

Avaliação de Desempenho de Parques Eólicos Portugueses

Elisabete da Silva Araújo

Relatório Final da Dissertação apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Energias Renováveis e Eficiência Energética

Orientadores

Maria Clara Rodrigues Bento Vaz Fernandes

Ângela Paula Barbosa de Silva Ferreira

“Este trabalho de Dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri”

julho 2013

Aos meus avós
com saudade

Resumo

Na tendência atual da integração de fontes de energias renováveis nos sistemas electroprodutores, de forma a minimizar as emissões de dióxido de carbono e a reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, a energia eólica desempenha um papel primordial, com uma penetração na Europa da ordem de 20%. Neste âmbito, a melhoria das práticas neste setor, que envolve um grande investimento em tecnologia, torna-se muito relevante. Este estudo pretende avaliar o desempenho dos parques eólicos pertencentes a dois promotores presentes no setor energético Português de forma a apoiar o *benchmarking* e a melhoria das práticas durante a operação dos parques. A técnica de *Data Envelopment Analysis* (DEA) tem sido aceite como instrumento principal de *benchmarking* nos setores da energia, particularmente no setor da eletricidade, embora seja escassa a sua aplicação ao setor da energia eólica. Pretende-se avaliar o desempenho dos parques eólicos na maximização da geração de energia elétrica com os recursos disponíveis e o potencial eólico em cada unidade. Esta abordagem interessa aos promotores na gestão operacional dos parques e também na instalação de futuros parques ou nas situações de *repowering* e/ou *overpowering*. Pretende-se ainda comparar o desempenho dos dois promotores em termos da capacidade dos parques maximizarem a geração de energia a partir dos recursos disponíveis e do potencial eólico. Os modelos de DEA são ainda utilizados para avaliar o desempenho dos parques eólicos pertencentes a dois promotores a atuar em território nacional. A primeira etapa consiste em aplicar o modelo de DEA aos parques de cada promotor. O valor de eficiência de cada parque, resultante da comparação com as melhores unidades (*benchmarks*) pertencentes a cada promotor, é designado por eficiência de operação. A segunda etapa consiste em eliminar a ineficiência de operação de cada parque, através da sua projeção na fronteira do respetivo promotor, para posteriormente avaliar em conjunto a eficiência dos parques dos dois promotores em análise, obtendo-se a eficiência do promotor.

Palavras-Chave: DEA, Eficiência, Desempenho, Energia Eólica

Abstract

In the current trend of integration of renewable energy sources into power systems to minimize emissions of carbon dioxide and reduce the dependence on fuels, wind energy plays a key role, with a penetration in Europe of approximately 20%. In this context, improving practices in this sector, which involves a large investment in technology, becomes very relevant. This study aims to evaluate the performance of wind farms from two operators in the Portuguese energy sector in order to support benchmarking and improving practices during operation of the farms. The technique of Data Envelopment Analysis (DEA) has been accepted as the main instrument of benchmarking in the sectors of energy, particularly in the electricity sector, although its application in wind energy sector is still scarce. It is intended to assess the performance of wind farms in the maximization of electricity generated from the resources available and wind potential in each unit. This approach is useful to promoters interested in the operational management of the farms and also in the installation of future farms or in situations of repowering and/or overpowering. The aim of this work is also to compare the performance of two promoters in terms of the ability of farms to maximize electric energy from the resources available and the wind potential. DEA models are also used to evaluate the performance of the wind farms owned by two promoters of wind farms which are operating in Portugal. The first step consists in applying the model of DEA to the farms of each promoter. The efficiency value of each park, resulting from the comparison with the best units (benchmarks) belonging to each promoter, is called operating efficiency. The second step is to eliminate the operating inefficiency through of each park its projection on the frontier of the respective promoter. Finally, we evaluate the management efficiency of each promoter, by evaluating the efficiency of all farms, free of operating inefficiency.

Keywords: DEA, Efficiency, Performance, Wind Energy

Agradecimentos

Os meus primeiros agradecimentos vão para as minhas orientadoras Prof.^a Maria Clara Bento Vaz e Prof.^a Ângela Paula Ferreira pela disponibilidade, ajuda e paciência que demonstraram na elaboração da minha tese de mestrado, não esquecendo a Prof.^a Elisa Barros pela orientação que me deu na área de Investigação Operacional.

Um agradecimento muito especial aos meus pais e irmão, por tudo aquilo que me ensinaram ao longo da minha vida e por não me deixarem desistir dos meus objetivos.

Os meus últimos agradecimentos vão para os meus tios e primos pelo incentivo e apoio manifestado ao longo da minha vida académica.

A todos os intervenientes o meu muito Obrigado.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Lista de Abreviações	ix
Capítulo 1	1
1. Introdução	2
1.2. Motivação	3
1.3. Estrutura da tese	3
2. Capítulo 2	5
2.1. Introdução	6
2.2. Recursos Eólicos	6
2.3. A imprevisibilidade do vento	7
2.4. Potência disponível no vento	8
2.5. Avaliação do potencial eólico no Mundo, na Europa e em Portugal	10
2.6. Dados estatísticos relativos à produção de energia eólica	14
2.7. Plano de Energias Renováveis para 2020	17
2.8. Tecnologia dos Parques Eólicos	22
2.8.1. Obstáculos ambientais /Efeito esteira	22
2.9. Aerogeradores	24
2.9.1. Rotor	25
2.9.2. Cabina	27
2.9.3. Torre	28
2.10. Aerogeradores de Eixo Vertical e de Eixo Horizontal	29
2.11. Sistemas de velocidade variável e velocidade fixa	31
2.12. Controlo <i>Stall /Pitch</i>	34
2.13. Conclusão	36
Capítulo 3	37
3. Técnica de DEA (<i>Data Envelopment Analysis</i>)	38
3.1. Introdução	38
3.2. Avaliação da Eficiência	39
3.3. Eficiência e Produtividade DEA	39
3.4. Características dos modelos de DEA	40

3.4.1. Orientação dos Modelos de DEA.....	40
3.4.2. Rendimentos à escala da fronteira de eficiência	41
3.4.3. Medidas de Eficiência	42
3.5. Formulação dos Modelos DEA.....	43
3.5.1. Modelo fraccionário com orientação aos <i>inputs</i>	43
3.5.2. Modelo fraccionário com orientação aos <i>outputs</i>	44
3.5.3. Modelos de DEA lineares	45
3.5.4. Modelo DEA orientado pelos <i>outputs</i> com CRS	45
3.5.5. Modelo DEA orientado pelos <i>outputs</i> com VRS	46
3.6. <i>Outliers</i>	48
3.7. Exemplo de aplicação da técnica DEA	48
3.8. <i>Program efficiency</i>	52
3.9. Conclusão.....	53
Capítulo 4	55
4. Avaliação do Desempenho dos Parques Eólicos com a técnica DEA.....	56
4.1. Introdução	56
4.2. Modelo de DEA	56
4.3. Caracterização do potencial de vento em cada parque eólico.....	59
4.4. Detecção de <i>Outliers</i>	60
4.5. Avaliação do desempenho dos parques eólicos.....	61
4.5.1. Avaliação da eficiência de operação dos parques eólicos do promotor EDP-R	61
4.5.1.1. Estudo dos <i>Benchmarks</i>	62
4.5.1.2. Definição de objetivos para um parque eólico ineficiente	63
4.5.2. Avaliação da eficiência de operação dos parques eólicos do promotor Iberwind	65
4.5.2.1. Estudo dos <i>Benchmarks</i>	65
4.5.2.2. Definição de objetivos para um parque eólico ineficiente	67
4.6. Aplicação do método <i>program efficiency</i> para comparar o desempenho dos promotores	68
4.6.1. Avaliação da eficiência de gestão dos promotores para o ano 2011	69
4.7. Avaliação da Eficiência Global dos parques dos promotores e identificação de componentes em 2011	75
4.8. Correlação entre o número de horas equivalentes e a eficiência dos parques eólicos	79

4.9. Conclusão.....	80
Capítulo 5	83
5. Conclusões e Desenvolvimentos futuros	84
Referências Bibliográficas.....	87
Anexos.....	91

Índice de Figuras

Figura 2.1: Emissões de CO ₂ ao longo do ciclo de vida.....	7
Figura 2.2: Crescimento das energias renováveis entre 2008 a 2035 em várias regiões	11
Figura 2.3: Atlas Europeu do Vento.....	12
Figura 2.4: Atlas Português do Vento; velocidade (m/s) média horizontal do vento a 60 m.....	13
Figura 2.5: Potência anual instalada no Mundo	14
Figura 2.6: Potência cumulativa instalada na Europa em (GW)	15
Figura 2.7: Portugal-capacidade geradora acumulada.....	15
Figura 2.8: Principais promotores de parques eólicos.....	16
Figura 2.9: Produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental em 2012.....	17
Figura 2.10: Peso das fontes de produção de eletricidade em Portugal Continental de janeiro a maio de 2012.....	17
Figura 2.11: Escoamento na zona envolvente de um obstáculo	22
Figura 2.12: Efeito de esteira.....	23
Figura 2.13: Aerogeradores posicionados num parque eólico.	24
Figura 2.14: Esquema de um aerogerador típico	25
Figura 2.15: Aerogerador de eixo horizontal <i>upwind</i>	26
Figura 2.16: Aerogerador de eixo horizontal <i>downwind</i>	26
Figura 2.17: Rotor de duas pás	27
Figura 2.18: Torre tabular.....	28
Figura 2.19: Aerogerador de eixo vertical do tipo <i>Darrieus</i>	29
Figura 2.20: Aerogerador de eixo horizontal.....	30
Figura 2.21: Sistema de conversão de energia eólica baseado no gerador de indução duplamente alimentado.....	33
Figura 2.22: Sistema de conversão de energia eólica baseado no gerador síncrono de ímanes permanentes	33
Figura 2.23: Fluxo separado <i>Stall</i> em volta do perfil.	34
Figura 2.24: Fluxo aderente ao perfil.	35
Figura 3.1: Processo de produção da técnica <i>Data Envelopment Analysis</i>	38
Figura 3.2: Diferença entre Eficiência e Produtividade.	40
Figura 3.3: Orientação pelos <i>inputs</i> ou orientação pelos <i>outputs</i>	41
Figura 3.4: Fronteiras VRS e CRS	42

Figura 3.5: Fronteira CRS (rendimentos de escala constantes).....	49
Figura 3.6: Fronteira VRS (rendimentos de escala variáveis).....	51
Figura 3.7: Representação gráfica do método <i>program efficiency</i>	52
Figura 4.1: Os <i>inputs</i> e <i>output</i> de cada parque eólico.....	56
Figura 4.2: Contributo dos <i>benchmarks</i> para a definição de objetivos de Amaral I.	64
Figura 4.3: Contributo dos <i>benchmarks</i> para definição de objetivos de N. ^a S. ^a da Vitória	67
Figura 4.4: Número de horas equivalentes do promotor EDP-R do ano 2011.....	80
Figura 4.5: Número de horas equivalentes do promotor Iberwind do ano 2011.....	80

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em FER para alcançar objetivos obrigatórios de 2020 e a trajetória provisória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da eletricidade em 2010-2014.	20
Tabela 2.2: Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em FER para alcançar objetivos obrigatórios de 2020 e a trajetória provisória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da eletricidade em 2010-2020	21
Tabela 3.1: Dados utilizados no programa EMS.	48
Tabela 3.2: Resultados obtidos do modelo CRS com orientação pelos <i>outputs</i> , no programa EMS.	49
Tabela 3.3: Resultados obtidos do modelo VRS com orientação pelos <i>outputs</i> no programa EMS.	50
Tabela 4.1: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor EDP-R obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades <i>cut-in</i> e <i>cut-out</i>) e percentil 75%).	60
Tabela 4.2: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor Iberwind obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades <i>cut-in</i> e <i>cut-out</i>) e percentil 75%).	60
Tabela 4.3: Valores de supereficiência dos parques do promotor EDP-R	61
Tabela 4.4: Valores de supereficiência dos parques do promotor Iberwind.	61
Tabela 4.5: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor EDP-R com o modelo CRS.	62
Tabela 4.6: Características dos <i>Benchmarks</i> dos parques eólicos para a EDP-R.	62
Tabela 4.7: Desvio padrão e média dos <i>inputs</i> e <i>output</i> dos parques eólicos eficientes do promotor EDP-R.	63
Tabela 4.8: Desvio padrão e média dos <i>inputs</i> e <i>output</i> dos parques eólicos ineficientes do promotor EDP-R.	63
Tabela 4.9: Resultados do modelo CRS para o parque eólico Amaral I.	64
Tabela 4.10: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor Iberwind com o modelo CRS.	65
Tabela 4.11: Características dos <i>Benchmarks</i> dos parques eólicos para a Iberwind.	65
Tabela 4.12: Desvio padrão e média dos <i>inputs</i> e <i>output</i> dos parques eólicos eficientes do promotor Iberwind.	66

Tabela 4.13: Desvio padrão e média dos <i>inputs</i> e <i>output</i> dos parques eólicos ineficientes do promotor Iberwind.....	67
Tabela 4.14: Resultados do modelo CRS para o parque eólico N ^a . Sr ^a . da Vitória.....	68
Tabela 4.15: Ajustamento radial do <i>output</i> para os parques do promotor EDP-R para o ano 2011.	69
Tabela 4.16: Ajustamento radial do <i>output</i> para os parques do promotor Iberwind, para o ano 2011.	70
Tabela 4.17: Avaliação do desempenho de todos os parques eólicos em estudo (ajustamento radial), para o ano 2011.	71
Tabela 4.18: Tabela síntese da eficiência de gestão do promotor para o ano 2011.....	73
Tabela 4.19: Número de vezes que cada <i>benchmark</i> é utilizado como referência na avaliação de eficiência de gestão do promotor em 2011.	74
Tabela 4.20: Tabela síntese da eficiência do promotor, para o ano 2010.....	74
Tabela 4.21: Resultados obtidos da eficiência global no ano 2011.....	76
Tabela 4.22: Tabela síntese da eficiência global no ano 2011.	78
Tabela 4.23: Tabela síntese da eficiência global, para o ano 2010.	79
Tabela 4.24: Tabela síntese do coeficiente de correlação para os anos 2010 e 2011	79

Lista de Abreviações

CO₂- Dióxido de Carbono

CRS- Rendimentos de escala constantes

DEA- *Data Envelopment Analysis*

DMUs- *Decision Making Units*

DRS- Rendimentos de escala decrescentes

ENE (2020) - Estratégia Nacional para a Energia

EU- *European Union*

EMS- *Efficiency Measurement System*

EDP-R- EDP-Renováveis

FER- Fontes de Energia Renováveis

IRS- Rendimentos de escala crescentes

LNEG- Laboratório Nacional de Energia e Geologia

PNAER- Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PPS- Conjunto de Possibilidades de Produção

PTE- Eficiência Técnica Pura

SNIRH- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SE- Eficiência de Escala

TE- Eficiência Técnica

VAB- Valor Acrescentado Bruto

VRS- Rendimentos de escala variáveis

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Classicamente a energia elétrica era produzida a partir de combustíveis fósseis. Com as reservas a esgotarem-se, torna-se necessário explorar outros recursos, nomeadamente os recursos renováveis.

A energia eólica é uma das fontes de energia mais exploradas no sector das energias renováveis, porque é uma energia limpa, não causa poluição atmosférica (não produz dióxido de carbono, dióxido de enxofre ou óxidos de azoto responsáveis pelo “efeito de estufa” e pela “chuva ácida”, e não produz ou utiliza qualquer material radioativo (Naturlink, 2013). A construção de vários parques eólicos para a produção de energia elétrica e respetiva ligação à rede elétrica, conduziu ao crescimento do número de promotores, ou seja, empresas que se responsabilizam por este tipo de produção. A preocupação com a melhoria dos níveis de desempenho dos parques na produção de energia eólica e a preocupação com a competitividade leva a que cada uma delas procure melhorar a sua produtividade através da adoção das melhores práticas observadas no setor.

As vantagens dos sistemas eólicos caracterizam-se por não produzirem emissões tóxicas ou poluentes nem lixo e possibilita atividades (como exemplo agricultura) no terreno envolvente. A energia eólica, também possui um inconveniente: o vento, apresenta uma velocidade variável e nem sempre está disponível quando a procura de eletricidade é maior [ENEOP (Eólica de Portugal, S.A), 2012].

Nesta tese utilizam-se modelos DEA para avaliar o desempenho dos parques eólicos pertencentes a dois promotores presentes no setor energético Português de forma a apoiar o *benchmarking* e a melhoria das práticas durante a operação dos parques. Pretende-se ainda comparar o desempenho dos dois operadores em termos da capacidade dos parques maximizarem a produção de energia elétrica a partir dos recursos disponíveis e do potencial eólico. Esta metodologia permite quantificar as diferenças entre os promotores relativos ao posicionamento das fronteiras e à dispersão da eficiência verificada para os parques pertencentes a cada um deles.

A utilização de métodos específicos para a avaliação de eficiência e desempenho dos parques eólicos dos diferentes promotores, permite inferir as melhores práticas e demonstrar que o sistema de energia eólica pode ser melhorado.

1.2. Motivação

A avaliação do desempenho dos parques eólicos é, genericamente, feita através de rácios, que têm como finalidade definir comparações entre objetivos definidos e aquilo que efetivamente se atingiu.

Pretende-se nesta tese utilizar um método sofisticado de avaliação de desempenho, a técnica de *Data Envelopment Analysis* (DEA). A DEA permite avaliar a eficiência relativa de unidades homogéneas (unidades produtivas), que utilizam múltiplos *inputs* para produzirem múltiplos *outputs*. A comparação entre as várias unidades permite identificar as mais eficientes e quantificar de forma sumária e relativa as ineficiências observadas nas restantes unidades (Vaz, Clara 2007). Para as unidades consideradas ineficientes a técnica DEA permite definir objetivos de melhoria de desempenho.

1.3. Estrutura da tese

Esta tese de mestrado está estruturada em cinco capítulos, sendo aqui apresentado um pequeno sumário de cada um deles.

O capítulo dois apresenta o estado de arte da energia eólica, descrevendo-se o desenvolvimento e tecnologias utilizadas neste tipo de energia.

No capítulo três apresenta-se uma introdução à técnica DEA, descrevendo-se assim os conceitos e modelos básicos para avaliar a eficiência e desempenho de unidades organizacionais. A aplicação da técnica DEA é ilustrada com exemplos práticos.

O capítulo quatro apresenta a avaliação efetuada aos parques eólicos dos dois promotores em estudo EDP-R (EDP-Renováveis) e Iberwind para dois anos consecutivos. É apresentada uma solução para se efetuar a avaliação de eficiência dos parques eólicos em estudo. É apresentada uma abordagem designada por *program efficiency* baseada em modelo DEA para identificar a eficiência de operação e a eficiência de gestão do promotor. Esta análise permite apoiar a política de gestão do promotor e a política de operação dos parques eólicos. Assim, apresentam-se resultados que evidenciam que há melhorias que devem ser realizadas quer ao nível da operação do parque, quer ao nível da gestão do promotor.

No capítulo cinco, avaliam-se globalmente os resultados obtidos e apresentam-se as respectivas conclusões do estudo realizado neste trabalho. São ainda identificadas algumas linhas de investigação futura.

Capítulo 2

Estado de Arte da Energia Eólica

2. Estado de arte da energia eólica

2.1. Introdução

Neste capítulo são abordados assuntos relacionados com o desenvolvimento da energia eólica, cuja exploração recente tem tido uma evolução notável. Inicialmente descreve-se o recurso eólico, de seguida apresenta-se a imprevisibilidade do vento, a potência disponível do vento e ainda dados sobre a exploração do recurso a nível mundial, europeu e no país. São ainda apresentadas as principais linhas orientadoras do plano de energias renováveis para 2020, do governo português e posteriormente são apresentados os principais aspetos relacionados com a tecnologia de conversão de energia eólica.

2.2. Recursos Eólicos

A origem dos ventos é devida às diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, pelo facto da radiação solar captada na Terra ser superior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares (Castro, 2011).

Os ventos rípidos, mais estáveis e mais persistentes, surgem em bandas localizadas a 10 km da superfície terrestre. Os conversores eólicos não são colocados a essas altitudes, devido ao espaço viável ser limitado a algumas dezenas de metros da terra. Nestas alturas, o vento é afetado pela fricção na superfície, o que causa uma redução na sua velocidade.

A humanidade há quase 3000 anos que tem utilizado a energia cinética do vento ligada ao deslocamento das massas de ar. As primeiras aplicações da energia eólica datam de 200 a.c na Pérsia, onde apareceram os primeiros moinhos de vento, sendo utilizados para atividades agrícolas como moagem de grãos e bombagem de água.

A energia eólica tem vindo a ter uma importância crescente como fonte alternativa de energia para a produção de eletricidade. A conversão de energia eólica em energia elétrica, teve início há 150 anos. Na Dinamarca, desde 1980, foi onde se desenvolveram os sistemas de conversão de energia eólica para produção de eletricidade, tendo sido os primeiros aerogeradores fabricados por pequenas companhias de equipamentos agrícolas.

Atualmente, a energia eólica é a fonte renovável de energia mais bem-sucedida para a produção de eletricidade, apresentando uma segurança de abastecimento energético com sustentabilidade ambiental e viabilidade económica.

As vantagens dos sistemas eólicos caracterizam-se por não produzirem emissões tóxicas ou poluentes nem lixo e possibilita atividades (como exemplo agricultura) no terreno envolvente. Esta é de longe a fonte com menor impacto ambiental, principalmente em termos de emissões de efeito de estufa, responsáveis pelas alterações climáticas. Na figura 2.1 apresentam-se as emissões de dióxido de carbono (CO₂) por fonte primária de energia.

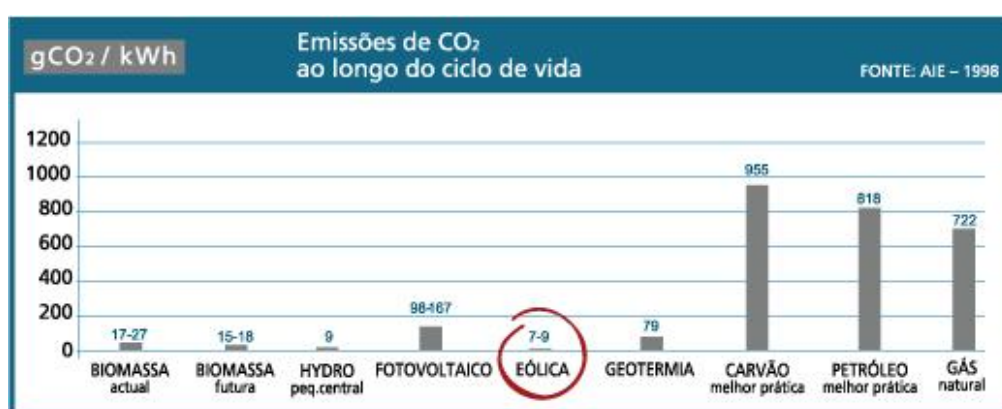


Figura 2.1: Emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida [ENEOP, 2012].

A energia eólica, também possui um inconveniente: o vento, apresenta uma velocidade variável e nem sempre está disponível quando a procura de eletricidade é maior [ENEOP (Eólicas de Portugal, S.A), 2012].

2.3. A imprevisibilidade do vento

O vento é caracterizado de uma imprevisibilidade temporal sendo o resultado do movimento das massas de ar à superfície da terra. Este pode ser classificado como vento forte, rajada ou vento fraco.

As medidas do vento são essenciais para uma avaliação do potencial eólico para a produção de energia elétrica. Os dados que as estações meteorológicas registam são tipicamente amostras ligadas à medição de dados para a navegação aérea, agricultura e previsão do tempo.

As estações meteorológicas não estão situadas nos locais mais favoráveis, para a caracterização do potencial eólico por isso, a extrapolação dos registos meteorológicos levou à avaliação por defeito do recurso.

Uma das características mais significativas, é que, em qualquer momento, a eletricidade produzida tem de igualar o consumo, acrescido das perdas, ou seja, a energia em grande escala não se adapta a ser armazenada na sua forma elétrica, pelo menos em quantidades úteis.

Neste caso as centrais elétricas “controláveis” são obrigadas a entrar em serviço para abastecer o consumo numa determinada hora e devem ser selecionadas previamente num processo designado por pré-despacho (*Unit commitment*). O padrão variável de produção eólica ao longo do tempo introduz alterações no pré-despacho dos centros produtores e transtorna a capacidade de transmissão de energia entre as regiões. Sendo este impacto tanto maior quanto mais elevado for o nível de penetração de energia eólica no setor energético.

Caso não se avalie a variação da potência eólica ou esta for erradamente prevista, é necessário instalar unidades de reserva, sendo estas muito caras, para compensar rapidamente o desequilíbrio entre geração e consumo, de forma a estabilizar o sistema. À medida que a potência instalada proveniente de sistemas eólicos aumenta, justifica-se o interesse crescente que a previsão do vento assume para os operadores de rede elétrica.

As fontes renováveis designadas pelas energias eólicas, continuam a crescer, a precisão dos instrumentos de previsão do vento é ambicionada quer pelos operadores das redes como pelos gestores dos parques eólicos, com o objetivo de reduzir os efeitos indesejáveis das flutuações do vento. Daqui é visível que o desenvolvimento acrescido da exploração desta energia renovável tem uma dependência forte da capacidade de fazer uma previsão correta do vento.

2.4. Potência disponível no vento

A energia renovável sofreu um elevado aumento de exploração em todo o mundo.

Os gestores da economia e os técnicos prevêem uma competitividade dos sistemas de conversão de energia eólica comparativamente a outros sistemas fundamentados em energias renováveis.

A energia eólica é a fonte renovável que atualmente está a ter maior investimento por parte dos países mais desenvolvidos do mundo.

A potência disponível do vento, P_w , varia com a velocidade do vento v , e é função da massa específica do ar, ρ (varia com a pressão, temperatura e humidade relativa) e da área exposta A , de acordo com:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

ou

$$P_w = \frac{1}{2} m_w v^2, \quad (2.2)$$

Sendo m_w o caudal mássico do vento, dado por

$$m_w = \rho A v \quad (2.3)$$

A energia eólica associada a P_w , não pode ser totalmente transformada dado que a velocidade do vento na saída do aerogerador não pode ser reduzida a zero (neste caso, através do aerogerador não existiria fluxo de ar). Se v_i for a velocidade do vento na entrada do aerogerador, v_o a velocidade na saída, o caudal mássico do vento médio é dado por:

$$m_{wmed} = \rho A \frac{v_i + v_o}{2} \quad (2.4)$$

Para o caudal mássico médio de vento que atravessa o sistema, a potência modificada do vento, P , é igual à razão da variação da energia cinética, isto é,

$$P = \frac{1}{2} m_{wmed} (v_i^2 - v_o^2) = \frac{\rho A}{4} (v_i + v_o) (v_i^2 - v_o^2) = \frac{P_w}{2} (1 + x - x^2 - x^3) \quad (2.5)$$

onde

$$x = \frac{v_0}{v_i} \quad (2.6)$$

O melhor valor de x para maximizar P é obtido por:

$$\frac{dp}{dx} = 1 - 2x - 3x^2 = 0, \quad (2.7)$$

Sendo

$$x_{pmax} = \frac{1}{3} \quad (2.8)$$

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_w = 0,593 P_w \quad (2.9)$$

A potência máxima que pode ser extraída é 59,3% da potência do vento (designado por limite de Betz). Os valores otimistas existentes para a relação entre a potência modificada e a potência do vento, designa-se por coeficiente de potência C_p , não sendo superior a 0,45. Para a área exibida A , dada por πr^2 em que r é o raio do aerogerador, a potência extraída do vento é então dada pela seguinte forma:

$$P = \frac{1}{2} \rho c_p \pi r^2 v^3 \quad (2.10)$$

2.5. Avaliação do potencial eólico no Mundo, na Europa e em Portugal

Classicamente a energia elétrica era produzida a partir de combustíveis fósseis. Com as reservas a esgotarem-se, torna-se necessário explorar outros recursos, nomeadamente os recursos renováveis.

Os países que mais utilizavam as energias fósseis como fonte de produção de eletricidade, como a China e Estados Unidos da América, estão a investir nas energias renováveis.

A China tornou-se líder na produção de energia eólica e fotovoltaica. Outros países estão a investir nas energias renováveis como o Médio Oriente e o Norte de África.

O Norte de África é uma região que possui um enorme potencial para desenvolver sistemas de conversão de energia eólica, no entanto existem desafios técnicos e políticos que têm de ser melhorados (World Energy Outlook 2010, 2013).

Supõe-se que a utilização das energias renováveis triplique entre 2008 e 2035, a energia elétrica produzida através das energias renováveis no ano 2008 contabilizou 19%, da energia elétrica produzida para 2035 prevê-se um crescimento para 32%. Na figura 2.2 têm-se uma perspetiva do crescimento das energias renováveis entre 2008 e 2035 nas principais áreas populacionais no mundo.

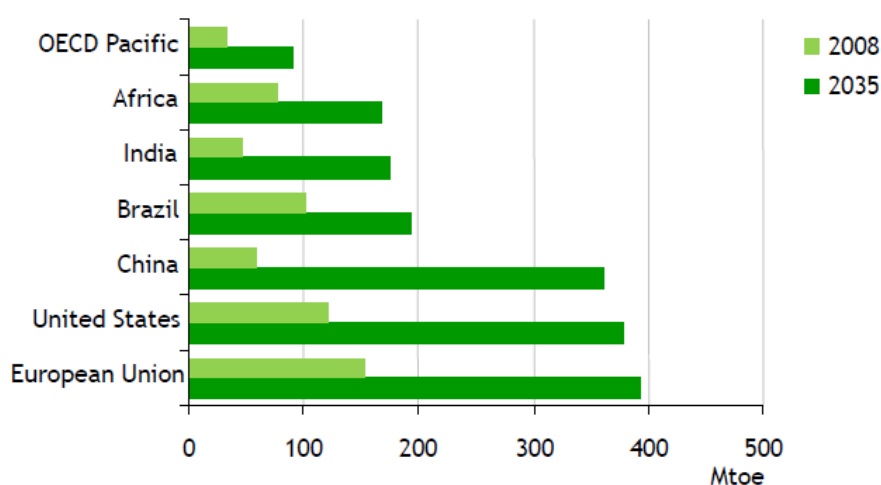


Figura 2.2: Crescimento das energias renováveis entre 2008 a 2035 em várias regiões [World Energy Outlook 2010, 2013].

No ano 1989, a Europa publicou o “ Atlas Europeu do Vento” que tem como função, a correção dos dados do vento. Estes foram adquiridos a partir de estações meteorológicas, sendo corrigidos apesar de, uma má qualidade, para ter em conta os efeitos da topografia e por fim extrapolados para outras áreas (Castro, 2011).

Na figura 2.3, obtida do “Atlas Europeu do Vento”, representa-se uma paisagem geral do recurso eólico na Europa Ocidental, em termos de velocidade média anual

(m/s) e da densidade de potência (W/m^2) média anual, a uma altura de 50 metros, para cinco diferentes condições topográficas. Os efeitos locais foram retirados, mantendo-se as enormes variações.

Desta figura verifica-se que, na Europa, as regiões que têm mais vento, estão situadas no Norte do Reino Unido e nas costas Norte/Oeste, no entanto as condições topográficas nestas zonas afetam esta imagem. Como exemplo, assinale-se o vento Mistral do sul de França e os ventos sazonais nas ilhas gregas.

Os recursos eólicos não são favoráveis no Norte de Itália e no Sul de França.

O “Atlas Europeu do Vento”, embora limitado, tem um papel importante na avaliação do potencial eólico para a produção de energia elétrica.

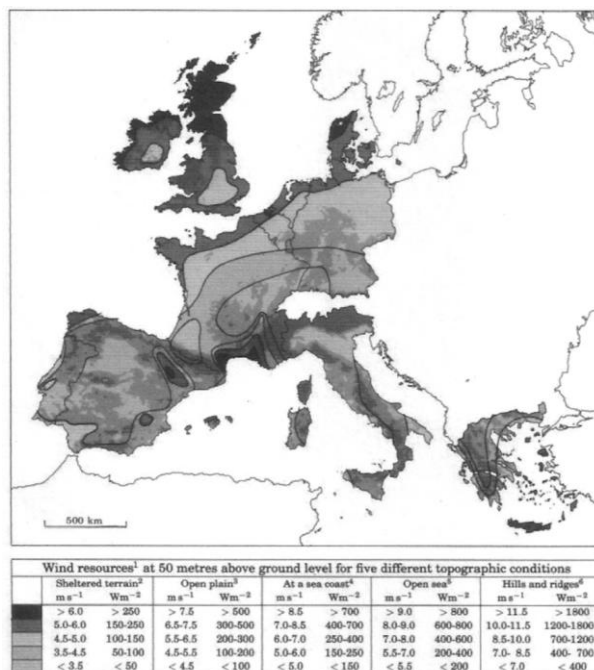


Figura 2.3: Atlas Europeu do Vento [Castro, 2011].

As instituições como o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) existentes em Portugal, empenham-se na realização constante de medições da velocidade do vento.

A publicação completa do “Atlas Português do Vento”, feita pelo LNEG é apresentada na figura 2.4, como exemplo. As velocidades maiores das médias anuais (6 a 7 m/s a 60 m de altura) estão situadas próximas do litoral oeste, nomeadamente na zona centro, e em certas regiões do interior norte.

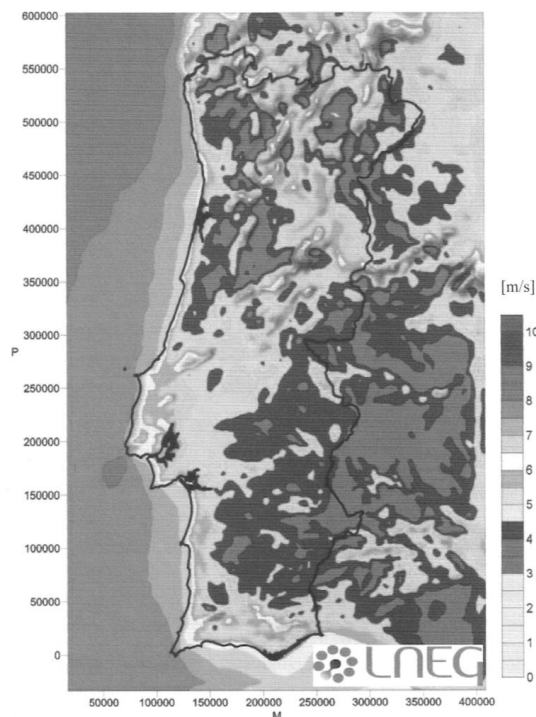


Figura 2.4: Atlas Português do Vento; velocidade (m/s) média horizontal do vento a 60 m [Castro, 2011].

No entanto, quando se pretende instalar aerogeradores eólicos, estes devem ser colocados em locais onde o vento tem maior força, para que haja sucesso económico na produção de energia.

A localização potencial tem que ser bem escolhida, com base em algumas regras simples, tais como:

- Os cumos das montanhas são, normalmente locais muito ventosos.
- O vento mais forte pode ser localizado em planaltos e planícies elevadas, assim como em zonas costeiras.
- Os locais com menos ocorrência de vento são normalmente os vales, apesar de poder ocorrer efeitos de concentração local.

Os mapas apropriados (cartas militares) ou visitas aos locais, são os elementos utilizados para identificar a localização onde supostamente os aerogeradores vão ser

instalados. Caso os mapas de isoventos (linhas de igual velocidade média anual do vento) estejam disponíveis, estes têm que ser utilizados para se fazer uma primeira estimativa do recurso eólico.

2.6. Dados estatísticos relativos à produção de energia eólica

A energia eólica é atualmente a fonte renovável mais utilizada a nível Mundial, Europeu e em Portugal para a produção de eletricidade. Desde o ano 1996 até ao ano 2012, a energia eólica cresceu consideravelmente, estimando-se num aumento de potência instalada.

A potência instalada no mundo teve um crescimento considerável desde de 1996 a 2010 como se verifica na figura 2.5. A potência instalada no ano 2010 é inferior ao ano 2009.



Figura 2.5: Potência anual instalada no Mundo [ENEOP, 2012].

Na Europa a energia eólica está cada vez mais a ser utilizada para produção de energia elétrica. Na figura 2.6 verifica-se o crescimento da potência cumulativa instalada na Europa desde 2000 até 2012.

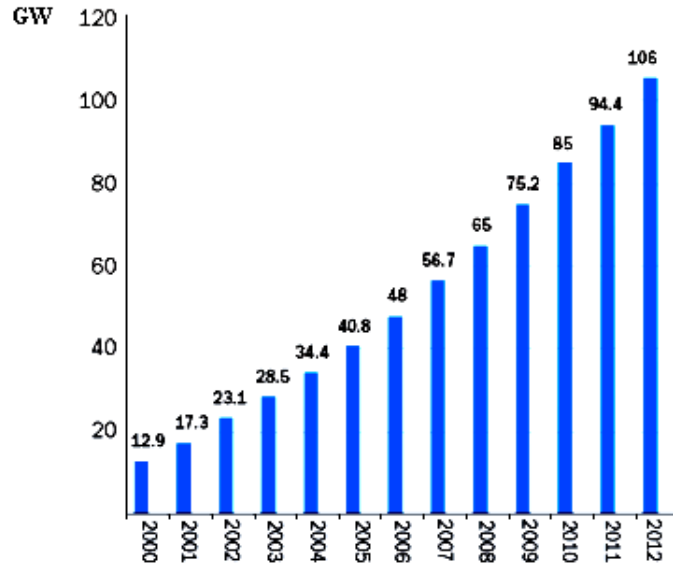


Figura 2.6: Potência cumulativa instalada na Europa em (GW) [EWEA 2012, 2013].

A evolução da capacidade instalada em Portugal apresentada na figura 2.7, desde 1996 a 2010 deve-se à implementação de um enquadramento legislativo específico e estável para fontes de energia renováveis, o que tem possibilitado um aumento da energia eólica, para atingir mais de 4000 MW instalados em 2011, capazes de produzir cerca de 15% da eletricidade consumida em Portugal.

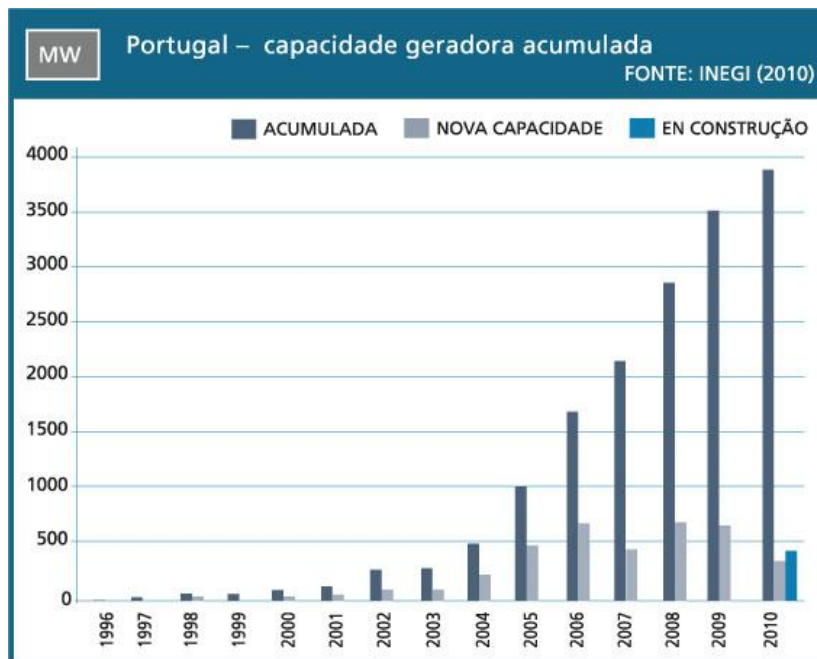


Figura 2.7: Portugal-capacidade geradora acumulada [ENEOP, 2012].

Em Portugal os parques eólicos são construídos em zonas do interior do país, devido à zona costeira portuguesa estar muito povoada. As zonas mais interiores são montanhosas o que maximiza o recurso eólico. Na zona costeira com reduzida povoação, como a zona da costa alentejana, foram construídos parques eólicos com menos aerogeradores instalados.

Os principais promotores de parques eólicos e respetivas quotas de mercado no fim de 2010 (parques ligados à rede) são apresentados na figura 2.8. De acordo com esta figura pode-se observar que os promotores EDP-R (EDP-Renováveis) e Iberwind são os que dominam o sector eólico em Portugal com uma elevada percentagem, 15,3% e 18%, respetivamente.

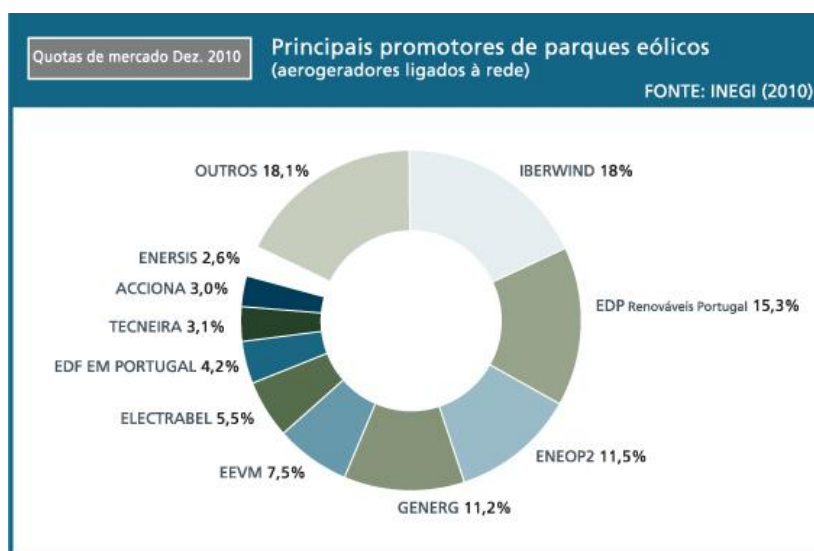


Figura 2.8: Principais promotores de parques eólicos [ENEOP, 2012].

Em 2012, Portugal atinge uma boa produção de eletricidade através da energia eólica. Como é apresentado na figura 2.9, a produção de energia eólica encontra-se na segunda posição, pelo que se pode verificar o resultado do investimento realizado neste sector.

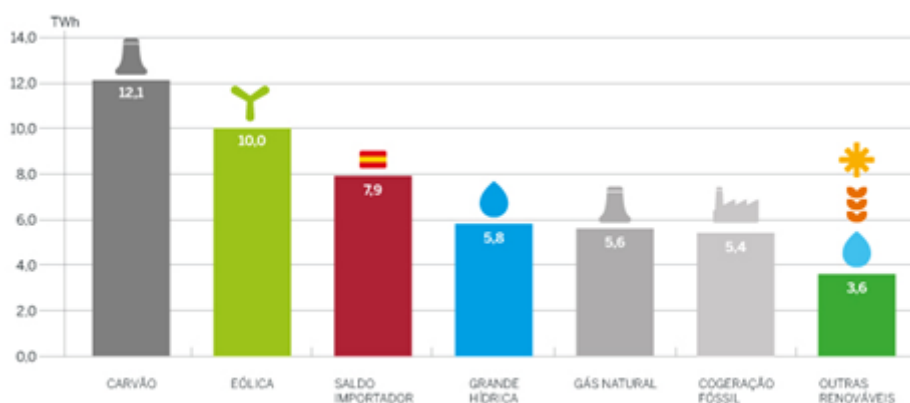


Figura 2.9: Produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental em 2012 [APREN, 2013].

Das energias renováveis a energia eólica teve um peso muito superior às outras como se pode verificar na figura 2.10, entre janeiro e maio de 2012.

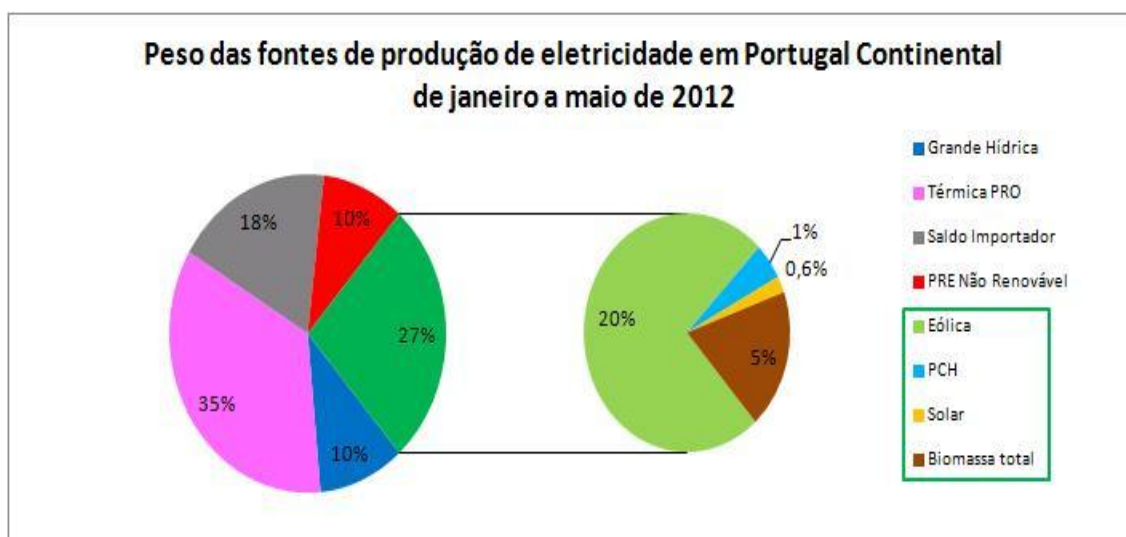


Figura 2.10: Peso das fontes de produção de eletricidade em Portugal Continental de janeiro a maio de 2012 [APREN, 2013].

2.7. Plano de Energias Renováveis para 2020

As metas definidas para o plano de energias renováveis para 2020, tem como objetivo melhorar a produção de energia no sector da eólica.

O Concelho de Ministros nº 29/2010, de 15 de Abril, admitiu a última Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020) e continua a dar às energias renováveis um papel fundamental na estratégia energética e nos objetivos projetados para o sector, com um

impacto muito significativo na economia portuguesa (APREN- (versão final do PNAER), 2012).

A ENE 2020 reúne objetivos da política energética determinada pelo 18º Governo, prologando-os para o ano 2020 e o objetivo é manter Portugal na liderança da revolução energética, no que respeita à utilização de energias renováveis.

A política energética nacional, ponderando o tributo das Fontes de Energia Renováveis (FER), tem os seguintes objetivos:

- Cumprir os compromissos nacionais no âmbito das políticas europeias de energia e de combate às alterações climáticas, consentindo que em 2020, 31% do consumo final bruto de energia, 60% da eletricidade produzida e 10% do consumo de energia no sector dos transportes rodoviários tenham origem em fontes renováveis.
- Consolidar o *cluster* industrial ligado à energia eólica e desenvolver novos clusters ligados às novas tecnologias do sector das energias renováveis certificando-se em 2020 um Valor Acrescentado Bruto (VAB) de 3800 milhões de euros e criando 100 mil novos postos de trabalho que se irão juntar aos 35 mil já existentes para a produção de energia elétrica com FER;
- Por em prática o desenvolvimento sustentável, criando condições para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo País em matéria de redução de emissões de gases com efeito de estufa, através de maior uso das FER e da eficiência energética.

Perante estes objetivos, a política energética para as FER, através da ENE 2020 determina também várias medidas, das quais se destacam as seguintes:

- Desenvolver, até 2012, um modelo tarifário que ajude a diminuir as tarifas de eletricidade, favorecendo os consumidores e desenvolvendo um quadro de sustentabilidade económica que permita o aumento a longo prazo do uso das energias renováveis.
- Atualizar o programa de microprodução, determinando metas e inserir um programa de miniprodução destinado a projetos com potências até 150 kW ou 250 kW em função das tecnologias.

Na estrutura da ENE 2020 existe um eixo inteiramente dedicado às FER, determinando metas e estratégias de progresso e promoção referentes às várias

tecnologias que compõem uma mistura das renováveis para 2020, numa visão de valorização do potencial dos recursos endógenos e na capacidade de desenvolvimento de valor numa aposta de uma maior diversificação das contribuições das FER.

O Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) tem novas medidas, de entre as quais, uma refere-se à eletricidade baseada em sistemas eólicos. Esta tem como objetivo disponibilizar novas formas de trabalho administrativo para a distribuição, receção e capacidade de potência aos parques eólicos. Como resultado prevê-se conseguir em 2015 uma capacidade instalada em energia eólica superior a 6000 MW e cerca de 6800 MW em 2020, em conjunto com a instalação de nova capacidade hídrica reversível para absorver os consumos de vazio da eólica. O desenvolvimento da produção nacional renovável apoia-se no aumento da ligação da capacidade instalada hídrica e eólica. A capacidade hídrica é reforçada e trará vantagens para condições favoráveis da gestão das bacias hidrográficas, enquanto dá ao sistema a resposta fundamental para fazer face variabilidade da produção eólica. Devido ao aumento da capacidade hídrica reversível, esta também colaborará para tornar viável a produção eólica nos períodos de menor consumo diminuindo os seus custos de produção.

Por fim temos uma avaliação prevista para cada tecnologia de renováveis com o intuito de conseguir os objetivos que são obrigatórios em 2020 e uma trajetória não final que nos indique as quotas de energia resultante de fontes renováveis nos setores da eletricidade, do aquecimento e arrefecimento assim como dos transportes.

Portugal tem de alcançar a meta para a qual a percentagem de energias renováveis no consumo final para o ano 2020 é de 31,0%, esta percentagem é a quinta mais elevada da EU (*European Union*) e tem dois objetivos essenciais: o progresso das FER coloca Portugal em posição de liderança em capacidade instalada térmica e elétrica, e o potencial que já existe para o desenvolvimento de novos projetos.

As tabelas seguintes, 2.1 e 2.2, apresentam as estimativas das diversas tecnologias baseadas em FER, para cumprirem os objetivos definidos para Portugal, considerando a disponibilidade dos recursos, a maturidade das tecnologias, os planos específicos esperados e a introdução das diversas medidas do progresso das FER. Os resultados estimados mencionam um aumento médio anual no período 2010 a 2020 de 6,8% para a potência instalada e 4,6% para a produção de energia elétrica.

Tabela 2.1: Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em FER para alcançar objetivos obrigatórios de 2020 e a trajetória provisória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da eletricidade em 2010-2014 [APREN- (versão final do PNAER) 2012].

	2005		2010		2011		2012		2013		2014	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Hidroeléctrica:	4 816	5 118	4 934	9 742	4 981	9 836	5 734	10 854	5734	10 854	6 026	11 238
1MW-10MW	323	381	410	827	457	920	503	1 013	503	1 013	550	1 108
>10MW	4 493	4 737	4 524	8 916	4 524	8 916	5 231	9 840	5 231	9 840	5 476	10 129
Da qual por bombagem³⁰	537	387	1 036	0	1 036	0	1 292	0	1 292	0	1 463	0
Geotérmica	14	55	25	163	25	163	25	163	28	182	30	195
Solar:	3	3	156	230	258	396	340	523	465	728	590	939
<i>Fotovoltaica</i>	3	3	156	230	228	336	300	443	385	568	460	679
<i>Solar concentrada</i>	0	0	0	0	30	60	40	80	80	160	130	260
Marés,ondas,oceanos	0	0	5	1	5	2	5	3	10	9	35	35
Eólica:	1 063	1 773	4 256	10 214	4 928	11 334	5 600	12 600	5 600	12 600	5 600	12 600
<i>onshore</i>	1 063	1 773	4 256	10 214	4 928	11 334	5 600	12 600	5 600	12 600	5 600	12 600
<i>offshore</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa:	476	1 976	647	2 400	722	2 671	812	2 991	862	3 191	907	3 358
<i>Sólida</i>	178	934	273	1 092	285	1 140	297	1 188	347	1 388	367	1 468
<i>Biogás</i>	9	34	39	138	53	184	80	280	80	280	105	368
<i>Biolíquidos³¹</i>	289	1 008	334	1 170	385	1 346	435	1 523	435	1 523	435	1 523
Total	6 372	8 925	10 023	22 751	10 919	24 402	12 516	27 133	12 699	27 563	13 188	28 364
Da qual em PCCE	369	1 304	437	1 536	499	1 751	560	1 967	560	1 967	560	1 967
Biomassa	369	1 304	437	1 536	499	1 751	560	1 967	560	1 967	560	1 967
<i>Sólida</i>	76	288	98	347	107	381	117	416	117	416	117	416
<i>Biogás</i>	4	8	5	19	7	24	8	28	8	28	8	28
<i>Biolíquidos</i>	289	1 008	334	1 170	385	1 346	435	1 523	435	1 523	435	1 523

Tabela 2.2: Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em FER para alcançar objetivos obrigatórios de 2020 e a trajetória provisória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da eletricidade em 2010-2020 [APREN- (versão final do PNAER) 2012].

	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Hidroeléctrica:	7 017	11 101	8 089	11 916	9 044	13 310	9 362	13 843	9 498	13 973	9 548	14 074
1MW-10MW	550	1 108	600	1 209	650	1 310	650	1 310	700	1 410	750	1 511
>10MW	6 467	9 993	7 489	10 707	8 394	12 001	8 712	12 533	8 798	12 562	8 798	12 562
Da qual por bombagem³²	2 454	0	3 238	0	3 898	0	4 216	0	4 302	0	4 302	0
Geotérmica	40	260	45	293	50	325	60	390	65	423	75	488
Solar:	720	1 157	860	1 389	1 005	1 629	1 160	1 895	1 325	2 178	1 500	2 475
<i>Fotovoltaica</i>	540	797	630	929	725	1 069	810	1 195	900	1 328	1000	1 475
<i>Solar concentrada</i>	180	360	230	460	280	560	350	700	425	850	500	1 000
Marés,ondas,oceanos	60	75	75	112	100	159	125	206	175	297	250	437
Eólica:	6 125	13 480	6 125	13 480	6 125	13 480	6 625	14 580	6 825	14 476	6 875	14 596
<i>onshore</i>	6 100	13 420	6 100	13 420	6 100	13 420	6 600	14 520	6 800	14 416	6 800	14 416
<i>offshore</i>	25	60	25	60	25	60	25	60	25	60	75	180
Biomassa:	907	3 358	922	3 411	922	3 411	937	3 463	937	3 463	952	3 516
<i>Sólida</i>	367	1 468	367	1 468	367	1 468	367	1 468	367	1 468	367	1 468
<i>Biogás</i>	105	368	120	420	120	420	135	473	135	473	150	525
<i>Biolíquidos³³</i>	435	1 523	435	1 523	435	1 523	435	1 523	435	1 523	435	1 523
Total	14 869	29 430	16 116	30 600	17 246	32 315	18 269	34 376	18 825	34 809	19 200	35 584
Da qual em PCCE	560	1 967	560	1 967	560	1 967	560	1 967	560	1 967	560	1 967
Biomassa	560	1 967	560	1 967	560	1 967	560	1 967	560	1 967	560	1 967
<i>Sólida</i>	117	416	117	416	117	416	117	416	117	416	117	416
<i>Biogás</i>	8	28	8	28	8	28	8	28	8	28	8	28
<i>Biolíquidos</i>	435	1 523	435	1 523	435	1 523	435	1 523	435	1 523	435	1 523

2.8. Tecnologia dos Parques Eólicos

2.8.1. Obstáculos ambientais /Efeito esteira

Quando se pretende instalar um aproveitamento de energia eólica é necessário ter em consideração as características do meio envolvente. Os obstáculos que se podem encontrar são edifícios, árvores, formações rochosas, entre outros. Todos estes elementos intervêm na redução significativa da velocidade do vento e são fontes de turbulência na sua proximidade. Quanto ao modo como o escoamento é afetado na área em que está envolvido o obstáculo, como é apresentado na figura 2.11, pode-se averiguar que a zona agitada pode prolongar-se até três vezes a altura do obstáculo, sendo maior na parte de trás do que na parte da frente.

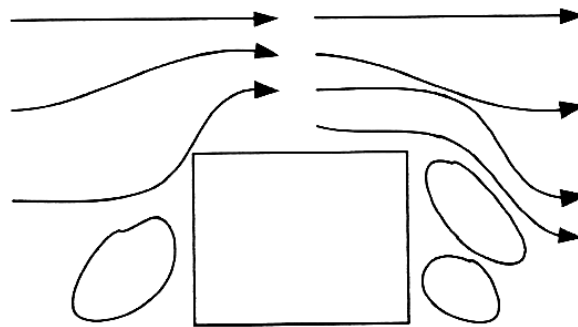


Figura 2.11: Escoamento na zona envolvente de um obstáculo [Castro, 2011].

A velocidade do vento diminui dependendo das dimensões e da porosidade do obstáculo. Como exemplo, pode-se dizer que um edifício tem porosidade nula, enquanto a porosidade das árvores varia entre verão e o inverno em função da quantidade das folhas.

Os obstáculos, encontrando-se a menos de 1 km medido segundo uma das direções predominantes, terão que ser usados no projeto de instalação de aerogeradores.

O estudo de impacto ambiental é muito importante na instalação dos aerogeradores, para a produção de energia eólica. Quando se vai instalar os aerogeradores os ambientalistas fazem muitos estudos no local, para ver se existe algum impacto ambiental tanto terrestre como aéreo.

Quanto ao impacto ambiental de um parque eólico, as opiniões dividem-se: há quem goste de ver nas montanhas os aerogeradores e diga que estes estão bem inseridos na paisagem levando à abertura de estradas que melhoram a acessibilidade no combate aos incêndios, outros não gostam e dizem que a sua presença é desfavorável.

Os aerogeradores produzem dois tipos de ruídos, um mecânico, ligado à caixa de velocidades (se existir), ao gerador e motores auxiliares, e um aerodinâmico ligado ao movimento das pás no ar. Existem no entanto, aerogeradores com ruído reduzido (nos sistemas que funcionam a velocidade variável, em que o gerador é de reduzida velocidade e a caixa de velocidades é ausente), mas não deixa de existir um zumbido quando a velocidade do vento é reduzida, embora quando a velocidade do vento for elevada o ruído é sobreposto ao ruído dos aerogeradores.

Uma característica dos sistemas eólicos que deve ser considerado é o *efeito de esteira*. O *efeito de esteira* deve-se ao efeito de um aerogerador, que a partir da energia do vento produz energia mecânica, de tal modo, o vento que “sai” do aerogerador possui uma energia muito reduzida comparativamente à do vento que “entrou” no aerogerador. Na zona traseira da turbina é gerada uma esteira de vento turbulento e com uma velocidade baixa. A turbulência provocada pelo aerogerador é apresentada na figura 2.12, pois descreve o *efeito de esteira*.



Figura 2.12: Efeito de esteira [Rui M.G.Castro, 2005].

Os aerogeradores quando são instalados dentro de um parque eólico, têm que cumprir normas, devido ao *efeito de esteira*. As normas que estes aerogeradores têm que cumprir para reduzir o *efeito de esteira* podem ser sintetizadas na colocação de cada aerogerador com uma distância entre cinco e nove diâmetros do rotor, na direção do vento e entre três e cinco diâmetros do rotor na direção perpendicular, como está apresentado na figura 2.13.

Com o cumprimento destas normas a energia perdida por *efeito de esteira* é estimada em 5%.

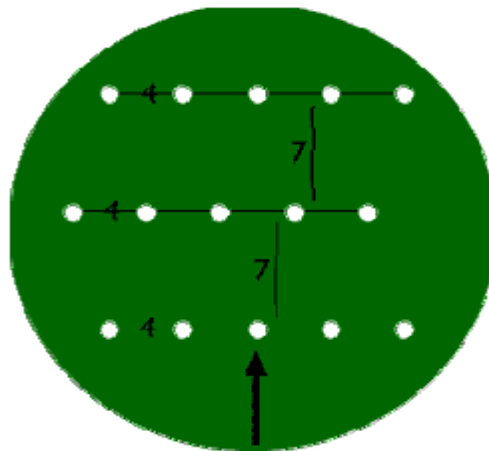


Figura 2.13: Aerogeradores posicionados num parque eólico [Rui M.G.Castro, 2005].

2.9. Aerogeradores

Os componentes que integram um aerogerador de eixo horizontal, que é o mais utilizado no mercado, são apresentados na figura 2.14.

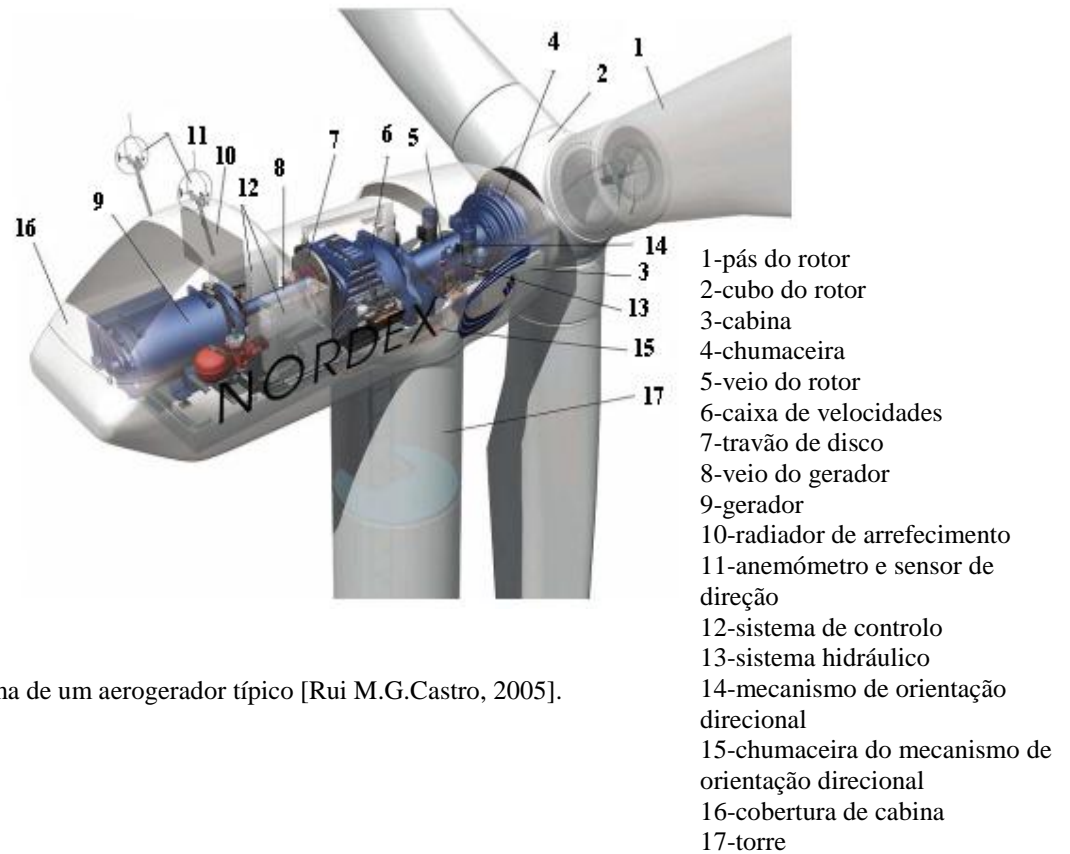


Figura 2.14: Esquema de um aerogerador típico [Rui M.G.Castro, 2005].

2.9.1. Rotor

O rotor tem duas possibilidades diferentes de ser colocado uma a montante e outra a jusante da torre. A primeira opção é denominada *upwind*, como se pode observar na figura 2.15 em que o rotor está na posição a montante da torre, ou seja, o vento não é perturbado pela torre. A outra opção é a *downwind*, representada como se pode observar na figura 2.16, em que o rotor está na posição a jusante da torre, o que possibilita o auto-alinhamento do rotor na direção do vento. Esta última opção tem deixado de ser utilizada, devido ao escoamento que é perturbado pela torre antes de incidir no rotor (Castro, 2011).

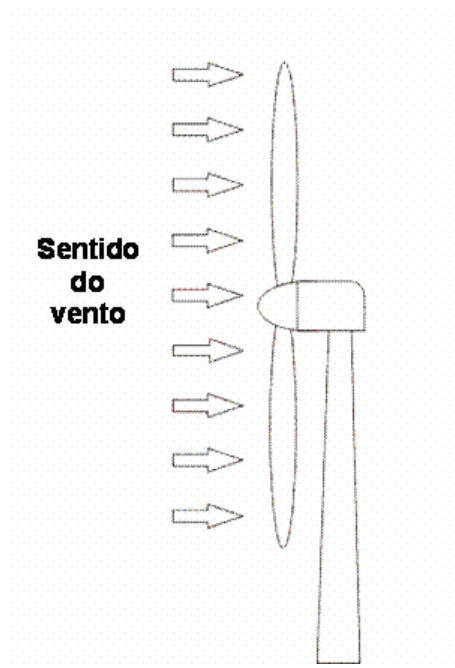


Figura 2.15: Aerogerador de eixo horizontal *upwind*
[Grenier, Damien 2012]

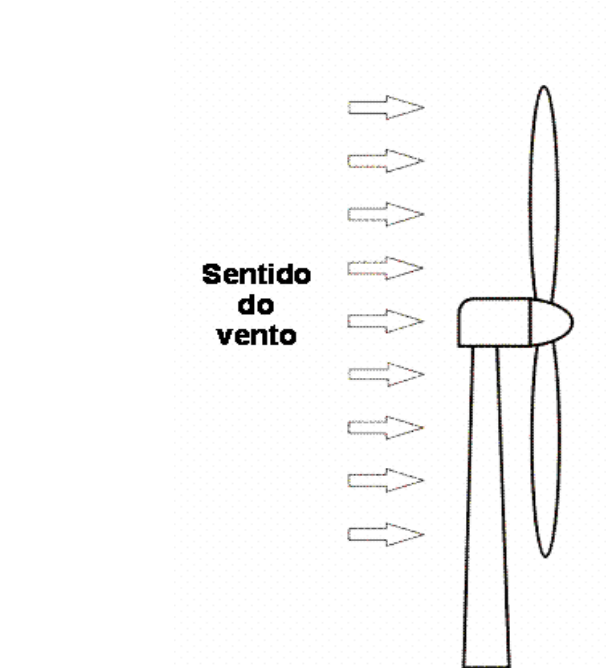


Figura 2.16: Aerogerador de eixo horizontal *downwind*
[Grenier, Damien 2012]

O cubo do rotor (local onde estão fixas as pás) precisa de oscilar, ou seja, apresenta um ângulo de inclinação relativamente à vertical, de forma a adaptar os desequilíbrios provenientes da passagem das pás, em frente da torre. A referência anterior também tem importância no desenho do rotor de duas pás, como se verifica na figura 2.17.

Os investigadores também estudaram o rotor de uma só pá, construindo protótipos mas sem desenvolvimento comercial, por isso não são utilizados.



Figura 2.17: Rotor de duas pás [M.G.Castro, 2005].

O tempo de vida útil do rotor depende dos esforços mecânicos a que é submetido ao longo dos anos e das condições ambientais, dependentemente da sua localização.

2.9.2. Cabina

Os equipamentos do aerogerador estão instalados na cabina, tais como, o veio principal, o travão de disco, a caixa de velocidades (se existir), o gerador e o mecanismo de orientação direcional.

O veio principal de reduzida rotação produz o binário primário do rotor para a caixa de velocidades. Estão instalados no veio principal as tubagens de controlo hidráulico dos travões aerodinâmicos, caso sejam precisos.

No caso de uma emergência, por causa de falhas no travão aerodinâmico ou para se realizarem manutenções é utilizado um travão mecânico de disco, que pode ser colocado no veio de baixa rotação ou no veio de alta rotação, depois da caixa de velocidades.

No veio de alta rotação o travão é reduzido e de baixo custo, porque o binário de travagem a fornecer é menor. Se houver uma falha na caixa do binário, o rotor fica sem controlo.

O rotor tem que ficar alinhado com a direção do vento, de forma a retirar a máxima energia possível. Para efetuar esta função, existe o mecanismo de orientação direcional, que é constituído por um motor, que recebe a informação de um sensor de direção do vento e faz com que, a cabina e o rotor rodem até que o aerogerador fique

bem colocado. No topo da cabine está posicionado um anemómetro e o sensor de direção.

Os dados obtidos da velocidade do vento são utilizados pelo sistema de controlo para realizar o controlo do aerogerador. A partir da velocidade do vento da ordem de 3,5 m/s (velocidade designada *cut-in*), o aerogerador entra em funcionamento e com os ventos superiores a 25 m/s (velocidade designada *cut-out*), o sistema de controlo efetua a paragem, de modo que a informação da direção do vento é utilizada como entrada do sistema de orientação direcional.

2.9.3. Torre

A torre sustenta a cabina e levanta o rotor até uma altura em que a velocidade do vento é mais elevada e menos turbulenta do que perto do solo. As torres mais recentes têm uma altura de cem ou mais metros, de tal forma que tem de ser dimensionadas para sustentar cargas significativas e também para aguentar a exposição ao tempo durante a sua vida útil, que é estimada em vinte anos.

Os fabricantes utilizam atualmente a torre do tipo tabular como é apresentado na figura 2.18.



Figura 2.18: Torre tabular [Rui M.G.Castro, 2005].

As torres tabulares podem ser construídas em aço ou betão, em que os variados troços são colocados com a ajuda de uma grua. Este tipo de torre tem mais segurança para as pessoas da manutenção, porque podem utilizar uma escada interior para ter acesso à plataforma da cabina.

2.10. Aerogeradores de Eixo Vertical e de Eixo Horizontal

O único aerogerador de eixo vertical, construído comercialmente com uma potência elevada foi uma máquina do tipo Darrieus. Este nome é uma homenagem de um engenheiro francês George Darrieus que propôs este tipo de aerogerador em 1931. O aerogerador do tipo Darrieus, com duas pás em forma de C («troposkiana») é apresentada na figura 2.19.



Figura 2.19: Aerogerador de eixo vertical do tipo *Darrieus* [Rui M.G.Castro, 2005].

Os aerogeradores de eixo vertical têm como vantagens:

- Uma construção simples;
- Não é sensível à direção do vento por isso dispensa o mecanismo de orientação direcional.

As suas desvantagens são as seguintes:

- Perto da base a velocidade do vento é reduzida;
- Incapacidade de auto-arranque, necessitando de meios externos (Castro,2011);
- É necessário o uso de espigas de suporte.

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais comercializados do mercado. Estes possuem tipicamente três pás com um perfil aerodinâmico [Grenier, Damien 2012].

Os aerogeradores de três pás são os mais utilizados devido ao bom compromisso entre o coeficiente de potência, custo e velocidade de rotação; como benefício a nível de estética são melhores comparativamente aos aerogeradores de duas pás. Na figura 2.20 está apresentado um aerogerador de eixo horizontal.



Figura 2.20: Aerogerador de eixo horizontal [CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2012].

2.11. Sistemas de velocidade variável e velocidade fixa

Nos últimos anos da década de 90, século passado, os sistemas têm vindo a ser melhorados no aproveitamento da energia do vento, isto é, os sistemas de velocidade fixa passaram a ser de velocidade variável.

Os sistemas de velocidade fixa são compostos por um gerador de indução, estes são colocados em ação através de uma caixa de velocidades e ligados diretamente à rede elétrica. Qualquer que seja a velocidade do vento, a velocidade de rotação da máquina é imposta pela frequência da rede elétrica (Ferreira, 2011).

Os benefícios que os sistemas de velocidade fixa possuem são a robustez e a fácil exploração, quando ligados a redes elétricas com elevada potência, com segurança do controlo estável da frequência. As desvantagens essenciais à utilização destes sistemas é o não controlo da energia reativa e limitação no controlo da energia dado que flutuações na velocidade do vento são transmitidas para o binário do veio mecânico e consequentemente para a rede, logo em redes fracas pode levar a flutuações na tensão da rede.

Os sistemas de conversão de energia eólica a velocidade fixa requerem dispositivos de controlo de energia reativa, ligados ao estator da máquina.

Os sistemas de conversão de energia eólica a velocidade variável são preparados para alcançar um rendimento aerodinâmico máximo, em que a velocidade de rotação do gerador é adaptada à velocidade do vento.

Os sistemas de velocidade variável retêm o binário do gerador aproximadamente constante, ou seja, as variações do vento são compensadas pelas variações da velocidade do gerador, ao contrário dos sistemas a velocidade fixa (Hansen, et al., 2004).

Os sistemas a velocidade variável na turbina eólica obtêm uma redução do ruído e da fadiga mecânica dos elementos do sistema e maximizam o rendimento aerodinâmico, obtêm o aumento de energia média anual, alcançando valores superiores na ordem de 10% (Mutschler, Hoffmann, 2002). O gerador de indução alimentado duplamente é usado com frequência em sistemas com potências superiores a 1,5 MW. A sua utilização pressupõe a ligação à turbina, propriamente dita, através de uma caixa de velocidades que pode ter múltiplas relações. Já que, construtiva e funcionalmente, não é viável a utilização de um número elevado de polos na máquina. O seu estator é ligado diretamente à rede, enquanto o rotor, com um enrolamento trifásico bobinado, é ligado à

rede através de um conversor cuja potência é da ordem de 30% da potência nominal da máquina (Blaajjerg, et al., 2010).

O conversor eletrônico possibilita o controlo do trânsito de potência com a rede e o controlo do ponto de funcionamento do gerador, admitindo um ajuste de velocidade muito próximo dos $\pm 25\%$ da velocidade síncrona (Bauer, et al., 2000). A energia que seria desperdiçada por efeito de Joule nos enrolamentos do rotor pode ser recuperada para a rede, isto para deslizamentos elevados, tal modo que, o conversor efetua a compensação do fator de potência e garante uma ligação suave à rede elétrica.

O gerador de indução duplamente alimentado tem como alternativa o gerador síncrono, convencional ou de ímanes permanentes, que pode ou não ter caixa de velocidades. Neste último caso contém uma terceira tendência dos sistemas de conversão de energia eólica, tendo os sistemas um acionamento direto do gerador.

Em comparação com o gerador de indução duplamente alimentado e a máquina síncrona convencional, a máquina síncrona de ímanes permanentes tem um rendimento superior, devido à eliminação das perdas de Joule no circuito elétrico do rotor e diminui as do circuito do estator, contudo tem uma maior fiabilidade e uma manutenção reduzida porque elimina o sistema de escovas e anéis.

Os geradores eólicos usados com acionamento direto são o gerador síncrono excitado eletricamente, ou com um sistema de excitação baseado em ímanes permanentes. Os geradores são projetados para velocidades reduzidas e binários elevados, ao contrário dos geradores standardizados embora sejam maiores e mais pesados, o volume dos materiais existentes são maiores, o que provoca um aumento de perdas, no caso de excitação convencional elétrica.

A máquina síncrona baseada em ímanes permanentes ajuda a diminuir aquelas tendências, o volume de material ativo é reduzido e o rendimento da máquina aumenta, ou seja, as perdas de excitação e de atrito nos contactos anéis escovas são eliminados, e possibilita a diminuição do passo polar, de tal modo que reduz as partes não ativas dos enrolamentos e as perdas Joule associadas.

Os sistemas de conversão de energia eólica de potências médias e elevadas, na ordem dos mega watts, sincronizados com a rede elétrica, não devem comprometer a estabilidade do sistema elétrico, devem contribuir ativamente para a recuperação das perturbações na rede elétrica, de forma similar às centrais convencionais, tendo de produzir potência ativa e reativa para a recuperação da tensão e da frequência nominais

e cumprir com os critérios da qualidade de energia (Blaabjerg, et al., 2010; Conroy, Watson, 2007; Tremblay, et al., 2006).

Os países mais desenvolvidos em energia eólica têm divulgado regulamentação neste sentido (Altin, et al., 2010), o que determina uma investigação contínua nos sistemas de potência, responsáveis pela troca de informação entre o gerador eólico e a rede elétrica.

As Figuras 2.21 e 2.22 representam os esquemas de controlo dos sistemas eólicos a velocidade variável para serem ligados à rede elétrica, baseando-se no gerador de indução duplamente alimentado e no gerador síncrono de ímanes permanentes com acionamento direto.

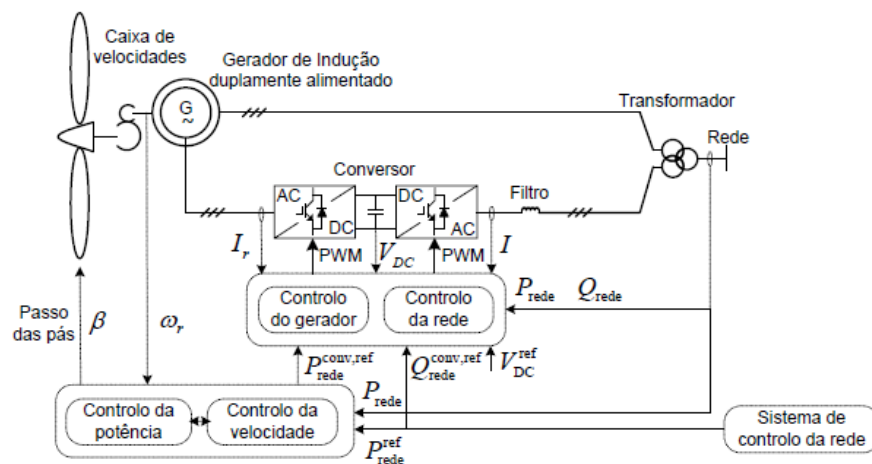


Figura 2.21: Sistema de conversão de energia eólica baseado no gerador de indução duplamente alimentado [Ferreira, Ângela 2011].

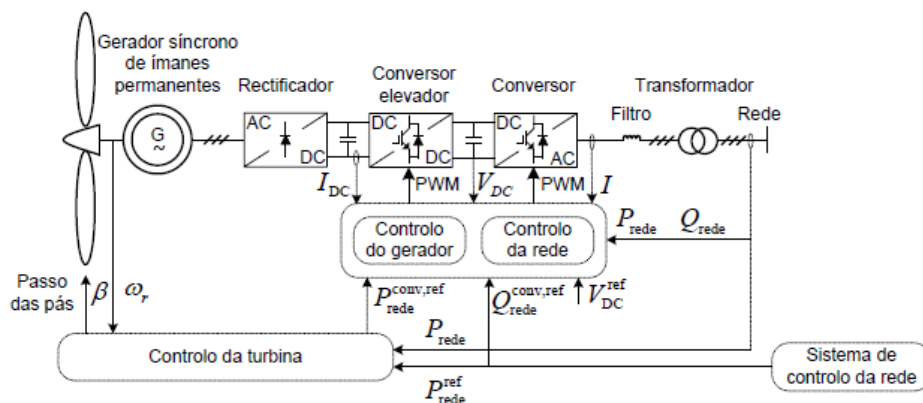


Figura 2.22: Sistema de conversão de energia eólica baseado no gerador síncrono de ímanes permanentes [Ferreira, Ângela 2011].

Das duas soluções apresentadas não é possível dizer qual delas a melhor de acordo com critérios económicos e/ou de fiabilidade da solução integral. Os geradores que incorporam as duas soluções representam impactes diferentes na fiabilidade e nos custos, de modo que os estudos feitos até agora não são conclusivos na totalidade (Arabian-Hoseynabadi, et al., 2010; Polinder, et al., 2006).

2.12. Controlo *Stall* /*Pitch*

Os sistemas de controlo têm como função a orientação do rotor, a velocidade e a carga, porém existem diferentes sistemas de controlo mecânico (velocidade, freio), aerodinâmicos (*Pitch/Stall*) e eletrónicos (controlo de carga) (CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2008).

Atualmente os aerogeradores usam dois sistemas diferentes de controlo aerodinâmico que são designados de controlo *Stall* e controlo *Pitch*.

O controlo *Stall* é um sistema passivo que reage à velocidade do vento, porém as pás do rotor são fixas no ângulo de passo e não podem rodar em torno do eixo longitudinal.

O ângulo de passo é selecionado para velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o escoamento em volta do perfil da pá do rotor separa-se da superfície da pá (*Stall*) como está apresentado na figura 2.23 o que diminui as forças de sustentação e aumenta as forças de arrasto.

As sustentações com menores e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para ser evitado o efeito *Stall*, que ocorre em todas as posições radiais das pás em simultâneo, e diminui a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal o que leva a um desenvolvimento deste efeito.

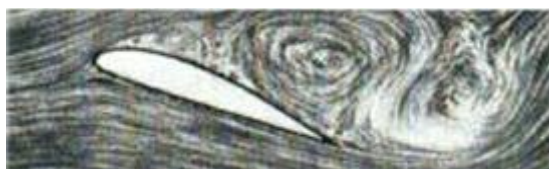


Figura 2.23: Fluxo separado *Stall* em volta do perfil [CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2008].

O controlo *Stall* dos aerogeradores é mais simples do que o controlo *Pitch* pois não necessita de um sistema de mudança de passo.

O controlo *Stall* em comparação com o controlo *Pitch* tem benefícios tais como:

- A ausência do sistema de controlo de passo;
- O cubo do rotor tem uma estrutura simples;
- A manutenção é reduzida devido ao número reduzido de peças móveis.

Os aerogeradores mais antigos utilizavam o controlo *Stall*, mas atualmente com o desenvolvimento das máquinas, os fabricantes estão a utilizar o controlo *Pitch*, que apresenta uma maior flexibilidade no funcionamento dos aerogeradores.

O controlo *Pitch* é um sistema ativo que precisa de informação do sistema. A potência nominal do gerador excede os seus limites devido ao aumento da velocidade do vento, as pás do rotor rodam em torno do seu eixo longitudinal, isto é, variam o ângulo de passo das pás de forma a regular a potência mecânica. Este sistema mantém o binário do gerador aproximadamente constante e as variações do vento são absorvidas pela velocidade do gerador.

Como é apresentada na figura 2.24, o escoamento em volta dos perfis das pás do rotor é muito aderente à superfície, produz sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.



Figura 2.24: Fluxo aderente ao perfil [CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2008].

O controlo *Pitch* é mais recente na tecnologia do que as de passo fixo, controladas por *Stall*, logo precisam de um sistema de variação de passo. Por isso possuem benefícios tais como:

- Controlo de potência ativa sob todas as condições de vento, incluindo regimes de fração de carga;
- Conseguem um controlo nominal mesmo em condições de baixa massa específica do ar;
- O controlo *pitch* tem assistência no arranque e efetua paragens de emergência.

Os principais fabricantes de aerogeradores, como exemplo a Enercon, utilizam o controlo *Pitch*, por este desempenhar um bom funcionamento nos seus aerogeradores.

2.13. Conclusão

Ao longo deste capítulo apresentou-se o estado de arte da energia eólica através da exploração das características funcionais mais relevantes. De um modo geral a evolução e a necessidade de utilização de uma fonte renovável no fornecimento da energia elétrica levou a um empenho no desenvolvimento da tecnologia de conversão de energia eólica, destacando-se os sistemas baseados em aerogeradores de eixo horizontal, a velocidade variável. Dentro das tecnologias disponíveis os sistemas atuais são baseados em geradores de indução duplamente alimentados e geradores síncronos de ímanes permanentes.

As referências bibliográficas utilizadas no capítulo têm como objetivo proporcionar uma visão global sobre as perspetivas atuais e futuras da energia eólica.

Capítulo 3

Técnica de *Data Envelopment Analysis* (DEA)

Program efficiency

3. Técnica de DEA (*Data Envelopment Analysis*)

3.1. Introdução

A técnica de DEA (*Data Envelopment Analysis*) permite avaliar a eficiência relativa de unidades homogêneas (unidades produtivas), que utilizam múltiplos *inputs* para produzirem múltiplos *outputs*. Essas unidades são designadas de DMUs (*Decision Making Units*). A homogeneidade das DMUs está relacionada com o facto de as DMUs efetuarem tarefas idênticas e utilizarem os mesmos *inputs* para produzir os mesmos *outputs*, variando a quantidade de *inputs* e *outputs* observados. Os *inputs* correspondem aos recursos utilizados enquanto que os *outputs* são os bens ou serviços resultantes do processo produtivo, como é representado na figura 3.1. O objetivo deste capítulo é descrever os conceitos básicos e os principais modelos da técnica de DEA: os modelos de VRS (rendimentos de escala variáveis) e de CRS (rendimentos de escala constantes) e as medidas de eficiência obtidas em cada modelo.

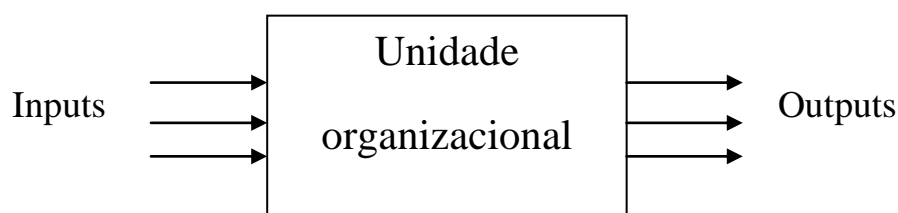


Figura 3.1: Processo de produção da técnica *Data Envelopment Analysis* [Vaz, Clara 2007].

O conjunto de todas as combinações possíveis entre múltiplos *inputs* e os múltiplos *outputs* associados às DMUs observadas em análise é designado por conjunto de possibilidades de produção (PPS) (Banker et al., 1984, Banker and Thrall, 1992).

A fronteira do conjunto de possibilidades de produção é definida pelo nível máximo de *outputs* obtido a partir de um determinado nível de *inputs* (orientação pelos *outputs*). A fronteira da tecnologia de produção é definida a partir da localização das DMUs eficientes, em vez de definir teoricamente a sua posição. A fronteira é constituída pelas DMUs eficientes que são ligadas através de segmentos de reta, em vez de assumir uma forma funcional teoricamente definida, o que significa que a técnica DEA é não paramétrica. A técnica DEA utiliza modelos de programação linear para

avaliar a eficiência de unidades produtivas. A eficiência avalia em que medida cada DMU realiza as suas operações, sem desperdício, ou seja, comparando os níveis observados de *inputs* e *outputs* da DMU com a fronteira. O resultado imediato da técnica de DEA é uma medida de eficiência relativa e não absoluta.

3.2. Avaliação da Eficiência

A medida de eficiência compara o rácio *output/input* da DMU avaliada com o valor deste rácio observado nas outras DMUs (Vaz, Clara, 2007). A medida de eficiência será sempre dependente da referência considerada para definir o máximo *output* produzido ou o mínimo *input* utilizado.

No caso de a DMU usar um *input* para a produção de um *output*, a eficiência de cada unidade pode ser calculada pelo rácio:

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{output}}{\text{input}} \quad (3.1)$$

No caso em que cada unidade utilize múltiplos *inputs* para a produção de múltiplos *outputs*, a eficiência é calculada pelo rácio:

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Soma ponderada de outputs}}{\text{Soma ponderada de inputs}} \quad (3.2)$$

Note-se que o rácio *output/input* é um rácio de produtividade, sendo medido em termos absolutos.

3.3. Eficiência e Produtividade DEA

A diferença entre os conceitos de produtividade e eficiência é exemplificada através da figura 3.2 (Mello, 2005). Esta figura 3.2 caracteriza um processo de produção em que cada unidade utiliza um *input* (*x*) para a produção de um *output* (*y*). Observe-se que as unidades B e C são DMUs eficientes (pois estão colocadas sobre a fronteira de eficiência). No entanto, a unidade C é a mais produtiva porque apresenta maior rácio *output/input*. Este facto pode ser observado comparando os declives das retas OC e OB. Assim, a unidade mais produtiva é aquela em que é possível definir uma reta tangente à

fronteira que passa pela origem (Vaz, Clara 2007). A unidade A é ineficiente e a menos produtiva quando comparada com as unidades B e C.

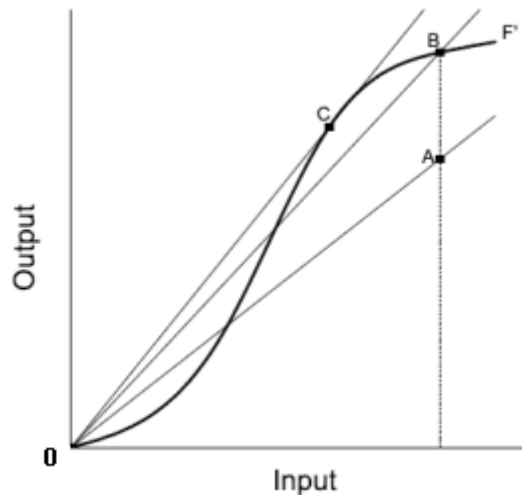


Figura 3.2: Diferença entre Eficiência e Produtividade [Vaz, Clara 2007].

3.4. Características dos modelos de DEA

3.4.1. Orientação dos Modelos de DEA

Conforme a perspectiva de avaliação de desempenho, a medida de eficiência para cada DMU pode ser calculada com orientação aos *inputs* ou orientação aos *outputs*.

Na perspectiva da orientação aos *inputs*, os valores de eficiência indicam quanto é que o nível de todos *inputs* pode ser proporcionalmente reduzido, mantendo os *outputs* constantes. A orientação pelos *outputs* mantém os *inputs* fixos. Neste caso, os valores de eficiência indicam quanto é que o nível de todos *outputs* pode proporcionalmente aumentar mantendo os *inputs* constantes. As duas medidas estão representadas na figura 3.3. Assim, a DMU ineficiente E se for projetada para o ponto E^* , torna-se eficiente aumentando o *output* para Y^{**} , mantendo o *input* em x . Se a DMU E for projetada para E^{**} torna-se eficiente reduzindo o *input* para X^{**} (Vaz, Clara 2007), mantendo o *output* em y .

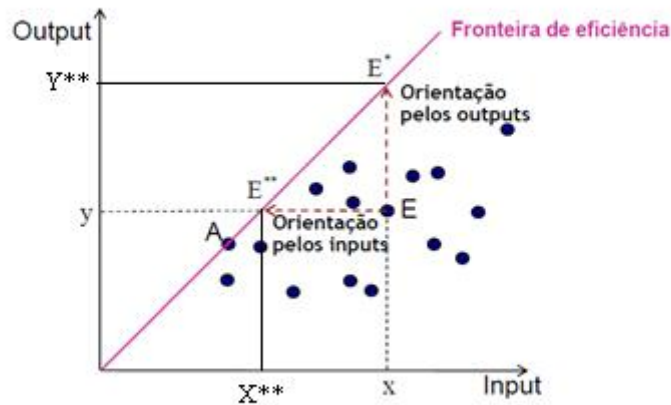


Figura 3.3: Orientação pelos *inputs* ou orientação pelos *outputs* [Vaz, Clara 2011].

O valor de eficiência de uma DMU está compreendido entre 0 e 1. A eficiência com orientação aos *outputs* e aos *inputs* são dadas pelas expressões (3.3) e (3.4), respetivamente. Note-se que a eficiência com orientação aos *outputs* é dada pelo inverso do fator máximo com que todos os *outputs* podem ser igualmente aumentados sem aumentar o nível de *inputs* utilizados.

$$\text{Eficiência (Output)} = \frac{x_E}{x_{E^*}} \quad (3.3)$$

$$\text{Eficiência (Input)} = \frac{y_{E^{**}}}{y_E} \quad (3.4)$$

Nesta tese irá ser utilizado a perspetiva da orientação pelos *outputs* (Vaz, Clara 2007).

3.4.2. Rendimentos à escala da fronteira de eficiência

Os rendimentos de escala são uma característica da fronteira de eficiência que indica as alterações nos *outputs* associados a uma alteração proporcional em todos os *inputs*. Esta noção só se aplica às DMUs eficientes. Se os *outputs* aumentam com a mesma alteração proporcional dos *inputs*, a DMU é caracterizada por rendimentos de escala constantes (CRS). Se os *outputs* variam menos do que a alteração proporcional

dos *inputs*, então a DMU caracteriza-se por rendimentos de escala decrescentes (DRS). Se os *outputs* variam mais do que a alteração proporcional dos *inputs*, então a DMU caracteriza-se por rendimentos de escala crescentes (IRS) (Vaz, Clara 2007).

Estas noções podem ser ilustradas na figura 3.4, em que se representam as fronteiras de eficiência, assumindo CRS e rendimentos de escala variáveis (VRS), no caso em que as DMUs utilizam um *input* para produzir um *output*.

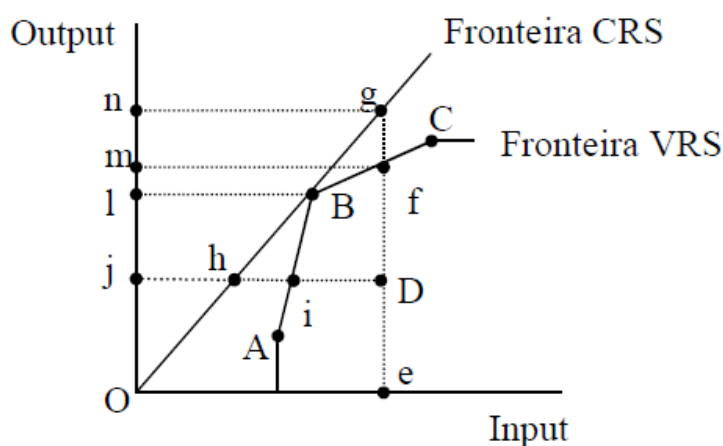


Figura 3.4: Fronteiras VRS e CRS [Vaz, Clara 2007].

A fronteira CRS corresponde à reta que passa na origem e na DMU B que é o ponto de produtividade máxima. A fronteira VRS é definida pelas DMUs eficientes (A, B e C) e pelos segmentos que as ligam. As DMUs A e C em termos de escala são ineficientes, devido ao facto de serem consideradas menos produtivas do que B. A DMU A apresenta rendimentos de escala crescentes (IRS) e a DMU C apresenta rendimentos de escala decrescentes (DRS). A DMU B tem rendimentos de escala constantes apresentando a produtividade máxima (Vaz, Clara 2007). Este ponto pertence simultaneamente às duas fronteiras.

3.4.3. Medidas de Eficiência

Com base nos rendimentos à escala da fronteira utilizada como referência para calcular a eficiência, podem ser calculadas as seguintes medidas: a eficiência técnica (TE), a eficiência técnica pura (PTE) e a eficiência de escala (SE). A TE é a medida de eficiência da DMU calculada tendo como referência a fronteira caracterizada por CRS. A PTE é a medida de eficiência da DMU calculada tendo como referência a fronteira

caracterizada por VRS. A SE mede o desvio entre as eficiências TE e PTE para cada DMU (equação 3.5) e é igual a:

$$SE = \text{Eficiência de escala} = \frac{TE}{PTE} \quad (3.5)$$

O que significa que,

$$TE = PTE \times SE \quad (3.6)$$

3.5. Formulação dos Modelos DEA

3.5.1. Modelo fraccionário com orientação aos *inputs*

Considerando que existem n DMUs ($j = 1, \dots, n$), em que cada uma utiliza m *inputs*, x_{ij} ($i = 1, \dots, m$) para produzir s *outputs*, y_{rj} ($r = 1, \dots, s$).

O modelo orientado pelos *inputs* para avaliar a eficiência da DMU j_0 , admitindo a existência de rendimentos CRS tem a formulação (3.7) (Charnes *et al.*, 1978).

$$\max \{e_{j_0} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r \times y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i \times x_{ij_0}}\}$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r \times y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \times x_{ji}} \leq 1 \quad \text{para cada DMU } j=1, \dots, n$$

$$v_i \geq \epsilon, i = 1, \dots, m$$

$$u_r \geq \epsilon, r = 1, \dots, s \quad (3.7)$$

O modelo possui duas variáveis, v_i e u_r , que correspondem aos pesos atribuídos aos *inputs* x_{ij} e *outputs* u_{rj} .

Este modelo (3.7) tem como finalidade maximizar o valor de eficiência da DMU j_0 , quando está sujeito a restrições que garantem que os pesos usados conduzem a resultados de eficiência menores ou iguais a 100% para todas as unidades observadas. O valor de ϵ é infinitesimal, o que confirma que os pesos são positivos. O valor ϵ é usado no modelo para garantir que todos os *inputs* e *outputs* são ponderados na avaliação de eficiência (Vaz, Clara 2007).

3.5.2. Modelo fraccionário com orientação aos *outputs*

A medida de eficiência pode também ser calculada considerando a orientação pelos *outputs*, cuja formulação é definida pelo modelo (3.8) (Charnes *et al.*, 1978).

$$\min \{h_{j_0} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i \times x_{ij_0}}{\sum_{r=1}^s u_r \times y_{rj_0}}\}$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{i=1}^m v_i \times x_{ij}}{\sum_{r=1}^s u_r \times y_{rj}} \geq 1 \quad \text{para cada DMU } j = 1, \dots, n$$

$$v_i \geq \epsilon, i = 1, \dots, m \tag{3.8}$$

$$u_r \geq \epsilon, r = 1, \dots, s \}$$

No modelo (3.8) a eficiência da DMU j_0 é determinado por $\frac{1}{h_{j_0}^*}$. Na orientação pelos *outputs*, a eficiência corresponde ao inverso do fator máximo ($h_{j_0}^*$), com que todos os *outputs* podem aumentar sem aumentar o nível de *inputs* utilizados. Se se considerar como referência a fronteira CRS, as medidas de eficiência com orientação

pelos *inputs* ou pelos *outputs*, são iguais, verificando-se que $e_{j_0}^* = \frac{1}{h_{j_0}^*}$ (o símbolo * significa que o valor corresponde à solução ótima).

3.5.3. Modelos de DEA lineares

O modelo fraccionário (3.8) é convertido no modelo linear (Charnes *et al.*, 1978), proposto em (3.9). Este modelo considera que a fronteira é caracterizada por CRS. O modelo proposto por (Banker *et. Al*, 1984), considera que a fronteira é caracterizada por VRS (Vaz, Clara 2007). Como já referido anteriormente, nesta tese, irá dar-se ênfase à perspectiva de avaliação de desempenho orientada aos *outputs*.

3.5.4. Modelo DEA orientado pelos *outputs* com CRS

O modelo (3.8) avalia a eficiência técnica de cada DMU. Aplicando a teoria da dualidade da programação linear o modelo (3.9) pode ser convertido na “ formulação da envolvente”, obtendo-se o modelo (3.10).

$$\text{Min } \{h_{j_0} = \sum_{r=1}^m v_i \times x_{ij_0}$$

$$\sum_{i=1}^s u_r \times y_{rj_0} = 1$$

$$\sum_{i=0}^s u_r \times y_{rj} - \sum_{r=1}^m v_i \times x_{ij} \leq 0, j=1, \dots, n$$

$$v_i \geq \epsilon, i = 1, \dots, m$$

$$u_r \geq \epsilon, r = 1, \dots, s \}$$

(3.9)

$$\text{Max } \{h_{j_0} = \delta_0 + \epsilon (\sum_{i=1}^m s_i + \sum_{r=1}^s s_r)$$

$$x_{ij_0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i, i=1, \dots, m$$

$$\delta_0 y_{rj_0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} + s_r = 0, r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j, s_i, s_r \geq 0, \forall j, i, r \}$$

(3.10)

No modelo (3.10), estão representadas as *slacks* (s_i e s_r), que correspondem a melhorias não radiais, associadas à diminuição de *inputs* (s_i) à expansão de *outputs* (s_r). Com base na solução ótima obtida no modelo (3.10) é possível obter os objetivos de melhoria que tornem a DMU eficiente.

O valor de λ_j^* das expressões (3.11) e (3.12) define a variável de intensidade associada à DMU j de referência, permitindo medir a contribuição dessa DMU para a definição dos objetivos da DMU avaliada (Vaz, Clara, 2007). A definição dos objetivos para os *inputs* correspondem à expressão (3.11) e para os *outputs* utiliza-se a expressão (3.12).

$$x_{ij0}^0 = x_{ij0} - s_i^* = \sum_{j=1}^n \lambda_j^* \times x_{ij} \quad (3.11)$$

$$Y_{ij0}^0 = \delta_0^* \times y_{rj0} + s_r^* = \sum_{j=1}^n \lambda_j^* \times y_{rj} \quad (3.12)$$

3.5.5. Modelo DEA orientado pelos *outputs* com VRS

Banker *et al.*, (1984) definiu o modelo de DEA para calcular a eficiência técnica pura tendo como referência a fronteira VRS. Assim, o modelo (3.13) corresponde à formulação dos pesos.

$$\text{Min } \{ h_{j_0} = \sum_{r=1}^m x_{ij_0} \times v_i + W$$

$$\text{Max } \{ h_{j_0} = \delta_0 + \epsilon (\sum_{i=1}^m s_i + \sum_{r=1}^s s_r)$$

Sujeito a:

$$x_{ij_0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i, i=1, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^s y_{rj_0} \times u_r = 1$$

$$\delta_0 y_{rj_0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} + s_r = 0, r = 1, \dots, s$$

$$- \sum_{i=1}^m y_{rj} \times u_r + \sum_{i=1}^m x_{ij} \times v_i + W \geq 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$W \in \mathbb{R}$

$$v_i \geq \epsilon, i = 1, \dots, m$$

$$\lambda_j, s_i, s_r \geq 0, \forall j, i, r \}$$

$$u_r \geq \epsilon, r = 1, \dots, s$$

$$j = 1, \dots, n \} \quad (3.13)$$

$$(3.14)$$

Neste modelo a eficiência da DMU j_0 é definida por $\frac{1}{h_{j_0}^*}$. Aplicando a teoria da dualidade, o modelo (3.13), pode ser convertido através da “ formulação da envolvente” obtendo-se o modelo (3.14).

O modelo VRS é obtido na formulação dos pesos através de uma constante adicional (w ou \bar{w}), e na formulação da envolvente através de uma restrição adicional ($\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$) (Vaz, Clara 2007). Neste modelo a fronteira deixa de ter a liberdade de procurar os pontos de produtividade máxima, sendo permitida a combinação linear das DMUs de tal forma que a soma de λ_j seja igual a 1 (Vaz, Clara 2007).

Nesta tese será utilizado o conceito de eficiência de Pareto-Koopmans (Charnes, A., *et al.*, 1985). Uma DMU é eficiente em termos de Pareto-Koopmans se não for possível aumentar qualquer um dos seus *outputs*, sem aumentar, pelo menos, um dos *inputs* e ou reduzir pelo menos um outro *output*. Isto significa que uma DMU é eficiente em termos de Pareto-Koopmans se a eficiência é igual a 100% e se as *slacks* associadas aos *inputs* e *outputs* forem nulas ($s_i = \emptyset, s_r = \emptyset$).

3.6. Outliers

De forma a analisar a homogeneidade das DMUs observadas (pressuposto da técnica de DEA), deve proceder-se à identificação de *outliers*. Estas DMUs assumem valores extremos relativamente aos observados nas restantes unidades da amostra. Utilizou-se o procedimento proposto em Andersen and Petersen (1989) para determinar os rankings das unidades eficientes. Neste procedimento, cada DMU é comparada com todas as unidades da amostra, excluindo ela própria, o que significa que a sua eficiência pode ter valores superiores a um, sendo designada por supereficiência.

Assim, considerou-se que os *outliers* correspondem a DMUs eficientes que excedem um determinado nível de supereficiência, devendo este último ser definido pelo analista.

3.7. Exemplo de aplicação da técnica DEA

Pretende-se ilustrar a aplicação da técnica DEA com um exemplo que considera cinco parques eólicos que utilizam como recurso a capacidade instalada em MW (*input*) para produzir o *output* energia elétrica em GWh. Os resultados dos modelos de DEA foram obtidos no programa EMS (*Efficiency Measuremen System*) (EMS, 2012). O quadro 3.1 apresenta os dados inseridos no programa EMS.

Tabela 3.1: Dados utilizados no programa EMS.

	<i>Input</i> : Capacidade Instalada (MW)	<i>Output</i> : Energia Elétrica (GWh)
Parque A	18,4	39,1
Parque B	9,9	25,6
Parque C	35,0	163,3
Parque D	6,9	21,0
Parque E	11,5	22,5

Na figura 3.5, a fronteira CRS é definida pelo parque C considerado eficiente e os restantes parques são ineficientes.

Utilizou-se o modelo CRS com orientação pelos *outputs*, para avaliar a eficiência de cada parque eólico na maximização de energia elétrica produzida com a capacidade instalada. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultados obtidos do modelo CRS com orientação pelos *outputs*, no programa EMS.

DMU	δ_0	Eficiência ($1/\delta_0$)	Benchmarks
Parque A	219,56%	45,5456%	C ($\lambda=0,53$)
Parque B	180,43%	55,4232%	C ($\lambda=0,28$)
Parque C	100,00%	100,0000%	-
Parque D	153,30%	65,2316%	C ($\lambda=0,20$)
Parque E	238,47%	41,934%	C ($\lambda=0,33$)

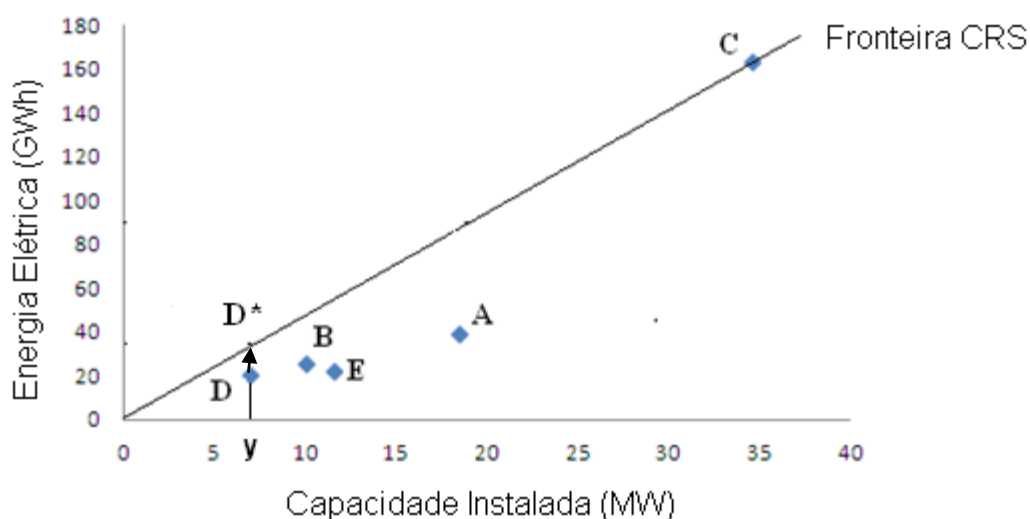


Figura 3.5: Fronteira CRS (rendimentos de escala constantes).

A fronteira CRS é definida pelo parque C, que é eficiente, com valor de eficiência igual a 100%. Os restantes parques são ineficientes, tendo valores de eficiência inferiores a 100%, como mostra a tabela 3.2 e se observa na figura 3.5.

Para cada parque ineficiente, o modelo indica os parques de referência (*peers* (*unidades de referência*)), isto é, as unidades com quem o parque se deve comparar e os objetivos de melhoria que resultam da combinação linear dos *peers* (unidades de

referência) determinada pela variável de intensidade λ_j . Os objetivos de melhoria são determinados pelas expressões 3.11 e 3.12. Por exemplo, o parque D é comparado com o parque C (como mostra a 4.^a coluna da tabela 3.2). O valor $\delta_0 = 153,30\%$, na tabela 3.2, indica o valor da expansão da energia elétrica para D se tornar eficiente. A medida de eficiência é o inverso desse valor e corresponde ao rácio como mostra a expressão (3.15).

$$TE = \text{Eficiência CRS} = \frac{y_D}{y_{D^*}} = \frac{1}{153,30\%} = 65,23\% \quad (3.15)$$

Os objetivos de melhoria propostos para o recurso e resultado da DMU D são calculados através das expressões (3.11) e (3.12) (Vaz, Clara, 2007), obtendo-se:

$$x_D^0 = 6,9 \approx 0,20 \times 35 = 7,0$$

$$y_D^0 = 153,30\% \times 21 = 32,193 \approx 0,20 \times 163,3 = 32,66$$

O ponto $(x_D; y_D) = (6,9; 32,193)$, representa o ponto D* na figura 3.5 ou seja, a DMU D para ser eficiente tem que produzir 32,193 GWh com o nível de potência atual.

A tabela 3.3 apresenta o resultado do modelo de DEA com VRS, com orientação pelos *outputs*. Este modelo avalia a capacidade de cada parque em maximizar a energia elétrica produzida com a potência instalada, tendo como referência a fronteira VRS.

Na figura 3.6 a fronteira VRS é definida pelos parques D e C, considerados eficientes, enquanto, os parques A, B, e E são ineficientes.

Tabela 3.3: Resultados obtidos do modelo VRS com orientação pelos *outputs* no programa EMS.

DMU	δ_0	Eficiência ($1/\delta_0$)	<i>Benchmarks</i>
Parque A	202,65%	49,3462%	C,D ($\lambda = 0,41$) ($\lambda = 0,59$)
Parque B	141,38%	70,7314%	C,D ($\lambda = 0,11$) ($\lambda = 0,89$)
Parque C	100,00%	100,0000%	-
Parque D	100,00%	100,0000%	-
Parque E	196,87%	50,7944%	C,D ($\lambda = 0,16$) ($\lambda = 0,84$)

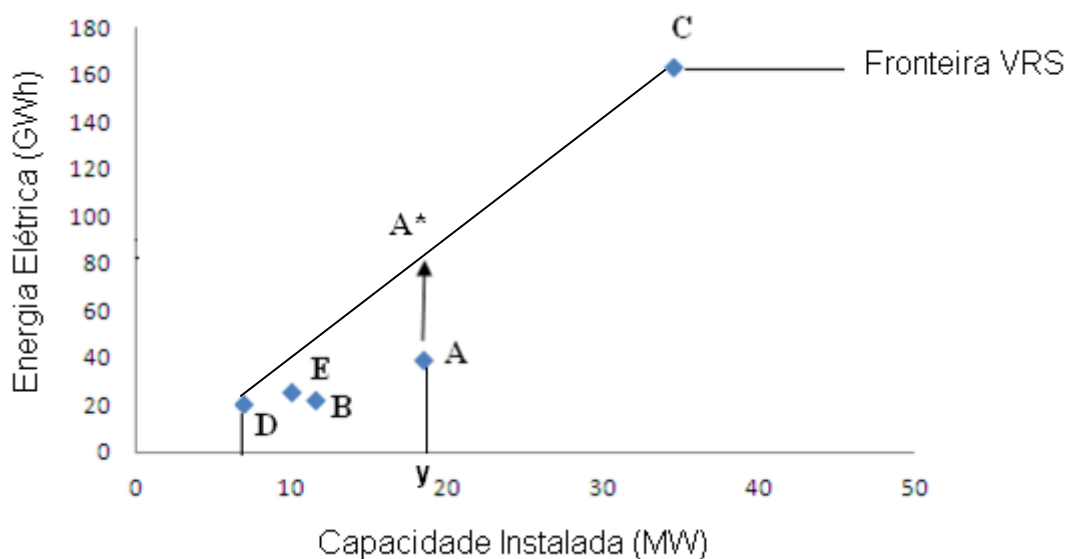


Figura 3.6: Fronteira VRS (rendimentos de escala variáveis).

Estes resultados obtidos no programa EMS confirmam a avaliação de desempenho observado nos parques em estudo. Por exemplo, o parque A é comparado com os parques (C e D), com $\lambda=0,41$; $\lambda=0,59$ (tabela 3.3), respetivamente. No entanto, para a DMU A ser eficiente, é preciso aumentar o seu *output* desde o ponto A até ao ponto A*.

A PTE_A é o inverso da expansão da energia elétrica e corresponde ao rácio y_A/y_{A^*} como mostra a expressão 3.16.

$$PTE_A = \frac{y_A}{y_{A^*}} = \frac{1}{202,65\%} = 49,35\% \quad (3.16)$$

Os objetivos para o recurso e o resultado da DMU A correspondem ao ponto A* e são calculados através das expressões (3.11) e (3.12).

$$x_A = 18,4 \approx 35 \times 0,41 + 6,9 \times 0,59 = 18,421$$

$$y_A = 163,3 \times 0,41 + 21 \times 0,59 = 79,343 \approx 39,1 \times 202,65\% = 79,236$$

O ponto $(x_A, y_A) = (18,4; 79,3)$ indica as quantidades ótimas de *input* e *output* que tornam o parque A eficiente, correspondentes ao ponto A* na figura 3.6. Estes

objetivos de melhoria foram obtidos pela combinação linear dos *inputs* e *outputs* observados pelas DMUs (C e D), que são os *benchmarks* de A.

3.8. Program efficiency

Charnes *et al.* (1981) propuseram o método *program efficiency* para comparar duas escolas de diferentes tipos, ou seja, as que aplicavam um programa específico (*Program Follow through*) e as outras escolas que não aplicavam esse programa.

O método *program efficiency* está ilustrado na figura 3.7. Considere-se dois grupos de DMUs que aplicam os programas A e B. Cada DMU utiliza dois *inputs* (X_1 e X_2) para produzir um *output* (Y). Para facilitar a representação das três variáveis no gráfico, cada *input* é normalizado pelo valor do *output*, obtendo-se $\frac{X_1}{Y}$ e $\frac{X_2}{Y}$.

A primeira etapa do método consiste em aplicar o modelo DEA às DMUs pertencentes a cada programa, obtendo-se o valor de eficiência de operação. Este valor de eficiência relativa de cada DMU é o resultado da comparação com as DMUs eficientes do mesmo programa. Na figura 3.7 a eficiência de operação da DMU b do programa B é igual a $\frac{Ob'}{Ob}$. Após a avaliação da eficiência de operação das DMUs em cada programa, elimina-se a ineficiência detetada de natureza radial e não radial. Desta forma cada DMU é projetada numa zona eficiente da fronteira do conjunto de possibilidades de produção.

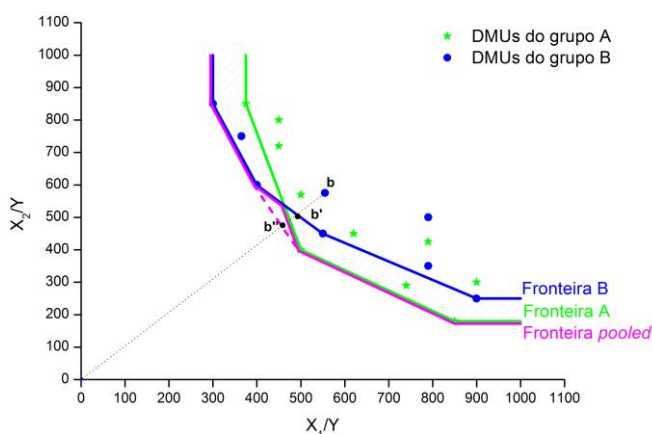


Figura 3.7: Representação gráfica do método *program efficiency*, [Vaz, Clara 2007].

A segunda etapa do método consiste em avaliar em conjunto a eficiência das DMUs de todos os programas livres de ineficiência relativa à eficiência de operação

(Vaz, Clara 2007). Nesta avaliação considera-se a fronteira *pooled* que é obtida quando se consideram todas as DMUs. Para cada unidade obtém-se um valor de eficiência, que é medido em relação à fronteira *pooled*. Esta medida é apenas atribuída às características do programa e não à atividade de gestão interna da unidade, sendo designada por *program efficiency*. No exemplo, o valor da *program efficiency* para a unidade b que é igual a $\frac{Ob''}{Ob'}$. Assim, para cada DMU pode-se obter uma medida de eficiência global que corresponde ao produto de duas componentes: *program efficiency* e eficiência de operação. Assim, a unidade b tem como eficiência global $\frac{Ob''}{Ob}$ que pode ser decomposta em $\frac{Ob''}{Ob'} \times \frac{Ob'}{Ob}$ (Vaz, Clara 2007).

Para o conjunto de DMUs relativas a cada programa, o valor do *program efficiency* é igual à média aritmética dos valores de *program efficiency* em relação a cada DMU. Este valor mostra em que medida a fronteira de um programa está próxima da fronteira *pooled*. No caso em que o valor médio do *program efficiency* está próximo de 100% indica que o desempenho das unidades desse programa, não é penalizado pelas características do programa (Vaz, Clara 2007).

3.9. Conclusão

Ao longo deste capítulo apresentou-se os conceitos base e alguns modelos da técnica de DEA (*Data Envelopment Analysis*). Aplicou-se a técnica DEA a dois exemplos, utilizando-se os modelos CRS e VRS, o que permitiu visualizar a diferença entre eles e o tipo de resultados que é possível obter com cada um deles.

Os modelos DEA são utilizados para avaliação do desempenho dos parques eólicos e vai-se dar ênfase à perspectiva de orientação pelos *outputs*.

No próximo capítulo a técnica DEA vai ser utilizada para avaliar o desempenho de parques eólicos, sendo utilizado o modelo CRS, e na perspectiva de orientação pelos *outputs*.

Capítulo 4

Avaliação de desempenho dos parques eólicos através da técnica DEA

4. Avaliação do Desempenho dos Parques Eólicos com a técnica DEA

4.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho dos parques eólicos utilizando a técnica de DEA. A amostra de parques eólicos estudada inclui os parques pertencentes a dois promotores a atuar em Portugal: EDP-R e Iberwind. A EDP-R detém trinta e cinco parques enquanto que a Iberwind gere trinta e um parques.

Os resultados obtidos no modelo DEA permitem definir os parques eficientes e ineficientes. Para estes últimos é possível identificar os parques *benchmarks* com quem se devem comparar e definir os objetivos de melhoria de desempenho.

4.2. Modelo de DEA

Nesta secção definem-se os *inputs* e *outputs* do modelo de DEA utilizado para avaliar o desempenho dos parques. Para isso, estudaram-se os *inputs* e *outputs* relativos à operação dos parques, procedendo-se à recolha de dados disponíveis. Consideram-se como *inputs* a capacidade instalada (MW), o número de aerogeradores e a disponibilidade do vento (horas), e como *output* a energia elétrica produzida (GWh), como está apresentado na figura 4.1. Considera-se a perspetiva de avaliação de desempenho dos parques orientada aos *outputs*. De acordo com a metodologia proposta, o modelo de DEA utilizado permitirá avaliar a capacidade de um parque de maximizar a produção de energia elétrica com os recursos que detém e o potencial eólico disponível.

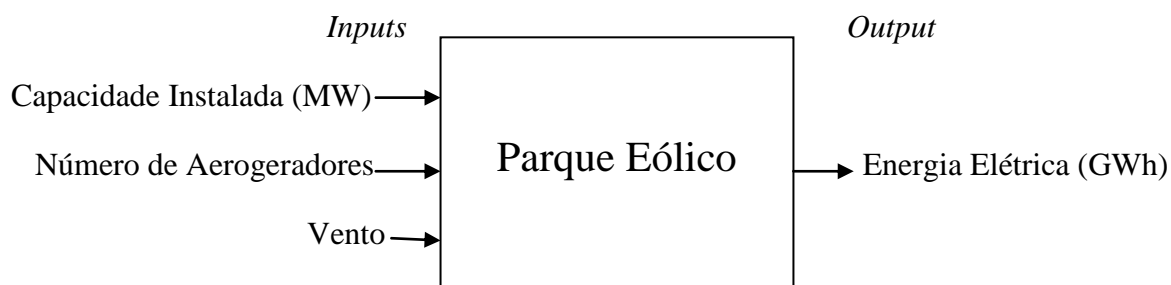


Figura 4.1: Os *inputs* e *output* de cada parque eólico

A capacidade instalada (MW) evidencia a dimensão de cada parque eólico e relaciona-se diretamente com a sua capacidade de produzir energia elétrica.

O número de aerogeradores responsáveis pela conversão da energia cinética do vento em energia elétrica, associado à potência instalada, está relacionado com o *layout* do parque.

A disponibilidade do vento é essencial para a produção de energia elétrica, porque sem esse recurso natural os aerogeradores não funcionam. Para se obter os dados do vento, calculou-se para os anos 2010 e 2011 o número de horas do vento entre as velocidades de *cut-in* (3,5 m/s) e *cut-out* (25 m/s) (Anexo A) em cada estação meteorológica, situada o mais próximo possível dos parques em análise.

O *output* energia elétrica (GWh) traduz a quantidade de energia produzida em cada parque eólico. Este *output* é o produto final da operação dos parques.

A capacidade instalada (MW), o número de aerogeradores e energia produzida (GWh) foram obtidos através de dados publicados por cada promotor dos parques eólicos em estudo, e os dados do vento foram obtidos através de uma pesquisa intensiva. Estes dados foram obtidos através de uma base de dados disponível no site SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) (SNIRH, 2012). O SNIRH tem informação das estações meteorológicas do país, a partir das quais se obtiveram os dados do vento.

Devido à dificuldade de se obter os dados do vento em cada parque eólico, optou-se por dividir os parques eólicos em zonas, em que se considerou que o comportamento do vento em cada zona seria similar.

Os parques eólicos dos diferentes promotores foram divididos em seis zonas: Minho e Douro Litoral, Viseu e Vila Real, Nordeste Transmontano; Beiras; Oeste e, finalmente, Algarve e Costa Alentejana. Para cada zona identificou-se a estação meteorológica, de acordo com o apresentado nos Anexos A e B. Assim, o perfil de vento utilizado para cada parque é o que está presente na estação meteorológica afeta à zona onde está inserido o parque. Utilizaram-se os dados relativos aos anos 2010 e 2011, uma vez que não havia dados disponíveis do vento, em anos anteriores. Os resultados do modelo de DEA foram obtidos com o programa EMS tendo-se concluído que o modelo mais adequado é o CRS, uma vez que os valores de eficiência com o modelo VRS são, em média, próximos dos obtidos no modelo CRS. Devido à capacidade instalada nos parques Açor, Serra Mú e Lagoa Funda ser diferente nos anos 2010 e 2011 optou-se por os retirar da análise efetuada. Assim, o estudo incidiu sobre o

grupo de parques gerido pela EDP-R que inclui trinta e três parques eólicos e o grupo de parques detido pela Iberwind que inclui trinta parques.

De acordo com Dyson *et al* (2001), o modelo DEA, para ser discriminatório do valor de eficiência atribuído às DMUs, deve usar um número mínimo de DMUs pelo menos igual a $2 \times (m \times s)$, em que m é o número de *inputs* e s é o número de *outputs* utilizados. Assim, neste estudo, o número mínimo de DMUs necessário é $2 \times (3 \times 1) = 6$. Este pressuposto é verificado nos dois promotores dos parques eólicos em análise.

Em termos de tecnologia empregue, verificam-se algumas diferenças entre os promotores. De um modo geral, a tecnologia utilizada pelo promotor EDP-R nos seus parques eólicos é a seguinte: o modelo mais utilizado por este promotor é a Enercon que equipa treze parques eólicos, relativamente às outras marcas dez parques eólicos utilizam a marca Ecotècnia e Gamesa; a GE Wind Energy encontra-se em quatro parques eólicos, e os restantes seis utilizam modelos de Bónus (Siemens Wind Power A/S) e Vestas. A potência unitária dos aerogeradores varia entre 500 kW e 1670 kW. O gerador mais utilizado nos parques eólicos é do tipo gerador de indução, utilizado em dezanove parques, enquanto o gerador síncrono é utilizado em catorze parques eólicos (Anexo C).

Quanto à tecnologia empregue pelo promotor Iberwind, verifica-se que os modelos Nordex e Vestas são utilizados em onze parques, os modelos Enercon e GE Wind Energy são utilizados em três parques eólicos e o modelo Wind Wind é utilizado em um parque eólico os modelos Vestas e Nordex são utilizados em simultâneo no parque Igreja Nova. O tipo de gerador mais utilizado nos parques eólicos do promotor Iberwind é o gerador de indução, utilizado em vinte parques enquanto o gerador síncrono é utilizado em onze parques eólicos. Quanto à potência unitária, esta varia entre os 500 kW e 3000 kW. O parque eólico com menos aerogeradores instalados é o parque Borninhos com apenas um aerogerador e os parques com mais aerogeradores instalados são Pampilhosa (38 aerogeradores), Chão Falcão (35 aerogeradores) e Candeeiros (37 aerogeradores) (Anexo D).

4.3. Caracterização do potencial de vento em cada parque eólico

Nesta secção pretende-se modelar a variável vento a incluir no modelo. Cada estação meteorológica disponibiliza dados da velocidade média, percentil 75% e velocidade do vento em cada hora do dia, entre outras. Pretende-se identificar a medida do vento que traduza melhor as condições de geração de energia elétrica.

Assim, estudaram-se três variáveis: (a) velocidade média do vento, (b) percentil 75% da velocidade do vento e o (c) número de horas por ano em que a velocidade do vento está entre os valores de *cut-in* e *cut-out*. O objetivo do estudo é avaliar a sensibilidade dos resultados obtidos ao tipo de variável utilizada. Os dados foram recolhidos nas estações meteorológicas disponíveis em SNIRH. Definida cada uma das variáveis propostas para modelar a disponibilidade do vento, obtiveram-se os valores das três eficiências para cada promotor, EDP-R e Iberwind. No programa EMS, utilizaram-se os dados relativos aos anos 2010 e 2011 (Anexo E.1 e E.2) e depois compararam-se os resultados do modelo de DEA, com o vento modelado de acordo com as três variáveis identificadas.

No promotor EDP-R, a diferença observada nos valores de eficiência varia entre 0 e 9% em 2011 (Anexo E.1).

No promotor Iberwind, as diferenças observadas nos valores de eficiência variam entre 0 e 2% em 2011, como mostra o (Anexo E.2). O comportamento da diferença observada é similar em 2010 (com exceção do parque Meroicinha, do promotor Iberwind, para o qual se obteve um máximo de 25%).

Neste estudo, como os valores da eficiência foram similares nas três variáveis, optou-se pela variável número de horas por ano da velocidade do vento entre os valores *cut-in* e *cut-out* para avaliar o desempenho dos parques eólicos da EDP-R e Iberwind, porque esta variável reflete melhor as condições de geração de energia elétrica. Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os valores da média, desvio padrão e mínimo de cada valor de eficiência obtido para a EDP-R e Iberwind.

Da análise do número de horas disponíveis de vento, para 2010 e 2011, verificou-se que o número de horas de vento disponíveis nos parques é mais elevado em 2010 do que em 2011, corrobora a redução da energia elétrica produzida nos parques eólicos em 2011.

Tabela 4.1: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor EDP-R obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*) e percentil 75%).

Promotor EDP-R						
Modelo CRS						
2010			2011			
	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (número de horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (número de horas)	Eficiência (Percentil 75%)
Média	82,30%	82,81%	82,23%	80,66%	82,05%	80,91%
Desvio Padrão	15,21%	14,97%	15,21%	16,09%	15,76%	16,00%
Mínimo	34,05%	33,97%	34,19%	34,42%	34,09%	34,34%

Tabela 4.2: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor Iberwind obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*) e percentil 75%).

Promotor Iberwind						
Modelo CRS						
2010			2011			
	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (número de horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (número de horas)	Eficiência (Percentil 75%)
Média	75,98%	75,30%	75,92%	72,12%	71,78%	72,06%
Desvio Padrão	11,91%	12,33%	11,86%	12,74%	12,86%	12,80%
Mínimo	54,02%	53,55%	54,14%	47,81%	47,01%	47,54%

4.4. Detecção de *Outliers*

A análise da existência de *outliers* na amostra de parques eólicos é efetuada utilizando a metodologia referida na secção 3.6. Avaliou-se a supereficiência dos parques e concluiu-se que não é necessário excluir unidades da análise. Os resultados de supereficiência obtidos para o promotor Iberwind e EDP-R estão apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, respetivamente.

No promotor Iberwind, o parque eólico Candeeiros, que tem um valor de supereficiência mais elevado, em 2011 (supereficiência = 189,51%), não pode ser excluído, uma vez que é considerado *benchmark* pela entidade promotora, como referido no relatório de contas (Iberwind, 2012)

No promotor EDP-R, o parque eólico Coentral/Safra tem o maior valor de supereficiência em 2011 igual a 178,89%, optando-se por não o excluir, dado que esta medida não foi considerada suficientemente elevada, tendo em conta o valor 189,51%, obtida anteriormente para o parque Candeeiros.

Tabela 4.3: Valores de supereficiência dos parques do promotor EDP-R.

CRS, 2010 Promotor EDP-R		CRS, 2011 Promotor EDP-R	
		EAlto Arganil	100,81%
ES.Alvoaça	103,33%	ES.Alvoaça	102,14%
ECabeço Rainha II	104,58%	ECabeço Rainha II	100,60%
ECoentral/Safra	123,54%	EGuerreiros	106,24%
EPadrela	133,33%	ECoentral/Safra	178,89%
		EPadrela	122,11%

Tabela 4.4: Valores de supereficiência dos parques do promotor Iberwind.

CRS, 2010 Promotor Iberwind		CRS, 2011 Promotor Iberwind	
IAchada	106,33%	IAchada	106,77%
ICandeeiros	139,02%	ICandeeiros	189,51%

4.5. Avaliação do desempenho dos parques eólicos

4.5.1. Avaliação da eficiência de operação dos parques eólicos do promotor EDP-R

Nesta secção, avalia-se o desempenho dos parques eólicos do promotor EDP-R através do modelo CRS (3.10) para os anos 2010 e 2011 (Anexos F.1). Na tabela 4.5 estão apresentados os resultados para o modelo CRS.

Tabela 4.5: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor EDP-R com o modelo CRS.

Promotor EDP-R		
	Eficiência 2010	Eficiência 2011
Média	82,81%	82,05%
Desvio padrão	14,97%	15,52%
Mínimo	33,97%	34,09%
Número de <i>benchmarks</i>	5	6

O grau de heterogeneidade observado é similar nos dois anos. A conclusão que se pode tirar dos resultados apresentados na tabela 4.5 é que o potencial de melhoria dos parques ineficientes da EDP-R é elevado sendo ligeiramente superior em 2011 (em média $\frac{1}{82,81\%} = 120,76\%$ em 2010 e $\frac{1}{82,05\%} = 121,88\%$ em 2011).

Nesta avaliação, o promotor EDP-R tem seis parques eólicos eficientes no ano 2011. O promotor EDP-R deverá identificar as boas práticas de operação dos *benchmarks* e difundir estas práticas pelos parques ineficientes nesta análise.

4.5.1.1. Estudo dos *Benchmarks*

Os *benchmarks* observados no ano 2011 apresentam-se na tabela 4.6. Esta tabela apresenta os parques eólicos utilizados como *benchmarks* pelas unidades ineficientes (Anexo G.1). Os parques Cabeço da Rainha II e Serra de Alvoaça não são utilizados como referência para os parques eólicos ineficientes.

Tabela 4.6: Características dos *Benchmarks* dos parques eólicos para a EDP-R.

Parques <i>Benchmarks</i>	n.º de vezes usado como <i>Benchmark</i>	Capacidade Instalada (MW)	Número de Aerogeradores	Número de horas do Vento	Energia Elétrica (GWh)
Guerreiros	17	18,0	9	3187	51,3
Padrela	14	7,5	5	3268	26,1
Coentral/Safra	13	41,8	25	1261	107,1
Alto Arganil	8	36,0	18	1923	91,3
Serra de Alvoaça	0	36,1	17	1923	89,0
Cabeço da Rainha II	0	31,2	15	1923	78,8

Os resultados da média e do desvio padrão dos *inputs* e *outputs* estão apresentados na tabela 4.7 e 4.8, respetivamente, para parques eficientes e para parques ineficientes.

Os resultados mostram que os parques eficientes possuem em média 28,43 MW de capacidade instalada, 14,83 de número de aerogeradores e produzem, em média, 73,93 (GWh) de energia elétrica. Estes valores são superiores aos observados nos parques ineficientes. No entanto, dada a pequena diferença de número de horas do vento nos parques ineficientes, poderá ser vantajoso aumentar a potência instalada em alguns parques.

Tabela 4.7: Desvio padrão e média dos *inputs* e *output* dos parques eólicos eficientes do promotor EDP-R.

	Capacidade Instalada (MW)	Número de aerogeradores	Número de horas disponíveis	Energia Elétrica (GWh)
Média	28,43	14,83	2247,50	73,93
Desvio Padrão	13,03	7,05	801,64	29,84
Máximo	41,80	25,00	3268,00	107,10
Mínimo	7,50	5,00	1261,00	26,10

Tabela 4.8: Desvio padrão e média dos *inputs* e *output* dos parques eólicos ineficientes do promotor EDP-R.

	Capacidade Instalada (MW)	Número de aerogeradores	Número de horas disponível	Energia Elétrica (GWh)
Média	14,06	9,59	2154,48	30,89
Desvio Padrão	6,45	5,55	883,31	15,62
Máximo	26,00	23,00	3268,00	65,60
Mínimo	3,30	2,00	1261,00	6,10

4.5.1.2. Definição de objetivos para um parque eólico ineficiente

De seguida, será ilustrada, como exemplo, a definição de objetivos para um parque eólico ineficiente, o parque Amaral I que teve um valor de eficiência igual a 84,90% o que significa que o seu potencial para aumentar a energia elétrica produzida é $\frac{1}{84,90\%} = 117,78\%$. Este parque eólico foi comparado com os parques eólicos Arganil e

Guerreiros ($\lambda_{\text{Arganil}}=0,1144$, $\lambda_{\text{Guerreiros}}=0,3265$). Isto significa que os objetivos de melhoria para o parque Amaral I são definidos 26% $\left(\frac{0,1144}{(0,1144+0,3265)}\right)$ por Arganil e 74% $\left(\frac{0,3265}{(0,3265+0,1144)}\right)$ por Guerreiros, tendo este parque uma maior contribuição, tal como se apresenta na figura 4.2.

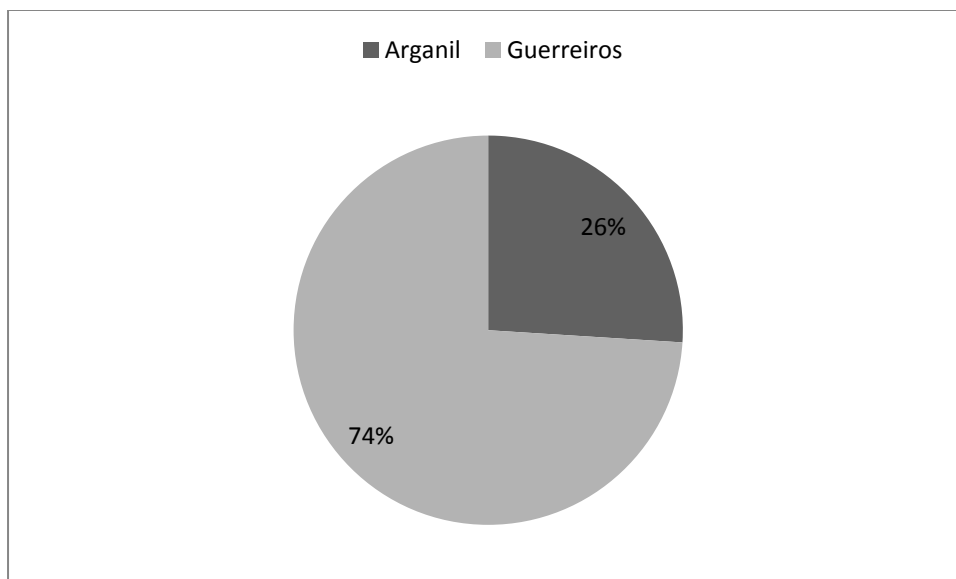


Figura 4.2: Contributo dos *benchmarks* para a definição de objetivos de Amaral I.

Os objetivos definidos para o parque eólico Amaral I (calculada com as expressões 3.11 e 3.12), correspondem a combinações possíveis de *inputs* e *outputs* dos *benchmarks* com as características indicadas na 4.^a coluna da tabela 4.9.

Tabela 4.9: Resultados do modelo CRS para o parque eólico Amaral I.

		Observado	Objetivo	Parque Arganil ($\lambda_{\text{Arganil}}=0,1144$)	Parque Guerreiros ($\lambda_{\text{Guerreiros}}=0,3265$)
<i>Inputs</i>	Capacidade Instalada (MW)	10,0	10,0	36,0	18,0
	Número de Aerogeradores	5	5	18	9
	Vento (horas)	1261	1261	1923	3187
<i>Output</i>	Energia Elétrica produzida (GWh)	23,1	27	91,3	51,3

Na avaliação de desempenho, não foram observadas *slacks* associadas aos *inputs* do parque eólico Amaral I. Conclui-se que o parque Amaral I pode aumentar a energia

elétrica produzida, utilizando os atuais recursos, como se verifica pelos resultados apresentados na tabela 4.9.

4.5.2. Avaliação da eficiência de operação dos parques eólicos do promotor Iberwind

Nesta secção avalia-se o desempenho dos parques eólicos do promotor Iberwind através do modelo CRS (3.10) para os anos 2010 e 2011 (Anexos F.2). Na tabela 4.10 estão apresentados os resultados para o modelo CRS.

Tabela 4.10: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor Iberwind com o modelo CRS.

Promotor Iberwind		
	Eficiência 2010	Eficiência 2011
Média	75,81%	71,78%
Desvio padrão	11,95%	12,86%
Mínimo	53,55%	47,01%
Número de <i>benchmarks</i>	2	2

Globalmente observa-se uma maior heterogeneidade dos parques em 2011. A conclusão que se pode tirar dos resultados obtidos na tabela 4.10 é que o potencial de melhoria dos parques ineficientes da Iberwind é elevado, sendo superior no ano 2011 (em média, $\frac{1}{75,81\%} = 131,90\%$ em 2010 e $\frac{1}{71,78\%} = 139,31\%$ em 2011).

O promotor Iberwind tem dois parques eólicos eficientes em 2011 (os mesmos *benchmarks* observados em 2010). As políticas de gestão observadas nestes parques *benchmarks* devem ser imitadas pelos parques ineficientes.

4.5.2.1. Estudo dos *Benchmarks*

Os dados dos *benchmarks*, Achada e Candeeiros (Anexo G.2), obtidos através do modelo CRS, no ano 2011 apresentam-se na tabela 4.11.

Tabela 4.11: Características dos *Benchmarks* dos parques eólicos para a Iberwind.

Parques <i>Benchmarks</i>	n.º de vezes usado como <i>Benchmark</i>	Capacidade Instalada (MW)	Número de Aerogeradores	Número de horas disponíveis	Energia elétrica (GWh)
Achada	27	6,9	3	1261	21,0
Candeeiros	12	111,0	37	1261	316,4

Os resultados da média e do desvio padrão dos *inputs* e *outputs* estão apresentados na tabela 4.12 e 4.13, respetivamente para parques eficientes e para parques ineficientes.

Os resultados mostram que os parques eficientes possuem em média 58,95 MW de capacidade instalada, 20 aerogeradores e produzem em média 168,70 (GWh) de energia elétrica. Estes valores são superiores aos observados nos parques ineficientes.

No entanto, os parques ineficientes apresentam valores bastante superiores de número de horas do vento face ao observado nos parques eficientes. Eventualmente, poderá ser vantajoso o aumento de potência instalada em alguns parques uma vez que estes parques do promotor Iberwind estão localizados em zonas com maior ocorrência de vento. Por outro lado, as práticas dos parques ineficientes deverão ser melhoradas no sentido de aumentar a produção de energia elétrica. O desvio padrão do número de horas disponíveis dos parques eólicos eficientes é nulo, porque estes dois parques estão localizados na mesma zona.

Observa-se que o parque Candeeiros é considerado pelo promotor Iberwind como tendo elevado desempenho como se refere no relatório de contas (Iberwind, 2012).

Tabela 4.12: Desvio padrão e média dos *inputs* e *output* dos parques eólicos eficientes do promotor Iberwind.

	Capacidade Instalada (MW)	Número de aerogeradores	Número de horas disponíveis	Energia Elétrica (GWh)
Média	58,95	20,00	1261,00	168,70
Desvio Padrão	73,61	24,04	0,00	208,88
Máximo	111,00	37,00	1261,00	316,40
Mínimo	6,9,00	3,00	1261,00	21,00

Tabela 4.13: Desvio padrão e média dos *inputs* e *output* dos parques eólicos ineficientes do promotor Iberwind.

	Capacidade Instalada (MW)	Número de aerogeradores	Número de horas disponíveis	Energia Elétrica (GWh)
Média	19,78	9,75	2204,57	42,75
Desvio Padrão	26,13	9,67	847,93	58,85
Máximo	114,00	38,00	3268,00	254,60
Mínimo	0,90	1,00	1261,00	1,90

4.5.2.2. Definição de objetivos para um parque eólico ineficiente

Como exemplo é utilizado o parque eólico N^a. Sr^a. da Vitória que teve um valor de eficiência igual a 64,56% o que significa que o seu potencial para aumentar a energia elétrica produzida é $\frac{1}{0,6456} = 154,89\%$. Este parque eólico foi comparado com os parques eólicos Candeeiros e Achada ($\lambda_{\text{candeeiros}}=0,0489$, $\lambda_{\text{Achada}}=0,9510$). Isto significa que os objetivos de melhoria para o parque N^a. Sr^a. da Vitória são definidos 5% $\left(\frac{0,0489}{(0,0489+0,9510)}\right)$ por Candeeiros e 95% $\left(\frac{0,9510}{(0,9510+0,0489)}\right)$ por Achada, tendo este parque uma maior contribuição, tal como se representa na figura 4.3.

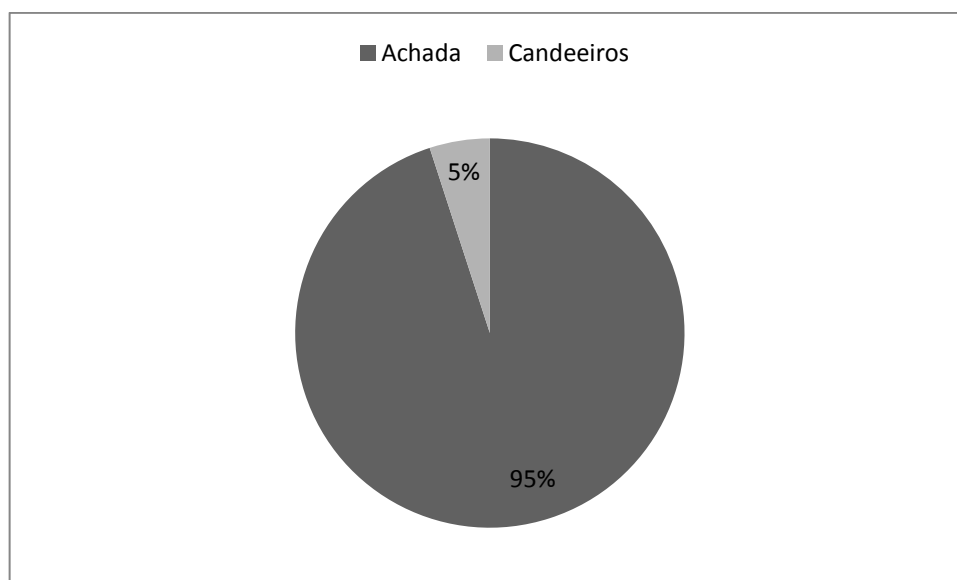


Figura 4.3: Contributo dos *benchmarks* para a definição de objetivos de N^a. Sr^a. da Vitória.

Os objetivos definidos para o parque eólico N^a. Sr^a. da Vitória, correspondem a combinações possíveis de *inputs* e *outputs* dos *benchmarks* com as características indicadas na 4.^a coluna da tabela 4.14.

Tabela 4.14: Resultados do modelo CRS para o parque eólico N^a. Sr^a. da Vitória.

		Observado	Objetivo	Parque Achada ($\lambda_{Achada}=0,9510$)	Parque Candeeiros ($\lambda_{Candeeiros}=0,0489$)
<i>Inputs</i>	Capacidade Instalada (MW)	12	12	6,9	111,0
	Número de Aerogeradores	8	5	3	37
	Vento (horas)	1261	1261	1261	1261
<i>Output</i>	Energia Elétrica produzida (GWh)	22,9	36	21	316,4

Na avaliação de desempenho, não foram observadas *slacks* associadas aos *inputs*, capacidade instalada (MW) e vento relativo ao parque eólico N^o. Sr^a. da Vitória, sendo observada uma *slack* relativa ao *input* número de aerogeradores. Tal significa, que em teoria seria possível aumentar a energia produzida, utilizando um menor número de aerogeradores, mas mantendo a potência total instalada.

4.6. Aplicação do método *program efficiency* para comparar o desempenho dos promotores

O método *program efficiency* foi utilizado para comparar o desempenho dos parques EDP-R e Iberwind, considerando apenas o ajustamento radial dos dados observados nos parques. A primeira etapa consiste em aplicar o modelo de DEA (3.10) aos parques de cada promotor. Os resultados desta avaliação foram apresentados e analisados nas secções 4.5.1 e 4.5.2.

O valor de eficiência de cada parque, resultante da comparação com as melhores unidades (*benchmarks*) pertencentes a cada promotor, é designado por eficiência de operação. A segunda etapa consiste em eliminar a ineficiência de operação de cada parque, após a sua projeção na fronteira do respetivo promotor. Finalmente, avalia-se em conjunto a eficiência dos parques dos dois promotores em análise, livres de ineficiência de operação. A fronteira utilizada nesta avaliação (fronteira *pooled*) obtém-se considerando todos os parques, independentemente do promotor a que pertencem. Nesta fase, o valor de eficiência obtido para cada unidade, medido em

relação à fronteira *pooled*, é apenas atribuído às políticas de gestão do promotor e não à atividade de operação interna do parque, e é designado por eficiência de gestão do promotor. Esta eficiência reflete o grau de controlo de gestão que cada promotor tem relativamente a cada parque.

Esta metodologia permite quantificar as diferenças entre os promotores relativos ao posicionamento das fronteiras e à dispersão da eficiência de operação verificada para os parques pertencentes a cada um deles.

4.6.1. Avaliação da eficiência de gestão dos promotores para o ano 2011

Os *outputs* ajustados para os parques EDP-R e Iberwind, que resultam da remoção da ineficiência de origem radial na eficiência de operação de cada parque são apresentados nas tabelas 4.15 e 4.16. Este ajuste radial resulta da multiplicação do *output* de cada parque pelo valor δ_0^* obtido no modelo (3.10). Uma vez que a avaliação de desempenho dos parques toma em conta o efeito de uma variável não controlável, o vento, optou-se por fazer apenas ajustamento radial no *output*, não se considerando ajustamento não radial (Vaz, Clara 2007).

Observe-se que após a correção radial se obteve o número de horas equivalentes corrigido para cada parque, verificando-se que nunca é superior ao número de horas equivalentes dos respetivos *benchmarks* (Anexo H).

Tabela 4.15: Ajustamento radial do *output* para os parques do promotor EDP-R para o ano 2011.

DMU	δ_0^*	<i>Output</i>	<i>Output*</i>
EAltoArganil	100,00%	91,30	91,30
ES.Alvoaça	100,00%	89,00	89,00
ECabeçoRainha	110,18%	54,20	59,72
ECabeçoRainhaII	100,00%	78,80	78,80
ECadafaz	104,53%	28,50	29,79
ES.João	126,68%	46,10	58,40
EVilaNova	102,58%	65,60	67,29
EBordeira	110,61%	59,40	65,70
EGuerreiros	100,00%	51,30	51,30
EMadrinha	102,15%	27,90	28,50
EPicoAlto	129,55%	13,20	17,10
EMosteiro	133,23%	20,30	27,05
EOrtiga	125,31%	28,90	36,21
ECoentralSafra	100,00%	107,10	107,10

DMU	δ_0^*	<i>Output</i>	<i>Output*</i>
ES.d'ELRei	112,53%	50,60	56,94
E AmaralII	117,78%	23,10	27,21
E ArrudaI	105,56%	16,20	17,10
EBolores	143,84%	11,00	15,82
ECaldasI	124,80%	21,80	27,21
EFanhões	115,74%	40,10	46,41
EPó	160,68%	15,90	25,55
ESobral II	108,58%	33,90	36,81
EPenaSuar	132,22%	32,90	43,50
EAlagoaCima	131,68%	28,30	37,27
ES.Barroso	143,70%	35,70	51,30
ES.BarrosoII	125,00%	22,80	28,50
ENegreloGuilhado	123,21%	45,70	56,31
E Padrela	100,00%	26,10	26,10
EAltoTalefe	163,60%	25,10	41,06
EFonteMesa	167,52%	19,60	32,83
EFonteQuelha	293,31%	14,00	41,06
E Testos	139,93%	47,100	65,91
EAbogalheira	175,87%	6,10	10,73
Média	128,19%	38,72	45,30
Desvio Padrão	36,59%	24,93	23,47

Tabela 4.16: Ajustamento radial do *output* para os parques do promotor Iberwind, para o ano 2011.

DMU	δ_0^*	<i>Output</i>	<i>Output*</i>
IFreita	142,95%	39,10	55,89
IBorninhos	144,93%	4,20	6,09
ISerraBornes	115,77%	148,80	172,27
ICHiqueiro	173,91%	7,00	12,17
IDegracia	128,36%	45,90	58,92
ILousãI	160,07%	63,40	101,48
ILousãII	114,51%	125,80	144,05
IMalhadas	117,70%	25,60	30,13
IMalhadizes	143,72%	25,20	36,22
IPampilhosa	127,63%	254,60	324,95
IRabaçal	124,22%	4,90	6,09
ICHãoFalcão	140,75%	163,30	229,84
IN ^a Sr ^a Vitória	154,90%	22,90	35,47
IAchada	100,00%	21,00	21,00
I Arcela	124,28%	27,40	34,05
I IgrejaNova	148,65%	14,70	21,85

DMU	δ_0^*	Output	Output*
IJarmeleira	144,16%	1,90	2,74
IS.Mamede	165,35%	12,70	21,00
ISerraEscusa	156,08%	3,90	6,09
ISerraT.Mundo	113,73%	26,20	29,80
ICandeeiros	100,00%	316,40	316,40
ICabeçoAlto	155,50%	22,90	35,61
ILombaSeixaI	212,72%	18,60	39,57
IMeroicinha	125,07%	21,90	27,39
IBigorne	161,40%	13,20	21,30
ILeomil	174,38%	28,10	49,00
IS.Cristòvão	162,93%	9,90	16,13
IS.Macário	155,56%	22,50	35,00
IVilaLobos	135,87%	22,40	30,43
ILombaSeixaII	183,53%	19,90	36,52
Média	143,62%	51,14	65,25
Desvio Padrão	25,53%	75,83	86,20

Os dados ajustados de cada parque foram utilizados para avaliar em conjunto a eficiência de gestão dos promotores em análise, livres de ineficiências de operação, obtendo-se os resultados da tabela 4.17.

Nesta fase, o valor de eficiência obtido para cada parque, medido em relação à fronteira *pooled* é apenas atribuída às políticas de gestão do promotor.

Tabela 4.17: Avaliação do desempenho de todos os parques eólicos em estudo (ajustamento radial), para o ano 2011.

	DMU	Eficiência*	Benchmarks*
1	EAltoArganil	87,07%	28 (0,48) 54 (0,29)
2	ES.Alvoaça	84,65%	28 (0,48) 54 (0,29)
3	ECabeçoRainha	90,81%	28 (0,52) 54 (0,16)
4	ECabeçoRainhaII	86,35%	28 (0,49) 54 (0,25)
5	ECadafaz	93,82%	28 (0,57) 54 (0,05)
6	ES.João	90,76%	28 (0,53) 54 (0,16)
7	EVilaNova	87,94%	28 (0,51) 54 (0,20)
8	EBordeira	90,33%	28 (0,92) 54 (0,15)
9	EGuerreiros	92,05%	28 (0,94) 54 (0,10)
10	EMadrinha	90,01%	28 (0,38) 59 (0,06) 61 (0,54)
11	EPicoAlto	90,02%	28 (0,23) 61 (0,37)
12	EMosteiro	94,44%	28 (0,57) 54 (0,04)

	DMU	Eficiência*	Benchmarks*
13	EOrtiga	90,90%	28 (0,35) 54 (0,10)
14	ECoentralSafra	89,02%	28 (0,25) 54 (0,36)
15	ES.d'ELRei	89,87%	28 (0,32) 54 (0,17)
16	EAmaraII	90,07%	28 (0,36) 54 (0,07)
17	EArrudaI	90,61%	28 (0,37) 54 (0,03)
18	EBolores	95,28%	28 (0,38) 54 (0,02)
19	ECaldasI	90,07%	28 (0,36) 54 (0,07)
20	EFanhões	87,77%	28 (0,33) 54 (0,14)
21	EPó	92,38%	28 (0,36) 54 (0,06)
22	ESobralII	88,61%	28 (0,35) 54 (0,10)
23	EPenaSuar	91,20%	28 (0,44) 54 (0,11)
24	EAlagoaCima	91,76%	28 (0,45) 54 (0,09)
25	ES.Barroso	91,85%	28 (0,96) 54 (0,10)
26	ES.BarrosoII	90,01%	28 (0,38) 61 (0,62)
27	ENegreloGuilhado	91,52%	28 (0,96) 54 (0,12)
28	EPadrela	100,00%	56
29	EAltoTalefe	95,27%	28 (0,98) 54 (0,06)
30	EFonteMesa	97,29%	28 (0,99) 54 (0,02)
31	EFonteQuelha	95,27%	28 (0,98) 54 (0,06)
32	ETestos	90,46%	28 (0,94) 54 (0,15)
33	EAbogalheira	96,58%	28 (0,33) 61 (0,07)
34	IFreita	99,82%	28 (0,09) 47 (2,34) 54 (0,01)
35	IBorninhos	96,13%	28 (0,08) 61 (0,12)
36	ISerraBornes	99,77%	28 (0,35) 54 (0,52)
37	ICHiqueiro	96,12%	28 (0,15) 61 (0,25)
38	IDegracias	98,98%	28 (0,53) 54 (0,14)
39	ILousãI	99,46%	28 (0,48) 54 (0,28)
40	ILousãII	99,67%	28 (0,43) 54 (0,42)
41	IMalhadas	97,49%	28 (0,57) 54 (0,05)
42	IMalhadizes	98,27%	28 (0,56) 54 (0,07)
43	IPampilhosa	100,00%	54 (1,03)
44	IRabaçal	96,12%	28 (0,07) 61 (0,12)
45	ICHãoFalcão	99,94%	28 (0,11) 54 (0,72)
46	IN ^a Sr ^a . Vitória	98,88%	28 (0,35) 54 (0,08)
47	IAchada	100,00%	2
48	IArcela	98,82%	28 (0,36) 54 (0,08)
49	IgrejaNova	98,11%	28 (0,37) 54 (0,04)
50	IJarmeleira	87,45%	28 (0,12)
51	IS.Mamede	100,00%	47 (1,00)
52	ISerraEscusa	87,46%	28 (0,27)

	DMU	Eficiência*	Benchmarks*
53	ISerraT.Mundo	98,65%	28 (0,36) 54 (0,07)
54	ICandeeiros	100,00%	45
55	ICabeçoAlto	93,70%	28 (0,99) 54 (0,04)
56	ILombaSeixaI	94,91%	28 (0,98) 54 (0,05)
57	IMeroicinha	99,40%	28 (0,05) 61 (0,75)
58	IBigorne	92,21%	28 (0,55) 61 (0,25)
59	ILEomil	100,00%	1
60	IS.Cristòvão	92,49%	28 (0,40) 61 (0,20)
61	IS.Macário	100,00%	10
62	IVilaLobos	91,72%	28 (0,99) 54 (0,02)
63	ILombaSeixaII	94,00%	28 (0,98) 54 (0,04)

A tabela 4.18 sintetiza o resultado da avaliação do desempenho dos parques dos dois promotores.

Tabela 4.18: Tabela síntese da eficiência de gestão do promotor para o ano 2011.

	EDP-R	Iberwind
Média	91,33%	96,99%
Desvio Padrão	3,26%	3,69%
Número de benchmarks	1	4

Os resultados obtidos mostram que o promotor Iberwind tem mais parques eólicos eficientes, apresentando uma média de eficiência superior à EDP-R e igual a 96,99%. Verifica-se que a diferença entre os dois promotores é em média de 5,65%.

O promotor EDP-R tem apenas um único parque eólico eficiente Padrela e apresenta uma eficiência média de 91,33%. No entanto, o parque eólico Padrela é a unidade mais utilizada como *benchmark*. Esta unidade é utilizada 56 vezes como referência pelos parques eólicos ineficientes.

O promotor Iberwind tem 4 *benchmarks*, em que o parque eólico Candeeiros é utilizado como referência por 45 parques ineficientes em comparação com os parques S.Macário, Achada e Leomil, como se pode observar na tabela 4.19.

Tabela 4.19: Número de vezes que cada *benchmark* é utilizado como referência na avaliação de eficiência de gestão do promotor em 2011.

<i>Benchmarks</i>	Número de vezes que é utilizado como referência
Padrela	56
Candeeiros	45
São Macário	10
Achada	2
Leomil	1

4.6.2. Avaliação do desempenho dos promotores no ano 2010

Numa primeira fase, avaliou-se a eficiência de operação dos parques de cada promotor com o modelo (3.10), no ano 2010. Estes resultados foram obtidos na secção 4.5.1 e 4.5.2. Numa segunda fase, avaliou-se a eficiência dos promotores removendo-se a ineficiência radial (Anexo I), obtendo-se a média e desvio padrão. Os resultados obtidos da avaliação da eficiência do promotor em estudo estão sintetizados na tabela 4.20. O *benchmark* da EDP-R é Padrela e os *benchmarks* da Iberwind são Candeeiros e Pampilhosa. Isto significa que a Iberwind tem dois parques na fronteira enquanto que a EDP-R tem apenas um.

A Iberwind apresenta uma eficiência média ligeiramente superior à EDP-R, sendo a diferença média entre os dois promotores aproximadamente igual a 2%.

Tabela 4.20: Tabela síntese da eficiência do promotor para o ano 2010.

	EDP-R	Iberwind
Média	89,57%	91,56%
Desvio Padrão	4,43%	16,26%
Número de <i>benchmarks</i>	1	2

Por comparação com a tabela 4.18, globalmente, verifica-se que do ano 2010 para 2011, as políticas de gestão do promotor melhoraram, aproximando-se dos 100%. Em 2011, a Iberwind aparece com uma performance mais demarcada da EDP-R.

4.7. Avaliação da Eficiência Global dos parques dos promotores e identificação de componentes em 2011

Finalmente, calcula-se a eficiência global (E_G) de todos os parques (fronteira *pooled*) e identificam-se as suas componentes, a eficiência de operação (E_O) do parque e a eficiência de gestão do promotor (E_P). Nesta secção avaliam-se todos os parques eólicos que estão em estudo (EDP-R e Iberwind), considerando os *inputs* e *output* observados em cada parque de cada promotor.

A eficiência global de um parque, quando se avalia todos os parques (EDP-R e Iberwind), pode ser decomposta na eficiência de gestão do promotor e na eficiência de operação dos parques eólicos, de acordo com a expressão (4.1).

Os resultados obtidos da E_G e suas componentes, para cada parque (j), apresentam-se na tabela 4.21.

$$E_{Gj} = E_{Oj} \times E_{pj} \quad (4.1)$$

Nesta análise, relaxa-se a situação de eficiência de cada parque, optando-se por considerar que um parque é eficiente, numa determinada perspetiva, se o valor de eficiência for $\geq 95\%$.

Os resultados obtidos indicam que se podem identificar quatro tipos de parques eólicos que se podem classificar em 4 *clusters* (A, B, C e D):

Cluster A: O parque é eficiente em termos de operação ($E_O \geq 95\%$), no entanto foram verificadas ineficiências devidas à gestão do promotor ($E_P < 95\%$), o que significa que o parque é afetado pela política de gestão do promotor. Por exemplo, o parque Alto Arganil tem uma eficiência global de 87,07% que pode ser decomposta na eficiência de operação ($E_O = 100\%$) e eficiência de gestão do promotor ($E_P = 87,07\%$). O parque é eficiente em termos de operação no entanto o seu desempenho é afetado pela gestão do promotor. Os parques que estão nestas condições são S.Alvoaça, Cabeço Rainha II, Guerreiros, Coentral/Safra, Cadafaz, Vila Nova, Madrinha e Arruda.

Cluster B: O parque é ineficiente em termos de operação ($E_O < 95\%$) e é eficiente em termos de política de gestão do promotor ($E_P \geq 95\%$). Por exemplo, o parque Pampilhosa, tem uma eficiência global de 78,35% que pode ser decomposta na eficiência de operação ($E_O = 78,35\%$) e eficiência de gestão do promotor ($E_P = 100\%$). O

parque é eficiente em termos de gestão do promotor, no entanto, o seu desempenho é afetado pela operação do parque. Os parques que estão nestas condições são: Bolores, Alto Talefe, Fonte Mesa, Fonte Quelha, Abogalheira, Freita, Borninho, Serra Bornes, Chiqueiro, Degracias, Lousã I, Lousã II, Malhadas, Malhadizes, Rabaçal, Chão Falcão, N^a Sr.^a Vitória, Arcela, Igreja Nova, S.Mamede, Serra T. Mundo, Meroicinha, Leomil, S. Macário e Lomba Seixa I.

Cluster C: O parque é eficiente em termos de operação ($E_O \geq 95\%$) e de política de gestão do promotor ($E_P \geq 95\%$). Estes parques correspondem a Padrela, Achada e Candeeiros. Estes parques são eficientes globalmente, sendo considerados *benchmarks* em termos de operação e em termos de gestão do promotor.

Cluster D: O parque é ineficiente em termos de operação ($E_O < 95\%$) e tem ineficiências devidas à gestão do promotor ($E_P < 95\%$), o que significa que o parque é afetado pela operação do parque e pela política de gestão do promotor. Os restantes parques analisados na amostra estão nestas circunstâncias.

Tabela 4.21: Resultados obtidos da eficiência global no ano 2011.

Eficiência Global				
	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência global	Clusters
EAltoArganil	87,07%	100,00%	87,07%	A
ES.Alvoaça	84,65%	100,00%	84,65%	A
ECabeçoRainha	90,81%	90,76%	82,42%	D
ECabeçoRainhaII	86,35%	100,00%	86,35%	A
ECadafaz	93,82%	95,67%	89,75%	A
ES.João	90,76%	78,94%	71,65%	D
EVilaNova	87,94%	97,48%	85,72%	A
EBordeira	90,33%	90,41%	81,67%	D
EGuerreiros	92,05%	100,00%	92,05%	A
EMadrinha	90,01%	97,90%	88,11%	A
EPico Alto	90,02%	77,19%	69,48%	D
EMosteiro	94,44%	75,06%	70,88%	D
EOrtiga	90,90%	79,80%	72,54%	D
ECoentral/Safra	89,02%	100,00%	89,02%	A
ES.d'El Rei	89,87%	88,87%	79,86%	D
EAmaraI	90,07%	84,90%	76,48%	D
EArruda I	90,61%	94,73%	85,84%	A
EBolores	95,28%	69,52%	66,24%	B
ECaldas I	90,07%	80,13%	72,17%	D

Eficiência Global				
	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência global	<i>Clusters</i>
EFanhões I	87,77%	86,40%	75,84%	D
EPó	92,38%	62,24%	57,49%	D
ESobral II	88,61%	92,10%	81,60%	D
EPena Suar	91,20%	75,63%	68,98%	D
EAlagoa Cima	91,76%	75,94%	69,68%	D
ES.Barroso	91,85%	69,59%	63,92%	D
ES.Barroso II	90,01%	80,00%	72,01%	D
ENegreloGuilhado	91,52%	81,16%	74,28%	D
EPadrela	100,00%	100,00%	100,00%	C
EAltoTalefe	95,27%	61,12%	58,24%	B
EFonteMesa	97,29%	59,69%	58,07%	B
EFonteQuelha	95,27%	34,09%	32,48%	B
ETestos	90,46%	71,46%	64,65%	D
EAbogalheira	96,58%	56,86%	54,92%	B
IFreita	99,82%	69,95%	69,83%	B
IBorninho	96,13%	69,00%	66,33%	B
ISerraBornes	99,77%	86,37%	86,18%	B
ICHiqueiro	96,12%	57,50%	55,27%	B
IDegracias	98,98%	77,90%	77,11%	B
ILousã I	99,46%	62,47%	62,14%	B
ILousã II	99,67%	87,33%	87,04%	B
IMalhadas	97,49%	84,96%	82,84%	B
IMalhadizes	98,27%	69,58%	68,38%	B
IPampilhosa	100,00%	78,35%	78,35%	B
IRabaçal	96,12%	80,50%	77,37%	B
ICHão Falcão	99,94%	71,05%	71,00%	B
IN ^a Sr ^a Vitória	98,88%	64,56%	63,84%	B
IAchada	100,00%	100,00%	100,00%	C
IArcela	98,82%	80,46%	79,52%	B
I Igreja Nova	98,11%	67,27%	66,00%	B
IJarmeleira	87,45%	69,37%	60,66%	D
IS.Mamede	100,00%	60,48%	60,48%	B
ISerraEscusa	87,46%	64,07%	56,04%	D
ISerraT.Mundo	98,65%	87,93%	86,74%	B
ICandeeiros	100,00%	100,00%	100,00%	C
ICabeçoAlto	93,70%	64,31%	60,26%	D
ILombaSeixa I	94,91%	47,01%	44,62%	B
IMeroicinha	99,40%	79,95%	79,48%	B
IBigorne	92,21%	61,96%	57,13%	D
ILeomil	100,00%	57,35%	57,35%	B

Eficiência Global				
	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência global	Clusters
IS.Cristóvão	92,49%	61,37%	56,77%	D
IS.Macário	100,00%	64,29%	64,29%	B
IVilaLobos	91,72%	73,60%	67,50%	D
ILombaSeixaII	94,00%	54,49%	51,22%	D
Média	94,03%	77,16%	72,35%	
Desvio Padrão	4,47%	15,24%	13,73%	

Na tabela 4.22 apresenta-se os resultados da média e desvio padrão mais específicos da eficiência global e suas componentes para o ano 2011 e por promotor.

Tabela 4.22: Tabela síntese da eficiência global no ano 2011.

Eficiência Global 2011						
	EDP-R			Iberwind		
	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência Global	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência Global
Média	91,33%	82,05%	74,67%	96,99%	71,78%	69,79%
Desvio padrão	3,26%	15,76%	13,47%	3,69%	12,86%	13,78%

Através da tabela 4.22 pode-se concluir que globalmente, os parques do promotor EDP-R são, em média, mais eficientes do que os parques do promotor Iberwind em 2011. Tal é explicado pelo facto dos parques de EDP-R apresentam níveis de desempenho mais elevado ao nível da operação dos parques. No entanto, verifica-se que a Iberwind apresenta uma melhor eficiência de gestão dos parques do que a EDP-R.

O melhor desempenho dos parques EDP-R manteve-se em 2010, tal como pode ser verificado pelo resultado síntese da eficiência Global para o ano 2010, como mostra a tabela 4.23.

Tabela 4.23: Tabela síntese da eficiência global, para o ano 2010.

Eficiência Global 2010						
EDP-R			Iberwind			
	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência Global	Eficiência de gestão do promotor	Eficiência de operação	Eficiência Global
Média	89,57%	82,81%	73,83%	91,56%	75,81%	69,81%
Desvio Padrão	4,43%	14,97%	12,27%	16,26%	11,95%	17,90%

4.8. Correlação entre o número de horas equivalentes e a eficiência dos parques eólicos

O pressuposto que os parques eólicos mais eficientes apresentam um maior número de horas equivalentes anuais é validado através da análise de correlação dos dados entre a eficiência de operação e o número de horas equivalentes anuais. Para o efeito, avaliou-se a correlação entre o número de horas equivalentes e a eficiência de operação para os dois promotores EDP-R e Iberwind em análise, como está apresentado nas figuras 4.4 e 4.5.

O coeficiente de correlação é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, pelo que varia entre os valores 1 e -1. O valor 1 tem como significado uma relação linear ótima, enquanto que o valor -1 significa uma relação linear ótima mas inversa, isto é, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui; por fim, o valor nulo significa que não existe uma relação linear. Quanto mais próximo o coeficiente de correlação for de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis (MEDSTATWEB, 2013). Os resultados do coeficiente de correlação dos dois promotores são apresentados na tabela 4.24, para os anos 2010 e 2011.

Tabela 4.24: Tabela síntese do coeficiente de correlação para os anos 2010 e 2011.

	ano 2010		ano 2011	
	EDP-R	Iberwind	EDP-R	Iberwind
r	0,8472	0,9889	0,9022	0,9902

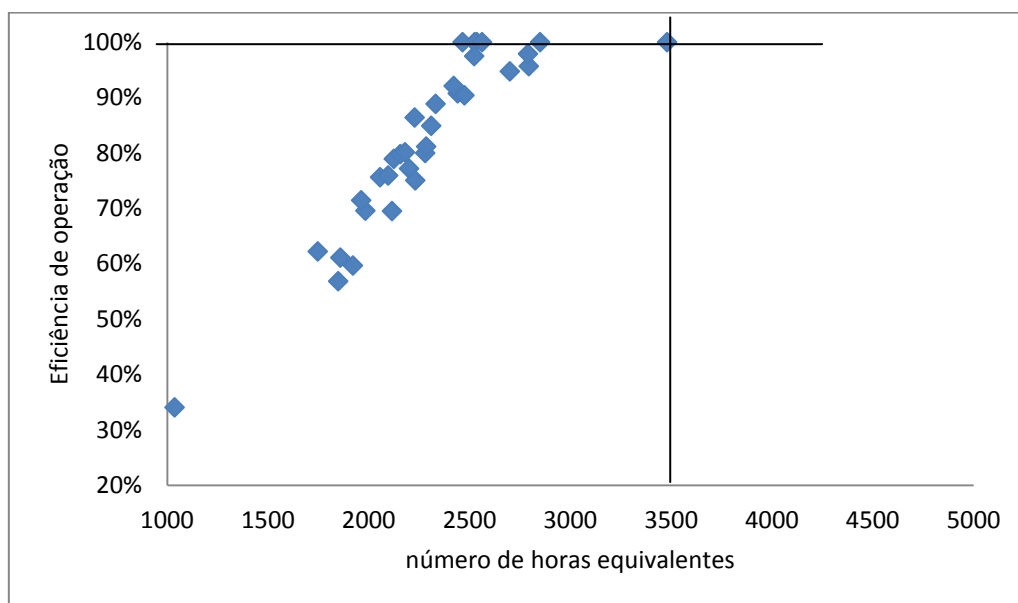


Figura 4.4: Número de horas equivalentes do promotor EDP-R do ano 2011.

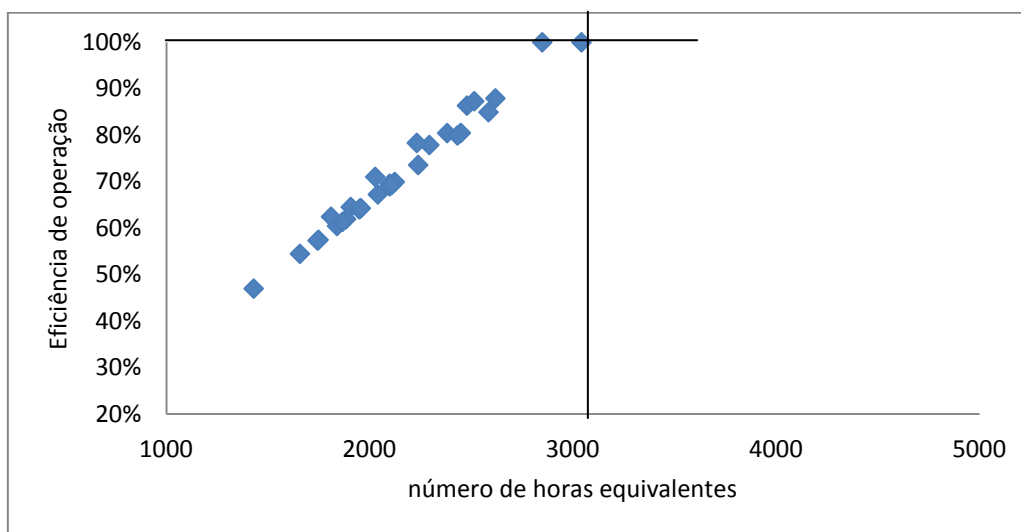


Figura 4.5: Número de horas equivalentes do promotor Iberwind do ano 2011.

4.9. Conclusão

Neste capítulo foram obtidos e analisados os resultados da avaliação do desempenho de parques eólicos. Conclui-se que o comportamento dos parques da EDP-R ao nível da operação é mais homogéneo do que os parques da Iberwind. Globalmente, a Iberwind apresenta um melhor desempenho, ao nível da gestão dos seus parques.

Verificou-se que, de 2010 para 2011, a eficiência de gestão dos promotores se aproximou dos 100%, o que significa que melhoraram a gestão dos seus parques. Globalmente, em 2011 os parques do promotor EDP-R são, em média, mais eficientes em termos de operação do que os parques do promotor Iberwind, o que traduz um melhor desempenho ao nível do seu funcionamento. A eficiência global permitiu identificar 4 *clusters* de parques, diferenciados pelas eficiências de operação e de gestão do promotor. Na amostra analisada identificaram-se ainda três *benchmarks*: Padrela, Achada e Candeeiros. Estes parques são eficientes em termos de operação e de gestão do promotor.

Em termos de tecnologias, os parques *benchmarks* utilizam o mesmo tipo de gerador, gerador de indução, embora de fornecedores e modelos distintos. O parque com mais aerogeradores instalados é Candeeiros (37 aerogeradores), os outros têm três aerogeradores instalados no parque Achada e cinco aerogeradores instalados no parque Padrela. Globalmente, a energia elétrica produzida diminuiu no ano 2011 em relação ao ano 2010, coerente com a redução do número de horas equivalentes, de 2010 para 2011. O número de horas entre as velocidades *cut-in* e *cut-out* são iguais nos parques Achada e Candeeiros, pois estes dois parques encontram-se situados na mesma zona e pertencem ao promotor Iberwind, enquanto o parque eólico Padrela pertence ao promotor EDP-R e localiza-se numa zona diferente.

Capítulo 5

Conclusões e desenvolvimentos futuros

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste trabalho realizou-se um estudo sobre a avaliação de desempenho de parques eólicos Portugueses. Como promotores dos parques eólicos a EDP-R e a Iberwind foram os escolhidos pois são os que dominam o setor eólico em Portugal.

No estado de arte da energia eólica, de um modo geral a evolução e necessidade de utilização de uma fonte renovável no fornecimento da energia elétrica levou a um desempenho no desenvolvimento da tecnologia de conversão de energia eólica, destacando-se os sistemas baseados em aerogeradores de eixo horizontal, a velocidade variável. Dentro das tecnologias disponíveis, os sistemas atuais são baseados em geradores de indução duplamente alimentados e geradores síncronos de ímanes permanentes.

Foi apresentada uma metodologia baseada na técnica de DEA para avaliar o desempenho de parques eólicos, o que permite identificar a eficiência de operação dos parques e a eficiência atribuída à gestão dos promotores.

Ao nível do caso de estudo, conclui-se que existe potencial de melhoria para os parques dos promotores EDP-R e Iberwind que podem conduzir ao melhor aproveitamento da energia eólica disponível e assim produzirem mais energia elétrica. Verificou-se que o comportamento dos parques da EDP-R ao nível de operação é mais homogêneo que os da Iberwind. Globalmente, os parques da EDP-R são, em média, mais eficientes do que os parques da Iberwind, o que, é atribuído ao melhor desempenho ao nível de operação dos parques EDP-R. No entanto, os parques da Iberwind têm uma performance melhor do que a EDP-R, ao nível de gestão do promotor ano 2010, acentuando-se esta tendência em 2011. Por último identificaram-se 4 *clusters* de parques que se distinguem pela eficiência de operação e eficiência de gestão do promotor, ou seja, identificaram-se os parques *benchmarks*, isto é, os parques que são eficientes em termos operação e gestão do promotor, que são Padrela, Achada e Candeeiros.

Este tipo de avaliação deverá ser adotado pelos promotores para avaliarem o desempenho dos seus parques em termos da energia elétrica, complementando a abordagem tradicional de utilização de rácios.

Nos desenvolvimentos futuros deste trabalho pretende-se incluir o impacto dos custos de exploração e manutenção no desempenho dos parques, assim como as

indisponibilidades programadas (para manutenção) e não programadas (por avaria). Pretende-se ainda alargar a abordagem apresentada à análise de mais promotores a atuar no mercado Europeu.

Referências Bibliográficas

Andersen, P. and N.C. Petersen “A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis,” Department of Management no.11/1989, Odense University, Denmark.

Altin, M., *et al.*; 2010. Overview of Recent Grid Codes for Wind Power Integration. In *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2010)*. Brasov, Romania, 20-22 May, 2010. pp. 1152-1160.

Arabian-Horeynabadi, H.; Tavener, P. J.; Oraee, H.; 2010. Reliability Comparison of Direct Drive and Geared Drive *Wind Turbine Concepts*. *Wind Energy, Wiley online Library*. Vol. 13, n.º 1. pp. 62-73.

APREN; 2012. APREN (Associação Portuguesa de Energias Renováveis) - versão final do PNAER <http://www.apren.pt/gca/?id=218> (consulta novembro, 2012).

APREN; 2013. APREN (Associação Portuguesa de Energias Renováveis). <http://www.apren.pt> (consulta 14 de fevereiro, 2013).

Banker, R., A. Charnes e W. Cooper (1984), *Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis*, *Management Science* 30, 1078-1092.

Banker, R.D. and Thrall, R.M. (1992). Estimation of returns to scale using *Data Envelopment Analysis*. *European Journal of Operational Research*, 62(1):74-84.

Baner, P., *et al.*; 2000. Evaluation of Electrical Systems for Offshore Windfarms. In *IEEE Industry Applications Conference*. 8-12 October, 2000. Vol. 3, pp. 1416-1423.

Blaabjerg, F., *et al.*; 2010. Trends in Power Electronics and Control of Renewable Energy Systems. In *14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2010)*. Ohrid, Republic of Macedonia, 6-8 September, 2010. pp. k1-k19.

Charnes, A., W. Cooper e E. Rhodes (1978), *Measuring the efficiency of decision-making units*, *European Journal of Operational Research* 2, 429-444.

Charnes, A., Cooper, W. W., and Rhodes, E. (1981). Evaluating program and managerial efficiency: an application of Data Envelopment Analysis to program follow through. *Management Science*, 27(6):668–697.

Charnes, A., *et al.*, (1985). *Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto-Koopmans Efficient Empirical Production Functions*. *Journal of Econometrics*, 30 (1/2), 91-107.

Castro. M.G (Maio de 2005). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada Introdução à Energia Eólica*. Universidade Técnica de Lisboa.

Conroy, J. F.; Watson, R.; 2007. Low-Voltage Ride- Through of a Full Converter Wind Turbine with Permanent Magnet Generator. *Renewable Power Generation, IET*. Vol.1, n.º 3. pp. 182-189.

CRESESB; 2008. CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=231> (11 de junho, 2008).

Castro, Rui (2011) - Uma introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica

Dyson *et al* (2001). Pitfalls and protocols in DEA. *European journal of operational research*, 4.

ENEOP, 2012. ENOP (Eólicas de Portugal, S.A). <http://www.eneop.pt> (consulta outubro, 2012).

EWEA, 2013. EWEA (*The European Wind Energy Association*), *Wind in power 2012 European statistics* .<http://www.ewea.org> (consulta 17 fevereiro, 2013).

EMS, 2012. EMS (Efficiency Measurement System), University of Dortmund, by Holger Scheel. <http://www.holger-scheel.de/ems/> (consulta março, 2012).

Ferreira, Ângela (2011) *Projeto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para Sistemas de Conversão de Energia Eólica*. Porto: FEUP. Tese de Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Hansen, A. D., *et al.*; 2004. Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and their Market Penetration. *Wind Engineering*. Vol. 28, n.º 3. pp. 247-263.

Grenier, Damien 2012. e-Learning-tools for Electrical Engineering. <http://e-lee.ist.utl.pt> (consulta novembro, 2012).

Iberwind, 2012. <http://www.Iberwind.com> (consulta 23 de maio, 2012).

Mutschler, P.; Hoffman, R.; 2002. Comparison of Wind Turbines Regarding their Energy Generation. In *IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialist Conference (PESC 2002)*. Queensland, Australia, 23-27 June, 2002. Vol. 1, pp. 6-11.

Mello, J. C. (2005). *Curso de Análise de envoltória de dados*. Universidade Federal Fluminense.

MEDSTATWEB, 2013. MEDSTATWEB-Um curso de estatística médica na web <http://stat2.med.up.pt> (consulta 12 de junho, 2013)

Naturlink, 2013. Naturlink a ligação à natureza. <http://naturlink.sapo.pt> (citado 26 de junho de 2013).

Polinder, H., *et al.*; 2006. Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 21, n.º 3 (September, 2006). pp. 725-733.

SNIRH, 2012. SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos). <http://snirh.pt> (consulta 1 de maio, 2012).

Tremblay, E., *et al.*; 2006. Study of Grid-Side Converter Control for Grid-Connected DFIG Wind Turbines under Unbalanced Load Condition. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2006)*. Montreal, Canada, 9-13 July, 2006. Vol. 2, pp. 1619-1624.

Vaz, Clara (2007) *Desenvolvimento de um sistema de avaliação e melhoria de desempenho no sector do retalho*. Porto: FEUP. Tese de Doutoramento em Engenharia Industrial e Gestão.

World Energy Outlook 2010. <http://www.oecd.org/mena/investment/46769903.pdf>, <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf> (consulta 1 de abril, 2013).

Anexos

Anexo A. Número de horas do vento entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*

O anexo A apresenta as estações meteorológicas e o número de horas dos parques eólicos dos promotores EDP-R e Iberwind, para os anos 2010 e 2011.

Tabela A.1: Estações meteorológicas dos parques eólicos do promotor EDP-R, ano 2010 e 2011.

Promotor EDP-R				
Estações Meteorológicas	Zona do País	Parques Eólicos	Número de horas (2010)	Número de horas (2011)
Almeidinha	Beiras	Alto do Arganil	2394	1923
		Serra de Alvoaça		
		Cabeço da Rainha		
		Cabeço da Rainha II		
		Cadafaz		
		São João I		
		Vila Nova		
		Mosteiro		
Lixa do Alvão	Viseu-Vila Real	Serra do Barroso	4245	3268
		Serra do Barroso II		
		Negrelo-Guilhado		
		Padrela		
		Alto do Talefe		
		Fonte de Mesa		
		Fonte da Quelha		
		Testos		
Ponte de Lima	Minho e Douro Litoral	Pena Suar	1854	1590
		Abogalheira		
		Alagoa de Cima		
Albufeira de Santa Clara	Algarve e Costa Alentejana	Bordeira	4506	3187
		Guerreiros		
		Madrinha		
		Pico Alto		
São Julião do Tojal	Oeste	Ortiga	2172	1261
		Safra/Coentral		
		Serra d'El Rei		
		Amaral I		
		Arruda I		
		Bolores		
		Caldas I		
		Fanhões I		
		Pó		
		Sobral II		

Tabela A.2: Estações meteorológicas dos parques eólicos do promotor Iberwind, ano 2010 e 2011.

Promotor Iberwind				
Estações Meteorológicas	Zona do País	Parques Eólicos	Número de horas (2010)	Número de horas (2011)
Almeidinha	Beiras	Chiqueiro	2394	1923
		Degracias		
		Lousã I		
		Lousã II		
		Malhadas		
		Malhadizes		
		Pampilhosa		
		Rabaçal		
Lixa do Alvão	Viseu-Vila Real	Cabeço Alto	4245	3268
		Lomba de Seixa I		
		Lomba da Seixa II		
		Meroicinha		
		Bigorne		
		Leomil		
		São Cristovão		
		São Macário		
		Freita I		
		Vila Lobos		
São Julião do Tojal	Oeste	Chão Falcão	2172	1261
		N ^a Sr ^a da Vitória		
		Achada		
		Arcela		
		Igreja Nova		
		Jarameira		
		São Mamede		
		Serra da Escusa		
		Serra de Todo o Mundo		
		Candeeiros		
Travancas	Nordeste Transmontano	Borninhos	2259	1788
		Serra de Bornes		

Anexo B. Localização geográfica

Nas figuras B.1 e B.2 são identificadas as zonas dos parques eólicos geridos pelo promotor EDP-R e Iberwind, respetivamente.

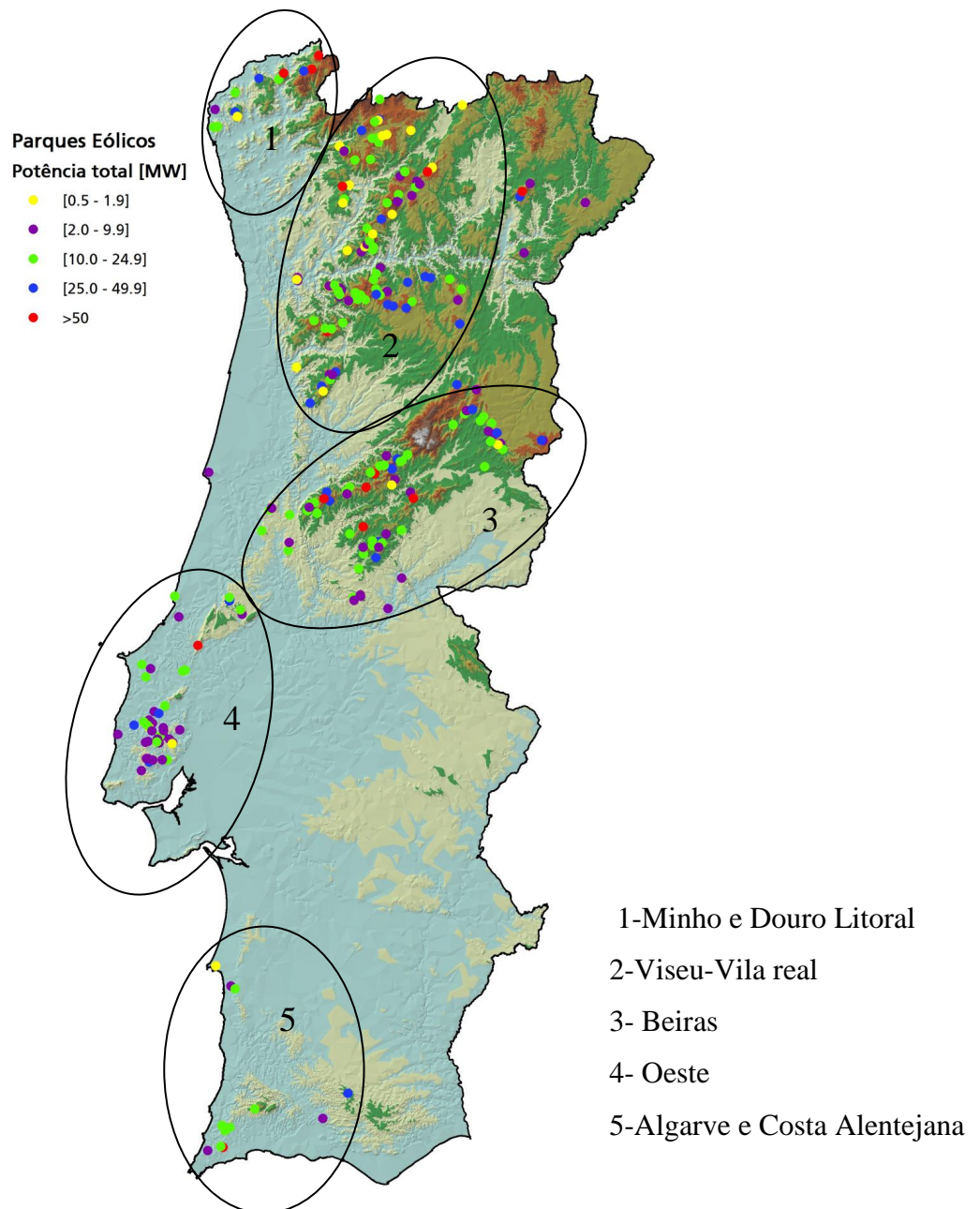


Figura B.1: Localização dos parques eólicos geridos pelo promotor EDP-R

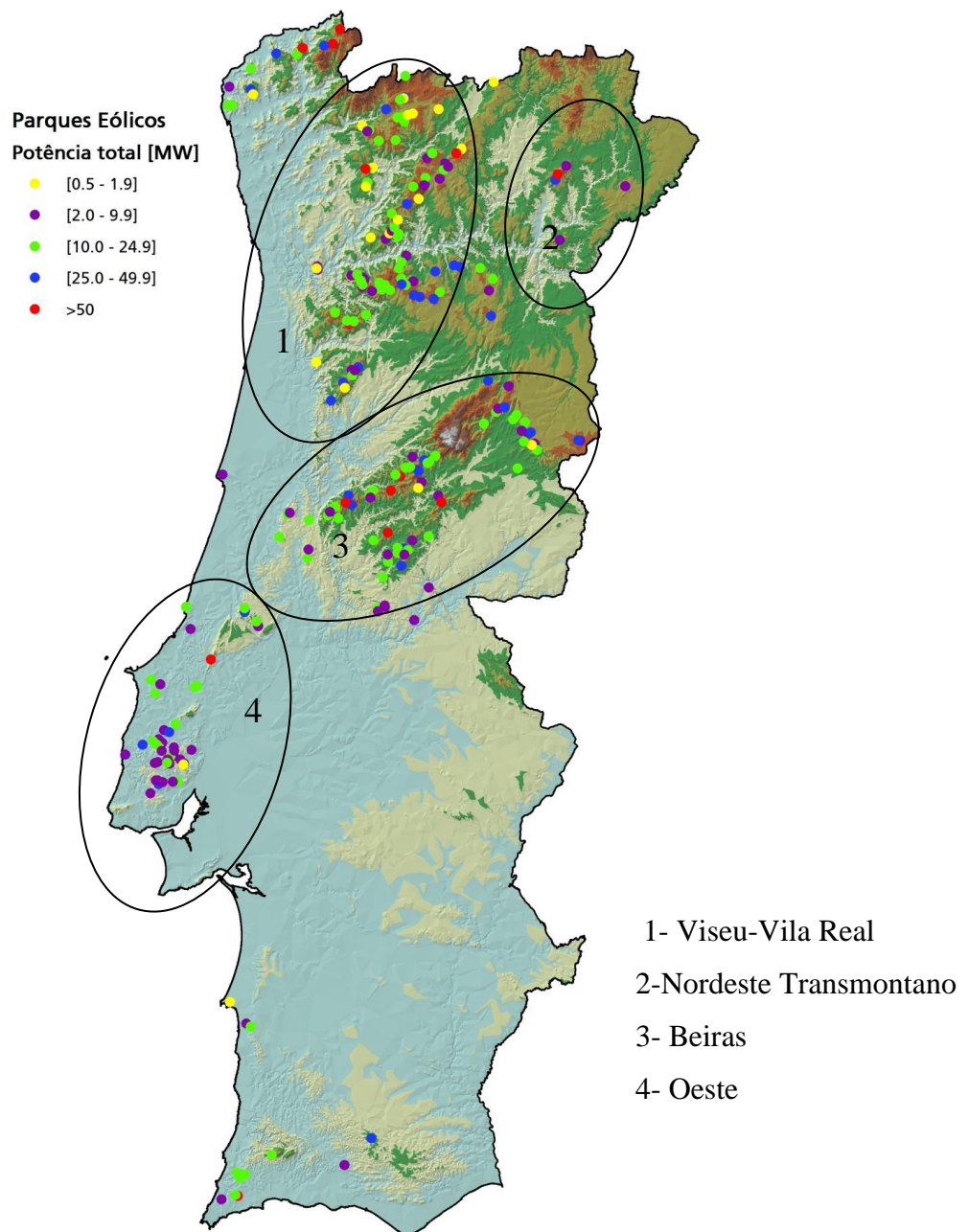


Figura B.2: Localização dos parques eólicos geridos pelo promotor Iberwind

Anexo C

Neste Anexo apresentam-se os dados dos parques eólicos relativamente ao promotor EDP-R.

Anexo D

Neste Anexo apresentam-se os dados dos parques eólicos relativamente ao promotor Iberwind.

Anexo E

Anexo E.1. Resultados dos valores de eficiências CRS para o promotor EDP-R

As tabelas E.1 e E.2 contêm os valores de eficiência CRS obtidos no programa EMS utilizando as três variáveis em análise que são (a) velocidade média do vento, (b) percentil 75% da velocidade do vento e o (c) número de horas por ano em que a velocidade do vento está entre os valores de *cut-in* e *cut-out*, para os anos 2010 e 2011.

Tabela E.1: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor EDP-R obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*) e percentil 75%), ano 2010.

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
EAltoArganil	72%	72%	72%	0%
ESerraAlvoaça	100%	100%	100%	0%
ECabeçoRainha	90%	90%	89%	1%
ECabeçoRainhaII	100%	100%	100%	0%
ECadafaz	90%	91%	88%	3%
ES.João	78%	79%	78%	1%
EVilaNova	97%	97%	96%	0%
EBordeira	89%	89%	89%	0%
EGuerreiros	97%	97%	97%	0%
EMadrinha	100%	100%	100%	0%
EPicoAlto	81%	81%	81%	0%
EMosteiro	72%	73%	70%	3%
EOrtiga	77%	79%	77%	2%
ECoentralSaфра	100%	100%	100%	0%
ES.d'ELRei	88%	89%	89%	1%
EAmaraI	87%	87%	87%	0%
EArruda I	96%	96%	96%	0%
EBolores	63%	66%	62%	4%
ECaldas I	83%	83%	83%	0%
EFanhões	83%	83%	83%	0%
EPó	60%	61%	59%	2%
ESobral II	92%	92%	92%	0%
EPenaSuar	77%	80%	78%	3%
EAlagoaCima	75%	79%	76%	3%
ES.Barroso	80%	80%	80%	0%

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
ES.Barroso II	93%	93%	93%	0%
ENegreloGuilhado	93%	93%	93%	0%
EPadrela	100%	100%	100%	0%
EAltoTalefe	62%	62%	62%	0%
EFonteMesa	63%	63%	63%	0%
EFonteQuelha	34%	34%	34%	0%
ETestos	82%	82%	82%	0%
EAbogalheira	63%	63%	63%	0%
Média	82,30%	82,81%	82,23%	0,12%
Desvio Padrão	15,21%	14,97%	15,21%	1%
Máximo	100%	100%	100%	4%
Mínimo	34,05%	33,97%	34,19%	0%

Tabela E.2: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor EDP-R obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*) e percentil 75%), ano 2011.

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
EAltoArganil	100%	100%	100%	0%
ESerraAlvoaça	100%	100%	100%	0%
ECabeçoRainha	90%	91%	90%	1%
ECabeçoRainhaII	100%	100%	100%	0%
ECadafaz	91%	96%	93%	4%
ES.João	78%	79%	79%	1%
EVilaNova	97%	97%	97%	1%
EBordeira	91%	90%	91%	0%
EGuerreiros	100%	100%	100%	0%
EMadrinha	98%	98%	98%	0%
EPicoAlto	77%	77%	77%	0%
EMosteiro	71%	75%	73%	4%
EOrtiga	76%	80%	77%	4%
ECoentralSafra	100%	100%	100%	0%
ES.d'ELRei	87%	89%	87%	2%
Eamaral I	81%	85%	81%	4%
Earruda I	95%	95%	95%	0%
EBolores	61%	70%	62%	9%
Ecaldas I	76%	80%	76%	4%
EFanhões	83%	86%	83%	3%
EPó	57%	62%	58%	5%

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
Esobral II	88%	92%	88%	4%
EPenaSuar	72%	76%	74%	3%
EAlagoaCima	72%	76%	74%	4%
ES.Barroso	71%	70%	70%	1%
ES.Barroso II	80%	80%	80%	0%
ENegreloGuilhado	83%	81%	82%	2%
EPadrela	100%	100%	100%	0%
EAltoTalefe	62%	61%	62%	1%
EFonteMesa	60%	60%	60%	0%
EFonteQuelha	34%	34%	34%	0%
ETestos	73%	71%	72%	2%
EAbogalheira	57%	57%	57%	0%
Média	80,66%	82,05%	80,91%	1%
Desvio Padrão	16,09%	15,76%	16,00%	0%
Máximo	100%	100%	100%	9%
Mínimo	34,42%	34,09%	34,34%	0%

Anexo E.2. Resultados dos valores de eficiências CRS para o promotor Iberwind

As tabelas E.3 e E.4 contêm os valores de eficiência CRS obtidos no programa EMS utilizando as variáveis em análise que são (a) velocidade média do vento, (b) percentil 75% da velocidade do vento e o (c) número de horas por ano em que a velocidade do vento está entre os valores de *cut-in* e *cut-out*, para os anos 2010 e 2011.

Tabela E.3: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor Iberwind obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*) e percentil 75%), ano 2010.

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
IFreita	80%	79%	80%	1%
IBorninhos	71%	71%	71%	0%
ISerraBornes	92%	92%	92%	0%
ICHiqueiro	65%	65%	65%	0%
IDegracias	81%	81%	81%	0%
ILousã	66%	66%	66%	0%
ILousãII	88%	88%	88%	0%
IMalhadas	85%	84%	84%	0%

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
IMalhadizes	73%	73%	73%	0%
IPampilhosa	79%	77%	77%	2%
IRabaçal	91%	91%	91%	0%
ICHãoFalcão	76%	76%	76%	0%
IN ^a Sr. ^a Vitória	70%	70%	70%	0%
IAchada	100%	100%	100%	0%
IArcela	86%	86%	86%	0%
IgrjaNova	74%	74%	74%	0%
Ijarmeleira	75%	75%	75%	0%
IS.Mamede	68%	68%	68%	0%
ISerraEscusa	59%	59%	59%	0%
ISerra T.Mundo	91%	91%	91%	0%
ICandeeiros	100%	100%	100%	0%
ICabeçoAlto	65%	65%	66%	0%
ILombaSeixaI	54%	54%	54%	1%
IMeroicinha	84%	59%	84%	25%
IBigorne	68%	84%	68%	16%
ILeomil	66%	68%	66%	2%
IS.Cristovão	67%	65%	67%	2%
IS.Macário	72%	67%	72%	5%
IVilaLobos	74%	72%	74%	2%
ILombaSeixaII	59%	59%	59%	0%
Média	75,98%	75,30%	75,92%	1%
Desvio Padrão	11,91%	12,33%	11,86%	0%
Máximo	100%	100%	100%	25%
Mínimo	54,02%	53,55%	54,14%	0%

Tabela E.4: Resultados dos valores de eficiência CRS para o promotor Iberwind obtidos para cada variável (velocidade média, número de horas (entre as velocidades *cut-in* e *cut-out*) e percentil 75%), ano 2011.

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
IFreita	72%	70%	72%	2%
IBorninhos	69%	69%	69%	0%
ISerraBornes	87%	86%	87%	0%
ICHiqueiro	58%	58%	58%	0%
IDegracias	79%	78%	79%	1%
ILousã	63%	62%	63%	0%

DMU	Eficiência (Vel.Média)	Eficiência (Número de Horas)	Eficiência (Percentil 75%)	Máxima Diferença
ILousãII	88%	87%	88%	0%
IMalhadas	86%	85%	86%	1%
IMalhadizes	71%	70%	71%	1%
IPampilhosa	78%	78%	78%	0%
IRabaçal	81%	81%	81%	0%
ICHãoFalcão	71%	71%	71%	0%
IN ^a Sr. ^a Vitória	65%	65%	65%	0%
IAchada	100%	100%	100%	0%
IArcela	80%	80%	80%	0%
IgrjaNova	67%	67%	67%	0%
IJarmeleira	69%	69%	69%	0%
IS.Mamede	60%	60%	60%	0%
ISerraEscusa	64%	64%	64%	0%
ISerraT.Mundo	88%	88%	88%	0%
ICandeeiros	100%	100%	100%	0%
ICabeçoAlto	65%	64%	65%	1%
ILombaSeixaI	48%	47%	48%	1%
IMeroicinha	80%	80%	80%	0%
IBigorne	62%	62%	62%	0%
ILeomil	59%	57%	59%	2%
IS.Cristòvão	61%	61%	61%	0%
IS.Macário	65%	64%	65%	1%
IVilaLobos	74%	74%	74%	0%
ILombaSeixaII	55%	54%	55%	1%
Média	72,12%	71,78%	72,06%	0%
Desvio Padrão	12,74%	12,86%	12,80%	0%
Máximo	100%	100%	100%	2%
Mínimo	47,81%	47,01%	47,54%	0%

Anexo F. Resultados obtidos para avaliação de desempenho dos parques eólicos

Este anexo contém os resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos dos promotores EDP-R e Iberwind, para os anos 2010 e 2011.

Tabela F.1: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor EDP-R com o modelo CRS.

DMU	Eficiência 2010	Eficiência 2011
EAltoArganil	71,52%	100,00%
ESerraAlvoaça	100,00%	100,00%
ECabeçoRainha	89,82%	90,76%
ECabeçoRainhaII	100,00%	100,00%
ECadafaz	91,33%	95,67%
ES.João	78,72%	78,94%
EVilaNova	96,81%	97,48%
EBordeira	89,02%	90,41%
EGuerreiros	96,66%	100,00%
EMadrinha	100,00%	97,90%
EPicoAlto	81,34%	77,19%
EMosteiro	73,02%	75,06%
EOrtiga	78,83%	79,80%
ECoentralSafra	100,00%	100,00%
ES.d'EL Rei	89,22%	88,87%
EAmaraI	87,05%	84,90%
EArruda I	96,26%	94,73%
EBolores	66,25%	69,52%
ECaldas I	82,93%	80,13%
EFanhões	83,02%	86,40%
EPó	61,46%	62,24%
ESobral II	91,91%	92,10%
EPenaSuar	79,67%	75,63%
EAlagoaCima	78,73%	75,94%
ES.Barroso	79,74%	69,59%
ES.Barroso II	92,83%	80,00%
ENegreloGuilhado	92,54%	81,16%
EPadrela	100,00%	100,00%
EAltoTalefe	61,94%	61,12%
EFonteMesa	62,94%	59,69%
EFonteQuelha	33,97%	34,09%
ETestos	82,17%	71,46%
EAbogalheira	63,14%	56,86%
Média	82,81%	82,05%
Desvio Padrão	14,97%	15,52%
Mínimo	33,97%	34,09%

Tabela F.2: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor Iberwind com o modelo CRS.

DMU	Eficiência 2010	Eficiência 2011
IFreita	79,36%	69,95%
IBorninhos	70,85%	69,00%
ISerraBornes	91,68%	86,38%
IChiqueiro	64,69%	57,50%
IDegracia	81,28%	77,91%
ILousã	66,40%	62,47%
Ilousã II	88,10%	87,33%
IMalhadas	84,32%	84,96%
IMalhadizes	72,80%	69,58%
IPampilhosa	77,20%	78,35%
IRabaçal	90,87%	80,50%
IChãoFalcão	75,56%	71,05%
IN ^a Sr ^a Vitória	70,44%	64,56%
IAchada	100,00%	100,00%
IArcela	86,02%	80,46%
IgrejaNova	74,21%	67,27%
IJarmeleira	75,30%	69,37%
IS.Mamede	67,86%	60,48%
ISerraEscusa	58,53%	64,07%
ISerraT.Mundo	91,44%	87,93%
ICandeeiros	100,00%	100,00%
ICabeçoAlto	65,29%	64,31%
ILombaSeixaI	53,55%	47,01%
IMeroicinha	83,86%	79,96%
IBigorne	67,77%	61,96%
ILeomil	64,96%	57,35%
IS.Cristóvão	66,84%	61,38%
IS.Macário I	71,79%	64,28%
IVilaLobos	74,24%	73,60%
ILombaSeixaII	59,04%	54,49%
Média	75,81%	71,78%
Desvio Padrão	11,95%	12,86%
Mínimo	53,55%	47,01%

Anexo G

Anexo G.1. Resultados da avaliação de desempenho do promotor EDP-R

Os resultados da avaliação de desempenho para os parques eólicos eficientes e ineficientes, do promotor EDP-R para os anos 2010 e 2011 estão apresentados nas tabelas G.1 e G.2, respetivamente.

Tabela G.1: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor EDP-R com o modelo CRS, ano 2010.

		EDP-R, 2010		
		DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
1	EAltoArganil	139,82%	2 (0,49) 4 (0,35) 14 (0,18)	
2	ESerraAlvo	100,00%	1	
3	ECabeçoRainha	111,33%	4 (0,67) 28 (0,19)	
4	ECabeçoRainha II	100,00%	25	
5	ECadafaz	109,49%	4 (0,22) 28 (0,44)	
6	ES.João	127,03%	4 (0,65) 28 (0,20)	
7	EVilaNova	103,30%	4 (0,81) 28 (0,11)	
8	EBordeira	112,34%	4 (0,55) 28 (0,75)	
9	EGuerreiros	103,46%	4 (0,30) 28 (0,89)	
10	EMadrinha	100,00%	2	
11	EPicoAlto	122,94%	10 (0,57) 28 (0,03)	
12	EMosteiro	136,94%	4 (0,18) 28 (0,46)	
13	EOrtiga	126,85%	4 (0,35) 28 (0,31)	
14	ECOentralSafra	100,00%	1	
15	ES.d' El Rei	112,08%	4 (0,66) 28 (0,14)	
16	EAmaraI	114,88%	4 (0,20) 28 (0,40)	
17	EArruda I	103,89%	4 (0,04) 28 (0,49)	
18	EBolores	150,95%	4 (0,05) 28 (0,48)	
19	ECaldas I	120,58%	4 (0,20) 28 (0,40)	
20	EFanhões	120,46%	4 (0,53) 28 (0,22)	
21	EPó	162,72%	4 (0,20) 28 (0,40)	
22	ESobral II	108,80%	4 (0,36) 28 (0,31)	
23	EPenaSuar	125,51%	4 (0,47) 28 (0,17)	
24	EAlagoaCima	127,01%	4 (0,38) 28 (0,22)	
25	ES.Barroso	125,40%	4 (0,33) 28 (0,81)	
26	ES.Barroso II	107,72%	28 (1,00)	

EDP-R, 2010			
	DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
27	ENegreloGuilhado	108,06%	4 (0,41) 28 (0,77)
28	EPadrela	100,00%	28
29	EAltoTalefe	161,45%	4 (0,22) 28 (0,87)
30	EFonteMesa	158,89%	4 (0,10) 28 (0,94)
31	EFonteQuelha	294,41%	4 (0,22) 28 (0,87)
32	ETestos	121,70%	4 (0,57) 28 (0,68)
33	EAbogalheira	158,38%	10 (0,05) 28 (0,35)

Tabela G.2: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor EDP-R com o modelo CRS, ano 2011.

EDP-R, 2011			
	DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
1	EAltoArganil	100,00%	8
2	ESerraAlvo	100,00%	0
3	ECabeçoRainha	110,18%	14 (0,46) 28 (0,41)
4	ECabeçoRainha II	100,00%	0
5	ECadafaz	104,53%	14 (0,15) 28 (0,53)
6	ES.João	126,68%	9 (0,09) 14 (0,42) 28 (0,34)
7	EVilaNova	102,58%	1 (0,60) 9 (0,24)
8	EBordeira	90,41%	1 (0,24) 9 (0,86)
9	EGuerreiros	100,00%	17
10	EMadrinha	102,15%	9 (0,56)
11	EPicoAlto	129,55%	9 (0,33)
12	EMosteiro	133,23%	14 (0,12) 28 (0,54)
13	EOrtiga	125,31%	9 (0,07) 14 (0,25) 28 (0,22)
14	ECoentralSafra	100,00%	13
15	ES.d' El Rei	112,53%	9 (0,04) 14 (0,47) 28 (0,17)
16	EAmaraI	117,78%	1 (0,11) 9 (0,33)
17	EArruda I	105,56%	9 (0,33)
18	EBolores	143,84%	14 (0,06) 28 (0,36)
19	ECaldas I	124,80%	1 (0,11) 9 (0,33)
20	EFanhoes	115,74%	1 (0,43) 9 (0,13)
21	EPó	160,68%	14 (0,16) 28 (0,32)
22	ESobral II	108,58%	1 (0,27) 9 (0,23)
23	EPenaSuar	132,22%	14 (0,32) 28 (0,36)
24	EAlagoaCima	131,68%	14 (0,25) 28 (0,39)
25	ES.Barroso	143,70%	9 (1,00)
26	ES.Barroso II	125,00%	9 (0,56)
27	ENegreloGuilhado	123,21%	1 (0,06) 9 (0,99)

EDP-R, 2011			
	DMU	Eficiência	Parques Benchmarks (λ)
28	EPadrela	100,00%	14
29	EAltoTalefe	163,60%	14 (0,15) 28 (0,94)
30	EFonteMesa	167,52%	14 (0,07) 28 (0,97)
31	EFonteQuelha	293,31%	14 (0,15) 28 (0,94)
32	ETestos	139,93%	1 (0,22) 9 (0,89)
33	EAbogalheira	175,87%	9 (0,07) 28 (0,28)

Anexo G.2. Resultados dos *benchmarks* do promotor Iberwind

Os resultados da avaliação de desempenho para os parques eólicos eficientes e ineficientes, do promotor Iberwind para os anos 2010 e 2011 estão apresentados nas tabelas G.3 e G.4, respetivamente.

Tabela G.3: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor Iberwind com o modelo CRS, ano 2010.

Iberwind, 2010			
	DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
1	IFreita	79,36%	14 (1,91) 21 (0,05)
2	IBorninhos	70,85%	14 (0,29)
3	ISerraBornes	91,68%	14 (0,53) 21 (0,51)
4	Ichiqueiro	64,69%	14 (0,58)
5	Idegracias	81,28%	14 (0,98) 21 (0,12)
6	ILousã I	66,40%	14 (0,84) 21 (0,26)
7	ILousã II	88,10%	14 (0,69) 21 (0,41)
8	IMalhadas	84,32%	14 (1,08) 21 (0,02)
9	IMalhadadizes	72,80%	14 (1,06) 21 (0,04)
10	IPampilhosa	77,20%	21 (1,03)
11	IRabaçal	90,87%	14 (0,29)
12	IChãoFalcao	75,56%	14 (0,29) 21 (0,71)
13	IN ^a Sr. ^a Vitória	70,44%	14 (0,95) 21 (0,05)
14	IAchada	100,00%	27
15	IArcela	86,02%	14 (0,96) 21 (0,04)
16	IgrejaNova	74,21%	14 (1,00) 21 (0,00)
17	IJarmeleira	75,30%	14 (0,13)
18	IS.Mamede	67,86%	14 (1,00)
19	ISerraEscusa	58,53%	14 (0,29)

		Iberwind, 2010		
		DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
20	ISerraT.Mundo	91,44%	14 (0,97) 21 (0,03)	
21	ICandeeiros	100,00%	14	
22	ICabeçoAlto	65,29%	14 (1,70)	
23	ILombaSeixa I	53,55%	14 (1,88)	
24	IMeroicinha	83,86%	14 (1,30)	
25	IBigorne	67,77%	14 (1,01)	
26	ILeomil	64,96%	14 (1,93) 21 (0,03)	
27	IS.Cristóvão	66,84%	14 (0,77)	
28	IS.Macário	71,79%	14 (1,67)	
29	IVilaLobos	74,24%	14 (1,45)	
30	ILombaSeixa II	59,04%	14 (1,74)	

Tabela G.4: Resultados obtidos da avaliação de desempenho dos parques eólicos para o promotor Iberwind com o modelo CRS, ano 2011.

		Iberwind, 2011		
		DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
1	IFreita	69,95%	14 (2,59) 21 (0,00)	
2	IBorninhos	69,00%	14 (0,29)	
3	ISerraBornes	86,38%	14 (0,94) 21 (0,48)	
4	Ichiqueiro	57,50%	14 (0,58)	
5	Idegracias	77,91%	14 (1,43) 21 (0,09)	
6	ILousã I	62,47%	14 (1,29) 21 (0,24)	
7	ILousã II	87,33%	14 (1,15) 21 (0,38)	
8	IMalhadas	84,96%	14 (1,43)	
9	IMalhadadizes	69,58%	14 (1,51) 21 (0,01)	
10	IPampilhosa	78,35%	21 (1,03)	
11	IRabaçal	80,50%	14 (0,29)	
12	ICHãoFalcao	71,05%	14 (0,29) 21 (0,71)	
13	IN ^a Sr. ^a Vitória	64,56%	14 (0,95) 21 (0,05)	
14	IAchada	100,00%	27	
15	IArcela	80,46%	14 (0,96) 21 (0,04)	
16	IgrejaNova	67,27%	14 (1,00) 21 (0,00)	
17	IJarmeleira	69,37%	14 (0,13)	
18	IS.Mamede	60,48%	14 (1,00)	
19	ISerraEscusa	64,07%	14 (0,29)	
20	ISerraT.Mundo	87,93%	14 (0,97) 21 (0,03)	
21	ICandeeiros	100,00%	12	
22	ICabeçoAlto	64,31%	14 (1,70)	
23	ILombaSeixa I	47,01%	14 (1,88)	
24	IMeroicinha	59,96%	14 (1,74)	

Iberwind, 2011			
	DMU	Eficiência	Parques <i>Benchmarks</i> (λ)
25	IBigorne	61,96%	14 (1,01)
26	ILeomil	57,35%	14 (2,33)
27	IS.Cristóvão	61,38%	14 (0,77)
28	IS.Macário	64,28%	14 (1,67)
29	IVilaLobos	73,60%	14 (1,45)
30	ILombaSeixa II	54,49%	14 (1,74)

Anexo H. Verificação do número de horas equivalentes, no ajustamento radial

Nesta secção compara-se o número de horas equivalentes dos parques ineficientes. Após o ajustamento radial no *output* o número de horas equivalentes é superior à dos respectivos *benchmarks*. O número de horas equivalentes para cada parque é definido pela expressão (H.1).

$$\text{número de horas equivalentes para o parque } j_o = \frac{\text{energia produzida (GWh)}}{\text{potência eléctrica (MW)}} \quad (\text{H.1})$$

A análise efetuada é ilustrada com os seguintes exemplos. Para o promotor EDP-R, considera-se o parque eólico Madrinha e verifica-se que o número de horas equivalentes corrigido não é superior ao número de horas observado no parque *benchmark* Arruda I, como se mostra na tabela H.1.

Tabela H.1: Resultados da Comparação do número de horas equivalentes corrigido para o parque Madrinha com o número de horas equivalentes do *benchmark* (Arruda I).

CRS, 2011-Promotor EDP-R			
	Capacidade Instalada (MW)	Energia eléctrica (GWh)	Número de horas equivalentes
EMadrinha	10	28,5	2849,99
EArruda I	6	17,10	2850,12

Para o promotor Iberwind, considera-se o parque eólico Rabaçal e verifica-se que o número de horas equivalentes corrigido não é superior ao número de horas observado no parque *benchmark* São Macário I, como se mostra na tabela H.2.

Tabela H.2: Resultados da Comparação do número de horas equivalentes corrigido para o parque Rabaçal com o número de horas equivalentes do *benchmark* (São Macário I).

CRS, 2011-Promotor Iberwind			
	Capacidade Instalada (MW)	Energia elétrica (GWh)	Número de horas equivalentes
IRabaçal	2	6,09	3043,39
IS.MacárioI	11,5	35,00	3043,57

Anexo I. Avaliação da eficiência do promotor para o ano 2010

Os *outputs* ajustados para os parques EDP-R e Iberwind, que resultam da remoção da ineficiência de origem radial na eficiência de operação de cada parque são apresentados nas tabelas I.1 e I.2. Este ajuste radial resulta da multiplicação do *output* de cada parque pelo valor δ_0^* obtido no modelo (3.10). Uma vez que a avaliação de desempenho dos parques toma em conta o efeito de uma variável não controlável, o vento, optou-se por fazer apenas ajustamento radial no *output*, não se considerando ajustamentos não radiais (Vaz, Clara 2007).

Tabela I.1: Ajustamento radial do *output* para os parques do promotor EDP-R para o ano 2010.

DMU	δ_0^*	<i>output</i>	<i>output</i> *
EArganil	139,82%	68,7	96,05
ESAlvoaça	100,00%	95,2	95,20
ERainha	111,33%	57,2	63,68
ERainhaII	100,00%	87,3	87,30
ECadafaz	109,49%	29,4	32,19
ESJoaoI	127,03%	49,1	62,37
EVilaNova	103,30%	71,3	73,65
EBordeira	112,34%	62,3	69,99
EGuerreiros	103,46%	50,8	52,56
EMadrinha	100,00%	29,3	29,30
EPicoAlto	122,94%	14,3	17,58
EMosteiro	136,94%	21,4	29,30
EOrtiga	126,85%	31,6	40,09
ECoentralSafra	100,00%	106,7	106,70
ES.D'El Rei	112,08%	55,2	61,87
EAmaraII	114,88%	25,4	29,18
EArrudaI	103,89%	16,9	17,56
EBolores	150,95%	12,3	18,57

DMU	δ_0^*	<i>output</i>	<i>output</i> *
ECaldasI	120,58%	24,2	29,18
EFanhões	120,46%	43,3	52,16
EPó	162,72%	17,7	28,80
ESobralII	108,80%	37,5	40,80
EPenaSuar	125,51%	36,8	46,19
EAlagoa	127,01%	31,2	39,63
EBarroso	125,40%	41,9	52,54
EBarrosoII	107,72%	27,2	29,30
ENegrelo	108,06%	54,0	58,35
EPadrela	100,00%	29,3	29,30
ETalefe	161,45%	27,9	45,05
EFonteMesa	158,89%	22,9	36,39
EQuelha	294,41%	15,3	45,05
ETestos	121,70%	57,5	69,98
EAbogalheira	158,38%	7,4	11,72
Media	126,56%	41,2	48,41
Desvio Padrão	36%	24,55	24,40

Tabela I.2: Ajustamento radial do *output* para os parques do promotor Iberwind, para o ano 2010.

DMU	δ_0^*	<i>output</i>	<i>output</i> *
IFreitaI	126,01%	46,6	58,72
IBorninhos	141,15%	4,6	6,49
ISbornes	109,07%	168,6	183,90
ICHiqueiro	154,59%	8,4	12,99
IDegracia	123,03%	50,7	62,37
IousãI	150,60%	71,7	107,98
IousãII	113,51%	135,3	153,58
IMalhadas	118,60%	26,7	31,67
IMalhadizes	137,37%	27,7	38,05
IPampilhosa	129,53%	268,7	348,06
IRabaçal	110,05%	5,9	6,49
ICFalcão	132,35%	186,0	246,17
ISVitória	141,97%	26,7	37,91
IAchada	100,00%	22,4	22,40
IArcela	116,25%	31,3	36,39
IgrejaNova	134,75%	17,3	23,31
IJarmeleira	132,81%	2,2	2,92
ISMamede	147,37%	15,2	22,40
ISEscusa	170,86%	3,8	6,49
ISMundo	109,36%	29,1	31,83

DMU	δ_0^*	<i>output</i>	<i>output</i> *
ICandeeiros	100,00%	338,9	338,90
ICabeçoAlto	153,16%	24,8	37,98
ILSeixaI	186,74%	22,6	42,20
IMeroicinha	119,25%	24,5	29,22
IBigorne	147,56%	15,4	22,72
ILeomil	153,95%	33,6	51,73
ISCristóvão	149,62%	11,5	17,21
ISMacarioI	139,30%	26,8	37,33
IVilaLobos	134,70%	24,1	32,46
ILSeixaII	169,38%	23,0	38,96
Média	135,10%	56,5	69,63
Desvio Padrão	21%	81,55	92,32

Os dados ajustados de cada parque foram utilizados para avaliar em conjunto a eficiência dos promotores em análise, livres de ineficiências de operação, obtendo-se os resultados da tabela I.3.

Nesta fase, o valor de eficiência obtido para cada parque, medido em relação à fronteira *pooled* é apenas atribuída às características do promotor.

Tabela I.3: Avaliação de desempenho de todos os parques eólicos em estudo (ajustamento radial), para o ano 2010.

	DMU	Eficiência*	Parques <i>Benchmarks</i> * (λ^*)
1	EAltoArganil	85,34%	28 (0,41226) 54 (0,29647)
2	ES.Alvoaça	84,36%	28 (0,41179) 54 (0,29740)
3	ECabeçoRainha	89,89%	28 (0,47816) 54 (0,16769)
4	ECabeçoRainha II	89,04%	28 (0,43518) 54 (0,25168)
5	ECadafaz	93,12%	28 (0,53545) 54 (0,05571)
6	ES.Joao	89,96%	28 (0,48054) 54 (0,16303)
7	EVilaNova	89,47%	28 (0,46001) 54 (0,20315)
8	EBordeira	87,95%	28 (0,98490) 54 (0,14967)
9	EGuerreiros	85,54%	28 (1,01355) 54 (0,09368)
10	EMadrinha	84,20%	28 (0,66667) 43 (0,02857) 54 (0,01570)
11	EPicoAlto	84,20%	28 (0,40000) 43 (0,01334) 54 (0,01333)
12	EMosteiro	93,79%	28 (0,54070) 54 (0,04545)
13	EOrtiga	91,32%	28 (0,46600) 54 (0,08923)
14	ECoentralSaфра	82,24%	28 (0,33040) 54 (0,35425)
15	ES.d'EL Rei	89,68%	28 (0,42637) 54 (0,16669)
16	EAmaraI	86,80%	28 (0,48224) 54 (0,05751)

	DMU	Eficiência*	Parques <i>Benchmarks</i> * (λ^*)
17	EArruda I	84,09%	28 (0,40000) 43 (0,01687) 54 (0,00970)
18	EBolores	97,16%	28 (0,50516) 54 (0,01271)
19	ECaldas I	86,80%	28 (0,48224) 54 (0,05751)
20	EFanhões	90,24%	28 (0,44404) 54 (0,13216)
21	EPó	93,22%	28 (0,48653) 54 (0,04911)
22	ESobral II	89,26%	28 (0,46314) 54 (0,09483)
23	EPenaSuar	90,11%	28 (0,37599) 54 (0,11874)
24	EAlagoaCima	90,68%	28 (0,38793) 54 (0,09541)
25	ES.Barroso	86,08%	28 (0,94987) 54 (0,09798)
26	ES.Barroso II	84,20%	28 (0,66667) 43 (0,02837) 54 (0,01591)
27	ENegreloGuilhado	86,99%	28 (0,94032) 54 (0,11665)
28	EPadrela	100,00%	60
29	EAltoTalefe	94,96%	28 (0,97135) 54 (0,05599)
30	EFonteMesa	97,13%	28 (0,98711) 54 (0,02520)
31	EFonteQuelha	94,96%	28 (0,97135) 54 (0,05599)
32	ETestos	88,38%	28 (0,92122) 54 (0,15397)
33	EAbogalheira	94,67%	28 (0,36000) 43 (0,00268) 54 (0,00265)
34	IFreita	96,33%	28 (0,74667) 43 (0,04151) 54 (0,07268)
35	IBorninhos	9,03%	28 (0,13333) 43 (0,00460) 54 (0,00428)
36	ISerraBornes	99,47%	28 (0,26473) 54 (0,52265)
37	ICHiqueiro	93,29%	28 (0,26667) 43 (0,00893) 54 (0,00884)
38	IDegracias	97,17%	28 (0,48866) 54 (0,14716)
39	ILousã I	98,58%	28 (0,41704) 54 (0,28714)
40	ILousã II	99,17%	28 (0,34542) 54 (0,42711)
41	IMalhadas	94,07%	28 (0,53688) 54 (0,05291)
42	IMalhadadizes	95,10%	28 (0,52686) 54 (0,07251)
43	IPampilhosa	100,00%	17
44	IRabaçal	93,29%	28 (0,13333) 43 (0,00381) 54 (0,00510)
45	ICHãoFalcão	99,78%	28 (0,14562) 54 (0,71537)
46	IN ^a Sr. ^a Vitória	95,57%	28 (0,47269) 54 (0,07616)
47	IAchada	97,99%	28 (0,28000) 43 (0,03614) 54 (0,00613)
48	IArcela	95,50%	28 (0,46667) 43 (0,01212) 54 (0,05962)
49	IgrjaNova	92,67%	28 (0,49561) 54 (0,03138)
50	IJarmeleira	83,10%	28 (0,12000)
51	IS.Mamede	97,99%	28 (0,28000) 43 (0,03614) 54 (0,00613)
52	ISerraEscusa	83,10%	28 (0,26667)
53	ISerraT.Mundo	94,67%	28 (0,48224) 54 (0,05751)
54	ICandeeiros	100,00%	58
55	ICabeçoAlto	90,45%	28 (0,97995) 54 (0,03919)
56	ILombaSeixa I	91,90%	28 (0,97374) 54 (0,05132)

	DMU	Eficiência*	Parques <i>Benchmarks</i> * (λ^*)
57	IMeroicinha	97,27%	28 (0,40000) 43 (0,02697) 54 (0,02635)
58	IBigorne	88,63%	28 (0,66666) 43 (0,00876) 54 (0,00902)
59	ILeomil	96,98%	28 (0,65333) 43 (0,05822) 54 (0,04111)
60	IS.Cristóvão	88,97%	28 (0,49333) 43 (0,01384) 54 (0,00020)
61	IS.Macário	97,99%	28 (0,46667) 43 (0,03649) 54 (0,03459)
62	IVilaLobos	88,08%	28 (0,98806) 54 (0,02333)
63	ILombaSeixa II	90,80%	28 (0,97851) 54 (0,04199)