

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

# **Sistema de Controlo e Exploração de um Parque Eólico**

Frederico Jorge Mendes Fonseca

VERSÃO FINAL

Relatório de Projecto realizado no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. José Rui Pinto Ferreira

Co-orientador: Eng. Fernando Ferreira

Junho de 2008



# Resumo

O projecto desenvolvido foi proposto pela PROEF (empresa que pertence ao grupo Eurico Ferreira, localizado na Trofa). A empresa começou recentemente a investir na área das energias renováveis.

Actualmente a PROEF possui um parque eólico (parque eólico do Zibreiro), que se localiza no concelho de torre de Moncorvo, mais precisamente na freguesia de Felgar, sendo constituído por quatro aerogeradores assíncronos de 2MW.

A PROEF tem como objectivo expandir os seus investimentos em parques eólicos, para isso necessita de uma maneira eficiente e simples de manusear os dados fornecidos pelo SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) do seu parque e dos parques que futuramente irá construir.

Para simplificar e organizar esses procedimentos, foi proposto o desenvolvimento de uma plataforma de simples acesso, com a finalidade de gerar relatórios com a facturação da energia vendida mensalmente e permitir que esses mesmos dados possam vir a ser consultados no futuro.

O programa desenvolvido está adequado para gerar relatórios de facturação para qualquer parque eólico localizado em Portugal, encontrando-se abrangido pelo Decreto-Lei 339 de 29 de Dezembro de 2001 e também pelo Decreto-Lei 225 de 31 de Maio de 2007.

A outra parte do trabalho proposto consiste em procurar soluções para minimizar a injeção de energia reactiva por parte dos cabos de média tensão durante as horas de vazio no parque eólico do Zibreiro.



# Abstract

The development Project it was proposed by PROEF (Eurico Ferreira holding), the company began recently to invest in replaceable energy area.

Actually, the PROEF has a eolic park( zibreiro eolic park), in moncorvo tower site, more exactly in felgar site, with four assincrono aerogenerators of 2MW, but your objective in future, is to have more eolic parks in nacional land.

For that it's necessary to have a efficient and easy way to handle all figures supply by SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) from this eolic park and others futures eolics park to organize, and make easy procedures, it was propose a process development of easy access, with aim generate reports of the energy sold monthly, and with the possibility of this figures be observed in future.

This programme is adequated to generate the bill energy reports to any other eolic park sited in Portugal and is under the law decree 339 of 29 December of 2001 and law decree 225 of 31 May of 2007.

The other part of this work, is for solutions to minimize the reactive energy injection that came from medium cable tension during the unload hours in Zibreiro eolic park.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar à minha família, por todo o grande apoio e incentivo dado durante todos estes anos da minha vida, eu sei que ele continuara a existir, por isso mais um motivo para agradecer.

À Leny pela sua grande dedicação e paciência para me aturar, para além de rever, opinar e corrigir todos os erros do meu texto.

Aos amigos que fiz aqui na FEUP, pelos jantares, noites de festa, discussões futebolísticas e pelas muitas horas de estudo dedicadas.

Ao Nuno, meu companheiro neste último semestre na PROEF, pelas diversas ajudas dadas durante a realização deste trabalho.

Ao Professor José Rui Ferreira pela sua total disponibilidade em ajudar e opinar sobre o trabalho.



# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Abreviaturas e Símbolos</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1 - Contexto Histórico .....	2
1.1.1 – Breve Referência ao desenvolvimento da energia eólica em território nacional .....	3
1.2 - Origem do Vento .....	3
1.3 - Rugosidade do Terreno .....	4
1.4 - Orografia.....	5
1.4- Distribuição de Weibull .....	5
1.5- Aproveitamento do Vento.....	6
1.6- Estudo do potencial eólico .....	7
1.7 - Aerogeradores .....	9
1.8- Parque Eólico .....	14
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>15</b>
Políticas de Desenvolvimento .....	15
2.1- Objectivos a atingir.....	15
2.2 – Evolução Legislativa .....	16

<b>Capítulo 3</b> .....	<b>17</b>
Análise da Remuneração .....	17
3.1- Tarifação segundo o DL 225/2007 .....	17
3.2- Coeficiente KMHO .....	18
3.3 – Parcela Fixa PF(VRD) .....	19
3.4- Parcela Variável PV(VRD) .....	19
3.5 – Parcela Ambiental PA(VRD).....	20
3.6 – Coeficiente Z – Majoração Ambiental.....	20
3.7 – Validade da Remuneração VRD .....	20
3.8 – Diferenças da Remuneração do DL 339-C/2001 em comparação com o DL 225/2007.....	20
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>23</b>
Plataforma para Remuneração de Parques Eólicos .....	23
4.1 – Base de Dados .....	23
4.2 – Aplicativo de Base de Dados .....	24
4.3 – Microsoft Access .....	24
4.4 – Estrutura da Base de Dados .....	25
4.5 – Esquema de Funcionamento do GPE .....	26
4.6 – Adicionar Parque.....	27
4.7 – Gerar Relatório.....	28
4.8 – Pesquisar Relatórios.....	31
4.9 - Visualizar Gráficos.....	32
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>35</b>
Compensação da Energia Reactiva.....	35
5.1 – Energia Reactiva .....	35
5.2 – Análise da Legislação.....	36
5.3 – Estrutura do Parque do Zibreiro .....	37
5.3.1 – Aerogeradores do Parque .....	38
5.3.2 – Cabos de distribuição .....	39
5.3.3 – Transformador de Grupo .....	39
5.4 – Tipos de Compensação Alternativos para Energia Reactiva .....	40
5.4.1 – Utilização do inversor da máquina .....	40
5.4.2 – Utilização de FACTS.....	40
5.5 – Propostas para Optimizar a Energia Reactiva .....	40
5.5.1 – Operação com FP = 1 .....	41
5.5.2 – Operação com FP = 0.98 .....	41

5.5.3 – Operação com FP variável .....	41
5.6 – Resultados da Pesquisa.....	42
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>43</b>
<b>Conclusão .....</b>	<b>43</b>
<b>Referências .....</b>	<b>45</b>



## Lista de figuras

Figura 1-2 – naus portuguesas .....	3
Figura 1-3 - Distribuição de Weibull para uma altura de 50m.....	6
Figura 1-4 - curva de potência de um aerogerador de 2MW .....	7
Figura 1-5 - Aerogerador .....	9
Figura 1-6 - constituição de um aerogerador .....	11
Figura 1-7 – pá de um aerogerador pronta a ser transportada e montada.....	11
Figura 1-8 – aparelho que mede a direcção e intensidade dos ventos .....	13
Figura 1-9 – Parque Eólico .....	14
Figura 4-1 – Esquema de funcionamento do GPE.....	26
<b>Figura 4-2</b> – Interface inicial do GPE .....	27
Figura 4-3 - Interface da opção “Adicionar Parque” .....	27
Figura 4-4 - mensagem de confirmação.....	28
Figura 4-5 - Mensagem de Parque já existente .....	28
Figura 4-6– Interface de introdução de dados.....	29
Figura 4-7 - <b>Relatório de remuneração</b> .....	30
Figura 4-8 .....	31
Figura 4-9 - interface de pesquisa.....	31
Figura 4-10 - mensagem de erro.....	32
Figura 4-11 – Interface de escolha de dados para visualização gráfica .....	33
Figura 4-12 – mensagem de informação .....	33

<b>Figura 4-13</b> – Representação gráfica da energia activa produzida .....	34
Figura 5-1– Esquema unifilar do parque .....	37
Figura 5-2 – Diagrama PQ dos aerogeradores Vestas V80 (2MW) .....	38

## Lista de tabelas

Tabela 4-1- Descrição de tabelas existentes na Base de Dados .....	25
Tabela 5-1 – parâmetros dos cabos de 30kV .....	39
Tabela 5-2 – parâmetros do transformador .....	39



# Abreviaturas e Símbolos

DL	Decreto-Lei
FP	Factor de Potência
GPE	Gestão de Parques Eólicos
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SGBD	Sistema Gerenciador de Base de Dados
SQL	<i>Structured Query Language</i>
UE	União Europeia
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Lista de símbolos

$A_e$	Factor de escala
$A_p$	Área varrida pelo rotor
$C_p$	Coefficiente de potência
$k$	Factor de forma
$V$	Velocidade do vento
$\lambda$	Relação de velocidade na extremidade da pá
$\theta$	Ângulo <i>Pitch</i>

$\rho$	Densidade do ar
$W_r$	Velocidade angular do rotor
$R$	Raio do rotor





# Capítulo 1

## Introdução

Devido ao aumento do aquecimento global e à escassez dos combustíveis fósseis, hoje em dia deparamo-nos com uma série de novas preocupações a nível da produção de energia.

Com o objectivo de fazer frente a estes problemas, podemos observar no cenário mundial que cada vez mais a energia proveniente de fontes renováveis está a ganhar destaque na geração de energia eléctrica.

Uma das tecnologias que mais evoluiu em termos tecnológicos e viu a sua capacidade instalada crescer exponencialmente nos últimos anos, foi a energia eólica.

A energia eólica utiliza como matéria-prima o vento, a energia cinética contida nos ventos é a fonte primária de energia que irá transformar-se em electricidade. O seu aproveitamento ocorre por meio da conversão de energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de aerogeradores, para a geração de electricidade.

O princípio de funcionamento consiste na movimentação das pás do rotor através da força do vento, as pás captam a energia cinética contida no vento, produzindo binário no rotor, accionando assim o gerador e obtendo como resultado final a energia eléctrica.

Energia Cinética → Produção de Binário → Energia Eléctrica

**Vento**

**Rotor**

**Gerador**

Este é um dos meios de produção de energia considerada renovável, ou seja, é uma fonte de energia limpa que não emite dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera, tendo também a vantagem do preço da sua matéria-prima ser nulo, não estando assim dependente das variações dos preços dos combustíveis fósseis.

## Introdução

Para que o aerogerador seja instalado com rentabilidade, é necessário fazer estudos sobre o regime de ventos da região, se possui ventos suficientemente fortes e constantes ao longo do ano, verificar os impactos ambientais que possivelmente poderão causar, incentivos que possam ter para a implantação do projecto, as exigências para interligação à rede eléctrica, e a escolha ideal do aerogerador a instalar (custo/rendimento).

Para haver um controlo da produção e da remuneração do parque é necessário manipular os dados fornecidos pelo SCADA, para tal foi desenvolvido neste projecto uma plataforma de gestão e controlo desses dados.

### 1.1 - Contexto Histórico

A utilização da força do vento como fonte de energia, remonta-se à data do aparecimento das primeiras grandes civilizações. Egípcios, Gregos e Romanos, utilizaram esta matéria-prima para movimentarem os seus barcos, através do uso de velas que aproveitavam esta força da natureza.

Porém, é só na Idade Média que vamos observar um desenvolvimento técnico substancial para a rentabilização do uso do vento. Foi nesta época histórica que se deram invenções importantes, como a criação e desenvolvimento do moinho de vento horizontal com hélices e o aperfeiçoamento na fabricação de lâminas aerodinâmicas, havendo também, de um modo geral uma modernização dos desenhos de engrenagem. Grande parte deste avanço tecnológico, deveu-se aos Holandeses que usavam este tipo de moinhos nos seus campos para a moagem de grãos e bombeamento de água.



**Figura 1-1** – moinho de vento

Continuando a enquadrar esta matéria no contexto histórico, se no século XIX o moinho de vento tinha como principal função bombear a água, já no século XX este foi repensado, sendo agora concebido para transformar energia mecânica em energia eléctrica.

Esta “nova ideia” surgiu como uma das soluções possíveis para se fazer frente às crises económicas provocadas pelo petróleo. E se no início a aplicação dos moinhos de vento para a produção de energia eléctrica, era alvo de opiniões críticas que alegavam o elevado custo de instalação e uma difícil manutenção, hoje, com o desenvolvimento tecnológico que ocorreu nesta área, provou-se que para além de serem perfeitamente rentáveis são uma boa aposta em alternativa ao uso dos combustíveis fósseis para geração de energia.

### 1.1.1 - Breve Referência ao desenvolvimento da energia eólica em território nacional

Vanguardista na arte da navegação, Portugal desde cedo começou a aproveitar a energia dos ventos nas suas embarcações, como óptimo exemplo disso podemos apontar as já muito conhecidas naus portuguesas.



Figura 1-2 – naus portuguesas

Para além do aproveitamento dos ventos nesta área, seguimos também a tendência europeia de criar moinhos de vento para a moagem de cereais e bombagem de água.

Em meados do século XX na região do Ribatejo já havia pequenos aerogeradores que produziam energia eléctrica (em corrente contínua), essa energia eléctrica era utilizada para fazer a bombagem da água e utilizada também para as operações de irrigação. Infelizmente essa tecnologia foi abandonada durante alguns anos em nosso país.

No entanto, no que toca à transformação da energia eólica em energia eléctrica para ser injectada na rede, foi a partir de 2001 que se verificou um forte crescimento neste sector, impulsionado pela necessidade de cumprir as directivas emanadas pela União Europeia (nomeadamente a Directiva comunitária 2001/77/CE), respeitantes ao acordo de Kyoto.

O primeiro parque eólico construído em Portugal foi o de Santa Maria (nos Açores) em 1988, no final de 2007 o nosso país já possuía uma potência instalada de 2100MW.

Assim, podemos concluir que apesar do atraso que sofremos em relação a outros países na utilização da energia eólica, com o forte investimento que temos verificado por parte do governo e também dos particulares, no final de 2007 já éramos os décimos maiores produtores mundiais deste tipo de energia.

## 1.2 - Origem do Vento

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre, o que origina o aquecimento das massas de ar que a circundam.

## Introdução

O ar quente é mais leve que o ar frio, pelo que subirá até alcançar uma altura de aproximadamente 10km e extender-se-á quer para norte quer para sul.

Uma estimativa da energia total disponível dos ventos, ao redor do planeta, pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela terra é convertida em energia cinética dos ventos. Esta percentagem representa cerca de vinte vezes o actual consumo mundial de energia, fazendo com que a energia eólica seja uma importante fonte de energia [1].

Os ventos devidos a diferenças de temperatura mais conhecidos são as brisas marítimas e ventos locais:

**Brisas marítimas:** Originadas pelas diferenças de temperatura entre o mar e a terra.

Durante o dia, devido a maior capacidade da terra de reflectir os raios solares, a temperatura do ar aumenta. Como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima).

Durante a noite, observamos o fenómeno contrário. Como a terra irá arrefecer mais rapidamente que o mar, dá-se a inversão da corrente (brisa terrestre).

Normalmente a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido a menor diferença de temperatura que ocorre no período nocturno. A força dos ventos resultante depende da diferença de temperatura entre ambos elementos, pelo que as brisas se fazem sentir com maior intensidade no Verão [2].

**Ventos locais:** São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais. A manifestação local de ventos mais conhecida, é a dos ventos oriundos das diferenças de temperatura entre as zonas altas dos montes e vales. Durante o dia, o ar quente que se encontra junto às encostas sobe, sendo substituído por ar frio que se desloca do cume da montanha para o vale. Durante o período nocturno, a direcção em que sopram os ventos é invertida [2].

### 1.3 - Rugosidade do Terreno

A rugosidade do terreno é a influência exercida pelos obstáculos à passagem do vento. A velocidade do vento é afectada pela fricção com a superfície terrestre, por isso é que os parques eólicos são instalados em locais sem obstáculos que prejudiquem a passagem do vento, como por exemplo prédios, casas, fábricas, ..., entre outros.

Quanto maior a rugosidade do terreno, maior será a perda da energia cinética contida no vento, sendo o seu aproveitamento prejudicado.

Na indústria eólica, é frequente utilizar o conceito de rugosidade para avaliar as condições eólicas de um determinado local. Assim, uma classe alta de rugosidade (3 ou 4) refere-se a zonas densamente arborizadas ou com elevada densidade populacional. O mar por exemplo apresenta uma classe de rugosidade de 0. [3]

Qualquer estrutura que se oponha ao escoamento do vento, constitui um obstáculo criando zonas de turbulência, dando assim origem a perda de velocidade e podendo provocar mudanças bruscas de direcção e intensidade.

A turbulência aumenta com a altura e espessura do obstáculo, sendo mais intensa na parte traseira junto do obstáculo e perto do chão.

## 1.4 - Orografia

Elementos orográficos como montes, colinas e planaltos exercem um efeito adicional ao perfil do vento.

Geralmente o vento sopra com uma maior intensidade nos cumes do que aquela que se verifica nos vales. No entanto, dependendo da orientação das elevações, pode haver um aumento do nível de turbulência, bem como a separação do fluxo, o que se traduzirá numa redução do vento.[3]

### 1.4- Distribuição de Weibull

Sendo o vento inconstante e caracterizado por variações quer de velocidade, quer de direcção, a velocidade do vento pode ser definida como uma variável aleatória, com uma distribuição de probabilidade. Essa distribuição pode ser obtida através de medições efectuadas em estações anemométricas previamente instaladas em locais onde se pretendam instalar aerogeradores. Essas medições devem ter a duração mínima de dois anos, de modo a obter um vasto conhecimento do regime de ventos (velocidade, direcção, temperatura e densidade) da região para cada período anual.

Este conjunto de dados é posteriormente tratado estatisticamente, de forma a definir-se uma função caracterizadora do regime de ventos da região, que se denomina função de distribuição de Weibull, e é dada pela seguinte expressão:

$$F(V) = \frac{k}{A_e} \times \left( \frac{V}{A_e} \right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{V}{A_e}\right)^k}, \quad (1.1)$$

em que :

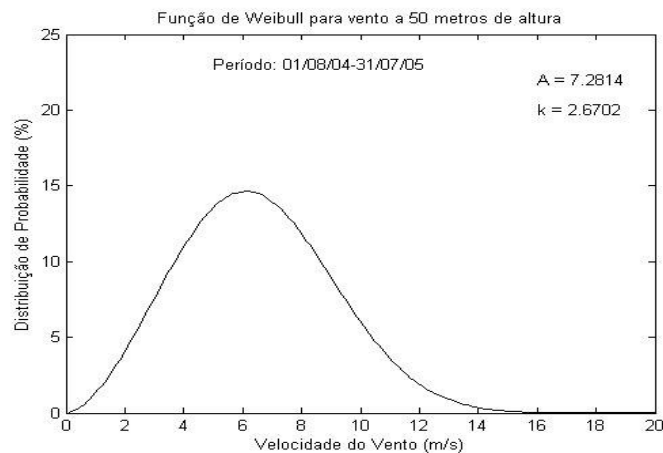
**V** – velocidade do vento (m/s)

**k** - factor de forma,  $k > 0$

**A<sub>e</sub>** - factor de escala,  $A_e > 0$

Ambos os factores **k** e **A<sub>e</sub>**, estão relacionados com a velocidade média e com a forma do histograma de classificação das ocorrências de velocidade. [4]

O gráfico da distribuição de Weibull é demonstrado na figura 1-3 abaixo.



**Figura 1-3** - Distribuição de Weibull para uma altura de 50m

Com este gráfico podemos concluir que durante o período de medição (01/08/04 a 31/07/05), durante 15% do tempo a velocidade do vento foi de 6m/s. Essa velocidade do vento, segundo a distribuição de probabilidade, foi a mais predominante durante o ano.

Como já sabemos o vento não é o mesmo para todas as regiões do globo, estando dependente das condições climáticas locais, da paisagem e da sua superfície. Logo a distribuição de Weibull também se irá alterar conforme a região onde são feitos os estudos.

## 1.5- Aproveitamento do Vento

Sabemos que a velocidade do vento aumenta conforme a sua distância do solo. Uma vez que esta é seriamente afectada pelo relevo do terreno e variável ao longo do tempo. [4]

O aproveitamento da energia contida nos ventos por parte do rotor não é 100% eficiente, caso fosse, não haveria mais vento após a passagem deste pelo veio do rotor, e o transporte de energia acabaria.

O ar após atravessar o plano das pás tem que sair com velocidade não nula. Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele, criando o conhecido “efeito de esteira”.

O conhecimento da direcção do vento é um factor importante para ser analisado, pois mudanças frequentes de direcção indicam situações de rajadas de vento. Além disso, a medida da direcção do vento auxilia na determinação da localização dos aerogeradores de modo a reduzir o “efeito de esteira” [2].

Esse efeito pode afectar outros aerogeradores que se situem a jusante, na direcção do vento dominante e ao lado. Para evitar este efeito negativo, deve haver uma separação entre aerogeradores num parque eólico, que deverá ser 6 vezes superior ao diâmetro do seu rotor na direcção dos ventos dominantes, e três vezes superior ao diâmetro do rotor na direcção perpendicular destes mesmos ventos.

Há portanto um máximo rendimento obtido por parte das turbinas eólicas. Este máximo é quantificado através do coeficiente  $C_p$ , no qual  $C_{pmax}=0,593$ , que é conhecido pelo coeficiente de Betz, ou seja, na melhor das hipóteses, 59,3% da energia contida no fluxo de ar pode ser extraída por uma turbina eólica (em condições de laboratório).

Na prática, o valor de  $C_p$  situa-se entre os 0,4 e os 0,5, pois o rotor eólico funciona dentro de uma faixa limitada de velocidade do vento, e o sistema possui outras perdas relacionadas com outros equipamentos que o constituem.

A curva de potência de um aerogerador é um gráfico que quantifica a potência que a máquina pode produzir, para uma dada velocidade de vento (figura 1-4).

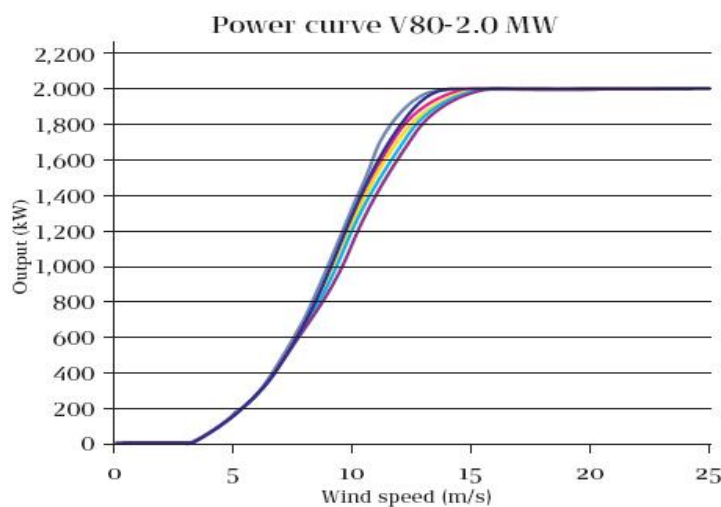


Figura 1-4 - curva de potência de um aerogerador de 2MW

Estas curvas de potência são obtidas com o auxílio de anemómetros, que tem a função de medir a velocidade e direcção do vento.

Como podemos observar na curva deste gráfico, o aerogerador só começa a produzir a partir dos 4m/s de velocidade do vento, essa velocidade denomina-se velocidade de entrada, a qual corresponde à velocidade necessária para vencer a inércia da máquina. É necessário referir que a partir dos 25m/s, a máquina deixa de produzir energia eléctrica devido à actuação do sistema de protecção, pois a esta velocidade pode provocar desgaste e danos na estrutura e peças da máquina.

Portanto um sistema eólico equipado com aerogeradores que possuem a curva de potência apresentada na figura 1-4, possuem uma velocidade de entrada (4m/s), uma velocidade nominal na qual a máquina obtém o máximo rendimento, (entre os 15 e os 18m/s) e uma velocidade de corte (25m/s).

## 1.6- Estudo do potencial eólico

Para verificar se a região possui bons ventos para a instalação de aerogeradores é necessário fazer medições desses ventos.

## Introdução

As medições são feitas através de anemómetros, que são aparelhos destinados a medirem a velocidade e a direcção do vento, geralmente a uma altura de 50m (altura média do rotor), e durante um período mínimo de dois anos.

Do ponto de vista do aproveitamento eólico é importante distinguir os vários tipos de variações temporais da velocidade dos ventos.

**Variações Sazonais** - O aquecimento não uniforme da superfície terrestre resulta em significativas variações no regime dos ventos, resultando na existência de diferentes estações do ano. Considerando que, em função da relação cúbica entre a potência disponível e a velocidade do vento (na altura do eixo da turbina), em algumas faixas de potência, uma pequena variação na velocidade implica numa grande variação na potência. Sendo assim, a utilização de médias anuais (ao invés de médias sazonais) pode levar a resultados que se afastam da realidade. [2]

**Variações Diárias**- as variações diárias na velocidade do vento (brisas marítimas, terrestres) são importantes quando após a escolha de uma região procura-se o local mais adequado para a instalação do sistema eólico dentro dessa área. Ao comparar a evolução da velocidade média ao longo do dia percebe-se que há uma significativa variação de um mês para os outros. [2]

**Variações de Curta Duração** - As variações de curta duração estão associadas tanto às pequenas flutuações como às rajadas de vento. Num primeiro momento, essas variações não são consideradas na análise do potencial eólico de uma região, desde que não assumam grandes proporções. As flutuações e a turbulência do vento podem afectar a integridade estrutural do sistema eólico, devido à fadiga que ocorre especialmente nas pás da turbina. Por outro lado, as rajadas, caracterizadas por aumentos bruscos de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhadas por mudanças de direcção, merecem maior atenção. [2]

A velocidade do vento aumenta com a altura em relação à superfície da Terra de forma dependente da rugosidade do terreno. Em terrenos planos (baixa rugosidade) esta variação é muito menos significativa do que em terrenos irregulares (alta rugosidade), sendo as áreas urbanas classificadas nesta segunda categoria. Por isso, as máquinas eólicas são geralmente instaladas em torres elevadas, onde as velocidades são significativamente maiores do que na superfície.

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m. O que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s.

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m.

Assim, a conversão de energia eólica em regiões com muitos obstáculos fica prejudicada. Não obstante, mesmo nestas regiões é possível o aproveitamento, sendo-o porém em escalas menores. Tornando-se necessário saber é se nestas regiões onde há uma rentabilidade mais restrita é ainda viável economicamente construir-se tais equipamentos para se converter a energia eólica em energia eléctrica, por exemplo.

Existe uma regra prática que permite a utilização de pequenos aerogeradores em regiões que possuem construções e/ou obstáculos naturais, tais como árvores muito grandes ou elevações (morros) no solo.

Esta regra diz que o aerogerador nestas regiões tem que ficar a uma distância mínima de 7 vezes a altura que o obstáculo tem. Por exemplo, se junto a uma casa de 5 metros de altura, se desejar implantar um sistema de captação e conversão da energia eólica, este sistema deverá estar a uma distância de 35 metros (7 multiplicado por 5) da mesma, para que haja um aproveitamento melhor dos geradores e para que a turbulência causada pela uniformidade do chão, das construções e dos obstáculos naturais seja minimizada, não interferindo muito no aproveitamento do sistema.

## 1.7 - Aerogeradores

Aerogeradores são todos os equipamentos capazes de transformar a energia cinética dos ventos em energia eléctrica para o uso em diversas situações.



Figura 1-5 - Aerogerador

Os ventos, são a fonte energética para os aerogeradores, pois são os ventos que fazem com que as pás movimentem o rotor do aerogerador, accionando o gerador e produzindo electricidade que pode ser acumulada em baterias ou então ser directamente injectada na rede.

O comportamento do aerogerador é definido por três variáveis que são:

- Relação de velocidade na extremidade da pá ( $\lambda$ )
- Ângulo *Pitch* ( $\theta$ )
- Coeficiente de potência ( $C_p$ )

As pás tipo *stall*, possuem um ângulo fixo em relação ao rotor, ângulo este determinado pelas características aerodinâmicas das pás, sendo necessário um sistema de travagem para parar o rotor quando necessário.

Os aerogeradores com reguladores de velocidade *pitch*, são constituídos por pás em que o ângulo de inclinação é regulável automaticamente, este tipo de controlo, mais complexo, dá à turbina uma maior capacidade de aproveitamento energético.

A potência dos aerogeradores é quantificada através da seguinte fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A_p V_w^3 \quad , (1.2)$$

onde:

$\rho$  - densidade do ar (1,23kg/m<sup>3</sup>).

$A_p$  - superfície varrida pelas pás (m<sup>2</sup>), sendo  $A_p = \pi R^2$ , R é o raio das pás.

$V$  - velocidade do vento no centro do rotor (m/s).

A potência dos aerogeradores para além de variar directamente com a velocidade do vento, varia também com o diâmetro do seu rotor, isto é, mantendo uma velocidade constante do vento e dobrando a área do rotor, a potência gerada irá ser quatro vezes maior.

O coeficiente de potencia  $C_p$ , é a quantidade de massa de ar incidente no rotor que é convertida em energia mecânica, no qual:

$$C_p = 0,22 \times \left[ \left( \frac{116}{\lambda_i} \right) - 0,4 \times (\theta - 5) \right] e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad , (1.3)$$

A relação de velocidade na extremidade da pá é definida por:

$$\lambda = \frac{R \times W_r}{V} \quad , \quad (1.4)$$

Onde:

$R$  – Raio do rotor

$W_r$  – Velocidade angular do rotor.

Um aerogerador (Figura 1-6) é constituído por diversos equipamentos. Seguidamente, vamos descrever esses componentes e as suas funções.

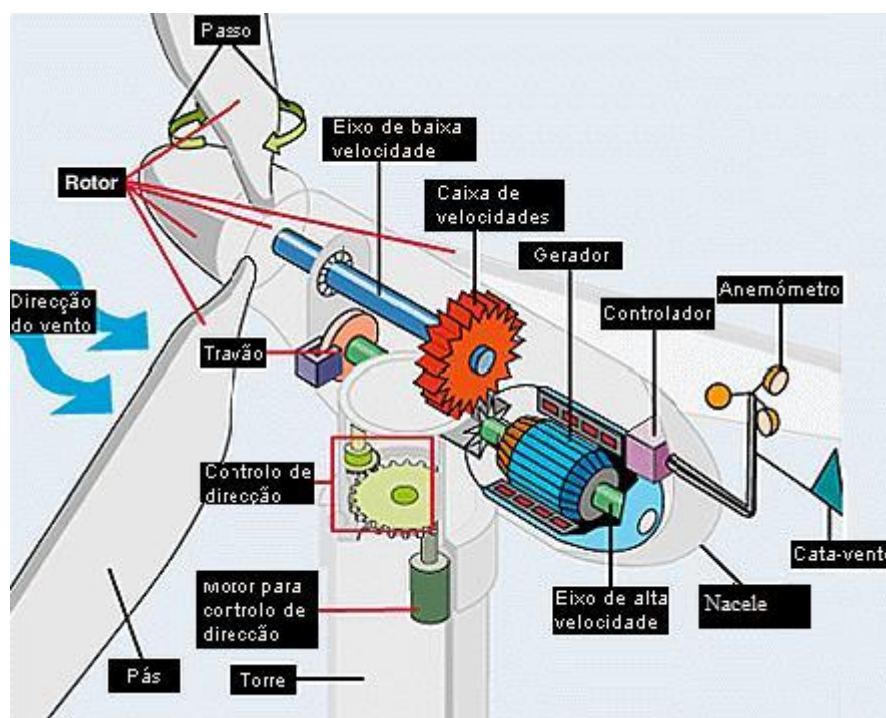


Figura 1-6 - constituição de um aerogerador

**Nacela:** Armazena alguns componentes que constituem o aerogerador, como por exemplo, gerador, caixa multiplicadora, sistema de travão a disco, entre outros.

**Pás do rotor:** Responsável por capturar o vento e transmitir a sua potência até ao cubo do rotor, onde está acoplado o eixo de baixa velocidade. A grande maioria das pás são fabricadas com plásticos reforçados com fibra de vidro, ou seja, poliéster ou epóxi com fibra de vidro.

Outra possibilidade é utilizar fibra de carbono como material de reforço, mas este material torna-se mais caro. Alumínio e aço tornam as pás muito pesadas e provocam muito desgaste.



Figura 1-7 – pá de um aerogerador pronta a ser transportada e montada

**Caixa multiplicadora (velocidades)** : A potência captada da rotação do rotor de uma turbina eólica é transferida para o gerador através do eixo principal da caixa multiplicadora (velocidades) e pelo eixo de alta velocidade.

O projecto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa multiplicadora entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido a restrições de velocidade na ponta da pá. Entretanto os geradores trabalham a rotações muito mais elevadas (entre 1200 a 1800 rpm), tornando necessário a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

**Freio de disco**: Está acoplado ao eixo do gerador e é utilizado em caso de emergência ou manutenção.

**Gerador eléctrico**: Transforma a energia mecânica em energia eléctrica. Estes podem ser síncronos ou assíncronos.

Existem actualmente no mercado três tipos de aerogeradores:

- Máquinas assíncronas, com controle do ângulo *pitch* e sem controle do ângulo *pitch (stall)*.
- Máquinas assíncronas duplamente alimentadas.
- Máquinas síncronas de velocidade variável.

**Máquinas Síncronas**: Necessitam de uma excitação de campo para trabalharem, essa excitação pode ocorrer de duas maneiras: excitação independente, por baterias; ou excitação acoplada ao eixo do rotor com campo de íman permanente.

Nos geradores síncronos a frequência é dependente da velocidade de rotação do rotor, por isso é necessário o uso de um conversor de frequência composto por um rectificador e um ondulator, de modo a que a tensão seja injectada na rede com o valor de frequência e amplitude exigida por esta.

Estes geradores permitem alta eficiência, pois há um maior aproveitamento do recurso eólico devido ao facto de funcionarem numa larga gama de velocidades.

Graças ao seu funcionamento em velocidade variável também possuem um MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que consiste em maximizar a potência produzida por parte do aerogerador para cada velocidade do vento em que este se encontra. Os geradores síncronos também possuem um melhor controlo da tensão e energia reactiva gerada através da sua excitação.

**Máquinas Assíncronas**: Este tipo de geradores não necessitam de excitação de campo para funcionarem. Os geradores assíncronos podem funcionar dentro de uma gama de velocidades, desde que sejam maior que a velocidade de sincronismo da máquina necessitando sempre de absorver energia reactiva da rede (ou bateria de condensadores) para a magnetização do estator.

Os geradores assíncronos podem ser duplamente alimentados. A dupla alimentação refere-se ao facto de tanto o rotor como o estator poderem entregar potência a rede.

O estator se encontra directamente ligado à rede, o rotor está ligado a um conversor de frequência e a um controlador de potência, permitindo o aproveitamento da velocidade de escorregamento, constituindo um sistema de velocidade variável a frequência constante.

Na prática considera-se que a velocidade do rotor pode variar entre 70% e 130% da velocidade de sincronismo da máquina.

Resumindo, a potência entregue a rede será a soma da potência entregue pelo estator com a potência entregue pelo rotor. Visto que a potência entregue ao rotor poderá ser até um terço da potência entregue pelo estator. Em condições nominais, podemos ter a máquina a gerar até 130% da sua potência nominal.

Os geradores de indução tem a vantagem de serem mais robustos, não necessitando tanto controlo e electrónica de potência para a regulação da sua tensão e frequência.

Em contrapartida, a desvantagem reside no facto de necessitarem de absorver energia reactiva a rede, sendo necessária a instalação de baterias de condensadores para atenuar esse consumo (que nas horas de ponta é taxado aos produtores), aumentando assim o investimento inicial.

**Sensores de vento:** servem como mecanismos de orientação, medem a direcção e intensidade dos ventos.



Figura 1-8 – aparelho que mede a direcção e intensidade dos ventos

**Unidade de refrigeração:** ventilador eléctrico para arrefecer o gerador e uma unidade para arrefecer o óleo do multiplicador de velocidade.

**Torre** - é o elemento que sustenta o rotor e a nacelle na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema.

Regra geral, as torres são fabricadas em metal (treliçada ou tubular), contento dentro dela uma vasta quantidade de equipamentos essenciais ao funcionamento do aerogerador.

Um dos aspectos mais importante no projecto das torres é a sua frequência natural, que deve ser desacoplada das excitações para evitar o fenómeno de ressonância, o qual aumenta a amplitude de vibrações e tensões resultantes reduzindo assim a vida dos componentes.

**Sistema de controlo:** onde se situam os fusíveis, disjuntores, inversores, conversores.

## 1.8- Parque Eólico

Um parque eólico é um local onde se encontram concentrados um conjunto de aerogeradores. Geralmente os parques eólicos estão situados em regiões pouco habitadas, devido à pouca rugosidade do terreno (que interfere negativamente no rendimento do aerogerador) e ao ruído produzido pelo aerogerador. Outra característica que influi na escolha do lugar para a instalação do parque eólico é a altitude do terreno. Isto deve-se ao facto da abundância de ventos ser maior em zonas altas.

O Parque eólico para ser ligado à rede eléctrica deve respeitar várias regras impostas pelo sistema. Como por exemplo controlo da energia reactiva injectada (durante o horário de cheia), entre outras imposições que podemos encontrar no Decreto-Lei nº 225/2007 que irei referir mais à frente.



**Figura 1-9** – Parque Eólico

# Capítulo 2

## Políticas de Desenvolvimento

Este capítulo fará uma breve referência às políticas de desenvolvimento adoptadas pela União Europeia e em particular por Portugal, para a área das energias provenientes de fontes renováveis.

### 2.1- Objectivos a atingir

A grande dependência das fontes primárias de energia (petróleo, gás, carvão), assim como o aumento exponencial do preço do petróleo que se tem verificado nos últimos anos em conjugação com as crescentes preocupações ambientais (devido às alterações climáticas), levaram a União Europeia (a partir de agora designada por UE) a incentivar a produção de energia proveniente de fontes renováveis.

Assim sendo, a UE pretende garantir um fornecimento energético seguro e sustentável aos consumidores. Ao mesmo tempo que tenta diminuir a forte dependência externa que possui devido importação de petróleo, aumentando a eficiência energética e reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub>.

A UE pretende que pelos menos 12% da matriz energética dos Estados membros sejam provenientes de fontes renováveis até ao ano de 2010.

Portugal por sua vez tem feito sua parte. O governo definiu as grandes linhas estratégicas para o sector da energia, estabelecendo a Estratégia Nacional para a Energia, aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de Outubro.

Esta Estratégia prevê a reestruturação do tecido empresarial do sector energético, através do alargamento do âmbito de actividades das principais empresas que nele operam, de modo a haver mais de um operador integrado relevante nos sectores da electricidade e do gás natural, criando assim um ambiente de concorrência.

As novas metas estabelecidas por Portugal, ultrapassam em muito aquelas que foram ditas pela EU. A produção de electricidade com base em energias provenientes de fontes renováveis passou de 39% para 45% do consumo em 2010, com uma forte aposta em todas as vertentes.

## 2.2 - Evolução Legislativa

O primeiro diploma legal relevante para esta matéria, foi o DL n.º189/88 de 27 de Maio que veio definir as regras aplicáveis à produção de energia eléctrica oriunda de recursos renováveis.

O Governo através deste Decreto-Lei (a partir de agora designado por DL), determinou que toda a energia produzida proveniente de fontes renováveis terá que ser obrigatoriamente adquirida pela distribuidora local de energia eléctrica, qualquer que seja a potência de instalação excepto para aproveitamentos hidroeléctricos, cuja potência está limitada aos 10MW.

Veio ainda a estabelecer os princípios e a metodologia de cálculo da tarifa de compra de energia eléctrica ao produtor pela rede pública, reconhecendo-se a mais-valia ambiental das energias renováveis relativamente aos combustíveis fósseis para produção de energia eléctrica.

Em 1995, de modo a responder às exigências sentidas nesta matéria, o Governo português aprovou uma série de medidas que vieram a dar um novo enquadramento jurídico ao SEN (Sistema Eléctrico Nacional), assim a produção de electricidade passou a reger-se pelo DL n.º 186/95 de 27 de Julho. Porém a adequação do DL n.º 189/88 a este enquadramento, levou à criação e aprovação do DL n.º 313/95 de 24 de Novembro.

Com o passar dos anos, a transformação sentida no sector eléctrico devido à criação de um mercado interno de energia e às crescentes preocupações ambientais (que já mencionámos anteriormente), deram origem à aprovação no ano de 2001 do DL nº339-C/2001 de 29 de Dezembro. Este veio substituir DL n.º168/99 que por sua vez já tinha vindo alterar o DL nº313/95 de 24 de Novembro.

Hoje, também o DL 339-C/2001 já foi substituído pelo DL n.º 225/2007 de 31 de Maio que vai regulamentar os parques que se encontrem em construção e também os que venham a ser criados futuramente. Ressalvando a opção dos parques já construídos poderem optar por se reger por este DL em detrimento do antigo que vigorava à data da sua construção.

O contributo da energia proveniente de fontes renováveis para o país é enorme, pois para além dos aspectos referidos, o conhecimento e a tecnologia adquirida também se tornam importantes para o país, esse conhecimento pode ser exportado gerando rendimentos à tecnologia nacional.

As actualizações das tarifas tem como objectivo atraírem o investimento privado para a área da produção de energia proveniente de fontes renováveis. Também têm como função simplificar o cálculo da tarifa, facilitando a sua compreensão.

Alguns coeficientes são actualizados para acompanharem a sua valorização ou desvalorização procurando estar de acordo com o valor de mercado que este mesmo possui.

# Capítulo 3

## Análise da Remuneração

Neste capítulo iremos analisar o regime de tarifação para o qual os parques eólicos se encontram licenciados. O parque eólico do Zibreiro (que é o principal alvo do estudo apresentado), está licenciado para operar segundo o DL n.º339-C/2001.

O DL mais recente, é o DL nº 225/2007 de 31 de Maio, que se encontra em vigor para qualquer parque que venha a ser construído. Por essa razão, também será feita uma análise da remuneração deste diploma legislativo.

### 3.1- Tarifação segundo o DL 225/2007

A fórmula geral para tarifação de acordo com o decreto referenciado é:

$$VRD_m = \{ KMHO_m \cdot [PF(VRD)_m + PV(VRD)_m] + PA(VRD)_m \cdot Z \} \cdot \frac{IPC_{m-1}}{IPC_{ref}} \cdot \frac{1}{(1-LEV)} \quad (3.1)$$

onde:

- **VRD<sub>m</sub>** - é a remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês *m*;
- **KMHO<sub>m</sub>** - é um coeficiente que modula os valores de PF(VRD)<sub>m</sub>, e de PV(VRD)<sub>m</sub> em função do posto horário em que a electricidade tenha sido fornecida;
- **PF(VRD)<sub>m</sub>** - é a parcela fixa da remuneração aplicável a centrais renováveis
- **PV(VRD)<sub>m</sub>** - é a parcela variável da remuneração aplicável a centrais renováveis,
- **PA(VRD)<sub>m</sub>** - é a parcela ambiental da remuneração aplicável a centrais renováveis
- **IPC<sub>m-1</sub>** - é o índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente referente ao mês *m-1*.
- **Z** - é o coeficiente adimensional que traduz as características específicas do recurso endógeno e da tecnologia utilizada na instalação licenciada;

- **IPCref** - é o índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês anterior ao do início do fornecimento de electricidade à rede pela central renovável (ver página do INE).
- **LEV**- representa as perdas, nas redes de transporte e distribuição, evitadas pela central renovável. Toma o valor de 0.015 no caso de centrais com potência maior ou igual a 5 MW e 0.035 no caso de centrais com potência menor do que 5 MW.

### 3.2- Coeficiente KMHO

Relativamente à modulação tarifária traduzida pelo coeficiente  $KMHO_m$ , as centrais renováveis deverão decidir (excepto as hídricas), no acto do licenciamento, se optam ou não por ela.

Para as centrais renováveis que, no acto de licenciamento e nos termos do número anterior, tiverem optado pela modulação tarifária traduzida pelo coeficiente  $KMHO$ , este tomará o seguinte valor:

$$KMHO_m = \frac{KMHO_{pc} ECR_{pc,m} + KMHO_v ECR_{v,m}}{ECR_m} \quad (3.2)$$

onde:

- **KMHO<sub>pc</sub>**- é um factor que representa a modulação correspondente a horas cheias e de ponta, toma o valor 1,25 para as centrais eólicas;
- **ECR<sub>pc</sub>**- é a electricidade produzida pela central renovável nas horas cheias e de ponta do mês m, expressa em kWh;
- **KMHO<sub>v</sub>** - é um factor que representa a modulação correspondente a horas de vazio, o qual toma o valor 0,80 para as centrais hídricas e o valor de 0,65 para as restantes instalações de produção licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio, e instalações de bombagem;
- **ECR<sub>v</sub>** - é a electricidade produzida pela central renovável nas horas de vazio (kWh)
- **ECR<sub>m</sub>** - é a electricidade produzida pela central renovável, no mês m, (kWh);

A modulação tarifária traduzida pelo coeficiente  $KMHO$  não foi escolhida no acto do licenciamento para o parque eólico do Zibreiro, pelo que este valor é considerado igual a 1.

Para os restantes parques eólicos que futuramente serão construídos, é necessário ter em conta o regime de ventos da região em que o parque se encontra situado. Pois se houver uma predominância de ventos fortes durante a noite, a não opção por essa modulação com certeza se tornaria uma boa escolha, uma vez que é dado um peso menor à energia produzida durante as horas de vazio. Caso contrário, se o regime de ventos ditar que há maior predominância de ventos fortes durante o dia a escolha por essa modulação pode beneficiar o produtor, não sendo contudo um benefício significante.

Em geral, a não opção por essa modulação tarifária é considerada positiva para o produtor.

### 3.3 - Parcela Fixa PF(VRD)

$$PF(VRD)_m = PF(U)_{ref} \cdot COEF_{pot,m} \cdot POT_{med,m} \quad (3.3)$$

- **PF(U)<sub>ref</sub>** - é o valor unitário de referência, deve corresponder à mensualização do custo unitário de investimento nos novos meios de produção. Cujas construção é evitada por uma central renovável que assegure o mesmo nível de garantia de potência que seria proporcionado por esses novos meios de produção, corresponde a 5,44 €/mês (valor anual de 65,28 €/kW)
- **COEF<sub>pot,m</sub>** - é um coeficiente adimensional que traduz a contribuição da central renovável, no mês *m*, para a garantia de potência proporcionada pela rede pública;

$$COEF_{pot,m} = \frac{NHP_{ref,m}}{NHO_{ref,m}} = \frac{ECR_m/POT_{dec}}{0,80 \times 24 \times NDM_m} = \frac{ECR_m}{576 \times POT_{dec}}$$

- **NDM**- é o número de dias do mês, assumindo 30.
- **POT<sub>dec</sub>**- é a potência declarada pela central no acto do licenciamento (kW).
- **ECR<sub>m</sub>** - é a energia activa produzida pela central (kWh).
- **POT<sub>med,m</sub>**- é a potência média disponibilizada pela central renovável à rede pública no mês *m* (kW).

### 3.4- Parcela Variável PV(VRD)

$$PV(VRD)_m = PV(U)_{ref} \cdot ECR_m \quad (3.4)$$

**PV(U)<sub>ref</sub>** - é o valor unitário de referência, o qual deve corresponder aos custos de operação e manutenção que seriam necessários à exploração dos novos meios de produção cuja construção é evitada pela central renovável, corresponde a 0,036 €/kWh.

### 3.5 - Parcela Ambiental PA(VRD)

$$PA(VRD)_m = ECE(U)_{ref} \cdot CCR_{ref} \cdot ECR_m \quad (3.5)$$

$ECE(U)_{ref}$  - é o valor unitário de referência para as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas, o qual deve corresponder a uma valorização unitária do dióxido de carbono que seria emitido pelos novos meios de produção cuja construção é evitada pela central renovável, toma o valor de  $2 \times 10^{-5}$  €/g.

$CCR_{ref}$  - é o montante unitário das emissões de CO<sub>2</sub> da central de referência, o qual toma o valor de 370 g/kWh. Este será utilizado, em cada central, durante todo o período em que a remuneração definida por VRD seja aplicável.

### 3.6 - Coeficiente Z - Majoração Ambiental

Este coeficiente toma o valor de fixo de 4,6 para as centrais eólicas independente da sua potência instalada.

### 3.7 - Validade da Remuneração VRD

O montante de remuneração VRD é aplicável, para cada MW de potência de injeção na rede atribuído, determinado com base num factor de potência de 0,98.

Para as centrais eólicas a remuneração VRD é válida durante um prazo de 15 anos ou até atingir o limite de fornecimento de 33GWh por cada MW de potência declarada de ligação, a contar desde o início do fornecimento de electricidade a rede.

### 3.8 - Diferenças da Remuneração do DL 339-C/2001 em comparação com o DL 225/2007.

A fórmula da remuneração VRD é a mesma para os dois decretos referidos, excepto em alguns valores que iremos mencionar agora:

$IPC_{ref}$  - é o índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês de Dezembro de 1998, toma o valor de 89,30;

$PV(U)_{ref}$  - toma o valor de 0,0249 €/kWh;

$ECE(U)_{ref}$  - toma o valor de  $7,5 \times 10^{-5}$  €/g;

**Coeficiente Z** - assume os respectivos valores para um regime de funcionamento anual:

- Para energia produzida nas primeiras duas mil horas - 1,70;

- Para o excedente de energia produzida entre as duas mil horas e as duas mil e duzentas horas – 1,30;
- Para o excedente de energia produzida entre as duas mil horas e duzentas horas e as duas mil e quatrocentas horas – 0,95;
- Para o excedente de energia produzida entre as duas mil horas e quatrocentas horas e as duas mil e seiscentas horas – 0,65;
- Acima de duas mil e seiscentas horas – 0,40.

Com o estudo mais aprofundado da remuneração, verificou-se o quanto que esta é complexa, pois depende de vários factores, por outro lado também verificamos que ao depender de tantos factores a remuneração torna-se mais justa para todas as tecnologias, fazendo com que haja um investimento sustentado e distribuído.



## Capítulo 4

# Plataforma para Remuneração de Parques Eólicos

O capítulo 4 dedica-se ao programa desenvolvido para Gestão de Parques Eólicos (a partir de agora designado “GPE”). O GPE tem como objectivo obter de uma maneira organizada e simplificada a facturação mensal dos parques eólicos localizados em Portugal.

Para além desta finalidade apontada, o GPE pode também ser qualificado como uma base de dados. Pois visa de igual modo permitir a consulta futura de uma factura, assim como a consulta gráfica da energia activa e reactiva produzida, entre outros dados relevantes.

O GPE no futuro também poderá facilmente através de protocolos de ligação, estabelecer com o SCADA do parque a aquisição automática dos dados, para serem inseridos na base de dados.

### 4.1 - Base de Dados

Uma Base de Dados é uma colecção de dados inter-relacionados, representando informações sobre um domínio específico.

Um sistema de base de dados consiste numa colecção de dados inter-relacionados e um conjunto de programas para prover o acesso a esses dados. O objectivo principal de um sistema de base de dados é possibilitar um ambiente que seja adequado e eficiente para uso na recuperação e armazenamento de informações.

Uma base de dados pode ser criada e mantida por um conjunto de aplicações desenvolvidas especialmente para esta tarefa ou por um Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGBD). Um SGBD permite aos utilizadores criarem e manipularem base de dados.

## 4.2 - Aplicativo de Base de Dados

Um Aplicativo de Base de dados é um tipo de software exclusivo para gerenciar uma base de dados. O software em questão, irá abranger uma serie de necessidades e objectivos que passam desde a utilização de pequenas ferramentas, como o uso de uma agenda, até aos mais complexos sistemas empresariais (como por exemplo o desempenho de tarefas de contabilidade).

O termo “Aplicativo de Banco de dados” usualmente se refere a softwares que oferecem uma interface para a base de dados. O software que gerência os dados é geralmente chamado de sistema gerenciador de base de dados (SGBD) ou de “database engine”.

Exemplos de aplicativos de base de dados são Microsoft Visual FoxPro, Microsoft Access, dBASE, MySQL, PostgreSQL, Firebird, Microsoft SQL Server e Oracle.

## 4.3 - Microsoft Access

Na realização do trabalho decidi usar o aplicativo Microsoft Access por ser este um software de uso diário dentro da PROEF.

Microsoft Access é um sistema relacional de administração de banco de dados da Microsoft, incluído no pacote do Microsoft Office Professional, que combina o Microsoft Jet Database Engine com uma interface de usuário gráfica. Ele permite o desenvolvimento rápido de aplicações que envolvem tanto a modelagem e estrutura de dados como também a interface a ser utilizada pelos usuários.

Microsoft Access é capaz de usar dados guardados em Access/Jet, Microsoft SQL Server, Oracle, ou qualquer recipiente de dados compatível com ODBC.

O desenvolvimento da estrutura de dados se dá de forma muito intuitiva, bastando que o programador possua conhecimentos básicos em modelagem de dados e lógica de programação.

Com o Microsoft Access é possível desenvolver desde aplicações simples como por exemplo, um cadastro de clientes, controlo de pedidos, até aplicações mais complexas, como o controle da facturação de parques eólicos. Os aplicativos desenvolvidos podem rodar perfeitamente numa rede de computadores e os dados armazenados pelo sistema podem ser publicados na Intranet ou até mesmo na Internet.

Um dos benefícios do Access do ponto de vista do programador é sua relativa compatibilidade com o SQL – buscas podem ser visualizadas e editadas como sendo indicações de SQL, e estes por sua parte podem ser usados directamente em Macros e Módulos VBA ( linguagem de programação *Visual Basic for Applications*) para manipular tabelas do próprio Access. Usuários podem misturar e usar ao mesmo tempo VBA e Macros para formulários de programação e lógica, além de serem oferecidos possibilidades com técnicas de orientação a objecto. [5]

O Access é composto por tabelas, formulários, relatórios, consultas, macros e pelos módulos que já foram referidos acima.

- **Tabelas:** Objectos onde os dados são armazenados;

- **Consultas:** objectos de procura e processamento dos dados armazenados nas tabelas;
- **Formulários:** Forma de ligação entre todos os objectos da base de dados, permitindo ao utilizador a “ilusão” de estar a trabalhar com uma aplicação e não comum conjunto de objectos;
- **Relatórios:** utilizados para formatar dados de forma a poderem ser impressos;
- **Macros:** automatização das acções (acção dos botões por exemplo);
- **Módulos:** programas em VBA para criação de rotinas e manipulação dos dados.

#### 4.4 - Estrutura da Base de Dados

A figura abaixo corresponde a estrutura de componentes da aplicação, estão representadas as tabelas que pertencem a base de dados, e uma breve descrição das suas funções.

**Tabela 4-1-** Descrição de tabelas existentes na Base de Dados

<b>Tabela</b>	<b>Descrição</b>
<b>TB_input</b>	Onde são guardados os registos de entrada, como a energia produzida durante o mês pelo parque, nome do parque, ano, mês, etc.
<b>TB_Parques</b>	Nesta tabela estão os dados relativos aos parques registados pelo utilizador, nome, potencia declarada e IPCMref. Que serão utilizados para gerar os relatórios.
<b>TB_Mes</b>	Aqui estão registados os meses existentes em um ano. Serão utilizados para gerar relatórios e organizar os gráficos.

## 4.5 - Esquema de Funcionamento do GPE

Na figura abaixo está representado um esquema de funcionamento do GPE, tendo como principal objectivo orientar o utilizador.

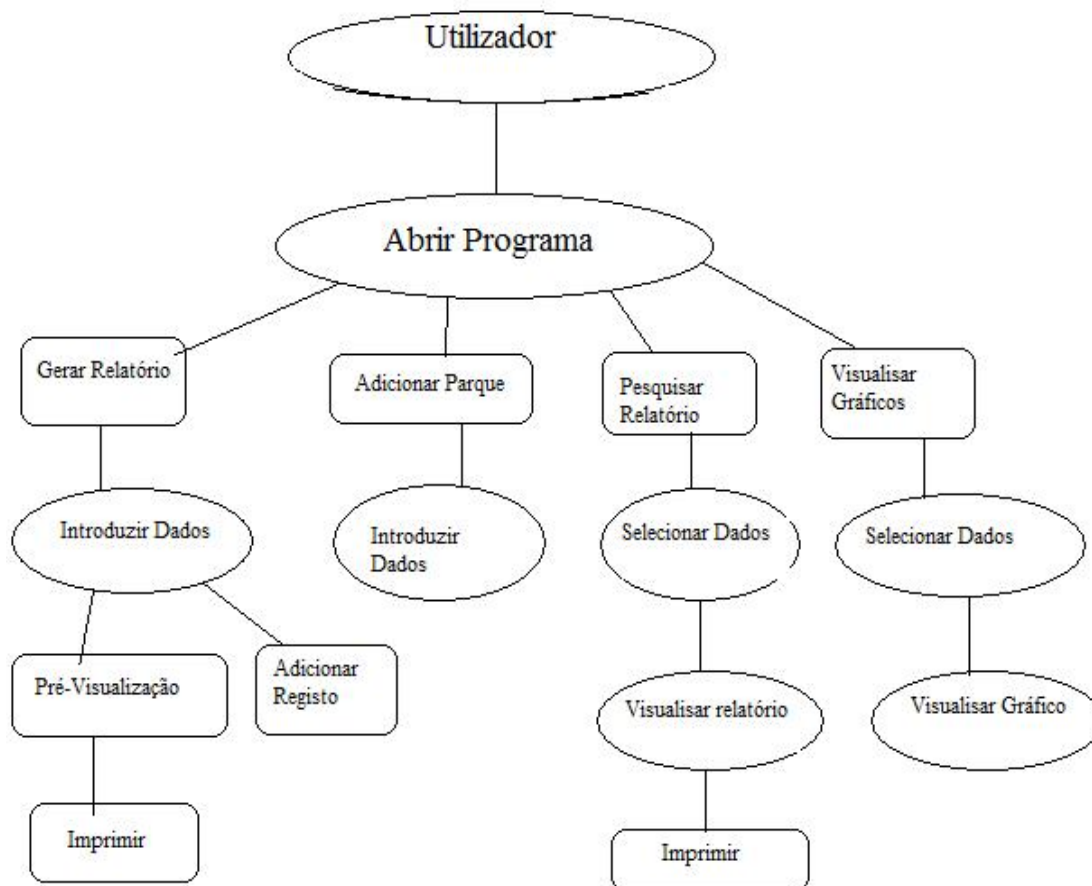


Figura 4-1 – Esquema de funcionamento do GPE

Cada rectângulo representa um botão da interface que o utilizador poderá utilizar, conforme a função que deseja executar.

A figura 4-2 representa a interface inicial do GPE, nesta etapa o utilizador escolhe a opção que deseja executar.



Figura 4-2 – Interface inicial do GPE

## 4.6 - Adicionar Parque

Nesta interface devemos introduzir o(s) parque(s) que desejamos adicionar a base de dados.

Figura 4-3 - Interface da opção “Adicionar Parque”

Para adicionar um parque necessitamos de preencher o seu nome, a potência declarada de ligação do parque a rede eléctrica e o IPCMref (ver tópico 3.1).

Ao clicar em adicionar, aparecerá uma mensagem de confirmação como na figura 4-4.

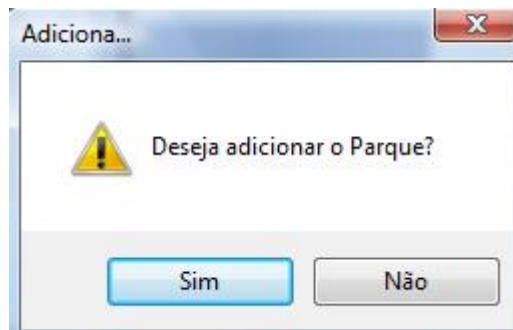


Figura 4-4 - mensagem de confirmação

Se desejarmos adicionar o parque é preciso confirmar a acção, ao confirmar, automaticamente será percorrida uma consulta para verificar se o parque já se encontra registado, em caso afirmativo aparecerá a mensagem da figura 4-5.

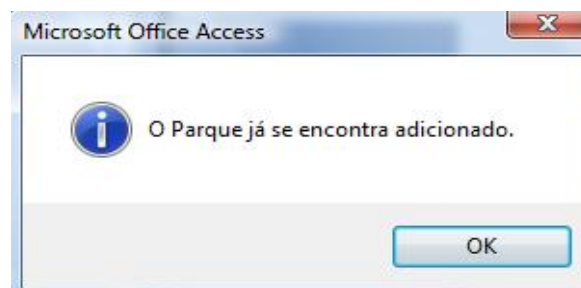


Figura 4-5 - Mensagem de Parque já existente

Caso contrário o parque será automaticamente registado e inserido na tabela TB\_parques, a janela é fechada e voltaremos novamente a interface inicial (figura 4-2).

## 4.7 - Gerar Relatório

Esta opção tem como objectivo a introdução de dados relativo a um determinado parque.

Os dados inseridos serão utilizados para se gerar o respectivo relatório de facturação do parque no respectivo mês.

Figura 4-6– Interface de introdução de dados


É necessário preencher todos os campos aqui referidos, excepto o campo “Dias de facturação”, que segundo os dois decretos para o qual o programa foi desenvolvido, é um coeficiente constante que toma o valor 30.

Outra particularidade prende-se com o facto de somente ser possível escolher um parque que já tenha sido inserido e que portanto já se encontra disponível na TB\_Parques, o mesmo ocorre com a escolha do Decreto-Lei, este campo está limitado como já foi explicado aos DL 225/2007 e 339 – C /2001.

O botão “Gerar Z” é necessário para obter um valor da majoração ambiental (Z), já referida no capítulo “análise da legislação”. O valor desse coeficiente (Z), depende do DL escolhido.

Se for escolhido o DL 225 o seu valor é 4,6. Caso contrário, o valor vai estar dependente do somatório do número de horas de produção naquele ano, tomando 1,7 como valor inicial até as 2000 horas de produção, a partir desse acumular de horas o valor de Z vai diminuindo até atingir o valor mínimo de 0,4.


Tendo todos os campos preenchidos é possível fazer a visualização do relatório com a respectiva facturação, sendo que todas as parcelas da tarifa e indicadores económicos aparecem bem especificados como podemos ver na figura 4-7.



## Relatório de Remuneração

### Parque Eólico de Zibreiro

Janeiro 2008



#### PARCELA FIXA- PF(VRDm)

Energia Produzida: 2723 kWh	COEFpotm: 0,00062	POTdec: 7625 kW	PF(U): 5,44 €/mês
Dias de facturação: 30	Decreto Lei: 339	POTmed: 3,7819 kW	PF(VRDm): 0,012756

#### PARCELA VARIÁVEL- PV(VRDm)

PV(U)ref: 0,025 €/kWh	PV(VRDm): 67,8027
-----------------------	-------------------

#### PARCELA AMBIENTAL - PA(VRDm)

ECE(U)ref: 7,50E-05 €/g	CCRref: 370 g/kWh	Z: 1,7
PA(VRDm): 75,56325		

#### PERDAS EVITADAS NA REDE

IPCM-1: 85	IPCMref: 89,3
------------	---------------

#### ENERGIA REACTIVA

REGISTADA		FACTURADA	
Reactiva Produzida Fora Vazio:	156 kVArh	Reactiva vendida a rede fora do vazio:	-7,65908 €
Reactiva Consumida Fora Vazio:	120 kVArh	Reactiva Consumida fora do vazio:	-2,028 €
Reactiva injectada Vazio:	120 kVArh	Reactiva injectada no vazio:	-1,524 €

#### TOTAL DA FACTURA

Remuneração Mensal(VRDm)	189,67 €	<input type="button" value="Pre-Vizualizar"/>  <input type="button" value="Imprimir"/>  <input type="button" value="Voltar"/>
Total Energia Reactiva	-11,21108 €	
Sub-Total (S/ IVA)	178,46 €	
<b>TOTAL COM IVA(5%)</b>	<b>187,38 €</b>	

Figura 4-7 - Relatório de remuneração

A partir daqui torna-se possível proceder a uma pré-visualização, se for desejado também podemos mandar imprimir o relatório, ou voltar para a interface anterior (de introdução de dados, figura 4-6).

Após concluir a visualização do relatório (se desejar), é necessário guardar os registos. Para isto basta clicar no botão “Adicionar Registo” e irá aparecer uma mensagem de confirmação como na figura 4-8.



Figura 4-8

Se se desejar adicionar o registo, basta confirmar a sua opção que automaticamente o programa irá percorrer uma rotina de consulta, para verificar se não há uma repetição dos registos ano e mês do parque em questão. Se houver repetição desses dados na tabela TB\_input, irá aparecer uma mensagem de erro impossibilitando assim o registo dos dados.

Caso não se pretenda adicionar os registos e voltar a interface inicial, somente precisamos de cancelar a opção da figura 4.8 e na interface de adição de dados carregar no botão “Voltar”.

## 4.8 - Pesquisar Relatórios

Esta interface serve para a pesquisa de relatórios das facturações existentes para um determinado parque.

A pesquisa é feita através do nome do parque, ano e mês que desejamos consultar.

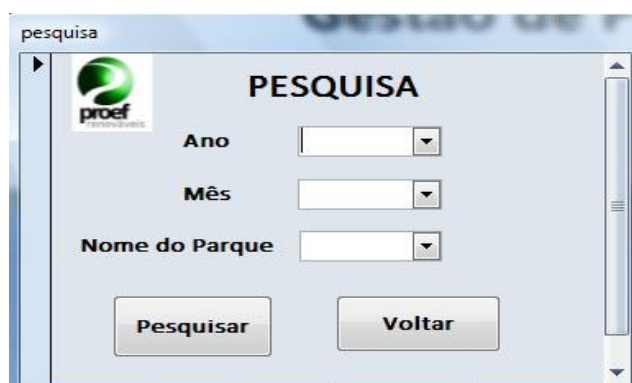


Figura 4-9 - interface de pesquisa

Novamente ao carregar no botão pesquisar será percorrida uma consulta para verificar se existe o registo pretendido na tabela TB\_input. Se esse registo não existir, aparecerá uma mensagem de erro.

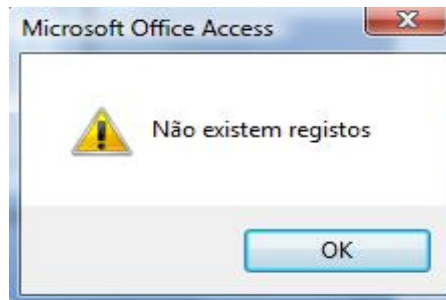


Figura 4-10 - mensagem de erro

Se por ventura o registo existir, automaticamente o relatório de facturação será apresentado, sendo possível a sua pré-visualização e impressão se assim for o desejado.

## 4.9 - Visualizar Gráficos

Poderemos visualizar graficamente os seguintes dados:

- Energia Activa Produzida
- Energia Reactiva Produzida durante as horas de vazio
- Energia Reactiva produzida durante as horas de cheias
- Energia Reactiva consumida fora do vazio
- Facturação
- Número de horas de produção

Os dados correspondem a todos os meses já registados num ano para o parque escolhido.

A interface de escolha dos parâmetros encontra-se representada na figura 4-11.



Figura 4-11 – Interface de escolha de dados para visualização gráfica

Novamente a rotina de verificação dos dados de entrada (input) é percorrida, se os dados não existirem aparecerá uma mensagem de aviso.

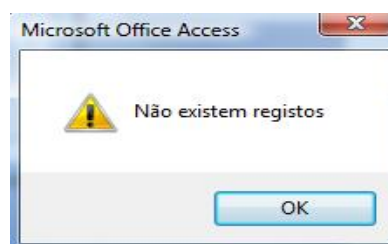


Figura 4-12 – mensagem de informação

Caso contrário será aberta uma janela com o respectivo gráfico do tipo de dados (energia activa, energia reactiva, etc.) escolhida (figura 4-13).

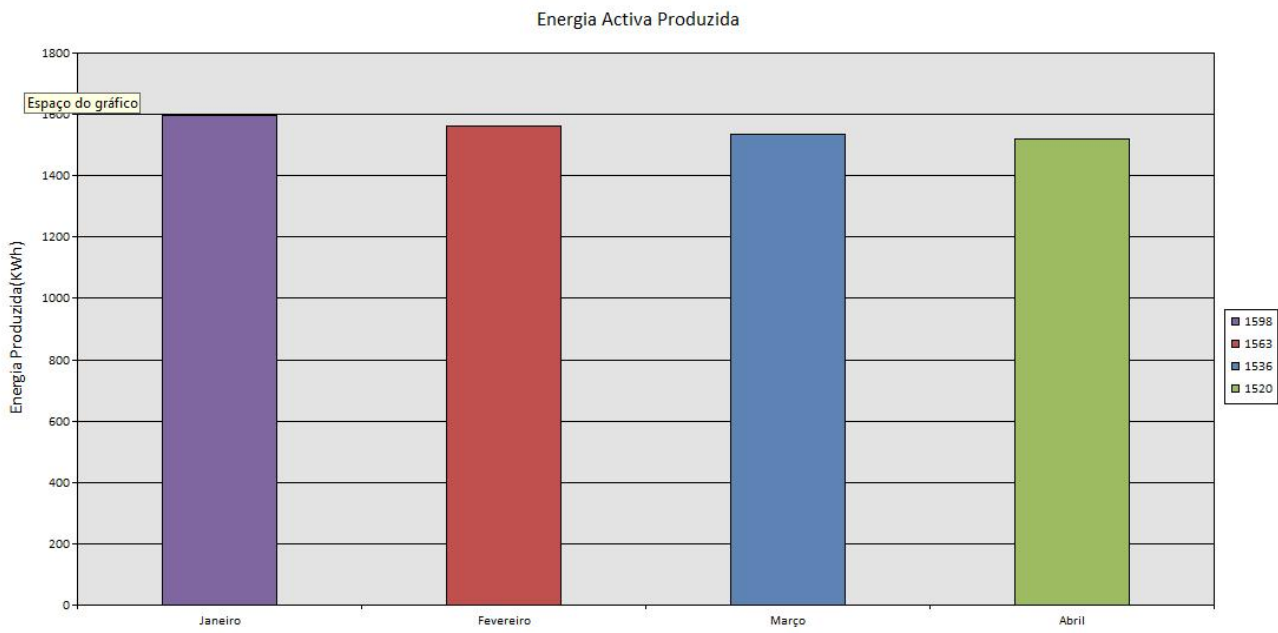


Figura 4-13 – Representação gráfica da energia activa produzida

# Capítulo 5

## Compensação da Energia Reactiva

Será apresentada uma solução para a minimizar a injeção de potência reactiva durante o horário de vazio por parte dos cabos de média tensão (30kV) que interligam o parque eólico do Zibreiro à rede de distribuição.

No total a potência injectada durante as horas de vazio é de 120 kVAr, sendo que essa energia é cobrada de acordo com a legislação que iremos abordar mais adiante.

### 5.1 - Energia Reactiva

Determinados equipamentos tais como motores eléctricos, transformadores, necessitam para a sua operação de uma certa quantidade de energia reactiva que pode ser suprida por diversas fontes ligadas ao sistema eléctrico, a funcionar individual ou simultaneamente.

Podemos considerar que as linhas de transmissão e de distribuição de energia eléctrica, são fontes de energia reactiva devido a sua reactância.

Essa energia reactiva pode ser tanto indutiva como capacitiva.

A energia reactiva indutiva é consumida pelos aparelhos (motores, transformadores), pois é responsável pela formação do campo magnético desses aparelhos, não produzindo nenhum trabalho útil.

A medição da energia reactiva é feita através do factor de potência, que representa o cosseno do ângulo de defasagem entre a onda sinusoidal da tensão e a onda sinusoidal da corrente.

Quando a onda de corrente está atrasada em relação a onda de tensão, o factor de potencia é dito indutivo e o ângulo de fase representa-se com um sinal negativo, caso contrário o factor de potencia é dito capacitivo e o ângulo de fase é representado com um sinal positivo.

O Factor de Potencia (FP) é calculado pelo cosseno da componente da potência activa (P) a dividir pela potência aparente (S).

$$FP = \frac{P}{S} \text{ ou } \cos \phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (5.1).$$

## 5.2 - Análise da Legislação

Nesta secção, iremos analisar o DL n.º 312/2001 de 10 de Dezembro que regula a injeção controlada de energia reactiva na rede eléctrica.

No referido diploma legal, para além dos artigos que vieram definir o funcionamento de uma parte mais técnica, como a regulação da injeção de energia de origem eólica na rede pública, verificamos também que o legislador se preocupou em determinar as regras relativas à operação, exploração, abastecimento, expansão e gestão do Sistema Eléctrico Nacional.

A seguir são transcritos os artigos considerados mais importantes para este tema.

Segundo o DL n.º 189/88 de 27-05-1988-Secção I - Artigo 12.º- Factor de potência

1. O factor de potência da energia fornecida por geradores assíncronos durante as horas cheias e de ponta não será inferior a 0,85 indutivo, para o que o produtor instalará as baterias de condensadores que forem necessárias.

2. Os geradores síncronos poderão manter um factor de potência entre 0,8 indutivo e 0,8 capacitivo perante variações na tensão da rede pública dentro dos limites legais que constarem da concessão da rede pública.

3. Durante as horas de vazio não é permitido o fornecimento de energia reactiva à rede.

O Despacho n.º 13615/99 (2.ª. Série); Regulamento da Rede de Distribuição (transcrito abaixo), transcreve a obrigatoriedade da instalação de equipamento por parte do produtor para o fornecimento de energia reactiva.

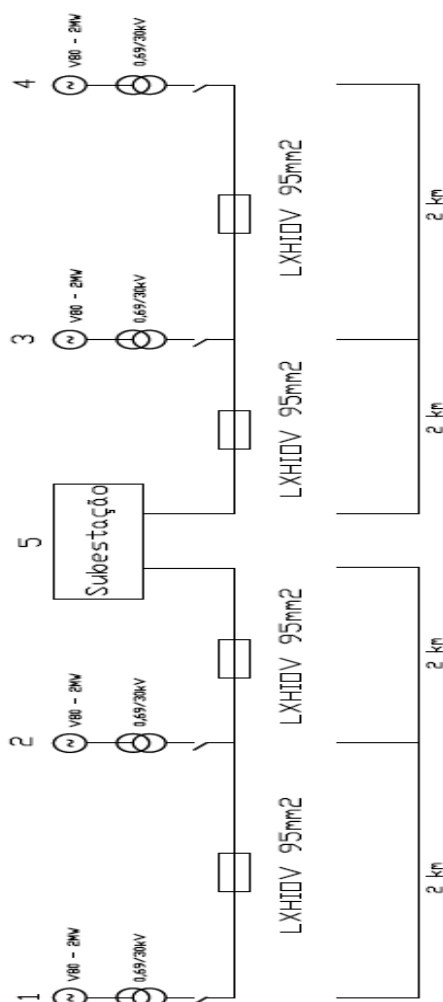
4.3.6 - Os produtores devem, nos períodos de horas cheias e de ponta, fazer acompanhar o fornecimento de energia activa de uma quantidade de energia reactiva correspondente, no mínimo, a 40% da energia activa fornecida. Os produtores não devem, nos períodos de vazio, fornecer energia reactiva à rede. A energia reactiva em défice nas horas de horas cheias e de ponta e a fornecida nas horas de vazio, é paga pelo produtor aos preços fixados no tarifário para o nível de tensão da interligação, respectivamente, da energia reactiva indutiva e da energia reactiva capacitiva. Por iniciativa do distribuidor em MT e AT, pode ser acordada, com o produtor, a modificação do regime de fornecimento de energia reactiva nos períodos fora de vazio. No caso de geradores assíncronos, o fornecimento de energia reactiva, nos períodos de horas cheias e de ponta, deve ser assegurado pela instalação de baterias de condensadores. Essa instalação pode ser realizada em local apropriado da RD, desde que o produtor suporte o respectivo custo e o distribuidor não invoque motivos de ordem técnica que inviabilizem a solução.

A energia reactiva fornecida durante as horas de ponta (acima da  $Tg(\phi) = 0,4$ ), será paga ao produtor. Actualmente a tarifa aplicada à potência reactiva fornecida durante o horário de ponta é de 0.0169 €/kVAr.

Durante o horário de vazio a penalização sofrida pelo produtor é de 0.0127 €/kVAr .

### 5.3 - Estrutura do Parque do Zibreiro

O esquema unifilar do parque eólico do Zibreiro está representado na figura 5-1



**Figura 5-1**– Esquema unifilar do parque

Como podemos observar, o parque está dividido em dois ramais. Cada ramal possui dois aerogeradores em paralelo, separados por uma distancia de 2km.

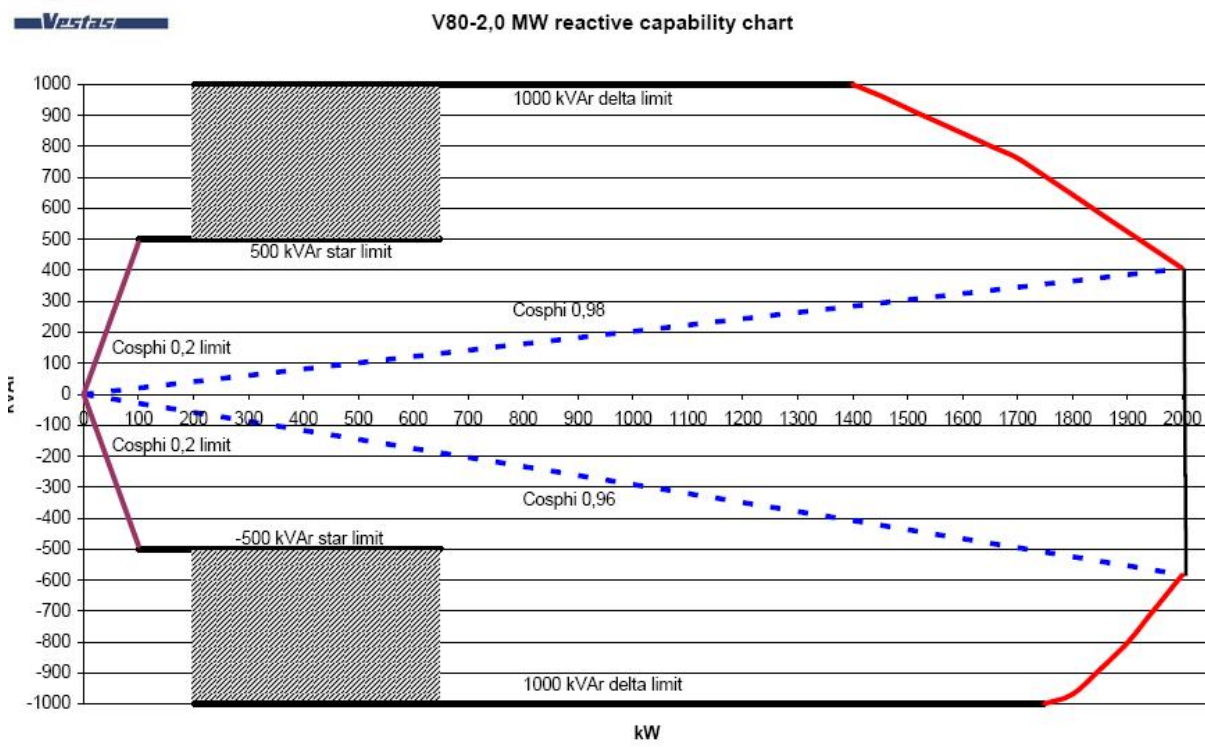
Será na subestação o ponto de interligação do parque à rede, isto é, o local onde é feita a contabilização da potência transitada entre o parque e a rede.

### 5.3.1 - Aerogeradores do Parque

O Parque eólico do Zibreiro está equipado com quatro aerogeradores Vestas V80 de 2MW,



## V80-2,0 MW capability chart



estes aerogeradores são máquinas de indução duplamente alimentadas e possuem uma boa auto-compensação de energia reactiva como podemos verificar pelo seu diagrama PQ (figura 5-2).

Figura 5-2 – Diagrama PQ dos aerogeradores Vestas V80 (2MW)

Pela observação do gráfico podemos interpretar que a máquina apenas trabalha dentro dos limites traçados pela linha a negro e a vermelho.

A máquina possui um limite de produção e consumo de reactiva máximo de 1Mvar, para que esta trabalhe dentro desse limite, é necessário que tenha um  $\text{Cos } \phi \geq 0,2$ . Isto implica uma produção de energia activa mínima de 204kW.

Por outro lado, quando a máquina funciona à potência nominal (2 MW), tem como limite de potência reactiva um  $\text{Cos } \phi$  de 0.98 capacitivo ou um  $\text{Cos } \phi$  de 0.96 indutivo, o que corresponde a uma geração/consumo de potência reactiva máxima de 406 kVar e 580 kVar respectivamente.

### 5.3.2 - Cabos de distribuição

O parque é ligado directamente a uma subestação da EDP, sendo que a tensão de ligação faz-se em 30kV. A subestação se situa a uma distancia de 2km de cada ramal.

Todos os cabos do parque encontram-se enterrados, sendo os cabos do tipo LXHIOV de 95mm<sup>2</sup> monopolar.

Os parametros dos cabos encontram-se descritos na tabela abaixo e foram retirados do catálogo da Cabelte para uma temperatura de funcionamento de 20°C.

**Tabela 5-1** – parâmetros dos cabos de 30kV

<b>Cabo</b>	<b>R(<math>\Omega</math>/km)</b>	<b>L(H/km)</b>	<b>C(F/km)</b>
LXHIOV-95mm2-monopolar	0,32	0,00041	0,00000018

As resistências dos cabos tiveram de ser corrigidas, pois como estes se encontram enterrados, a temperatura de funcionamento será de 70°C e não de 20°C, logo o valor da resistência passou a ser de 0,3776( $\Omega$ /km).

Como os cabos de transmissão encontram-se enterrados, a produção de energia reactiva tem que ser considerada, pois os cabos terão um comportamento capacitivo.

O principal objectivo deste estudo é a minimização da energia reactiva produzida pelos cabos durante o horário de vazio, de modo a que o productor respeite a legislação e não seja penalizado.

### 5.3.3 - Transformador de Grupo

Cada aerogerador possui um transformador elevador de tensão 0,69/30kV; as suas características encontram-se descritas na tabela 5-2.

**Tabela 5-2** – parâmetros do transformador

<b>S<sub>n</sub></b>	<b>X<sub>f</sub></b>	<b>X<sub>f</sub>(pu)</b>
2,15MVA	10%	0,00215

Será considerado o valor da potência reactiva associada ao ramo de magnetização, consumida pelo transformador. Este valor corresponde a aproximadamente 2% da sua potência nominal. Assim sendo, o transformador terá um consumo constante de potência reactiva de cerca de 0,042MVar.

## 5.4 - Tipos de Compensação Alternativos para Energia Reactiva

Em alternativa à bateria de condensadores, já aplicada no parque do Zibreiro para a compensação de energia reactiva durante as horas fora de vazio, será apresentado neste ponto alguns componentes que podem efectuar a mesma tarefa de uma maneira mais eficiente.

### 5.4.1 - Utilização do inversor da máquina

Na situação em que a máquina não dispõe de potência mecânica disponível no vento, existe a possibilidade teórica de utilizar o inversor associado ao rotor (o inversor do lado da rede) funcionando tanto como compensador de reactiva, quer com carácter indutivo (sendo utilizada no horário de vazio) quer com carácter capacitivo (no horário de cheia), suprimindo assim as necessidades exigidas pela legislação (já referidas no ponto 5.2).

O inversor do lado do rotor tem como função o controlo das correntes no rotor, controlando a potência activa e reactiva. O inversor do lado da rede, tem como função manter a tensão DC, tendo um grau adicional de liberdade que normalmente não é utilizado, devido a questões relacionadas com perdas e rendimento. A utilização desse grau de liberdade, poderia dar uma capacidade adicional à máquina de indução duplamente alimentada de gerar potência reactiva através desse mesmo inversor [6].

Esta seria uma boa solução devido ao seu baixo custo, visto não ser necessário instalar equipamentos extra para o seu funcionamento. Porém, para que tal ocorra, seria necessário contactar a Vestas no sentido de saber a hipótese de esta solução ser implementada.

### 5.4.2 - Utilização de FACTS

Actualmente, começam a surgir no mercado inversores e contactores estáticos (FACTS, [6]) associados a cargas indutivas e capacitivas de modo a fazerem a compensação do factor de potência, a preços economicamente mais viáveis, sendo no entanto uma das soluções pretendidas mais dispendiosas.

Tecnologicamente, esta seria uma boa solução mas exigiria um grande esforço em termos de complexidade de controlo.

A bidireccionalidade do inversor permite a este funcionar tanto nas horas de cheias (como fonte capacitiva), como nas horas de vazio (como fonte indutiva). A sua implementação permitiria um ajuste contínuo do factor de potência (a partir daqui designado por FP), a única desvantagem prende-se com o seu preço.

## 5.5 - Propostas para Optimizar a Energia Reactiva

Neste ponto, apresentarei algumas formas de minimizar a energia reactiva injectada durante o horário de vazio e dinamizar a injeção de energia reactiva durante o horário de

cheia, apenas alterando o ponto de funcionamento dos aerogeradores de acordo com a figura 5-2.

O primeiro aspecto a considerar é saber qual o modo de operação da máquina que melhor comportamento tem, esta decisão depende de vários aspectos que se relacionam com: a rentabilização das capacidades técnicas da máquina (e respectivo investimento), com todo o equipamento envolvido no projecto, os factores económicos associados a essa rentabilização e ainda com os factores económicos relacionados com a manutenção da máquina (que influenciam o tempo de vida desta).

### 5.5.1 - Operação com FP = 1

Este modo de operação com factor de potência unitário é aplicado no parque do eólico do Zibreiro, é o modo de operação mais fácil de implementar do ponto de vista do controlo da máquina, pois neste caso a máquina não apresentará geração de energia reactiva.

A geração de energia reactiva ocorre devido aos cabos (já referidos), e elementos de compensação extra (baterias de condensadores, no caso em estudo).

### 5.5.2 - Operação com FP = 0.98

O modo de operação com factor de potência de 0,98 terá duas variantes:

- Terá carácter capacitivo no horário de cheia (FP=0,98);
- Terá carácter indutivo no horário de vazio (FP=-0,98).

Esta solução apresenta a nítida vantagem de adaptar a legislação em vigor no respectivo horário. É uma solução "mista" no que diz respeito ao compromisso, cumprimento da legislação/complexidade de operação das máquinas. A compensação da potência reactiva de acordo com a legislação será partilhada entre a máquina e o(s) elemento(s) de compensação extra. Nesta situação o ajuste de compensação por parte da máquina será fixo uma vez que é imposto um factor de potência fixo.

No horário de cheia o FP será de 0,98 capacitivo, enquanto no horário de vazio o FP será de 0,96 indutivo (devido aos limites impostos pela máquina, figura 5-2). Esta escolha prende-se, naturalmente, com o facto de se pretender injectar ou consumir reactiva, consoante o respectivo horário de funcionamento. [7]

### 5.5.3 - Operação com FP variável

O modo de operação com factor de potência variável, faz uso da grande capacidade de auto-compensação que a máquina em estudo apresenta (figura 5-2), permite efectuar um controlo fino da potência reactiva gerada, fazendo assim um controlo mais rigoroso da potência reactiva injectada na rede.

## Compensação da Energia Reactiva

No caso de o parque estar numa situação próxima do valor nominal, observando a figura 5-2, conclui-se que será necessário uma compensação extra para respeitar os limites de energia reactiva exigidos pela legislação durante o horário de cheia.

Este modo, apresenta a desvantagem de ter uma maior complexidade no que diz respeito ao controlo da máquina. Por outro lado diminui a necessidade de instalação de meios de compensação extra (bateria de condensadores), pois a máquina é auto-suficiente em termos de compensação, numa grande gama de potências. [7]

## 5.6 - Resultados da Pesquisa

Como as máquinas do parque do Zibreiro operam com factor de potência unitário, e já possuem bateria de condensadores para compensar a energia reactiva em débito durante o horário de cheia, escolhi que a melhor solução seria modificar a operação das máquinas para operarem com factor de potência de 0,98 (capacitivo e indutivo).

Essa solução torna-se a mais simples e cumpre praticamente todos os requisitos exigidos.

Durante as horas de cheias com a máquina dimensionada para operar num factor de potência de 0.98 capacitivo, supondo que a máquina esteja a trabalhar na sua potência nominal (caso mais desfavorável), para além dos 3,2MVA<sub>r</sub> ( $\text{tg } \phi = 0,4$ ) exigidos e injectados de potência reactiva pela bateria de condensadores injectaríamos mais 0,4MVA<sub>r</sub> por máquina, aumentando assim o rendimento mensal do parque.

Durante as horas de vazio, devido as limitações já referidas e observadas na figura 5.2, a máquina só pode operar com um factor de potencia de 0,96 indutivo, supondo um caso bem desfavorável na qual a máquina esteja a trabalhar com uma potencia reduzida, 250kW, a energia reactiva consumida será de 72,9kVA<sub>r</sub>h por cada máquina, multiplicando esse valor por 4, estaríamos a consumir um total de 291kVA<sub>r</sub>h cumprindo assim o objectivo pretendido (consumir 120kVA<sub>r</sub>h).

Quando as máquinas se encontram paradas durante o horário de vazio nada podemos fazer para consumir a energia reactiva, visto que sem energia activa não há consumo de energia reactiva pelos aerogeradores, como referido em 5.3.1, logo para este caso o produtor paga pela energia reactiva injectada pelos cabos de média tensão.

Uma possibilidade para não ser penalizado pela energia reactiva injectada será então implementar a solução apresentada em 5.4.1, começar a utilizar o inversor associado ao rotor (inversor do lado da rede) da máquina de indução duplamente alimentada para fazer a compensação da energia reactiva, quer com carácter indutivo, quer com carácter capacitivo.

# Capítulo 6

## Conclusão

Em Portugal a potência instalada proveniente da energia eólica tem aumentado significativamente, no final de 2007 esta fonte de energia já representava 8% da electricidade consumida anualmente em território nacional.

O investimento por parte das empresas tem aumentado, devido à atractiva remuneração imposta à produção de electricidade proveniente de fontes renováveis. Sendo cada vez maior a procura de bons sítios onde se possa proceder à instalação de parques eólicos ou fotovoltaicos.

Este trabalho teve como principal finalidade criar um programa de simples acesso que tem como objectivo organizar e estruturar os dados mais relevantes dos parques eólicos, de modo a gerar relatórios da remuneração mensal que estes proporcionam. Estes relatórios também poderão vir a ser consultados no futuro para além de que os dados mensais de um ano de funcionamento podem ainda ser visualizados graficamente.

Além da sua importância organizativa, o GPE pode ser usado para a recolha de dados que futuramente podem ser úteis para a previsão do regime de ventos e consequentemente do rendimento monetário do parque.

Com o intuito de rentabilizar ao máximo o parque construído, foi estudada a melhor maneira de extinguir a energia reactiva injectada pelos cabos de MT (30KV) durante as horas de vazio.

Foi investigado se o aerogerador teria a possibilidade de consumir energia reactiva. Essa possibilidade foi confirmada, sendo necessário que a máquina altere o seu modo de operação.

Para o objectivo do estudo (consumir os 120kVAR injectados pelos cabos de MT), basta modificar o modo de operação das máquinas para trabalharem com um  $FP=0,98$  capacitivo no horário de cheia e  $FP= 0,98$  indutivo nas horas de vazio.

## Compensação da Energia Reactiva

Com esta simples implementação não só consumiríamos os 120kVAR como estaríamos a contribuir positivamente com o sistema eléctrico, pois passaríamos a consumir energia reactiva durante o horário crítico (horário de vazio).

O GPE vai substituir na PROEF a maneira anteriormente utilizada para gerar os relatórios de renumeração, que consistia na utilização de uma folha de cálculo (Excel) apenas utilizada pelo Engenheiro responsável, pois a mesma tornava-se confusa para outros utilizadores.

A folha de cálculo não era uma ferramenta prática para ser usada na rede interna da empresa, não permitindo que se criasse uma base de dados com os registos antigos.

O GPE sendo uma plataforma simples e dinâmica é facilmente utilizada por qualquer pessoa que esteja familiarizada com o parque, sendo também possível a sua utilização via intranet.

A solução mais simples e económica encontrada para a minimização da energia reactiva injectada durante o horário de vazio pelos cabos enterrados de MT, foi mudar o modo de operação da máquina. Com esta solução não é necessário adquirir nenhum equipamento extra para consumir essa energia reactiva excedente.

A máquina está a operar com  $FP=1$ , ou seja, a máquina não consome nem produz energia reactiva.

A minha proposta é mudar o modo de operação da mesma para  $FP=0,98$  (capacitivo nas horas de cheias e indutivo nas horas de vazio), sempre respeitando os limites da máquina (ver Figura 5-2). Neste modo de operação a máquina já passaria a suprir a energia reactiva injectada pelos cabos de MT e por outro lado, durante o horário de cheia a máquina passaria a injectar energia reactiva, gerando mais receita para o parque.

A aceitação por parte da PROEF da solução apresentada foi positiva, pois os engenheiros desconheciam a possibilidade da máquina consumir potência reactiva através da alteração do seu modo de operação.

# Referências

- [1] Mortensen, NielsG, Landberg, Lars, Troen, Ib, and Petersen, Erik L., 1993, Wind Atlas Analysis and Application Program.
- [2] CRESESB – Energia Eólica Princípios e Aplicações - [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)
- [3] Projecto WindFeup - Eduardo Miguel R de Almeida [2002] - FEUP
- [4] Peças Lopes – Apontamentos da disciplina Energia Eólica e Solar – FEUP
- [5] Microsoft Access 2007, John Cronan, Bobbi Sanberg, A Faria
- [6] Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults, I. Erlich, M. Wilch and C. Feltes[2007]: UNIVERSITY DUISBURG-ESSEN Disburg. 81
- [7] Controlo na injeção de reactiva na rede por um parque eólico, Ricardo Filipe M André, IST[2007].
- [8] Avaliação da rentabilidade anual de um parque eólico – Nuno Miguel dos Santos Taveira, Sergio Filipe Mota Ferreira [2002] - FEUP
- [9] Catálogo da Vestas V80 (2MW)
- [10] Wind Energy Handbook, Tony Burtton, David Sharpe ,Nick Jenkins, Ervin
- [11] Programação em Visual Basic 6, Luís de Campo, Sandro Vilar, Levi Lúcio

