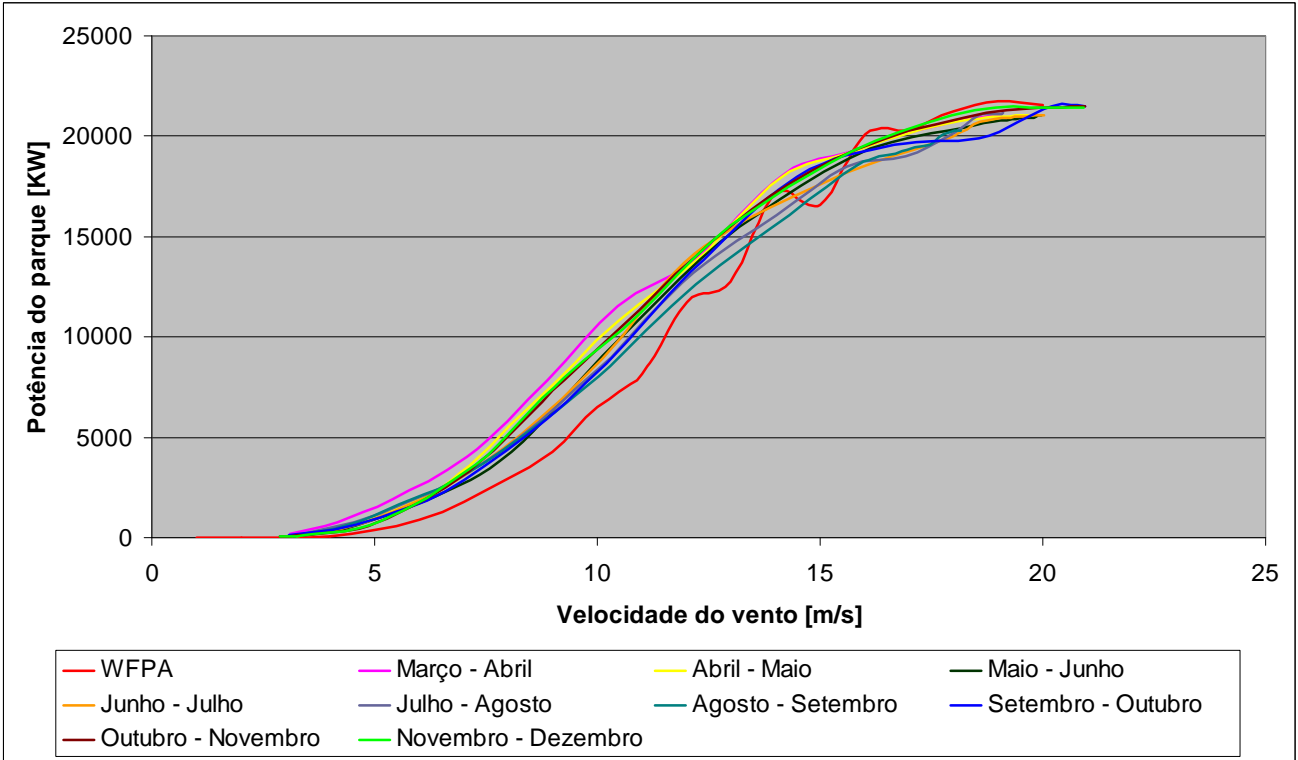


Figura 2C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 2.

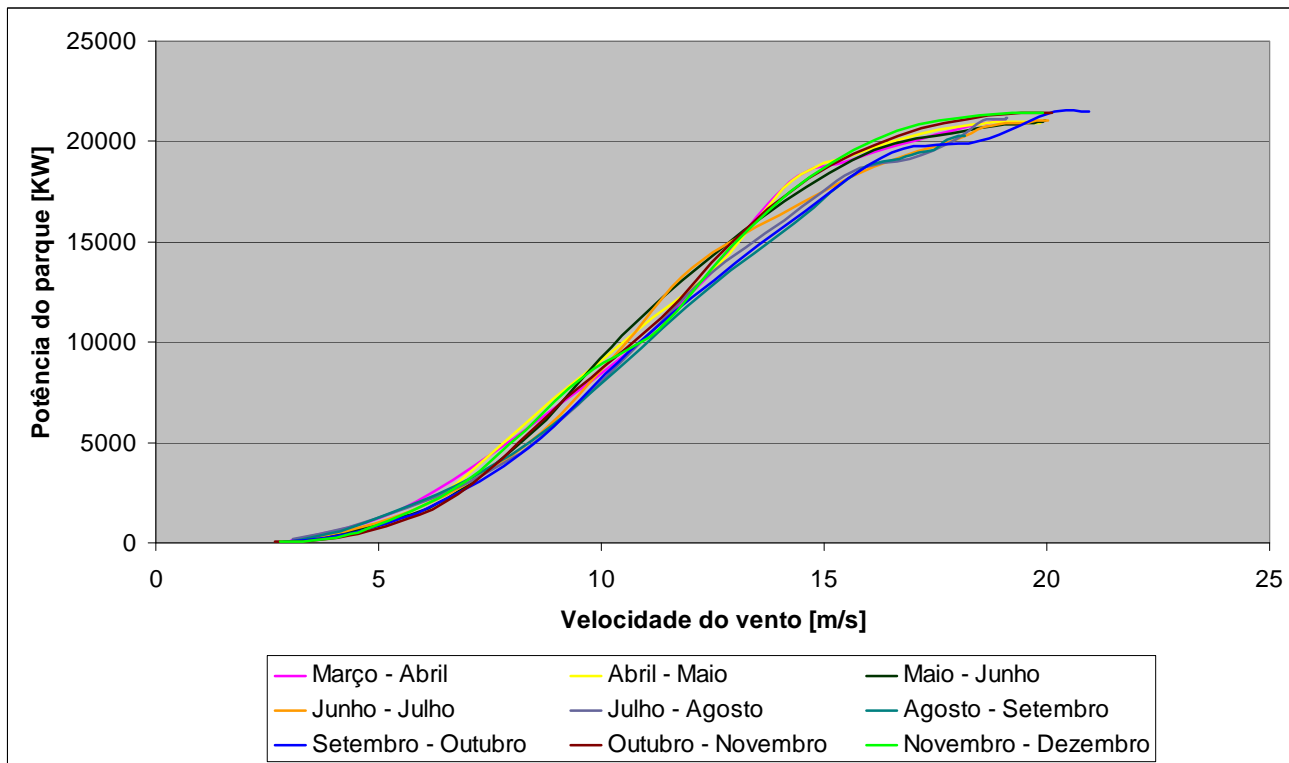


Figura 3C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 3.

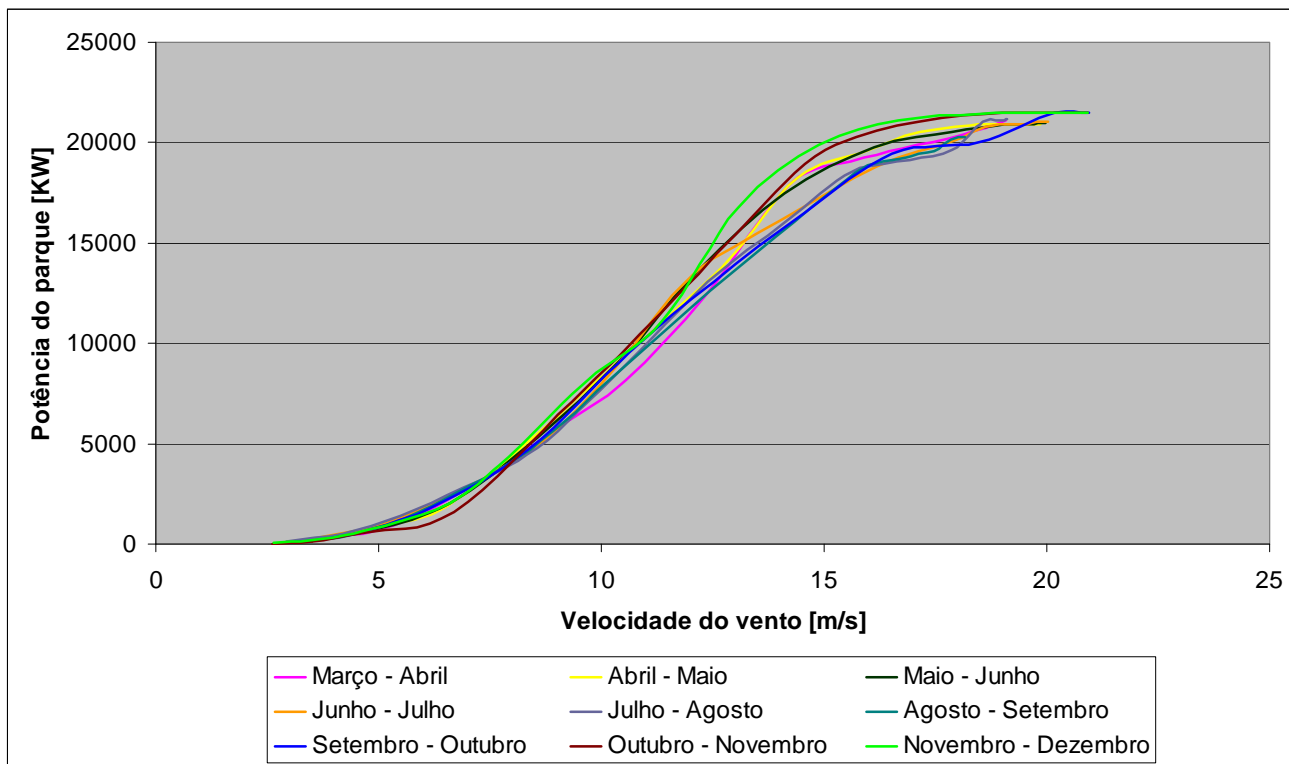


Figura 4C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 4.

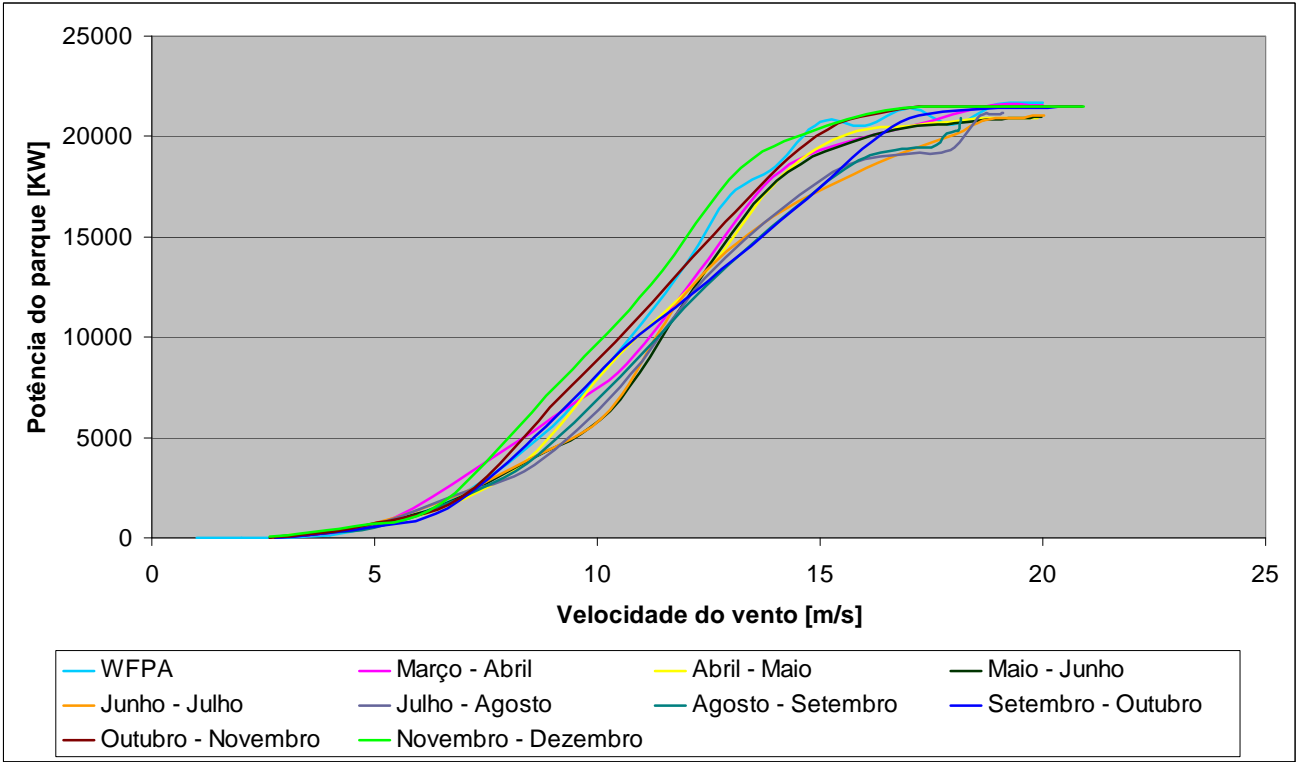


Figura 5C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 5.

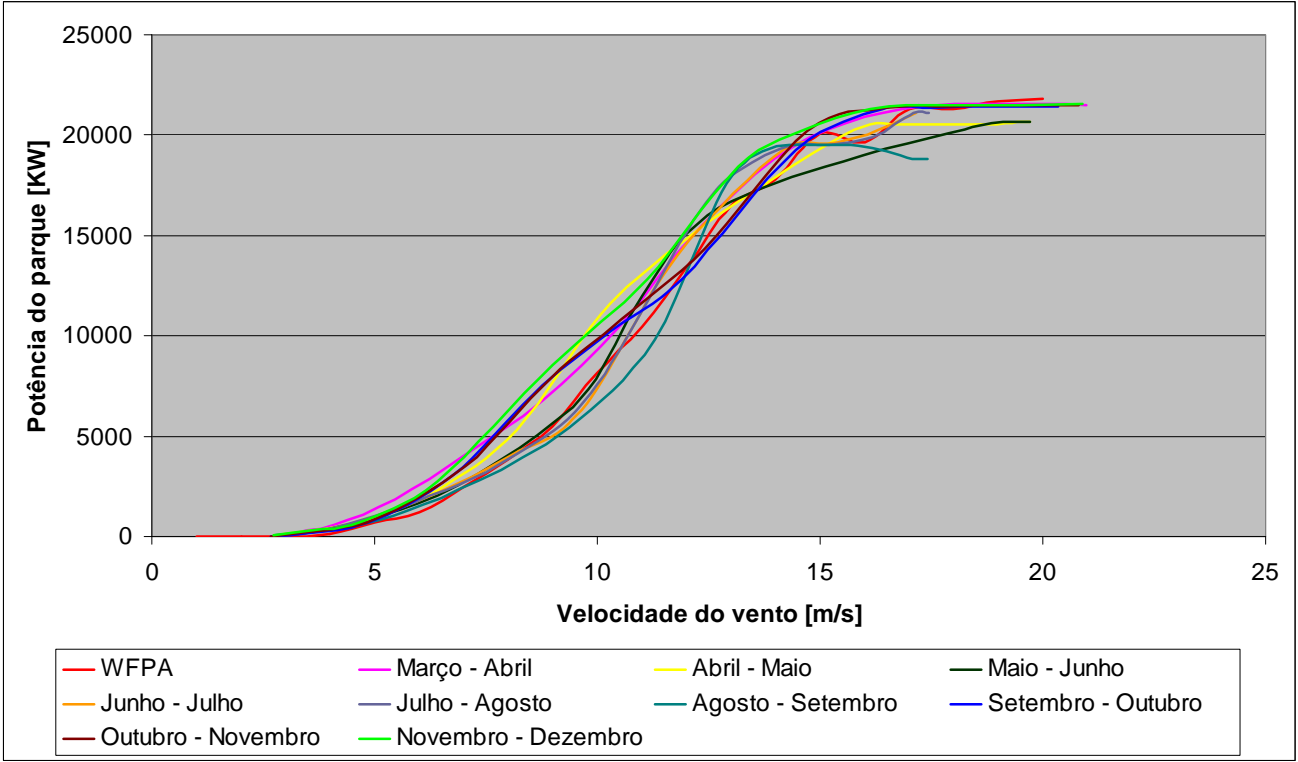


Figura 6C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 6.

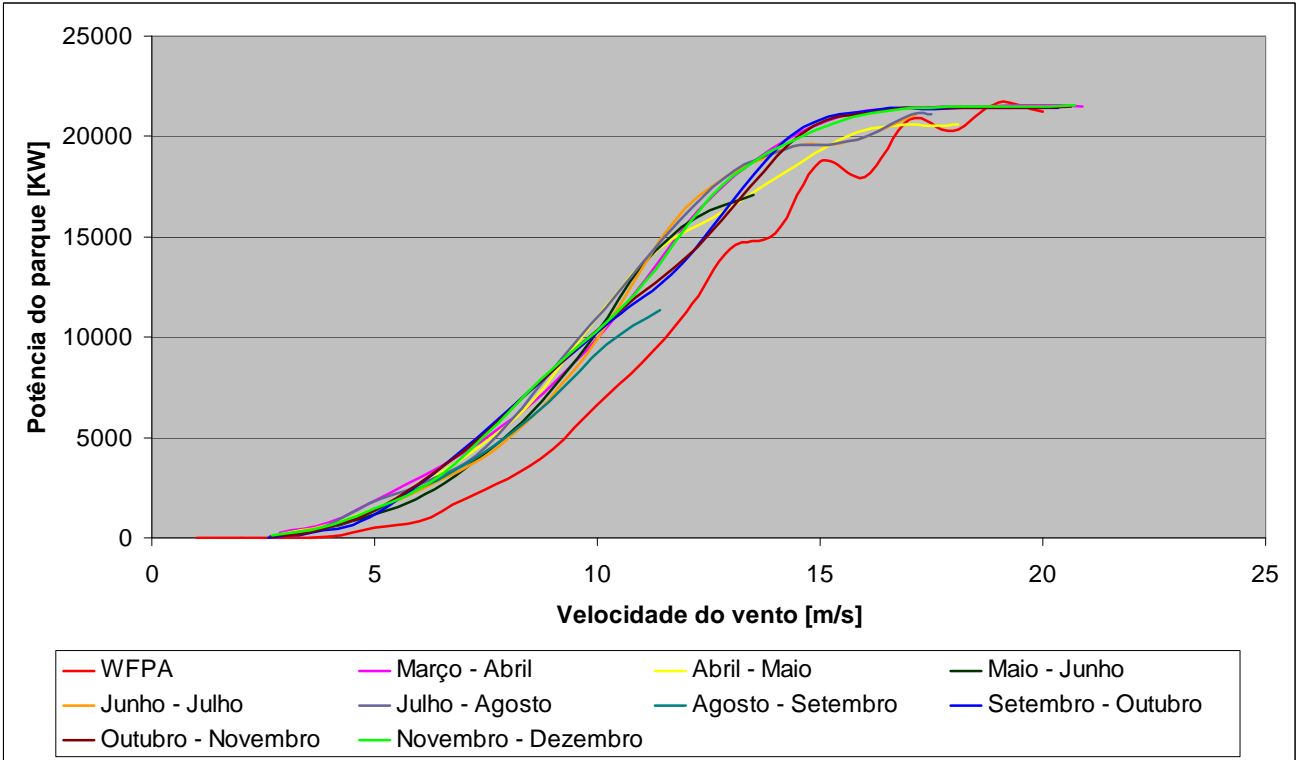


Figura 7C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 7.

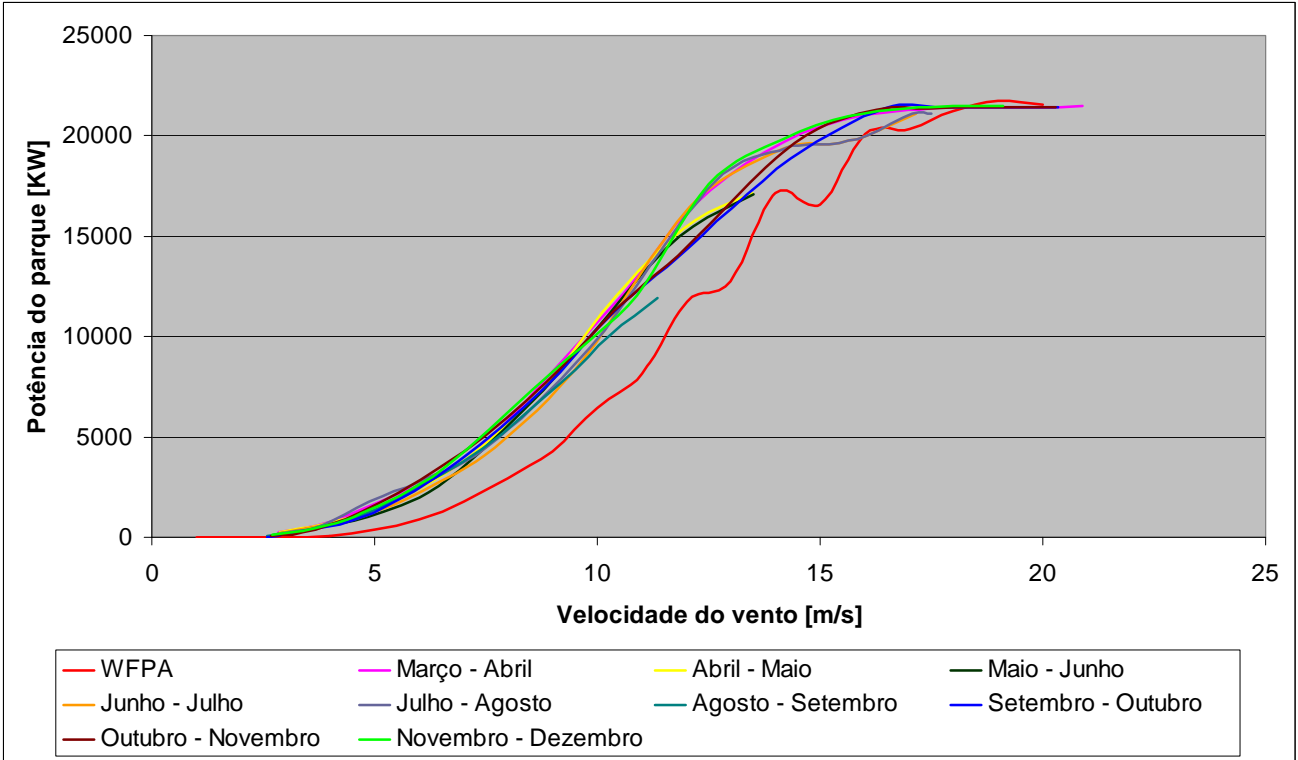


Figura 8C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 8.

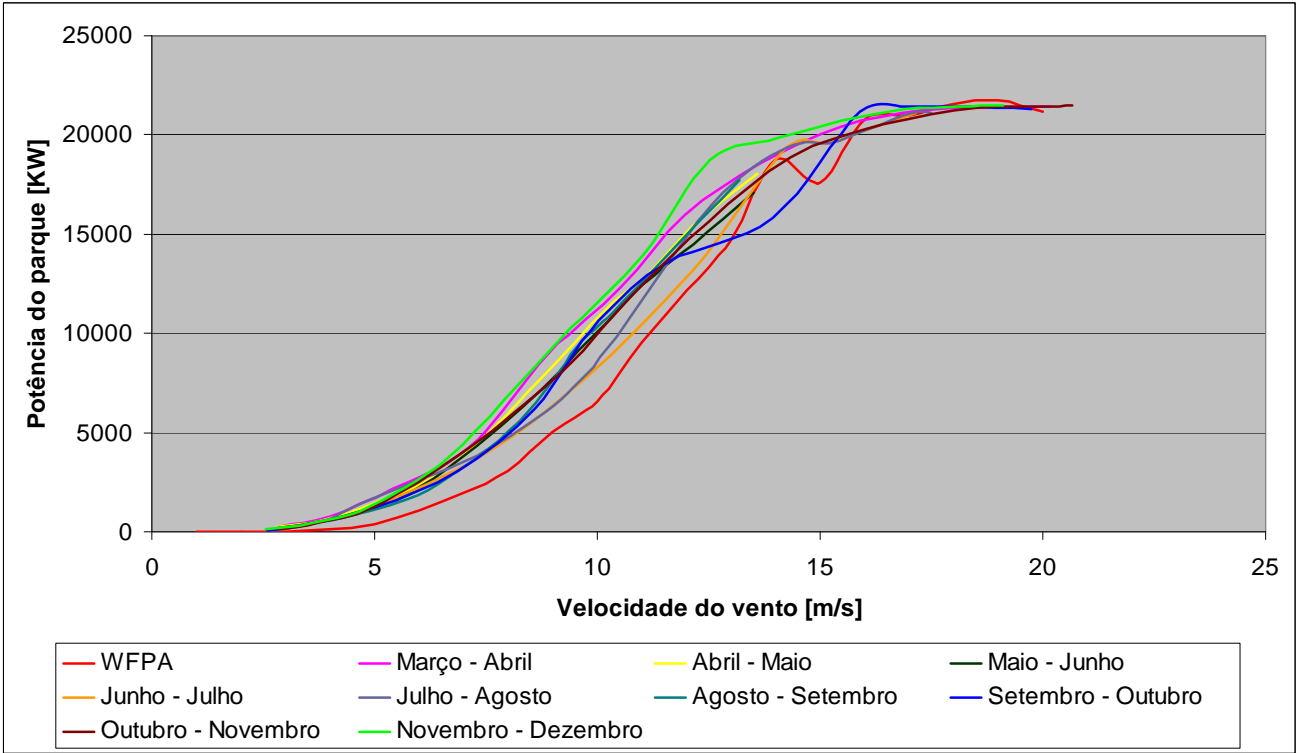


Figura 9C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 9.

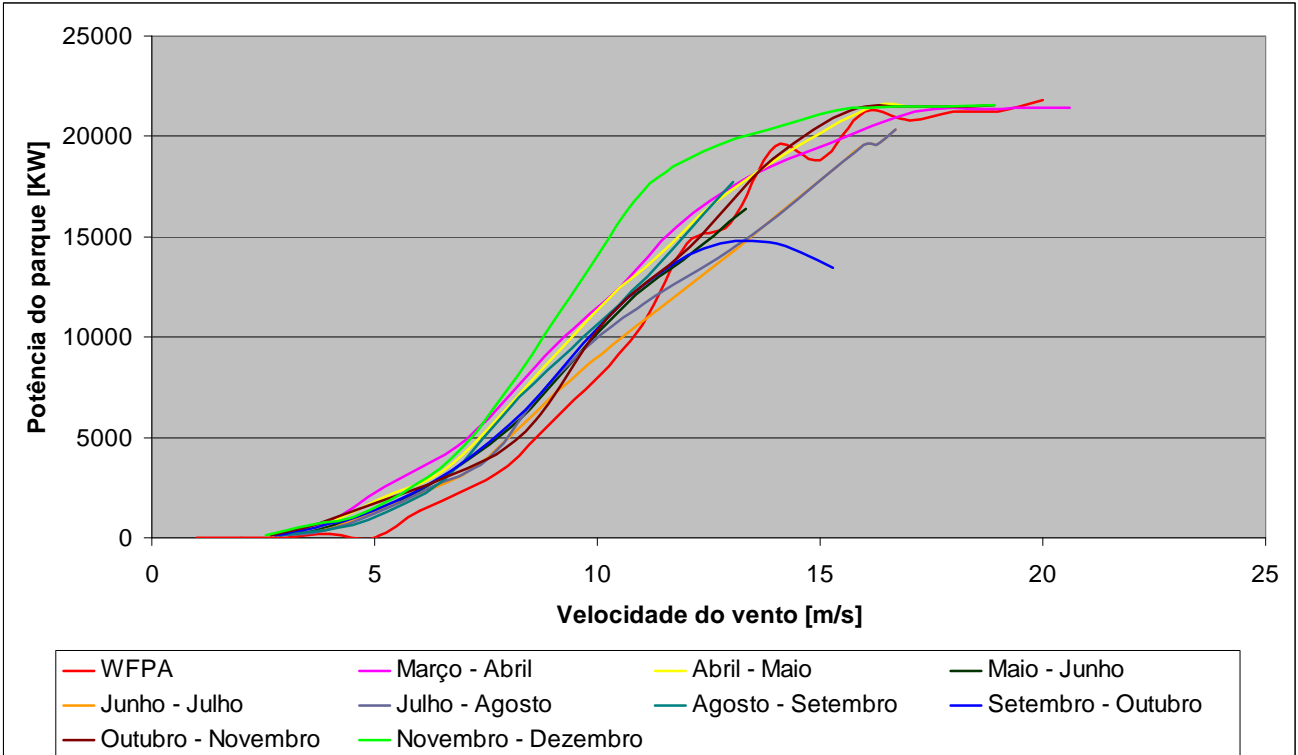


Figura 10C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 10.

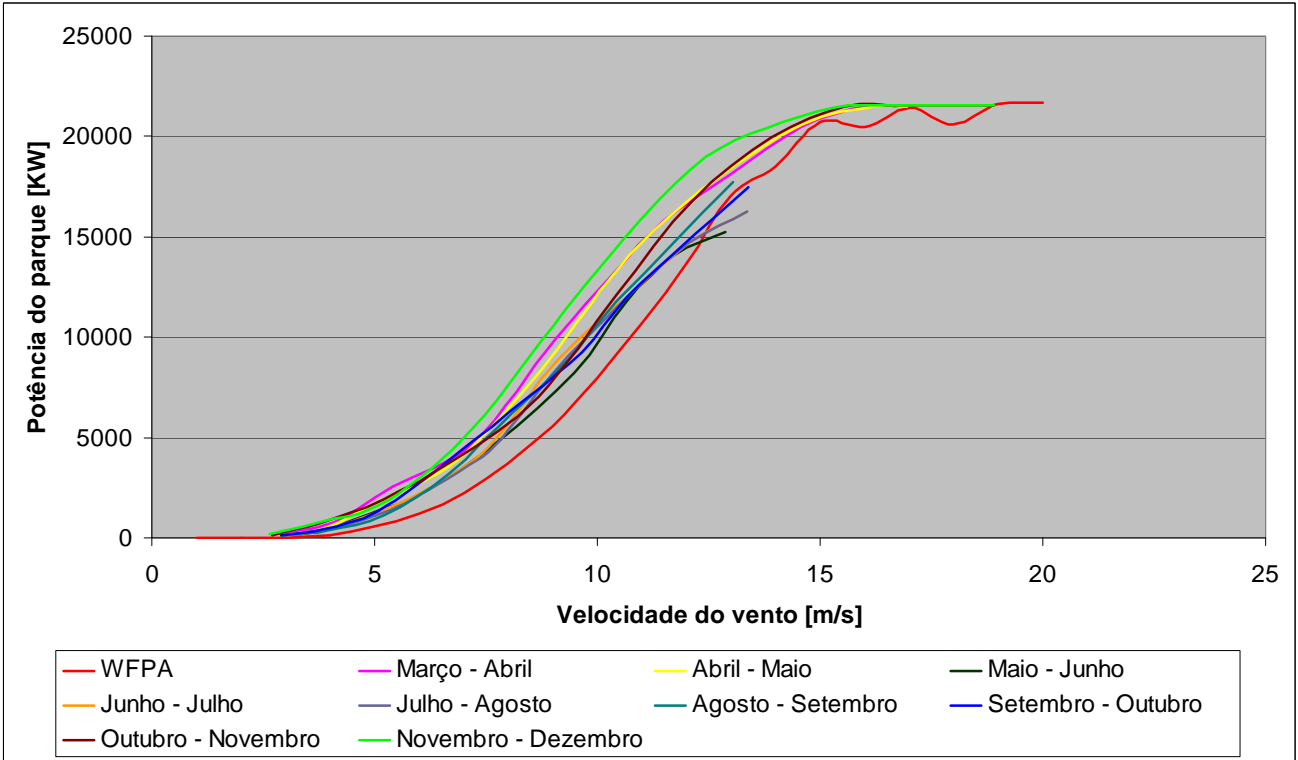


Figura 11C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 11.

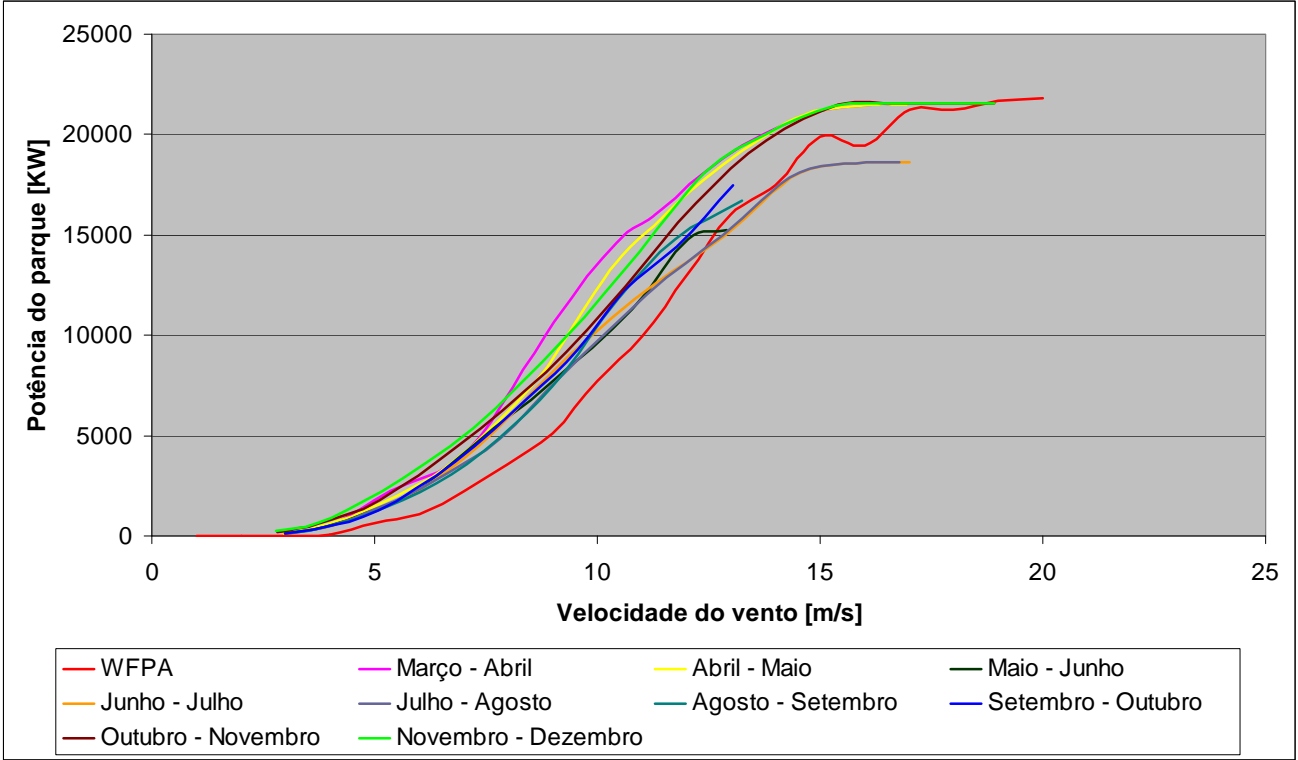


Figura 12C - Curvas de potência mensais do parque, correspondentes ao Sector 12.





## Anexo D - Capítulo 5

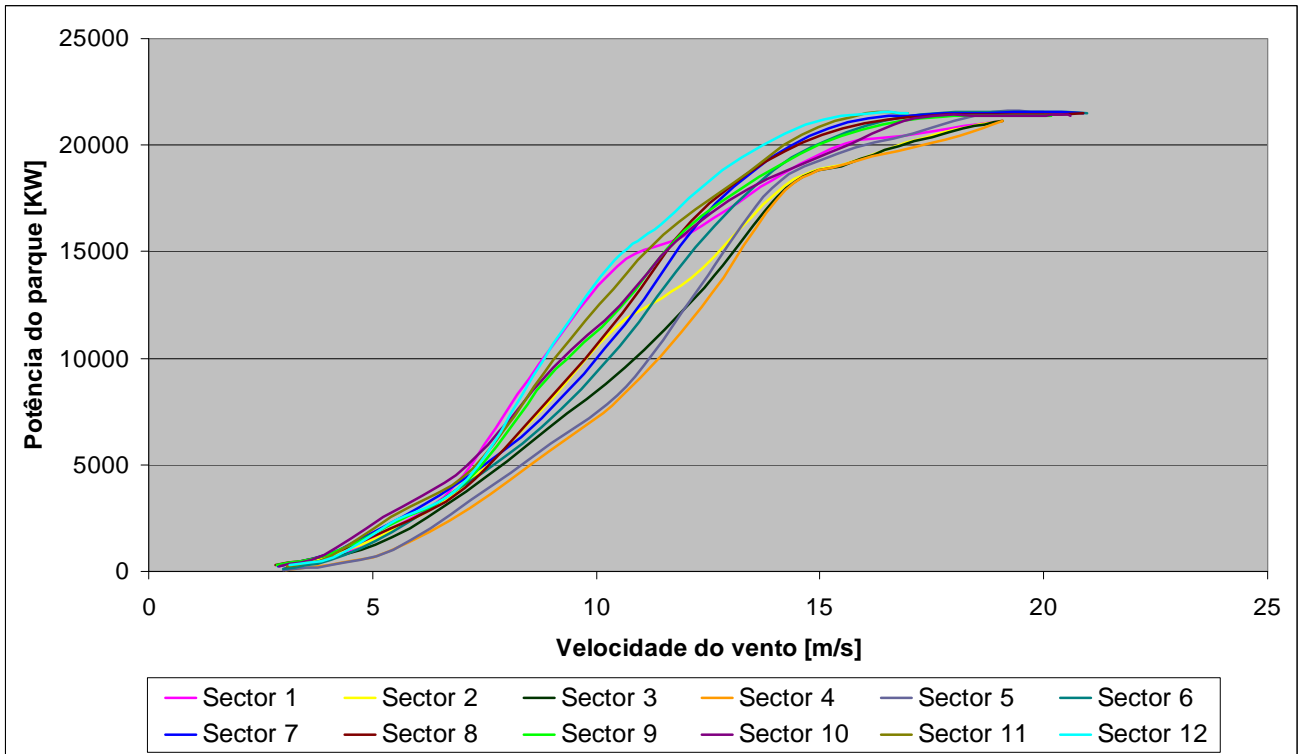


Figura 1D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Março-Abril.

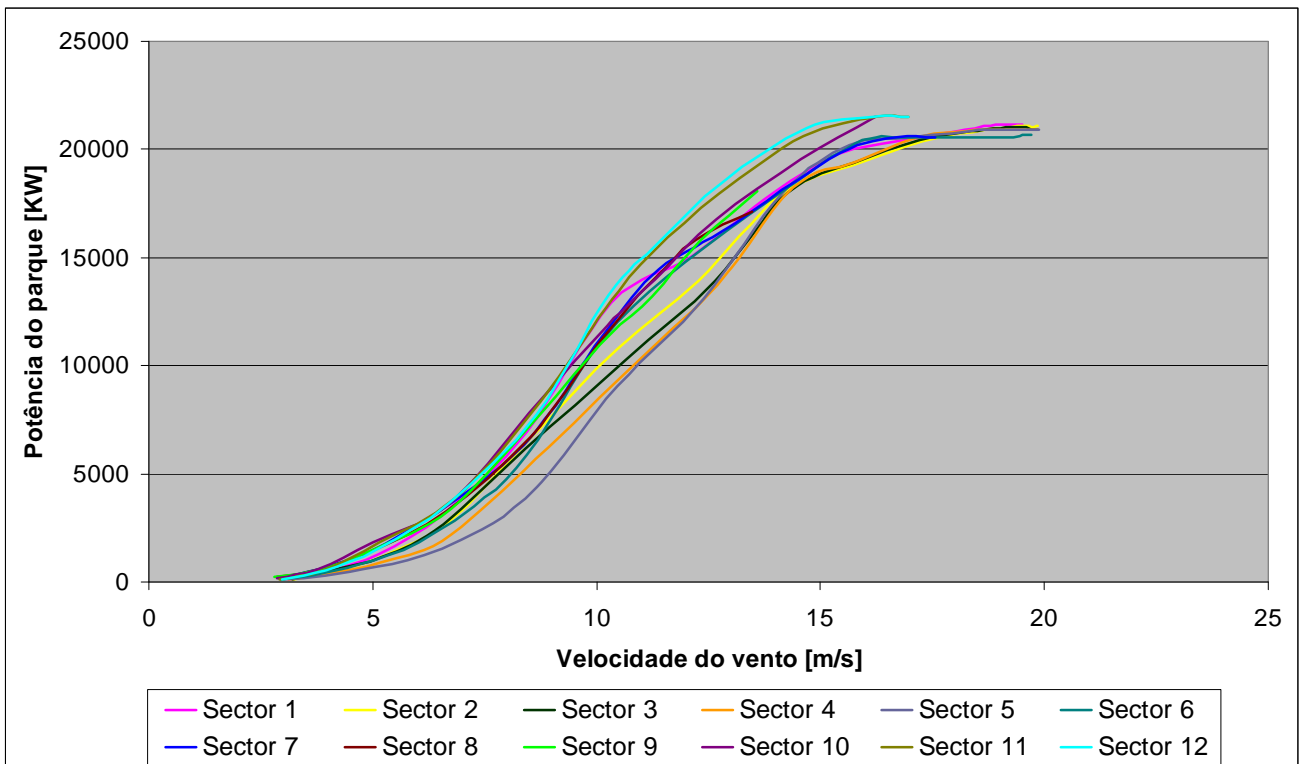


Figura 2D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Abril-Maio.

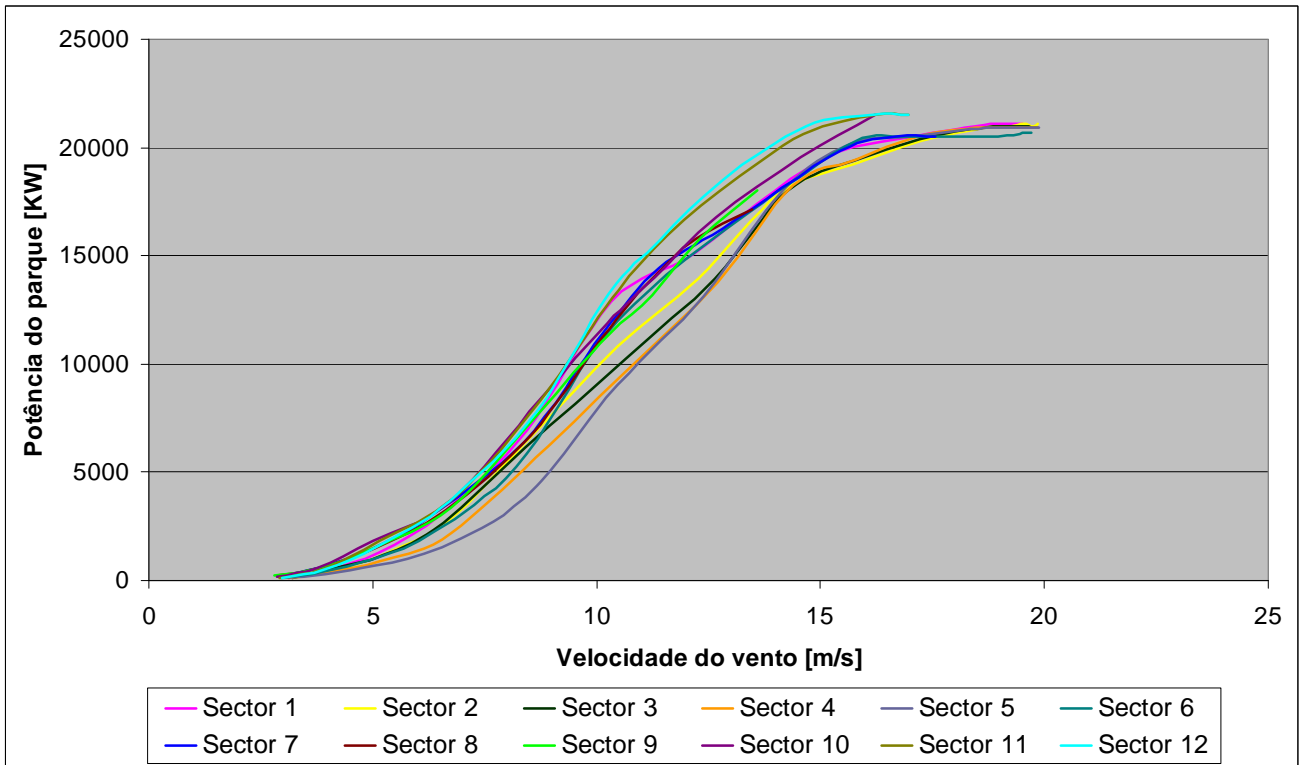


Figura 3D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Maio-Junho.

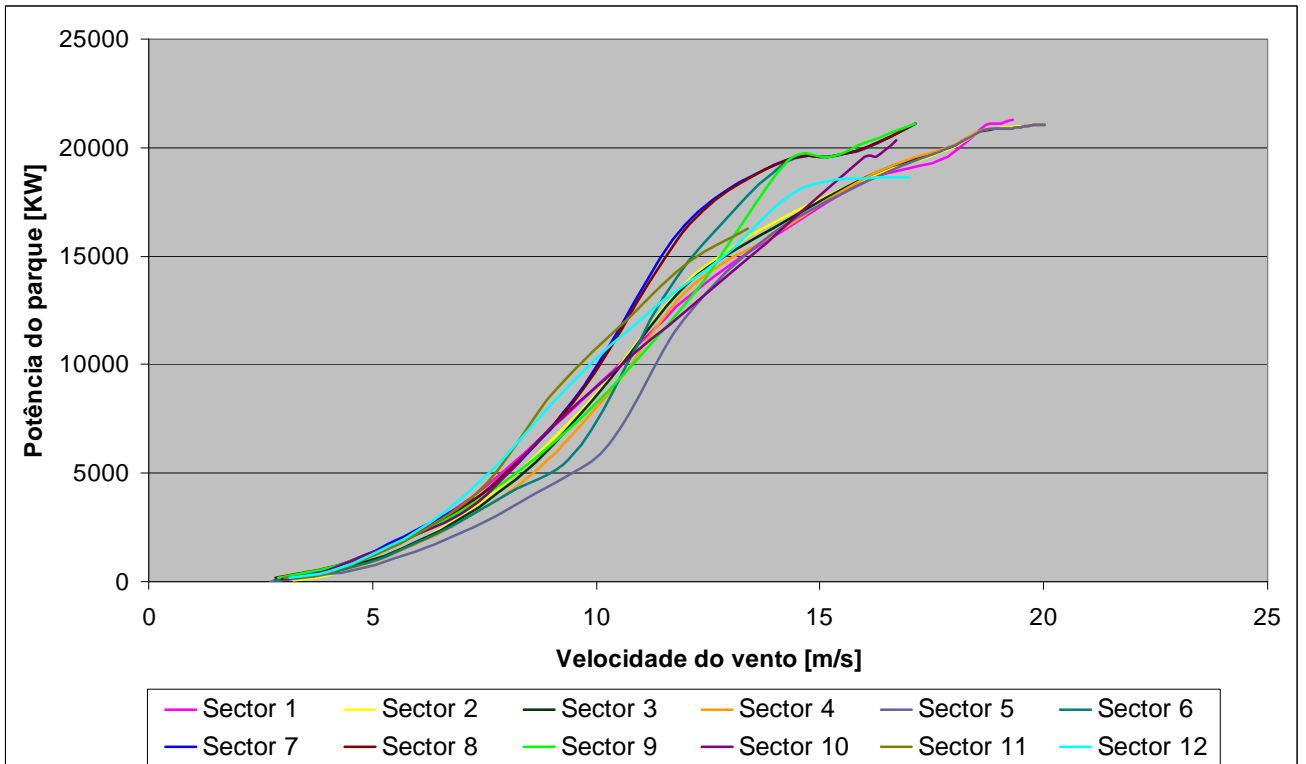


Figura 4D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Junho-Julho.

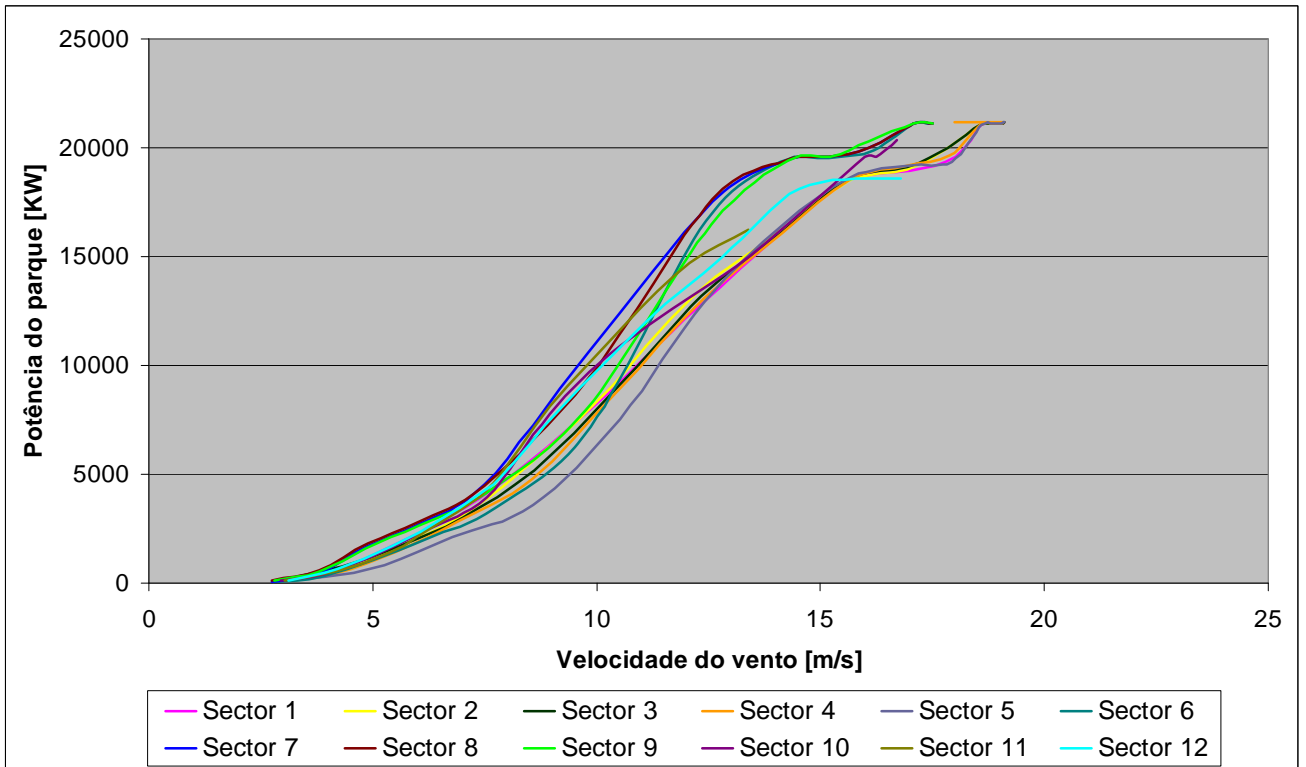


Figura 5D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Julho-Agosto.

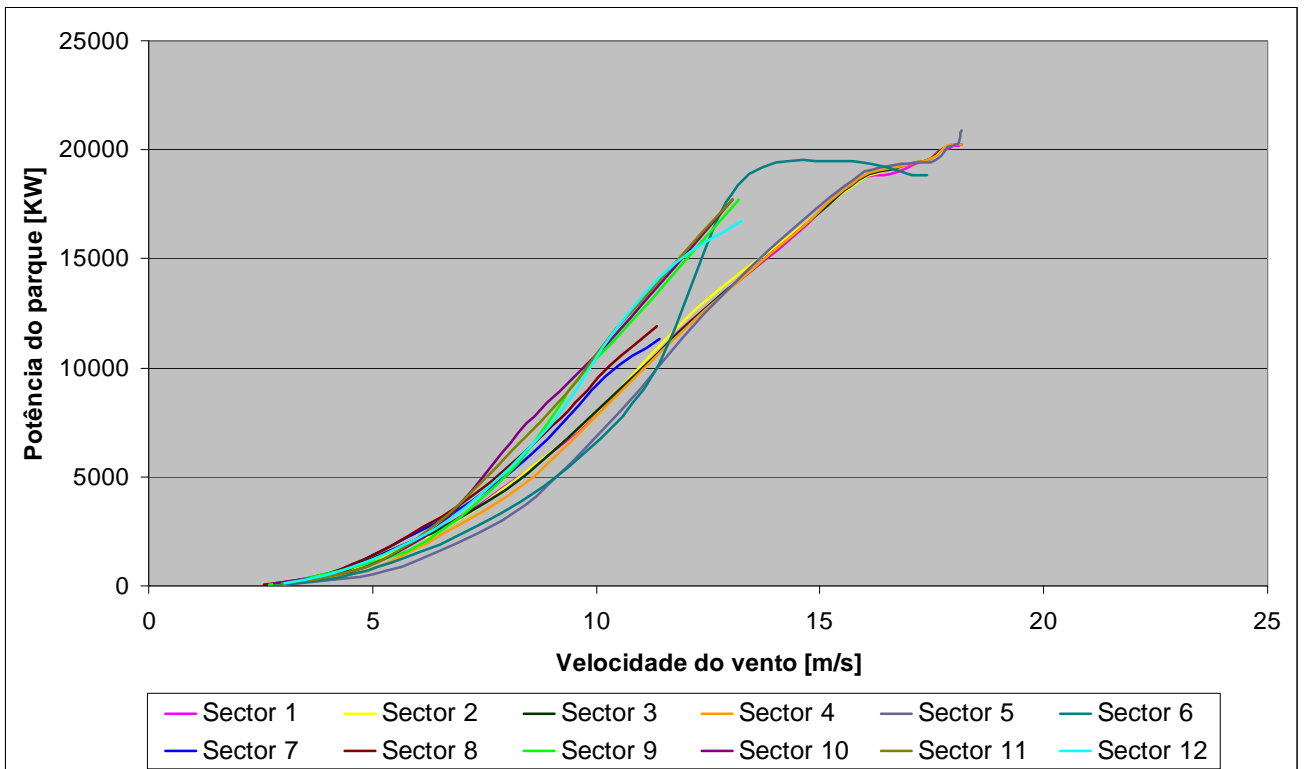


Figura 6D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Agosto-Setembro.

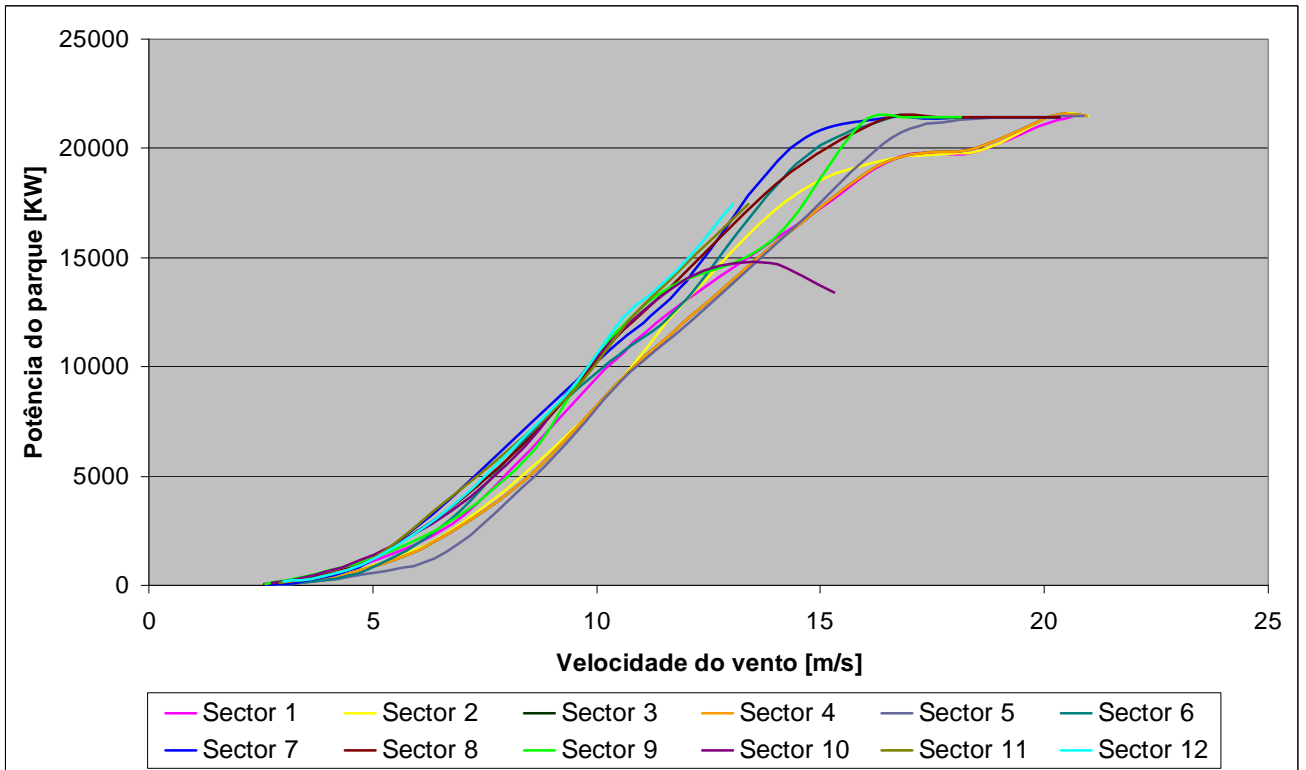


Figura 7D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Setembro-Outubro.

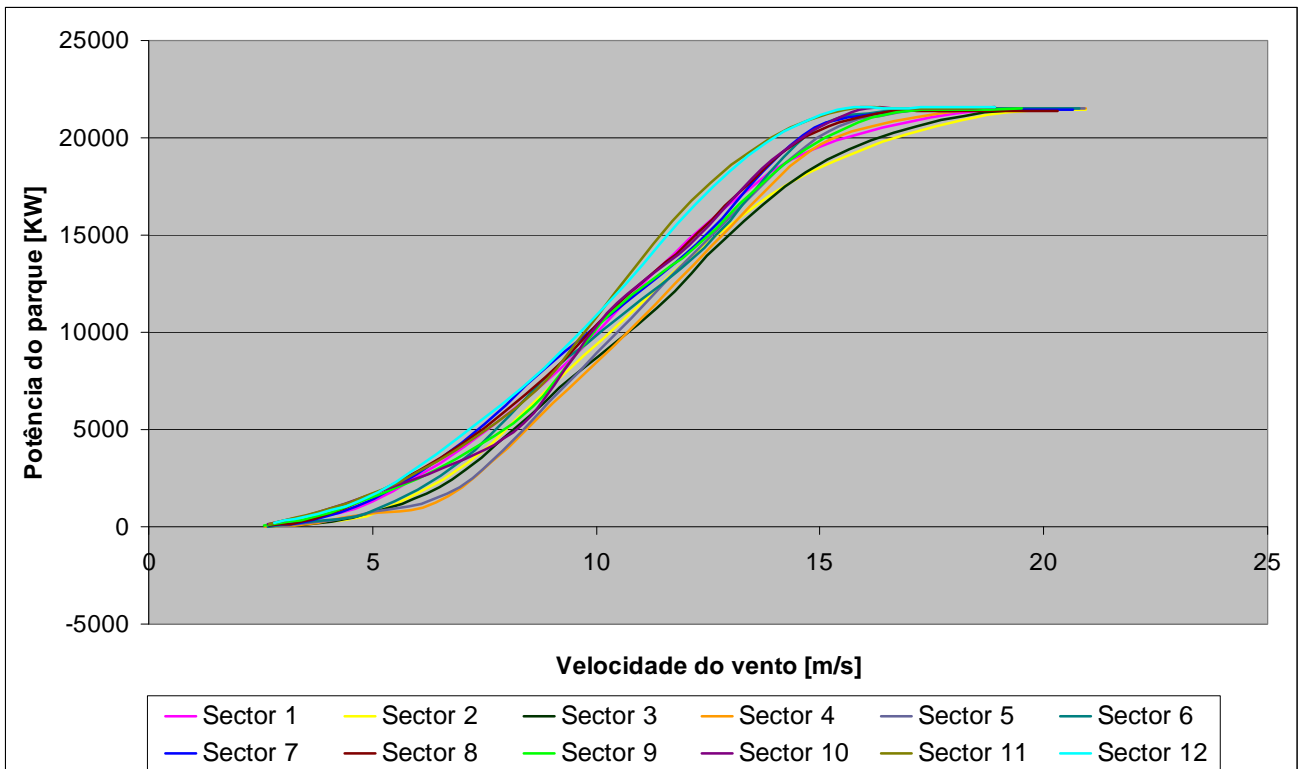


Figura 8D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Outubro-Novembro.

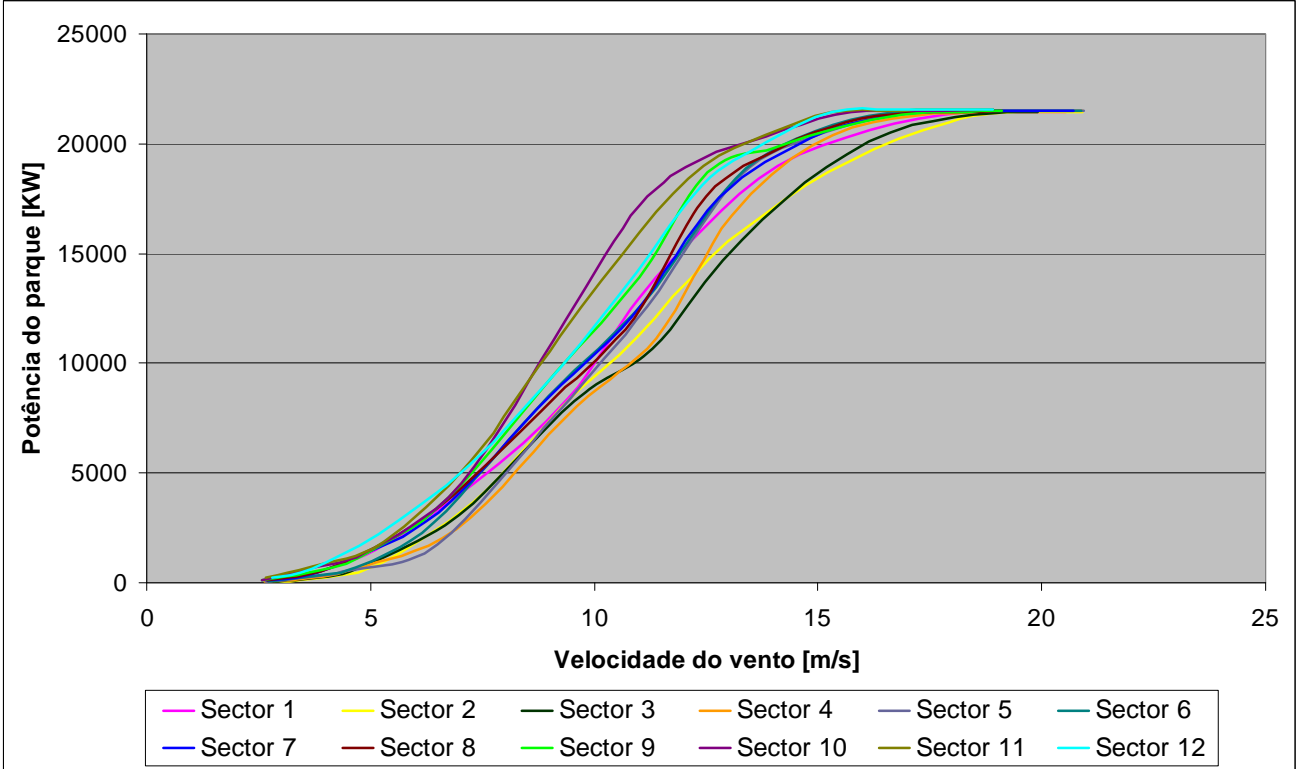


Figura 9D - Curvas de potência por sector, correspondentes aos meses de Novembro-Dezembro.

## Anexo E - Capítulo 6

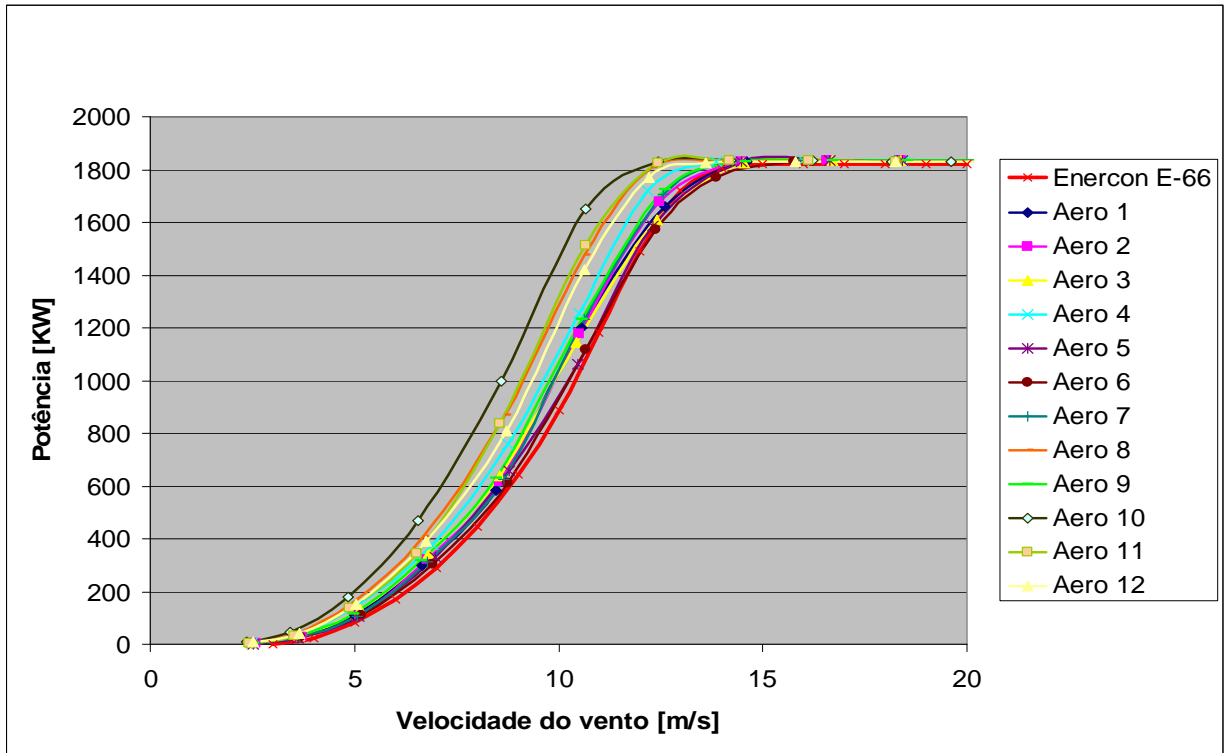


Figura 1E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Janeiro-Fevereiro.

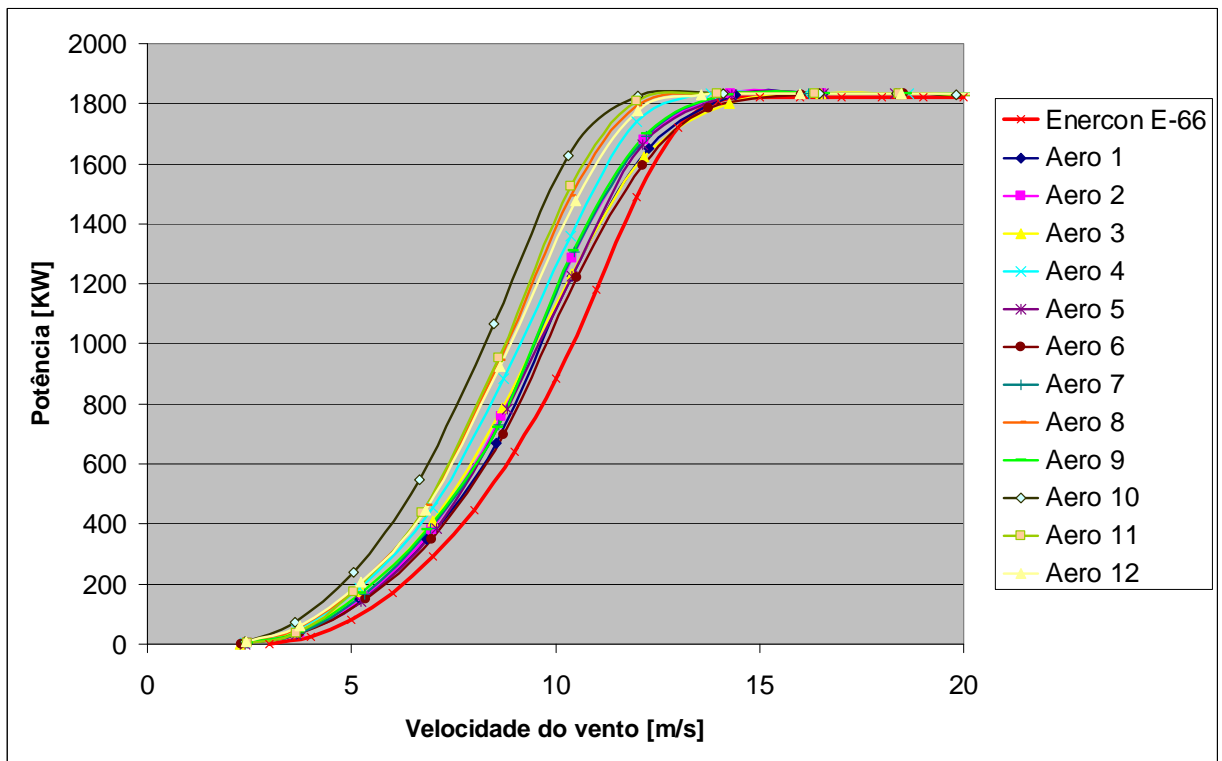


Figura 2E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Fevereiro-Março.



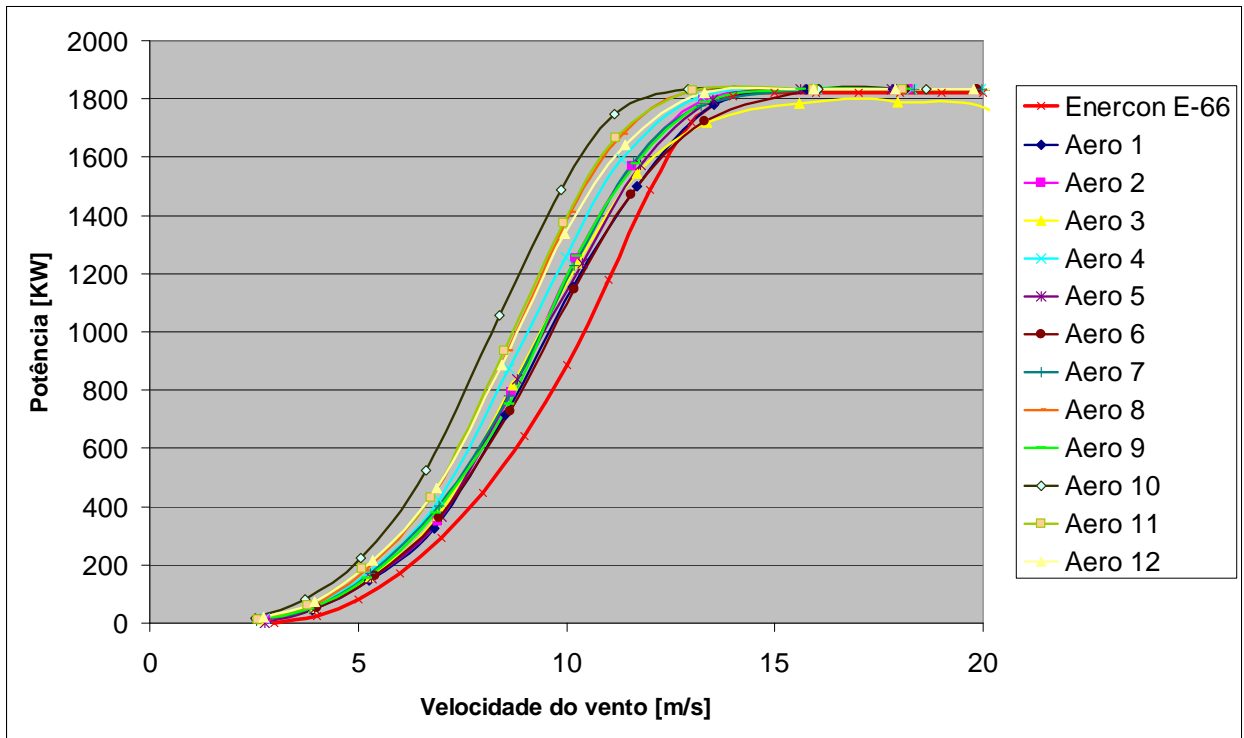


Figura 3E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Março-Abril.

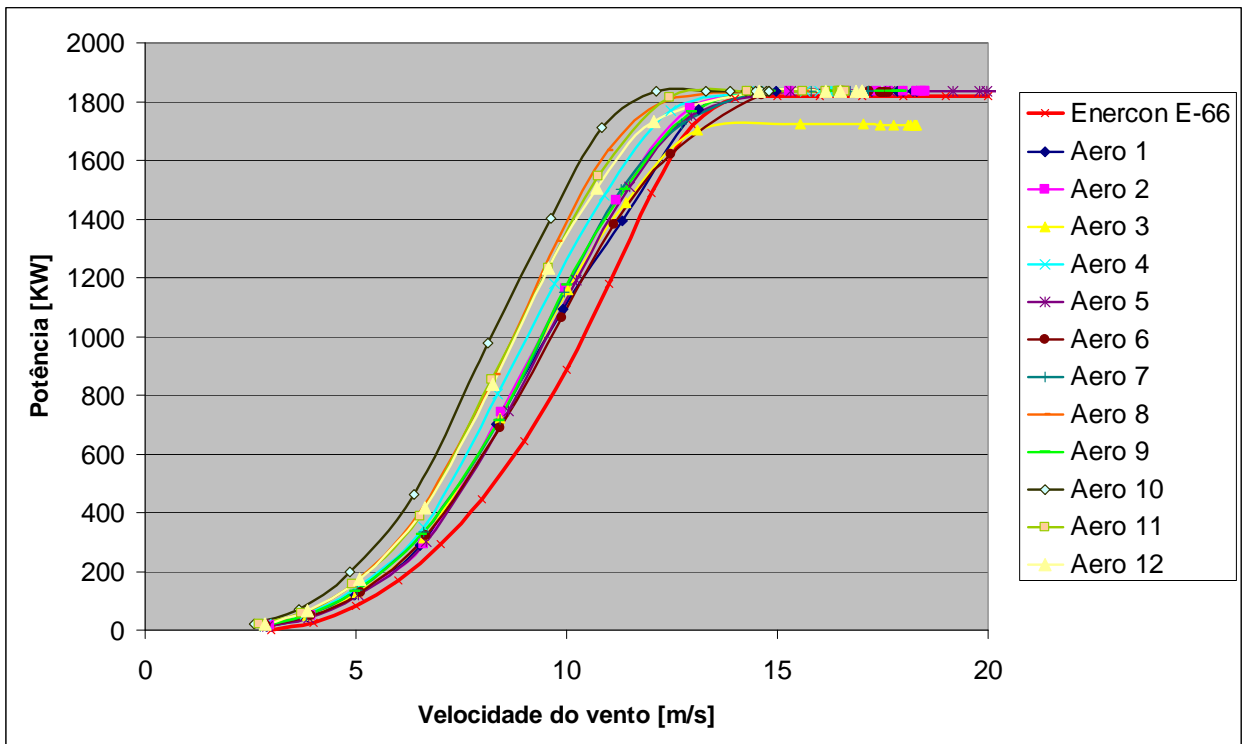


Figura 4E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Abril-Maio.

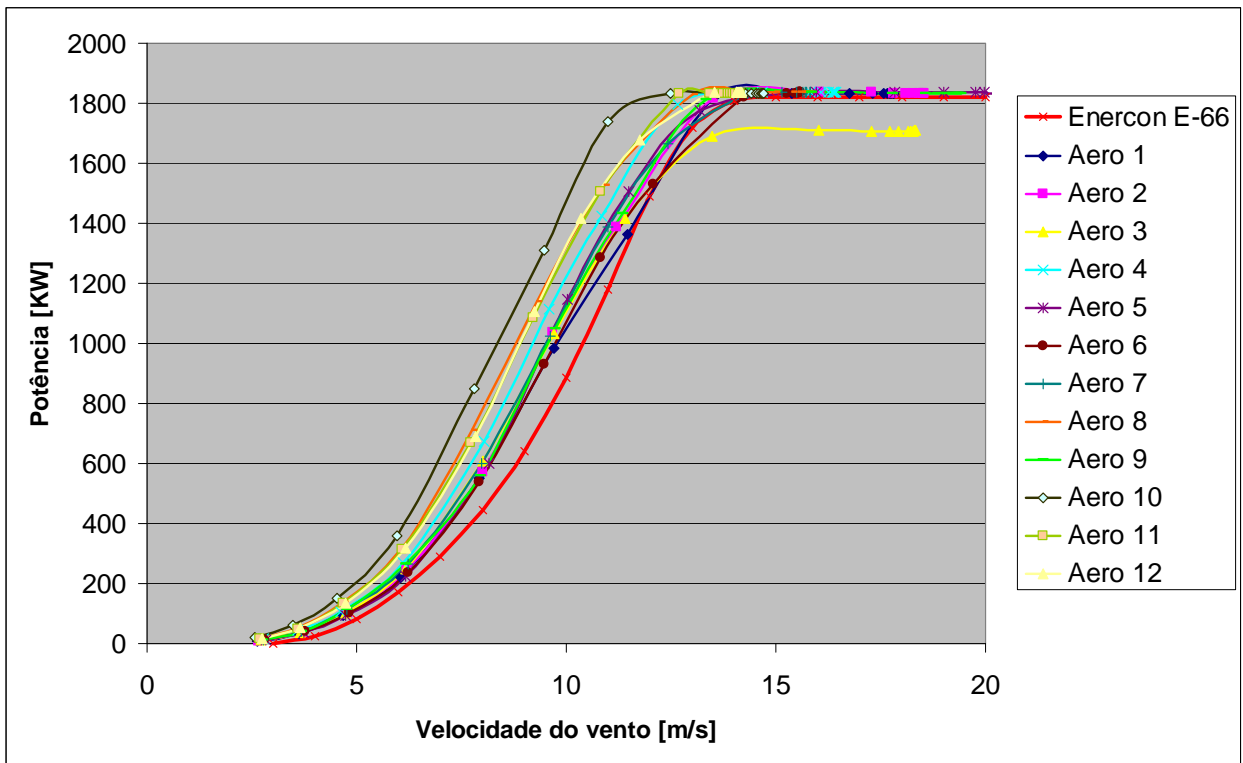


Figura 5E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Maio-Junho.

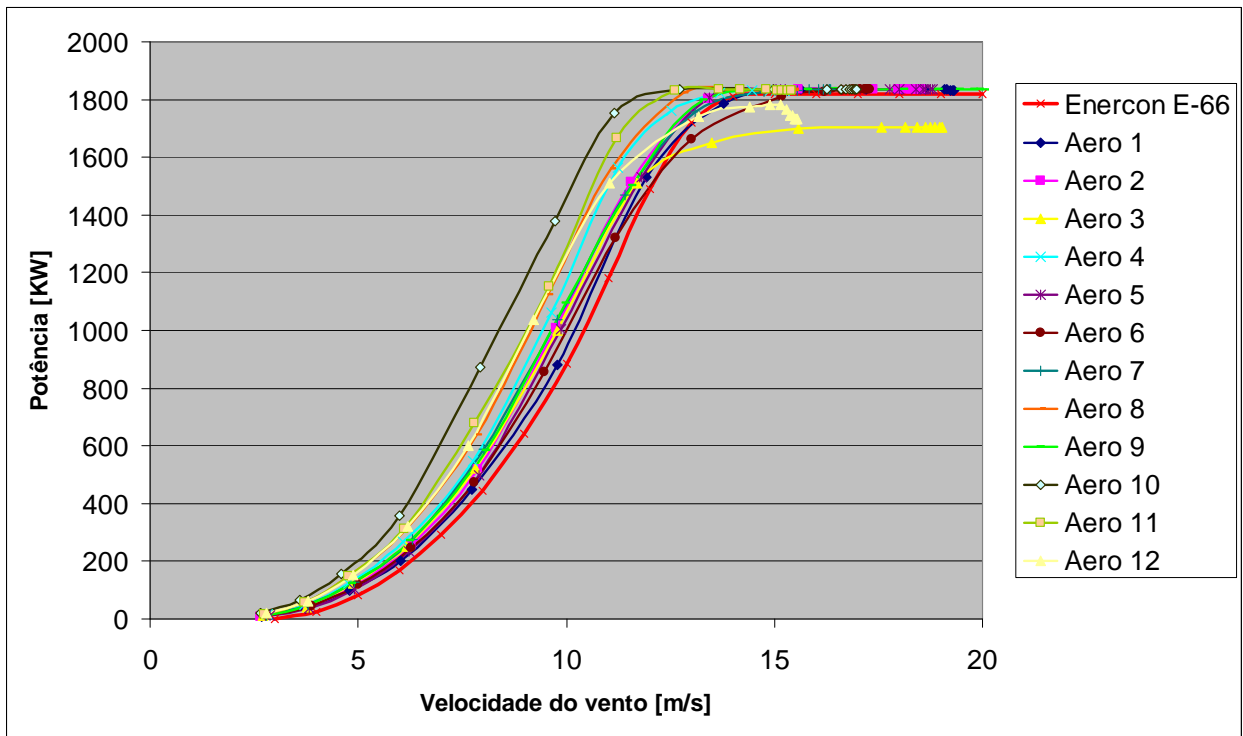


Figura 6E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Junho-Julho.

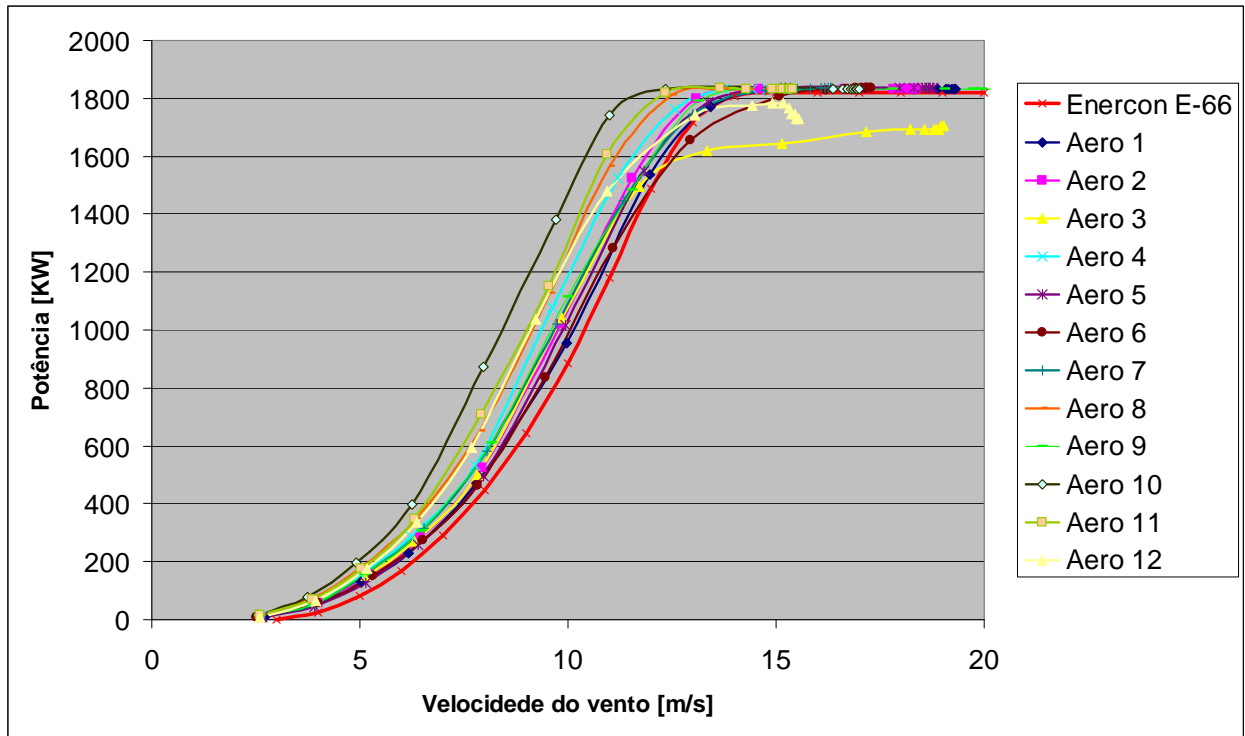


Figura 7E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Julho-Agosto.

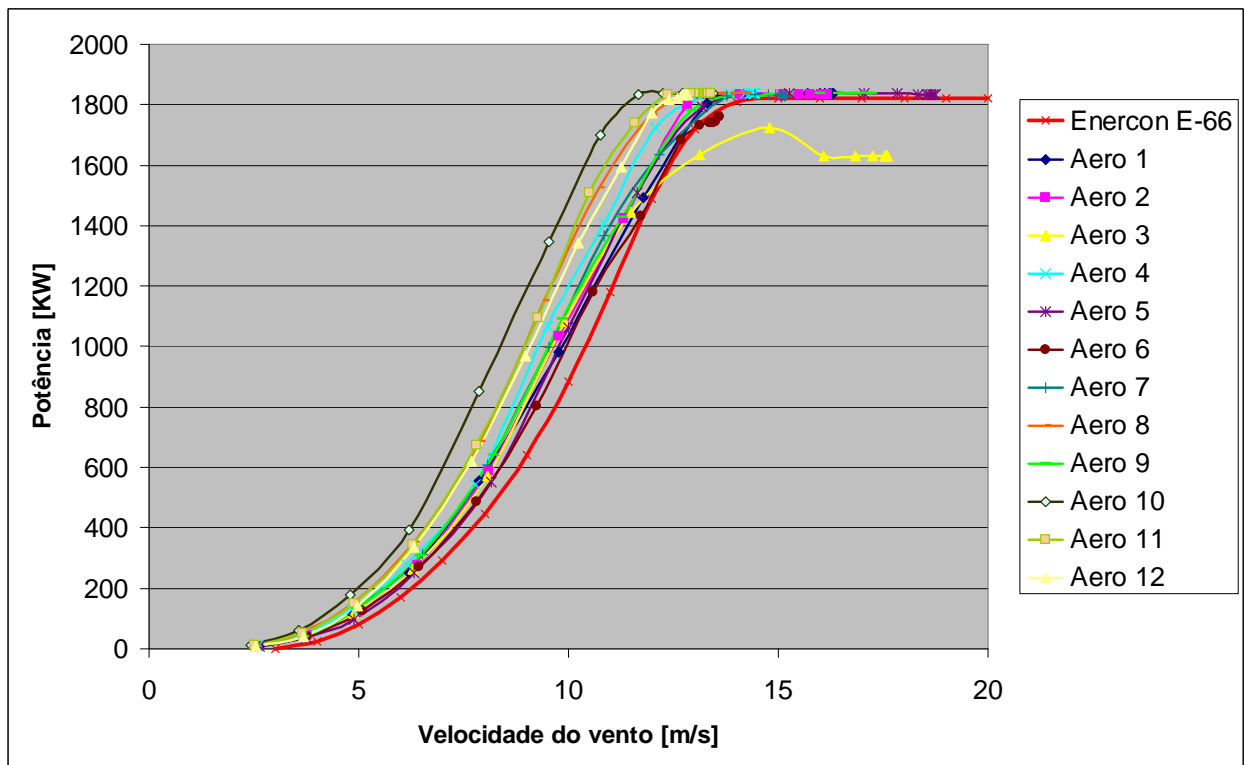


Figura 8D - Curvas de potência correspondentes aos meses de Agosto-Setembro.

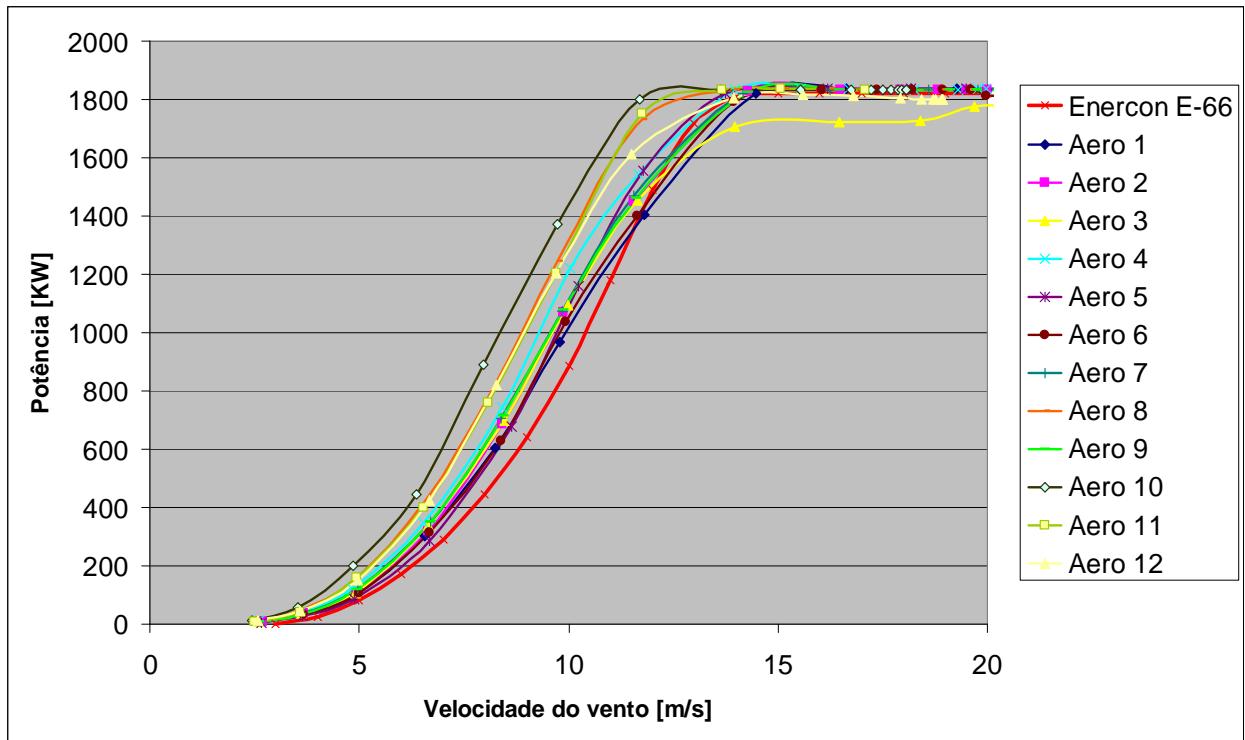


Figura 9E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Setembro-Outubro.

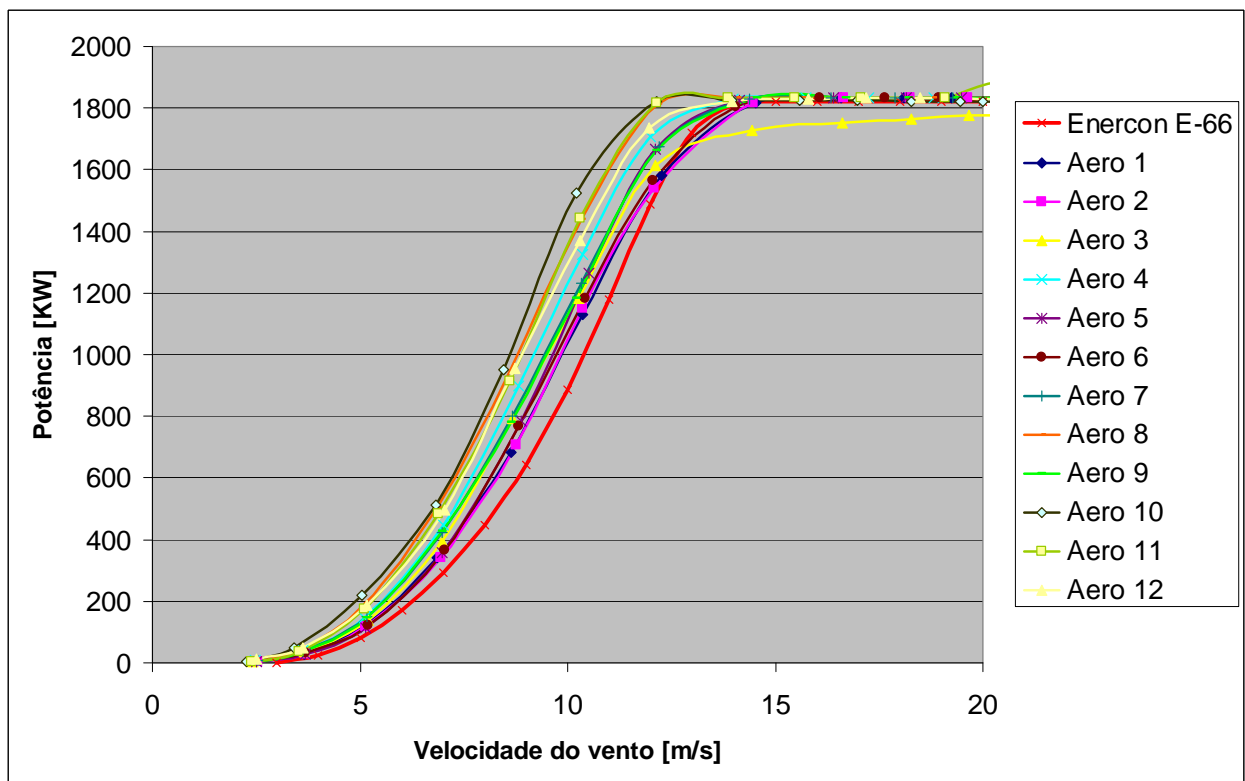


Figura 10E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Outubro-Novembro.

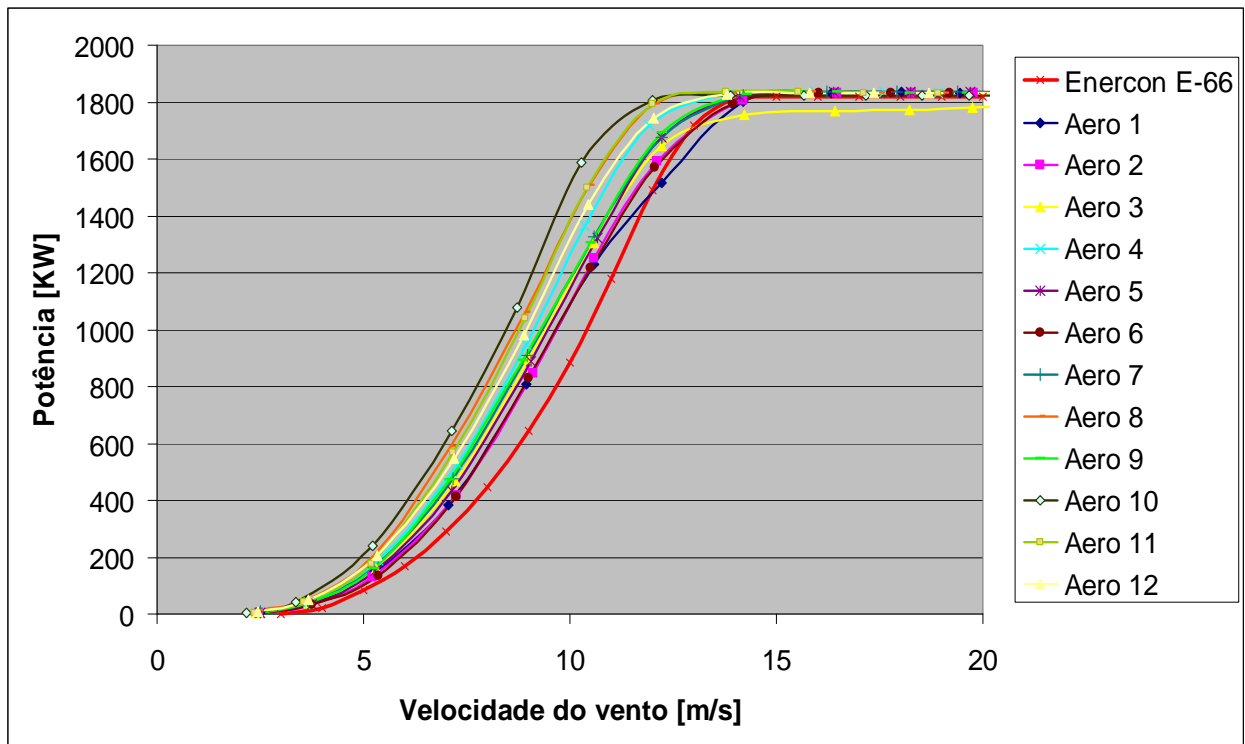


Figura 11E - Curvas de potência correspondentes aos meses de Novembro-Dezembro.



## Anexo F - Capítulo 7

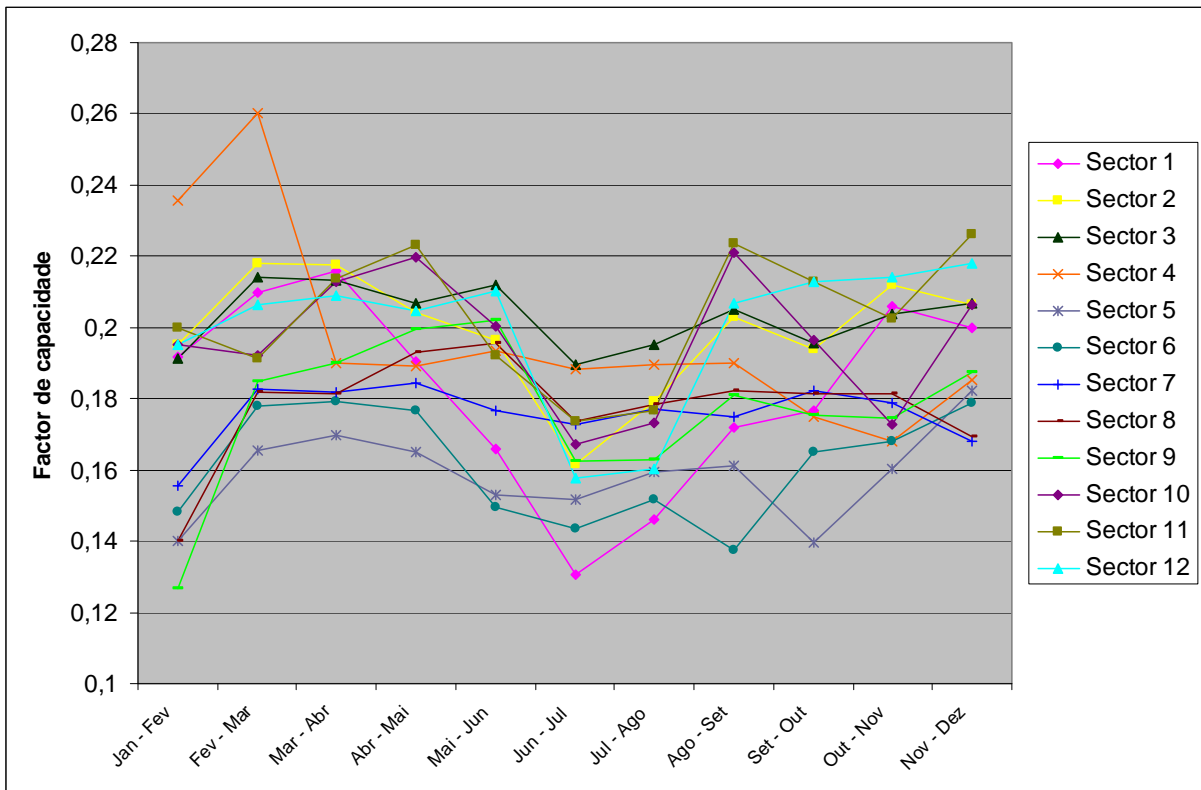


Figura 1F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 1.

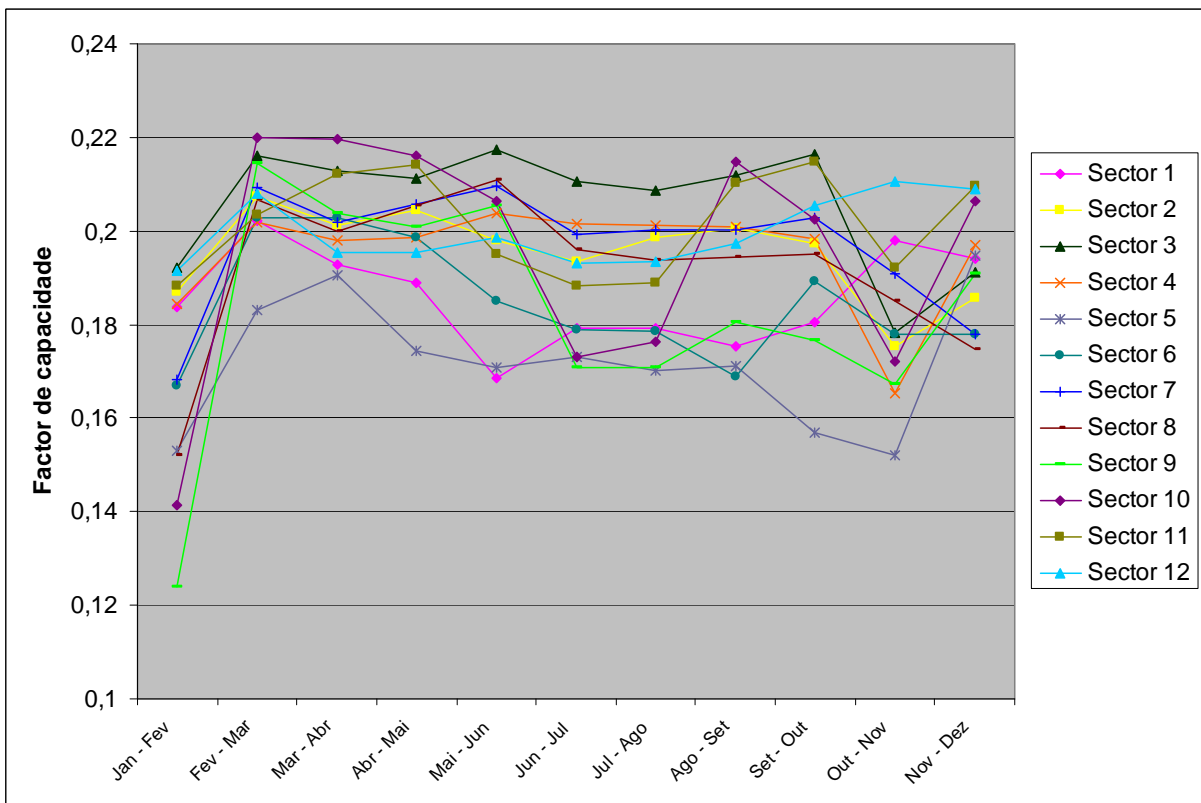


Figura 2F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 2.



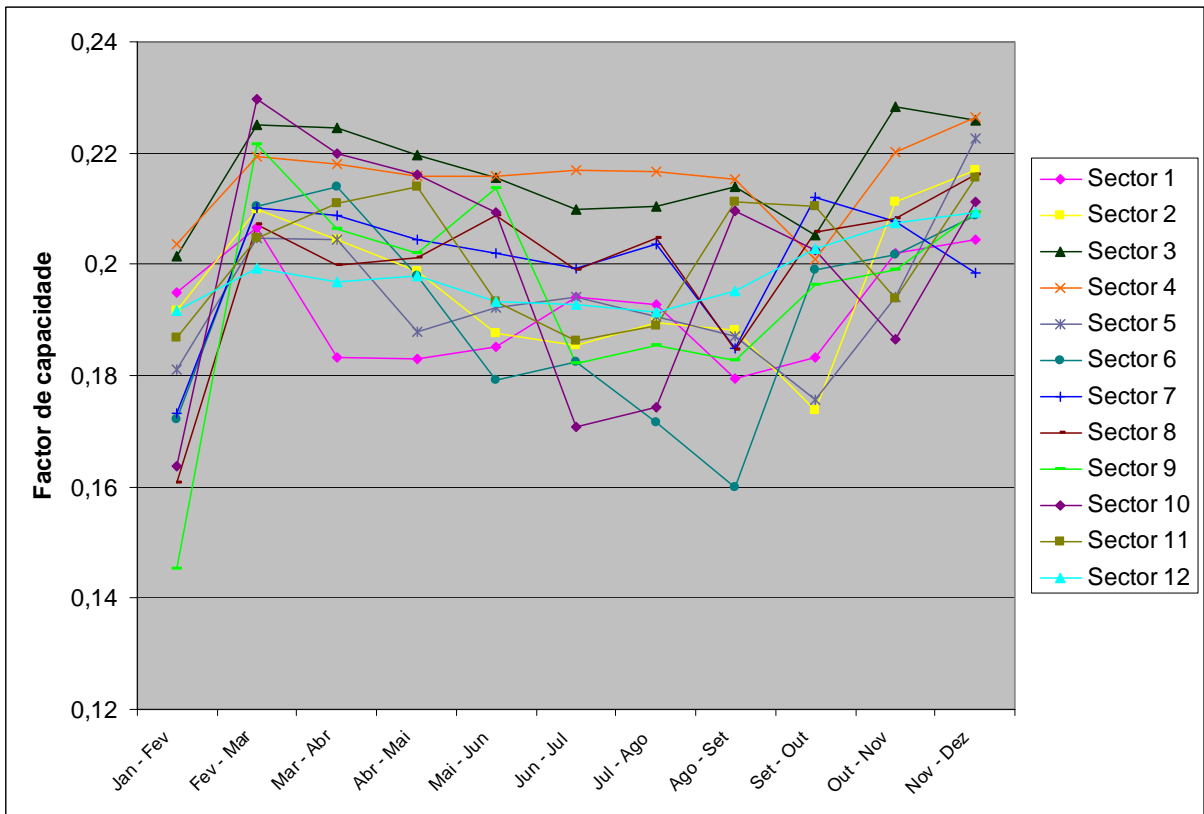


Figura 3F - Evolução do factor de capacidade do aerogenerador 3.

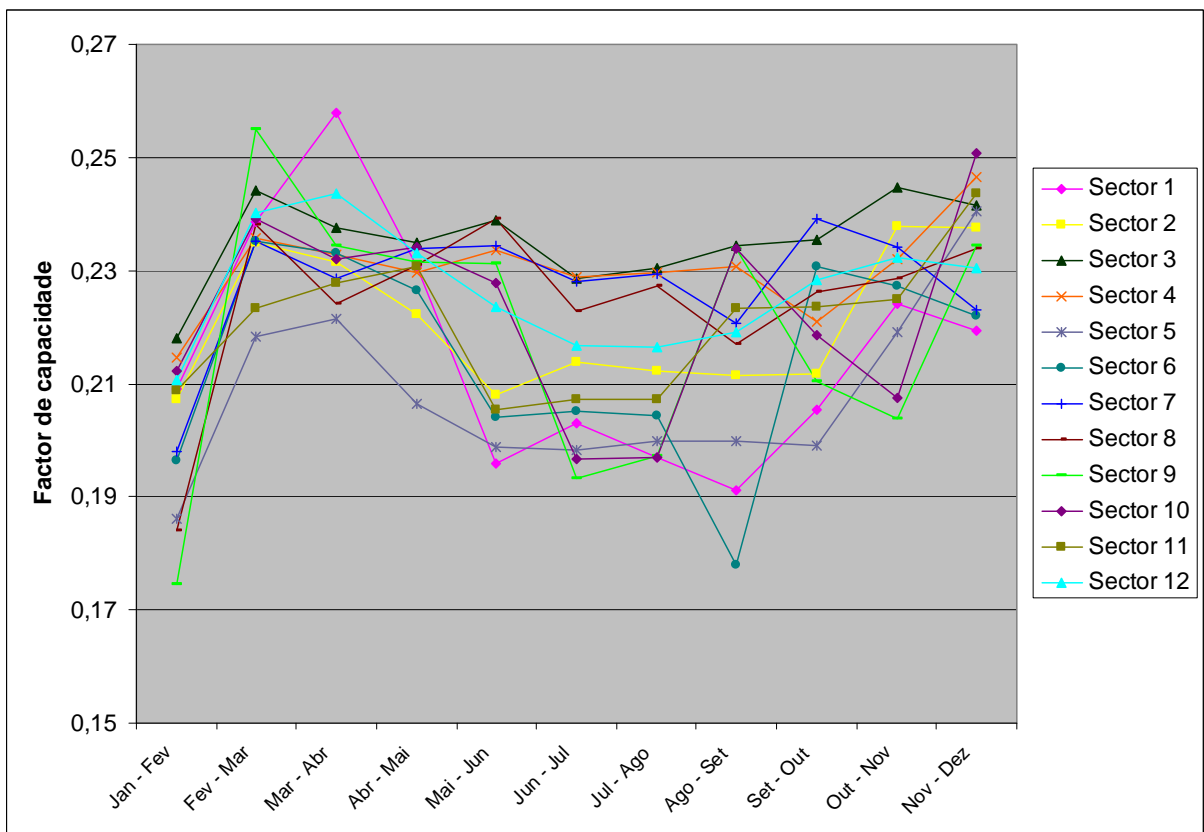


Figura 4F - Evolução do factor de capacidade do aerogenerador 4.

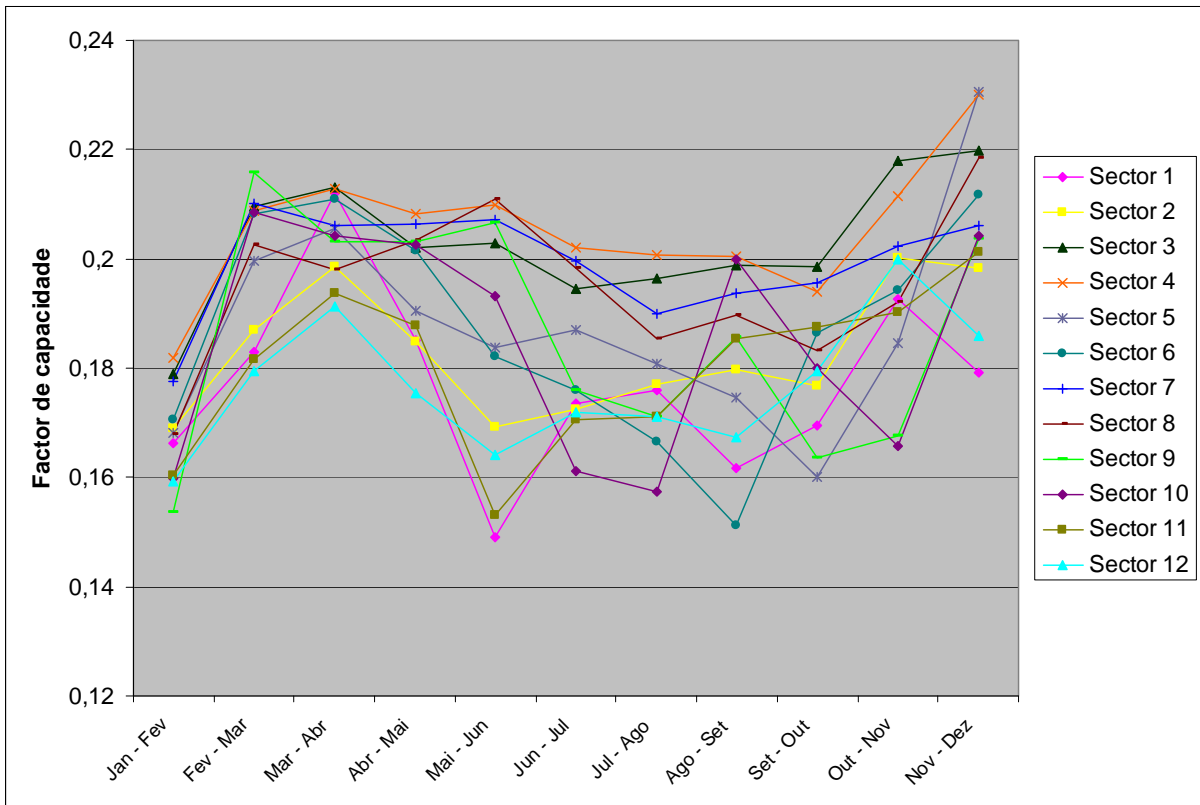


Figura 5F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 5.

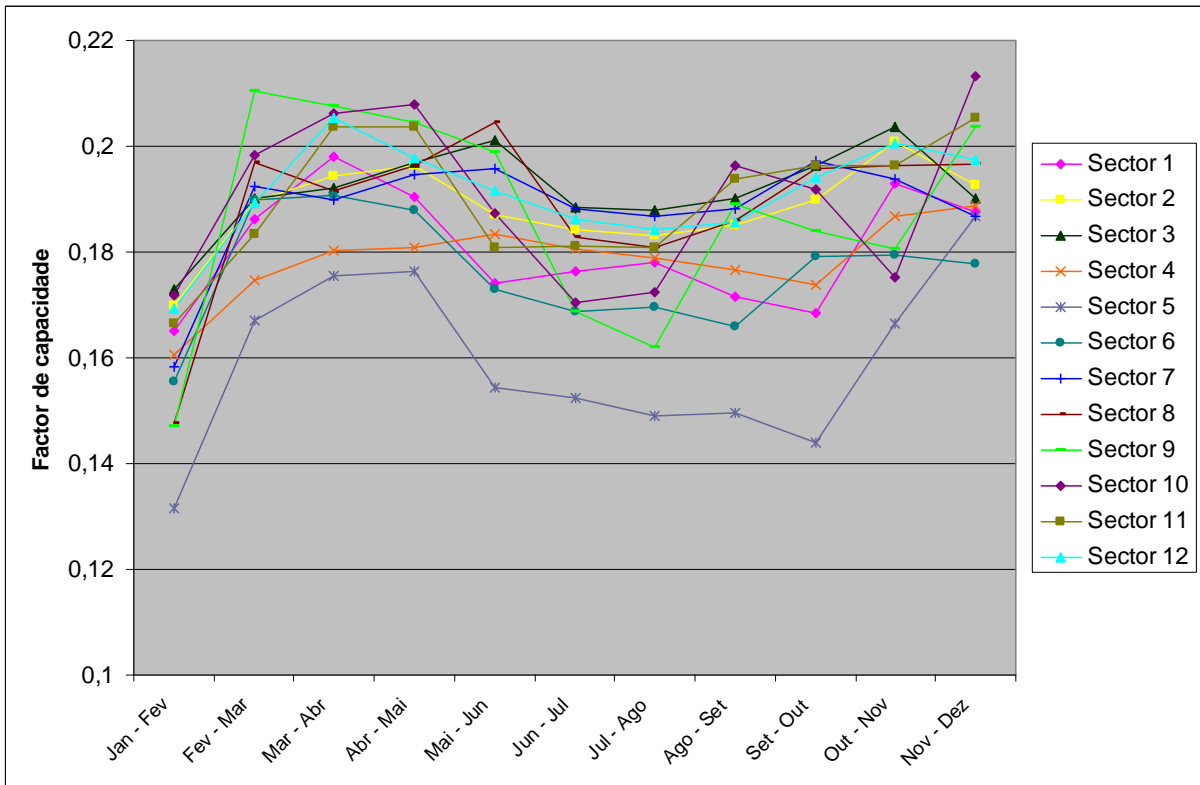


Figura 6F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 6.

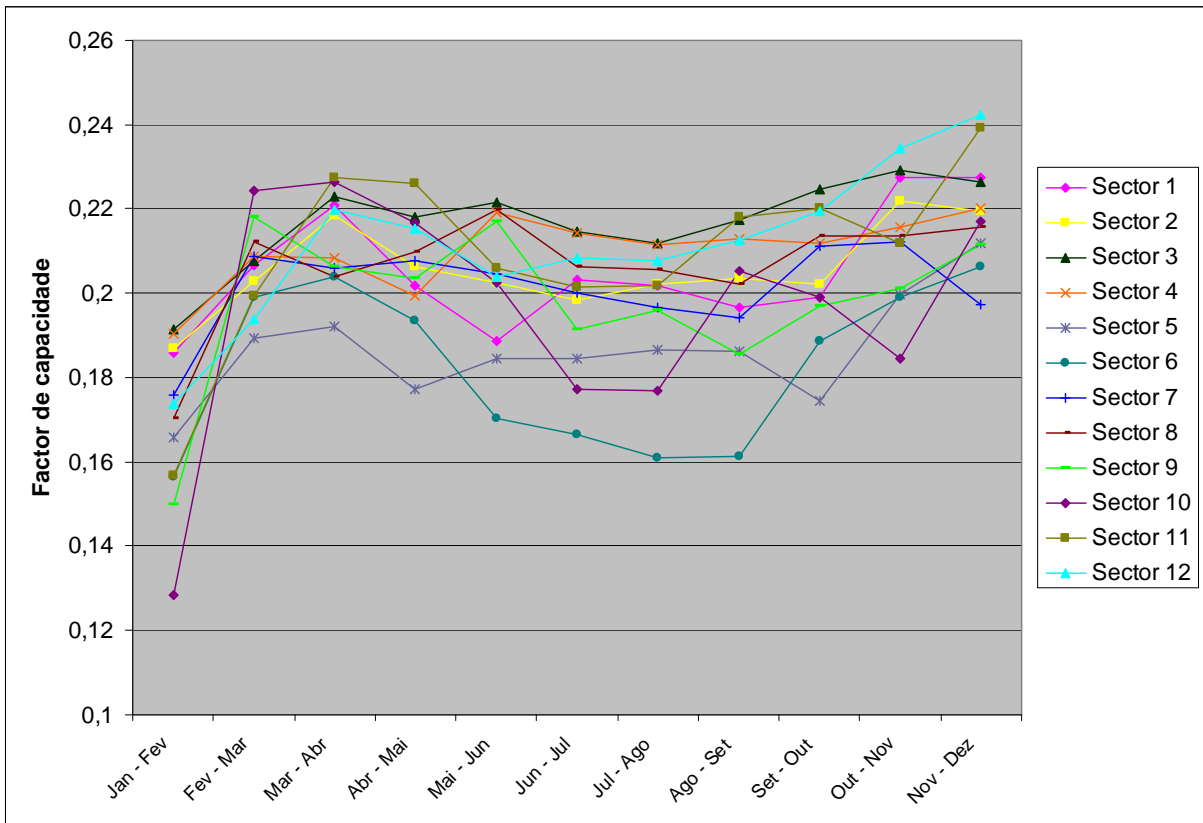


Figura 7F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 7.

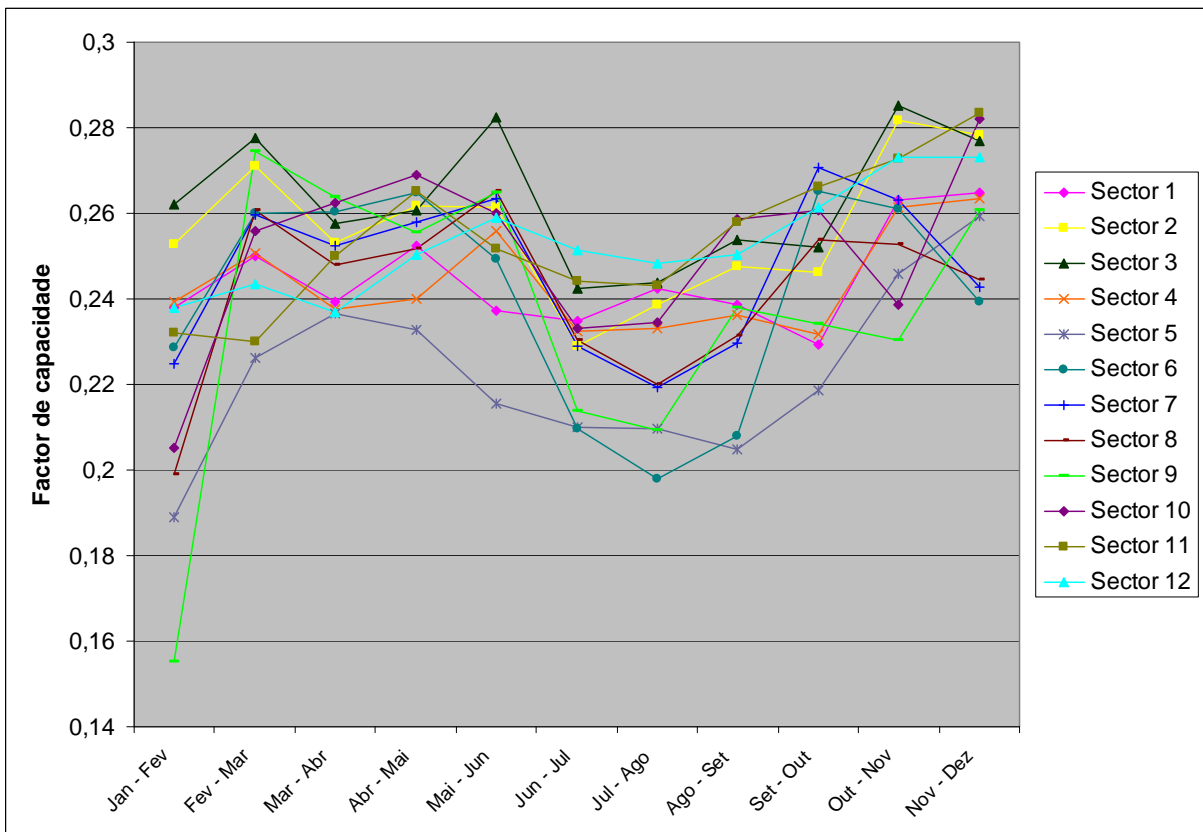


Figura 8F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 8.

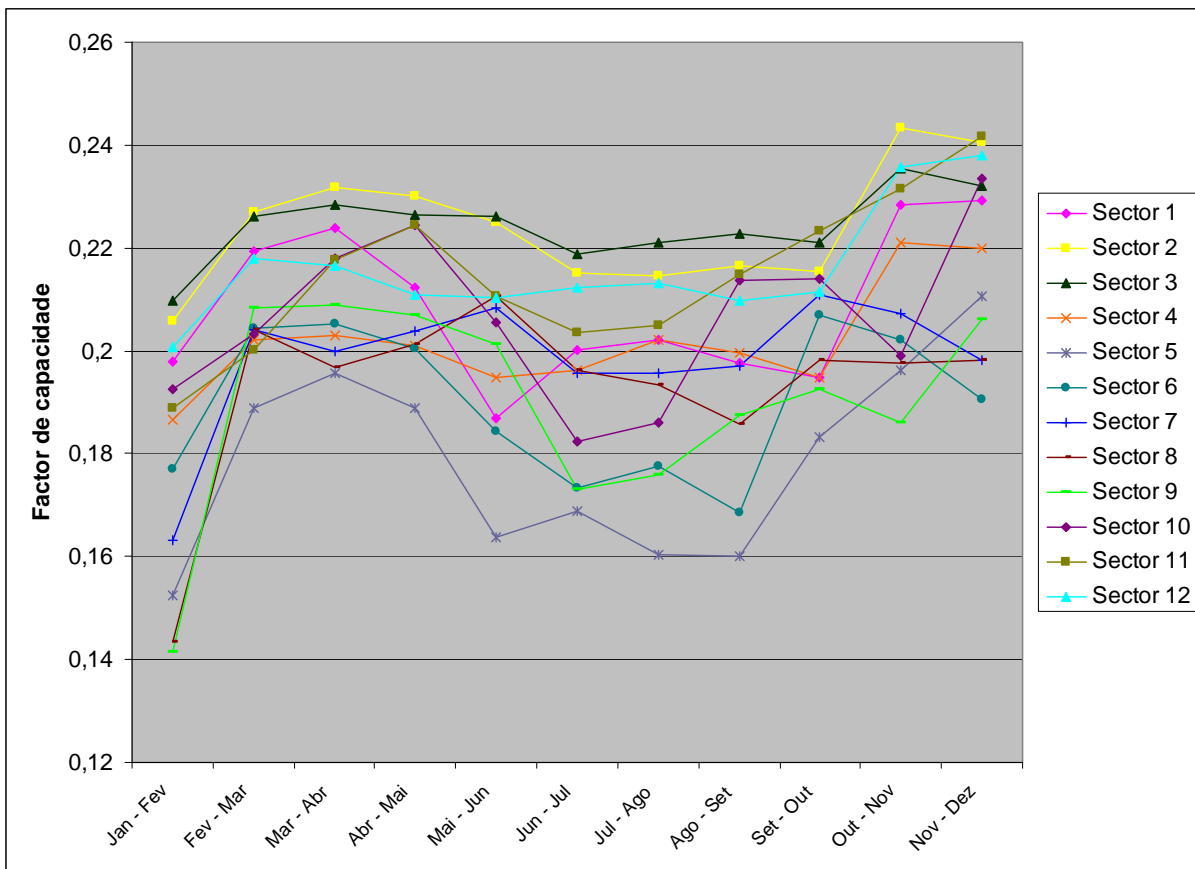


Figura 9F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 9.

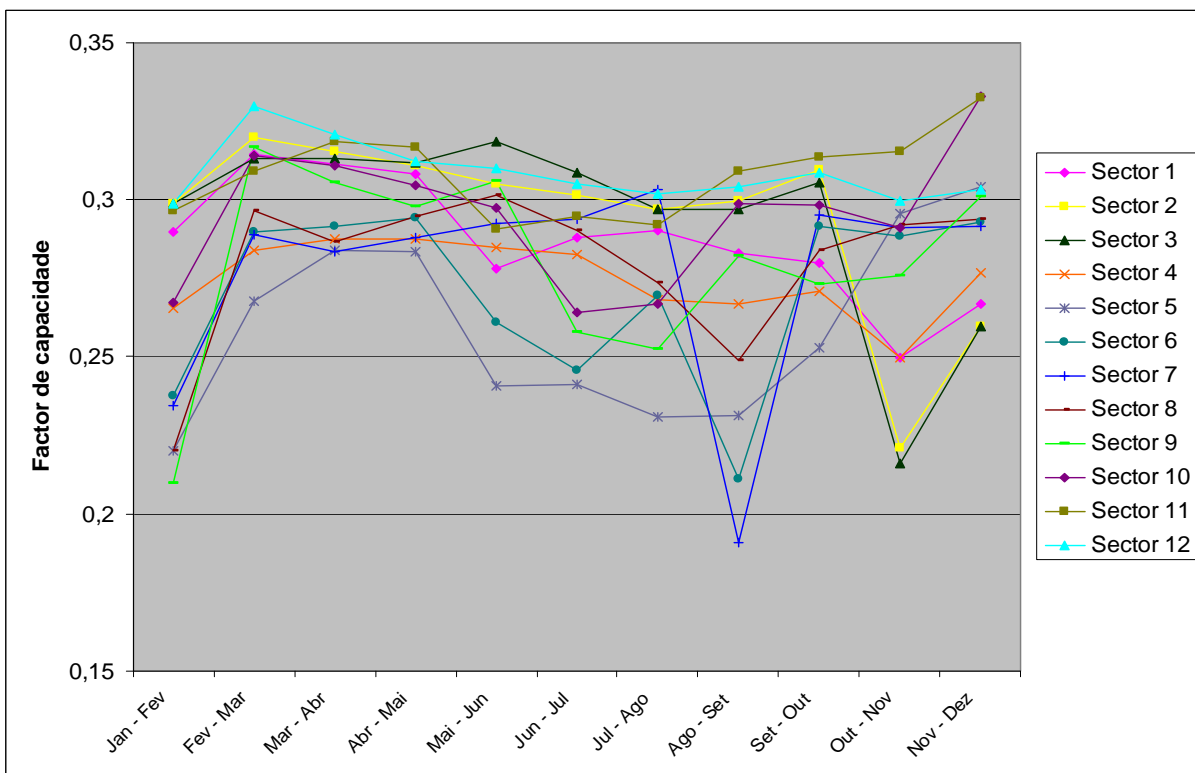


Figura 10F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 10.

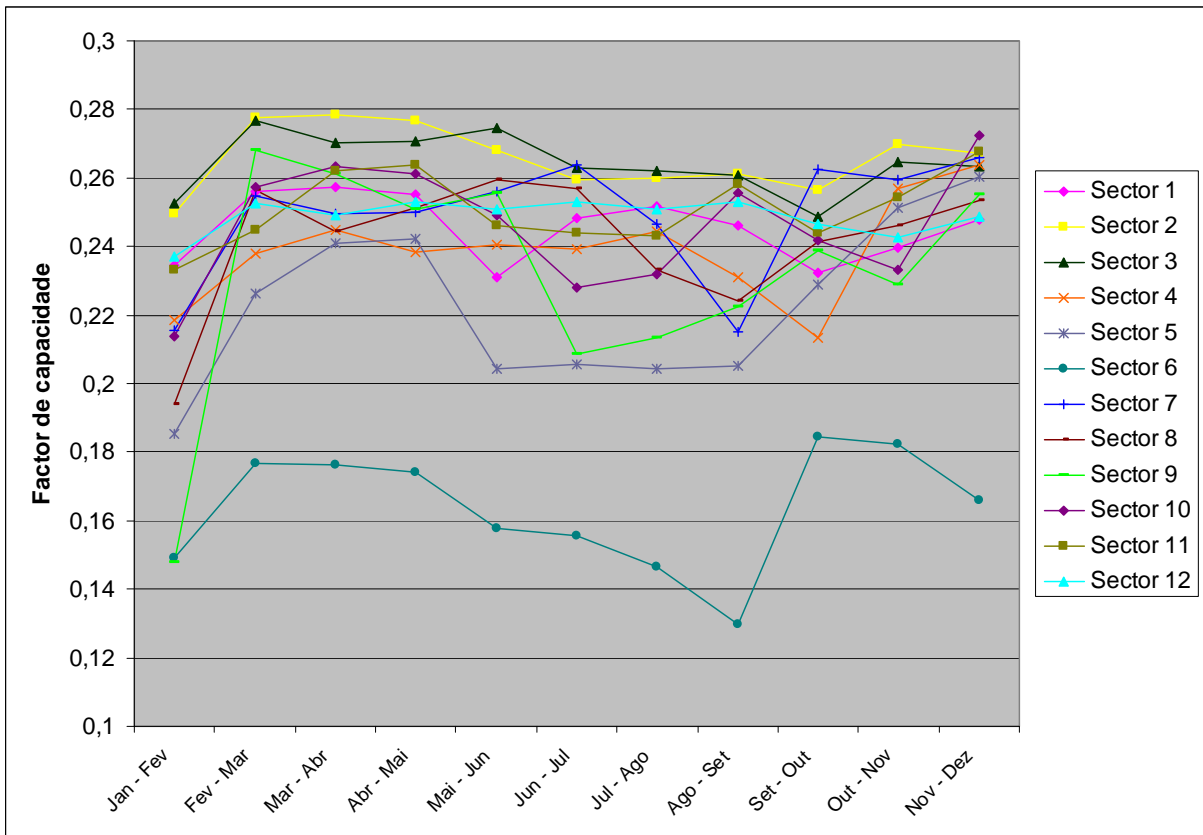


Figura 11F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 11.

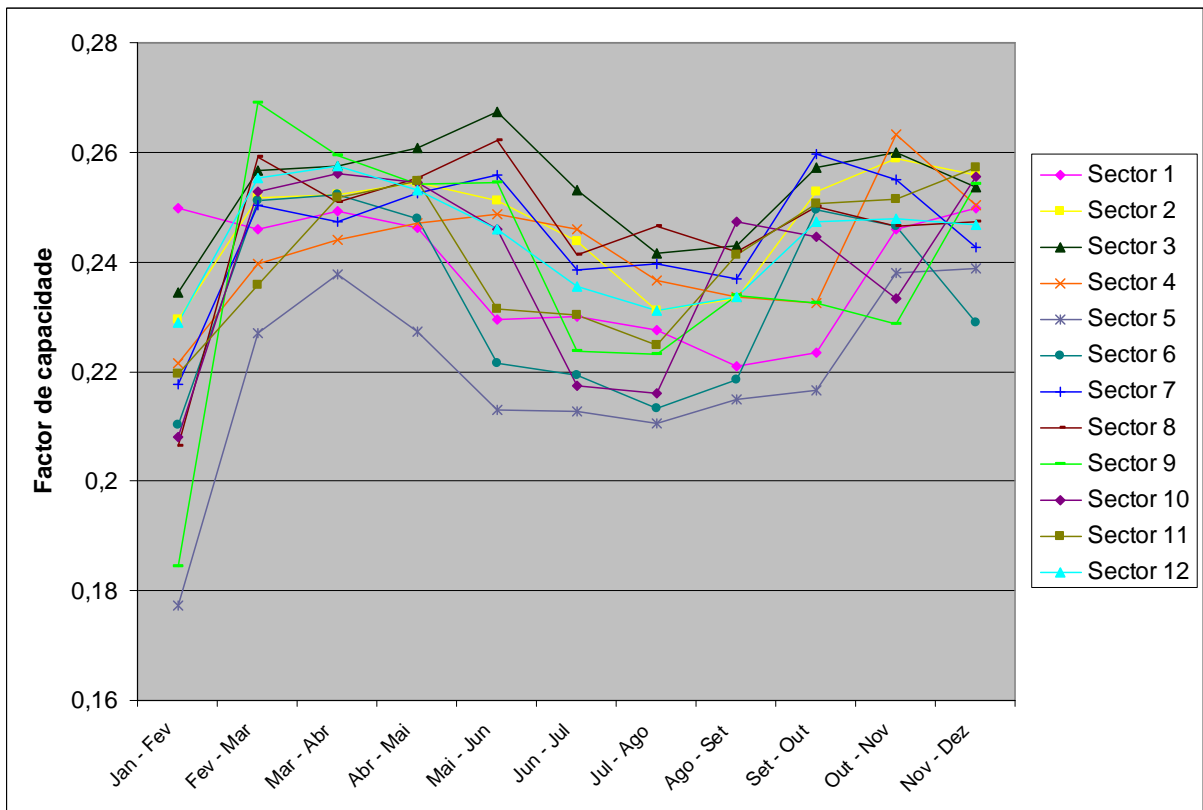


Figura 12F - Evolução do factor de capacidade do aerogerador 12.



## Referências

- [1] "Estatísticas Rápidas - Nº38", Direcção Geral de Energia e Geologia, Abril de 2008.
- [2] Basseville, Michèle, *et al*, "Detection of abrupt changes: Theory and Application", Englewood Cliffs, N.J., November 2008
- [3] Relatório elaborado pela Entidade Responsável pelo Estudo do Parque, 2005.
- [4] Relatório elaborado pela Entidade Responsável pelo Estudo do Parque, Enercon, 2005
- [5] Simões, "Caracterização do Escoamento Atmosférico e Locais com Elevado Potencial Eólico", Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Relatório de Estágio de Licenciatura, 1999.
- [6] M.G. castro, Rui, "Energias renováveis e produção descentralizada- introdução à energia eólica", Ed.3 Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007
- [7] Marques da Silva et al., "Caracterização do Recurso Eólico. Em Curso de Formação - Acção do Programa Altener. Energia Eólica", Cap.2. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação - INETI, Lisboa., 1996
- [8] A.elkamel, s.abdul-wahab, w.bouharamra, e.alper, "Data Mining: A Preprocessing Engine", Journal of Computer Science 2 (9): 735-739, 2006, ISSN 1549-3636, Science Publications , 2005.
- [9] Demuth, Howard et al, " Neural Network Toolbox 5 - User's Guide", The Math Works, Inc, 2007





## Bibliografia consultada

A.elkamel, s.abdul-wahab, w.bouharamra, e.alper, (2001). "Measurement and prediction of ozone levels around a heavily industrialized area: a neural network approach", *Advances in Environmental Research* 5 (47-59).

Borgelt Cristian. "Neural Networks", Dept. of Knowledge Processing and Language, Germany.

G. N. Kariniotakis, (1996). "Wind Power Forecasting Using Advanced Neural Networks Models", IEEE.

Gama, João *et al.* "Learning with drift Detection", LIACC- University of Porto, Portugal

García, Mnuek Baena *et al.* " Early Drift Detection Method", Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computacion E.T.S. Ingeniera Informática, Univerddidad Málaga, Espanha.

Juan R. Rabuñal, (2006). "Artificial Neural Networks in Real-Life Applications", idea group publishing.

Hui Li, (2004). "Neural Network Based Sensorless Maximum Wind Energy Capture with Compensated Power Coefficient", Dept. of ECE, FAMU-FSU College of Engineering.

H. Manden, (2004). "A Protocol for Standardizing the Performance Evaluation of Short-Term Wind Power Prediction Models - ANEMUS", Denmark.

Marijana Zekic, (1998). "Structure Optimization of neural Networks in Relation to Underlying Data", University of Osijek, Faculty of Economics.

Paiva, José Pedro, " Redes de Energia Eléctrica - uma análise sistemática", IST Press, 2005

Sanchez, Ismael. "Recursive estimation of dynamic models using cook's distance, with application to wind energy forecast", Working paper 02-55(15), Statistic and Econometrics Series, November 2002.

Sanchez, Ismael. "Short-term prediction of Wind energy production", International Journal of Forecasting 22, 2006.

Shuhui Li, (2001). "Comparative Analysis of Regression and Artificial Neural Network Models for Wind Turbine Power Curve Estimation", Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Texas A&M University-Kingsville.

Sousso Kélouwani, (2004). "Nonlinear Model Identification of Wind Turbine With a Neural Network", IEEE.

Tony Burton, et al, (2001). "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons, Ltd.

Y. d. Song, M. Bikkash, and M.J. Schulz (2001). "Control and Health Monitoring of variable-speed Wind Power Generation Systems", North Carolina A&T State University.

